



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOMÉTRICA
DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO
MIXTECA ALTA, OAXACA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

ANA KAREN ROMERO HERNÁNDEZ



DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS PALACIO PRIETO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mí

A mi madre, Ana Luisa Hernández Mejía

A mi ahijada, Natalia García Fuentes

Por el amor incondicional que me dan cada día.

“Creo que el principito aprovechó la migración de una bandada de pájaros silvestres para su evasión. La mañana de la partida, puso en orden el planeta. Deshollinó cuidadosamente sus volcanes en actividad, de los cuales poseía dos, que le eran muy útiles para calentar el desayuno todas las mañanas. Tenía, además, un volcán extinguido. Deshollinó también el volcán extinguido, pues, como él decía, nunca se sabe lo que puede ocurrir. Si los volcanes están bien deshollinados, arden sus erupciones, lenta y regularmente. Las erupciones volcánicas son como el fuego de nuestras chimeneas. Es evidente que en nuestra Tierra no hay posibilidad de deshollinar los volcanes; los hombres somos demasiado pequeños. Por eso nos dan tantos disgustos.”

Antoine de Saint-Exupéry, *El Principito*.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por mi formación académica, pero sobretodo, personal al convertirse en mi segundo hogar desde el año 2009 en la ENP #5 “José Vasconcelos”.

Al Instituto de Geografía por permitirme formar parte de él y apoyarme con la beca de titulación María Teresa Gutiérrez de MacGregor.

Se reconoce el apoyo de la Dirección de Apoyo al Personal Académico de la UNAM a través del proyecto “Geopatrimonio y geoparques; estrategias para la enseñanza y divulgación de las Ciencias de la Tierra” (DGAPA, proyecto: PE103516).

Al Doctor José Luis Palacio Prieto, por aceptar dirigir esta tesis, por sus consejos y apoyo. Le agradezco todo el aprendizaje adquirido pero, sobre todo, el enseñarme el mundo de los Geoparques.

Al Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta, a las autoridades y a la comunidad de los nueve municipios que lo conforman, por permitir las visitas de campo y por aceptar que se realicen trabajos como este sobre su territorio.

Al Doctor Jean-François Yves Pierre Parrot Faure y a la Doctora Carolina Ramírez Núñez, del Laboratorio de Análisis GeoEspacial (LAGE) del Instituto de Geografía de la UNAM, por el apoyo en la elaboración de los datos espaciales esenciales para el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, la Mtra. Oralia Oropeza Orozco, al Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez y al Mtro. José Mauricio Galeana Pizana, por aceptar revisar esta tesis, agradezco sus aportaciones para mejorar este trabajo. También agradezco su tiempo y enseñanzas como profesores y en campo.

Agradezco a mi familia por su apoyo y comprensión, por enseñarme que lo más importante que tenemos es el conocimiento. En especial a mi madre Ana Luisa y a mi tío Salvador por ser ambos *mi sustento*; y a mis primas Viry, Xiadani y Mariana por ser *mis hermanas*.

A Natalia, porque eres un motivo de superación y porque contigo se borran las tristezas y desaparece el estrés, por ser mi hija prestada, *mi amor*.

A mis profesores de danza, Manuel Peña y Salvador Hernández por sus enseñanzas y la dedicación que ponen en cada clase, en cada paso, en cada pieza y en cada uno de sus alumnos. *Porque lo que soy es gracias a la danza*.

A mis amigos de danza, Gloria, Enrique, Elena, Syrei, Fernanda y Diego por tantos momentos divertidos, por los escenarios compartidos, los bailes, el sudor, las sonrisas y por ser una gran familia.

A mis amigos Mariana Frías y Axel Ordoñez porque sin ustedes la prepa no hubiera sido igual. Por todas las locuras y momentos divertidos, por los bailes y las canciones de HSM. Pero sobre todo por siempre escucharme, apoyarme y nunca juzgarme, *por siempre Peter y las bebes*.

A las Bestias que se unieron en el camino y desde entonces han formado parte importante de mi vida, *gracias por seguir aquí*.

A Fernanda Camacho, porque sin ti el último año de prepa hubiera sido insoportable, porque me levante contigo y logramos encontrar nuestro destino. Gracias por tu confianza y por tu sinceridad infinita, por estar en cada momento esencial de mi vida, *te adoro*.

A Andrea Garduño, por ser la mejor geoamiga y un gran ejemplo a seguir. Por hacer siempre buen equipo y ser mi mejor compañera de campo. Gracias por guiarme y ayudarme cuando más lo necesité. Pero sobre todo por tu confianza, tus consejos, los momentos de chisme, las mil sonrisas y también las lágrimas, *you will always be my person*.

A Blanca Pérez, por permitirnos ser amigas y por dejarme conocer a tu hermosa familia, también por tu contagiosa sonrisa e inigualable optimismo. A Iván Morales, por tu cariño y por enseñarme a ver del mundo lo que solo tú podrías ver. A ustedes dos por ser el mejor *trinomio cuadrado perfecto* y *por todo* lo que ya sabemos...

A Jesús Alcalá, por tener las palabras adecuadas en cada una de las etapas por las que pase para lograr concluir de la mejor manera este trabajo. Por motivarme cada día a ser mejor y apoyarme de todas las formas que una persona puede apoyar a otra. Pero principalmente por compartir este momento de nuestras vidas y porque poco a poco ha sido mucho.

A los compañeros del Instituto que me hicieron sentir bienvenida, Norma López, Manuel Figueroa y Ale Franco por su ayuda, consejos y apoyo.

A los geoamigos Alin Ochoa, Víctor Bazán, Octavio Quiroz, Daniel Morales, Eduardo García, Jorge Mayorga, Emmanuel Álvarez y Alejandro Moreno, por tantas aventuras, pláticas y diversión ilimitada durante toda la carrera.

A la Geografía, por la gran aventura que ha sido aprender de ella. También porque en esta aventura conocí a geógrafos extraordinarios, algunos que fueron mis profesores, asesores y sinodales, otros que son mis colegas y amigos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE MORFOMETRÍA	14
1.1 Geomorfometría en cuencas hidrográficas	14
1.2. La caracterización métrica del relieve	17
1.3 Importancia, antecedentes generales y en México	19
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO MIXTECA ALTA	21
2.1 El Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta	21
2.2 Condiciones físico-geográficas del área de estudio.....	21
2.2.1 Ubicación	21
2.2.2 Hidrología.....	24
2.2.3 Clima.....	25
2.2.4 Suelos.....	26
2.2.5 Vegetación y uso del suelo	29
2.2.6 Condiciones socioeconómicas.....	31
2.3 Geología y grandes unidades de relieve	34
2.3.1 Terrenos tectonoestratigráficos.....	34
2.3.2 Unidades geológicas dentro del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.....	38
2.3.3 Estructuras geológicas principales dentro del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta	52
2.3.3 Unidades Geomorfológicas del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.....	53
CAPÍTULO 3. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO MIXTECA ALTA	58
3.1 Modelo Digital de Elevación y Red de drenaje	58
3.2 Altimetría.....	66
3.3 Pendiente	67
3.4 Densidad de disección.....	68
3.5 Profundidad de disección	69
3.6 Disección general.....	70
3.7 Energía de relieve.....	71
CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOMÉTRICA DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO MIXTECA ALTA	73
4.1 Morfometría del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.....	73
4.1.1 Altimetría	73
4.1.2 Pendiente	77
4.1.3 Densidad de disección	80
4.1.4 Profundidad de disección.....	84
4.1.5 Disección general	88
4.1.6 Energía del relieve.....	91
4.2 Características Morfométricas por unidad geológica	94
4.2.1 Formación San Isidro (Kisi)	94
4.2.2 Caliza Teposcolula (Ki).....	98
4.2.4 Formación Yanhuatlán (Ya).....	102

4.2.5 Depósito Teotongo (Vt)	107
4.2.6 Toba Llano de Lobos (TL)	111
4.2.7 Andesita Yucudaac (AY)	115
4.2.8 Cuerpos Hipabisales (HYP)	119
4.2.9 Aluvión (Al)	123
DISCUSIÓN	127
CONCLUSIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	139

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Características de las curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Strahler, 1957).
- Figura 1.2 Orden de corrientes de acuerdo con Horton (1945).
- Figura 2.1 Ubicación del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.
- Figura 2.2 Municipios que componen al Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.
- Figura 2.3 Mapa de cuencas hidrológicas. Elaborado con base en INEGI (2015).
- Figura 2.4 Mapa de climas. Elaborado con base en INEGI 2015.
- Figura 2.5 Mapa de asociaciones de suelo. Elaborado con base en INEGI, 2015.
- Figura 2.6 Porcentaje de superficie que ocupa cada unidad de suelo.
- Figura 2.7 Mapa de vegetación y uso de suelo. Elaborado con base en INEGI 2015.
- Figura 2.8 Porcentaje de superficie que ocupa cada tipo de vegetación y uso de suelo.
- Figura 2.9 Terrenos tectonoestratigráficos y geología de Oaxaca. Con base en Centeno, 2004 y Elías, 2005 en Rosado, 2016.
- Figura 2.10 Columna estratigráfica del área de estudio (redibujado de Ferrusquía, 1970 y Santamaría, 2009).
- Figura 2.11 Mapa geológico. Al: depósitos aluviales, HYP: cuerpos hipabisales, AY: Andesita Yucudaac, TL: Toba Llano de Lobos, Vt: Depósito Teotongo, Ya: Formación Yanhuítlán, Tat: Conglomerado Tamazulapan, Ki: Caliza Teposcolula, Kisi: Formación San Isidro. Elaborado con base en Ortiz *et al.*, 2016.
- Figura 2.12 Caliza Teposcolula (A) e intrusivo de andesitas hipabisales (B), Río Verde, San Bartolo Soyaltepec
- Figura 2.13 Afloramiento de la Caliza Teposcolula en San Bartolo Soyaltepec.
- Figura 2.14 Formación Yanhuítlán en el sendero las Conchas.

Figura 2.15 Toba Llano de Lobos en Río Verde, San Bartolo Soyaltepec.

Figura 2.16 Andesita Yucudaac en Santo Domingo Tonaltepec.

Figura 2.17 Cuerpo intrusivo (dique) que aflora en el geositio Vista Hermosa, municipio de Santo Domingo Tonaltepec.

Figura 2.18 Perfiles aluviales en las Conchas, se aprecia una secuencia de paleosuelos.

Figura 2.19 Porcentaje de superficie que ocupa cada unidad geológica.

Figura 2.20 Sección del mapa geológico de Santa María (2009), donde se muestra la Falla Cieneguilla.

Figura 2.21 Mapa de Paisajes Geomorfológicos. Elaborado con base en Ortiz et al., 2016.

Figura 2.22 Porcentaje de superficie que ocupa cada unidad geomorfológica dentro del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 3.1 Tipos de caminos en píxeles que se pueden encontrar en el mundo *raster*.

Figura 3.2 Elementos estructurales utilizados para la dilatación de curvas (Parrot y Ochoa-Tejeda, 2005).

Figura 3.3 Modelo Digital de Elevación del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta generado en Dilat_curves y recuperado en ArcMap 10.2.2

Figura 3.4 Sombreado del Modelo Digital de Elevación.

Figura 3.5 Sobreposición de la red de drenaje corregida (en azul) sobre la red original (en rojo).

Figura 3.6 Ejemplificación de las correcciones en la red de drenaje. En rojo la red original con errores y en azul el resultado de la corrección.

Figura 4.1 Mapa altimétrico del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.2 Histograma de altitudes del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.3 Curva Hipsométrica del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.4 Histograma de pendientes del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.5 Mapa de pendientes del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.6 Histograma de densidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.7 Mapa de densidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.8 Histograma de profundidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.9 Mapa de profundidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.10 Histograma de disección general del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.11 Mapa de disección general del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.12 Histograma de energía del relieve del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.13 Mapa de energía del relieve del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Figura 4.14 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Formación San Isidro (Kisi).

Figura 4.15 Mapas morfométricos de la Formación San Isidro (Kisi).

Figura 4.16 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Caliza Teposcolula (Ki).

Figura 4.17 Mapas morfométricos de la Caliza Teposcolula (Ki).

Figura 4.18 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Formación Yanhuatlán (Ya).

Figura 4.19 Mapas morfométricos de la Formación Yanhuatlán (Ya).

Figura 4.20 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico del Depósito Teotongo (Vt).

Figura 4.21 Mapas morfométricos del Depósito Teotongo (Vt).

Figura 4.22 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Toba Llano de Lobos (TL).

Figura 4.23 Mapas morfométricos de la Toba Llano de Lobos (TL).

Figura 4.24 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Andesita Yucudaac (AY).

Figura 4.25 Mapas morfométricos de la Andesita Yucudaac (AY).

Figura 4.26 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de los Cuerpos Hipabisales (HYP).

Figura 4.27 Mapas morfométricos de los Cuerpos Hipabisales (HYP).

Figura 4.28 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico del Aluvión (Al).

Figura 4.29 Mapas morfométricos del Aluvión (Al).

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Municipios que comprenden el área del GMA.

Tabla 2.2. Características poblacionales de cada municipio que conforma al GMA.

Tabla 2.3. Grado de marginación municipal de los nueve municipios que conforman el GMA.

Tabla 4.0 Clasificación numérica de los paisajes geomorfológicos.

Tabla 4.1 Clasificación de los rangos de pendiente del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Tabla 4.2 Clasificación de la densidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Tabla 4.3 Clasificación de la profundidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Tabla 4.4 Clasificación de la disección general del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Tabla 4.5 Clasificación de la energía del relieve del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Tabla 5 Valores de los índices morfométricos predominantes en cada unidad geológica

INTRODUCCIÓN

La Geomorfometría es la ciencia que analiza de manera cuantitativa la superficie terrestre (Pike *et al.*, 2009). Es una aproximación moderna, analítico-cartográfica, a la representación de la topografía de la Tierra a partir de la manipulación de datos altitudinales del terreno. La geomorfometría es un campo interdisciplinario que involucra las matemáticas, ciencias de la Tierra y, más recientemente, la informática y, puede considerarse actualmente como una disciplina por derecho propio (Pike, 2000). Si bien los primeros ejemplos geomorfométricos se remontan al siglo XVIII, la Geomorfometría alcanza su mayor desarrollo a partir del desarrollo de la informática y la disponibilidad de contar con herramientas para el manejo de datos morfométricos plasmados en un Modelo Digital de Elevación (Pike *et al.*, 2009), en particular los Sistemas de Información Geográfica.

Los métodos geomorfométricos permiten realizar la cuantificación de algunos elementos del relieve y han permitido el desarrollo de métodos matemáticos para el estudio de las formas del relieve así como los procesos que les dan origen y modifican, tanto endógenos como exógenos.

La aplicación de los métodos geomorfométricos permite elaborar mapas específicos que facilitan la apreciación de las características cuantificables del relieve. Algunos de estos elementos son: longitud, superficie, volumen, altura absoluta y relativa, pendiente, orientación, densidad, frecuencia, entre otros. (Lugo, 1991).

La geomorfometría es importante para la geomorfología ya que las formas del relieve se asemejan a los modelos geométricos (morfológicos) como conos, pirámides, rectángulos y

elipses, los cuales se pueden definir apoyándose en la cuantificación de elementos del relieve específicos.

De acuerdo con Lugo (2011), la geomorfometría se encarga de análisis de los elementos del relieve a partir de diversos índices numéricos: medios, máximos, mínimos. Los índices geomorfométricos más comunes que se utilizan para el análisis del relieve son la pendiente del terreno, la diferencia de alturas entre divisorias y cauces (profundidad de la disección), la distancia horizontal entre ellos, la longitud de cauces fluviales por unidad de superficie (densidad de la disección) y la diferencia máxima de altura por unidad de superficie (energía o amplitud del relieve). Algunos indicadores compuestos incluyen la relación entre la densidad y la profundidad de la disección, de la que resulta la intensidad de la disección del relieve (Lugo, 2011:196), entre otros.

Los índices geomorfométricos han sido aplicados en el estudio de cuencas hidrográficas con la finalidad de conocer las características físicas de la cuenca y el impacto que tienen en el drenaje (Méndez *et al.*, 2014). Estas características se analizan a partir del conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y de drenaje de la cuenca. Además, su estudio ha sido útil para determinar las semejanzas entre los flujos de diferentes tamaños para finalmente elaborar a escalas pequeñas modelos que puedan utilizar sus resultados en los prototipos de gran escala. Las características físicas de una cuenca se encuentran relacionadas con las del comportamiento de los caudales que la transitan. Estos parámetros han sido aprovechados en diversas áreas, entre las que se pueden mencionar la planeación urbana, ingeniería civil hasta la caracterización de los fondos oceánicos y de otros planetas (Pike *et al.*, 2009).

En México se han aplicado los métodos geomorfométricos tanto en estudios de cuencas como encaminados a la elaboración de cartografía geomorfológica como apoyo en estudios geomorfológicos generales y específicos. La mayor de parte de estos estudios se han realizado en el Instituto de Geografía de la UNAM, bajo la dirección del Dr. José Lugo Hubp, pionero en métodos cartográficos geomorfológicos en México y quien ha desarrollado y aplicado algunas de estas técnicas, referidas en su libro *“Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)”* publicado en 1991, en el cual hace una compilación de los métodos geomorfométricos y las formas en que se pueden emplear dentro del campo de la geomorfología. Además en las carreras, principalmente, de Geografía y Geología de la UNAM, este autor ha dirigido numerosas tesis de licenciatura y posgrado, en las cuales se utilizan los métodos cuantitativos para el conocimiento del relieve, como ejemplo se mencionan los trabajos de Ramírez Núñez, 2007; Parada Colín, 2003; Castillo Rodríguez, 2003; Vázquez Cerón, 2001; Zermeño Ortiz, 1996; Salinas Montes, 1994 y Alcántara Ayala, 1993.

Dentro de los estudios mencionados se desarrollan los métodos para la obtención de los índices morfométricos del relieve que en general son: altimetría, densidad de disección, profundidad de disección y aptitud o energía del relieve. Estos indicadores fueron utilizados principalmente para estudios geomorfológicos, cartografía geomorfológica, estudios sobre procesos geomorfológicos, geomorfología dinámica y estudios de riesgos.

La zona de estudio corresponde al territorio designado como Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta, mismo que fue reconocido por ese organismo en mayo de 2017. El proyecto inició en 2014 con la finalidad de obtener el reconocimiento de UNESCO; es uno de los

dos geoparques mundiales existentes en México y como parte de sus actividades se llevan a cabo diversos estudios, entre los cuales se cuenta este trabajo.

Hipótesis:

El análisis geomorfométrico contribuye al conocimiento del relieve señalando la relación entre los indicadores y elementos que constituyen a las formas del relieve, destacadamente su constitución geológica y los procesos geomorfológicos, tanto endógenos como exógenos.

Objetivo general:

- Elaborar un estudio geomorfométrico como apoyo al análisis geomorfológico del Geoparque Mundial Mixteca Alta, Oaxaca.

Objetivos particulares:

- Identificar las condiciones físico-geográficas del área de estudio;
- Aplicar los índices geomorfométricos que permitan la caracterización de los elementos del relieve en el Geoparque y establecer la relación existente con algunos elementos geológicos y geomorfológicos, y
- Contribuir al conocimiento de las formas de relieve y procesos asociados en el territorio del Geoparque.

Este trabajo de investigación se divide en cuatro capítulos. En el Capítulo 1 “Conceptos generales sobre morfometría”, se hace una recopilación de los antecedentes de la geomorfología y el surgimiento de los métodos cuantitativos como una herramienta necesaria para los trabajos e investigaciones científicas sobre el estudio de las formas del

relieve. En el Capítulo 2, “Caracterización geográfica del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta”, se aborda de manera general el proyecto del Geoparque Mixteca Alta y las características físicas de los nueve municipios que lo conforman, así mismo se exponen algunos datos socioeconómicos de la región. También se abordan de manera más amplia las características geológicas y geomorfológicas que han sido trabajadas y publicadas en distintos trabajos llevados a cabo dentro del Geoparque y de investigaciones alternas.

En el Capítulo 3, "Métodos para la caracterización morfométrica del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta", se hace una explicación detallada de los procesos metodológicos que se llevaron a cabo para la elaboración de cada uno de los mapas geomorfométricos y los materiales utilizados.

En el Capítulo 4, “Caracterización geomorfométrica del Geoparque Global Mixteca Alta”, se exponen y discuten los resultados de la investigación, se incluyen las características geomorfométricas de cada unidad geológica y su relación con las unidades de relieve. Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegó en esta investigación.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE MORFOMETRÍA

1.1 Geomorfometría en cuencas hidrográficas

El análisis cuantitativo se ha aplicado a cuencas hidrográficas en las cuales los flujos de agua y los movimientos de masa por gravedad son los principales agentes del desarrollo de la morfología. Strahler (1957) basa el análisis cuantitativo en el análisis dimensional y de similitud, esto quiere decir que se pueda tener un modelo a escala de una cuenca que funcione de la misma forma y que proporcione los mismos resultados de acuerdo a la zona de estudio según la similitud geométrica. Ya que todas las mediciones de longitud entre los puntos correspondientes en ambas cuencas (la original y el modelo a escala) llevan una relación de escala fija, de ahí la generalización de que en dos sistemas geoméricamente similares todos los números adimensionales correspondientes o productos que describen la geometría deben comportarse de manera análoga.

De acuerdo con Gaspari (2012), el análisis cuantitativo de cuencas estudia variables en conjunto (lineales, de superficie, relieve y drenaje), con las cuales es posible conocer sus características físicas y de esta forma comparar e interpretar la funcionalidad hidrológica entre varias cuencas. Para el estudio de cuencas se desarrollaron tres diferentes parámetros: forma de la cuenca, relieve y red de drenaje.

En primer lugar están los que se asocian con la forma de la cuenca, que buscan similitudes geométricas entre sus características medias y la red de canales, ya que la forma de la cuenca refleja ciertas características en el hidrograma de descarga de corrientes determinadas. Se espera que cuencas de misma área pero diferente forma expresen un comportamiento también distinto.

Los factores de forma se conocen a través de la obtención de los siguientes datos: *área (A)* de la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio y se expresa en km^2 ; *perímetro (P)* que es la longitud sobre un plano horizontal que recorre la divisoria de aguas y se expresa en metros o kilómetros; *longitud de la cuenca (L)* es la distancia horizontal que va de la desembocadura hasta el punto más lejano aguas arriba donde el río corte la curva de nivel; *ancho de la cuenca (B)* es la relación entre el área y la longitud; *Factor de Forma de Horton (Kf)* mide qué tan cuadrada o alargada puede ser una cuenca y entre menor sea el factor de forma menor posibilidad de crecidas tendrá la cuenca; *Coefficiente de compacidad de Gravelius (kc)* compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia y sus valores nunca serán menor a 1, por lo que mientras más cercano sea el índice a la unidad indica mayor concentración de agua y por último *Razón de Elongación de Schumm (Re)*, que relaciona el diámetro de un círculo que tenga la misma área que la cuenca y la longitud máxima de la misma (Strahler, 1952; Horton, 1945).

En segundo lugar se encuentran los parámetros del relieve que influyen principalmente en la concentración del agua de escorrentía en la red de drenaje; los parámetros que permiten esta caracterización son: la *Curva Hipsométrica*, permite caracterizar el relieve a partir de las cotas de altitud y la estimación de la superficie acumulada en cada cota; *Pendiente media de la cuenca*, es el valor medio del declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal de la vertiente sobre la cual se ubica la cuenca; *elevación media*, se determina a partir de la curva hipsométrica determinando la elevación media que equivale al 50% del área de la misma; *el análisis hipsométrico* permite determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva de la cuenca (Fig. 1.1) (Strahler, 1952).

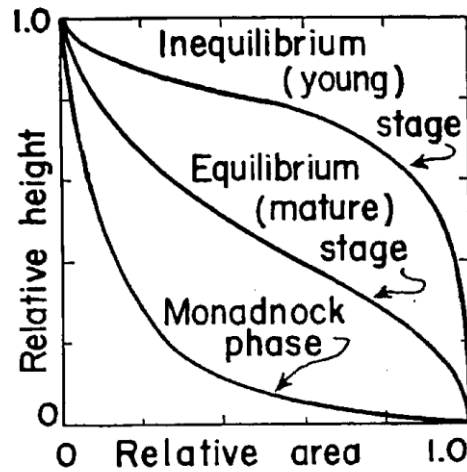


Figura 1.1 Características de las curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Strahler, 1957).

Por último, están los parámetros relativos al drenaje: el *orden de cauces* permite clasificar el grado de bifurcación dentro de la cuenca (Fig. 1.2); *relación de bifurcación* (R_b), donde se define el cociente entre el número de cauces de cualquier orden y el número de cauces de orden del siguiente orden superior; la *densidad de drenaje* (D_d) relaciona la longitud de la red de drenaje y el área de la cuenca para establecer la eficiencia de la red de drenaje; y el *tiempo de concentración* (T_c) mide el tiempo que tarda en viajar una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta su punto de salida (Strahler, 1952; Horton, 1945). Derivado de esto se elaboraron otros parámetros o índices medibles que se pudieran aplicar en otros relieves sin que fueran necesariamente una cuenca hidrográfica, y que permitieran conocer aspectos fundamentales del mismo para distintas aplicaciones, las cuales se retoman en el siguiente capítulo.

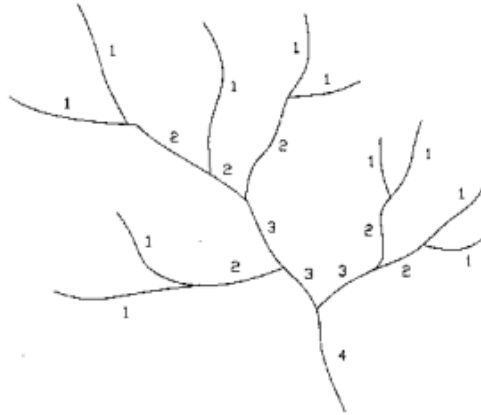


Figura 1.2 Orden de corrientes de acuerdo con Horton (1945).

1.2. La caracterización métrica del relieve

A principios del siglo XX, con las aportaciones de W. Davis y W. Penk, la geomorfología logra tomar un lugar como una ciencia independiente en el contexto de las ciencias de la Tierra, y es constituida como la ciencia que enlaza los aspectos geográficos que son los esencialmente espaciales, y geológicos, de carácter temporal. Surge así la base de la geomorfología, la ciencia que estudia las formas del relieve en el espacio a través del tiempo (Palacio, 1982). En geomorfología, diversos estudios se han encaminado al análisis del terreno a través de los métodos morfométricos que se encargan de evaluar las propiedades cuantitativas del terreno, que ayuden a comprender la evolución y la dinámica del relieve, de la interacción entre los procesos endógenos y los exógenos.

La caracterización morfométrica es una técnica que se ha desarrollado desde finales del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX. Algunos de los antecedentes más representativos fueron entre 1920 y 1940 ya que se desarrollaron métodos aplicables a la cartografía de algunas grandes regiones de la ex Unión Soviética (Spiridionov, 1952 en Alcántara, 1993). Finalmente, tomó forma en la geomorfología posterior a los trabajos de R. E. Horton (1945) acerca de la clasificación de las corrientes fluviales en órdenes

progresivos modificados por A. N. Strahler (1952). De acuerdo con Lugo (1986), es a partir de aquí que surgen numerosos métodos cuantitativos en la geomorfología y se destacan los que desarrollan Leopold, *et al.* (1964).

Así surge la posibilidad de la cuantificación de los elementos lineales, puntuales y areales que caracterizan al relieve como longitud, volumen, altura absoluta y relativa, pendiente, orientación, densidad y frecuencia. Todo esto con la elaboración de mapas específicos que contribuyen a un mejor conocimiento del relieve (Lugo, 1999).

Los análisis morfométricos deben iniciar con la elaboración del mapa altimétrico, éste ayuda a apreciar y entender la totalidad del relieve. Es importante su elaboración ya que simplifica la comprensión de un mapa topográfico. En este mapa se van a definir los intervalos de valores altitudinales máximos y mínimos para lograr diferenciar entre las zonas bajas, altas e intermedias. Para cumplir el objetivo del mapa altimétrico es necesario elegir los colores adecuados, éstos se basan en un sistema internacional que aplicado correctamente ayudará a que el mapa se pueda visualizar con un efecto en tercera dimensión (Lugo, 1991).

En segundo lugar se debe realizar un mapa de pendientes. Este mapa ayuda a conocer la inclinación del terreno y en conjunto con el altimétrico es posible obtener una primera clasificación del relieve. Posteriormente, se pueden realizar los mapas de los indicadores morfométricos ya mencionados o los que se elijan según los objetivos de cada trabajo, entre los cuales se incluyen la densidad de disección, profundidad de disección, disección general y energía del relieve.

1.3 Importancia, antecedentes generales y en México

De acuerdo con Strahler (1957), la geomorfología es una ciencia que trabajaba únicamente de forma descriptiva y estudiaba la evolución histórica de las formas terrestres y sus características geológicas. Este enfoque en el análisis descriptivo fue un limitante para cuestiones prácticas sobre todo de ingeniería. Durante la primera mitad del siglo XX la geomorfología comenzó su fase cuantitativa con algunos geomorfólogos que intentaron cuantificar la descripción de las formas del relieve.

Si el objetivo era colocar a la geomorfología sobre la investigación cuantitativa en principios fundamentales, existía la necesidad de situarla sobre bases sólidas para lo cual se propone que los procesos geomórficos sean tratados como esfuerzos gravitatorios o de cizallamiento molecular que actúan sobre materiales elásticos, plásticos o fluidos para producir la variedad de características de deformación o falla que constituyen la meteorización, erosión, transporte y deposición, respondiendo a tensiones que son más comúnmente gravitacionales, pero también pueden ser moleculares (Strahler, 1952-a).

En México, fue en la segunda mitad del siglo XX cuando se comenzaron a utilizar los métodos morfométricos para estudios de geomorfología aplicada, principalmente desarrollados en Estados Unidos, Francia, Inglaterra y de la entonces Unión Soviética (Lugo, 1991).

En distintas zonas de México se han realizado diversos estudios geomorfológicos que tienen como base principal la aplicación de métodos morfométricos según los objetivos de cada trabajo. Una de las instituciones involucradas en este tipo de investigaciones es el Instituto de Geografía UNAM. De igual forma existen investigaciones encaminadas al

estudio de cuencas y sobre geomorfología dentro de las carreras de Geografía, Geología e Ingeniería de la UNAM.

Algunas de las primeras publicaciones acerca de estos métodos fueron hechas por el Dr. José Lugo Hubp, quien en 1986 publicó "*Los métodos geomorfológicos*" en la Revista de Geografía vol. 1 No. 1 (Lugo, 1986), donde da una primer aproximación sobre los métodos cartográficos y la importancia de la aplicación de los métodos morfométricos para la cuantificación de algunos elementos del relieve en estudios geomorfológicos. Posteriormente se comenzaron a aplicar estos métodos en investigaciones y como una herramienta práctica para la elaboración de la cartografía geomorfológica.

Desde la década de los ochenta del siglo pasado en México se han elaborado numerosas tesis que utilizan métodos morfométricos para la caracterización del relieve. Entre los múltiples trabajos representativos que aplican índices geomorfométricos es el que se titula "Estudio Geomorfológico de Aguascalientes" el cual tiene como principal objetivo realizar la cartografía geomorfológica del estado para conocer las características del relieve (Alcántara Ayala, 1993). En el Estado de México en el municipio de Atizapán de Zaragoza se hizo un estudio con la finalidad de conocer la génesis del relieve y las condiciones en las que se encontraba en ese momento para elaborar la cartografía geomorfológica a detalle (Parada Colín, 2003). En Guanajuato se llevó a cabo un estudio basado en la cartografía morfogenética en el municipio de Pénjamo el cual tenía como objetivo principal la evaluación geomorfológica de la zona a través de una serie de mapas morfogenéticos y morfométricos (Ramírez Núñez, 2007).

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO MIXTECA ALTA

2.1 El Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta

En mayo de 2017, en México el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta de Oaxaca (al cual nos referiremos como GMA) fue reconocido por la UNESCO como Geoparque Mundial. La ejemplaridad de las formas de relieve derivadas de los procesos endógenos y exógenos, además de su relación con las actividades antrópicas, constituyen el principal recurso del Geoparque para fomentar el geoturismo, un tipo de turismo de carácter fundamentalmente educativo enfocado a la divulgación de las ciencias de la Tierra, en su sentido más amplio (geología, geomorfología y geografía) a través del cual se busca contribuir al desarrollo sustentable local (Palacio, 2013).

El paisaje de la Mixteca Alta resulta ser un recurso invaluable para el entendimiento de la interacción del hombre con el medio que lo rodea, así como el crecimiento demográfico y la utilización de los recursos, lo cual da como resultado a lo que llamamos geopatrimonio, que trata de una herencia geológica, histórica y cultural. De esta forma el GMA se propone como un museo y un laboratorio activo de la erosión. Lo anterior explica el lema del Geoparque: "erosión, cultura y geopatrimonio" (Rosado, 2016).

2.2 Condiciones físico-geográficas del área de estudio

2.2.1 Ubicación

El GMA se ubica dentro de la región Mixteca en el estado de Oaxaca (Fig. 2.1), la cual se divide en Mixteca Alta, Mixteca Baja y Mixteca Costa. La Mixteca Alta se encuentra en la zona noroeste del estado y fisiográficamente en el contacto entre la Sierra Madre del Sur

y la Sierra Madre Oriental, una región montañosa con un altitud mínima de 2100 msnm y máxima de 2892 msnm. El contacto entre estas dos cordilleras montañosas ha recibido múltiples nombres: Complejo Oaxaqueño, Escudo Mixteco y Nudo Mixteco (González, 2009). Limita al norte con el Cinturón Volcánico Mexicano.

El Geoparque comprende nueve municipios de la región Mixteca Alta, que conforman un área total de 415.4 km² (Tabla 2.1). Las coordenadas extremas del GMA son: 17° 25' 20'' y 17° 39' 27'' N, y 97° 11'53'' y 97° 27'40'' W. Se encuentra a 80 km al Norte de la ciudad de Oaxaca (Fig. 2.2).

Tabla 2.1. Municipios que comprenden el área del GMA.

Municipios	Área (km²)
San Andrés Sinaxtla	22.6
San Bartolo Soyaltepec	74.9
San Juan Teposcolula	86.9
San Juan Yucuita	23.3
San Pedro Topiltepec	32.8
Santa María Chachoapam	61.8
Santiago Tillo	17
Santo Domingo Tonaltepec	26.5
Santo Domingo Yanhuitlán	69.6
Total	415.4

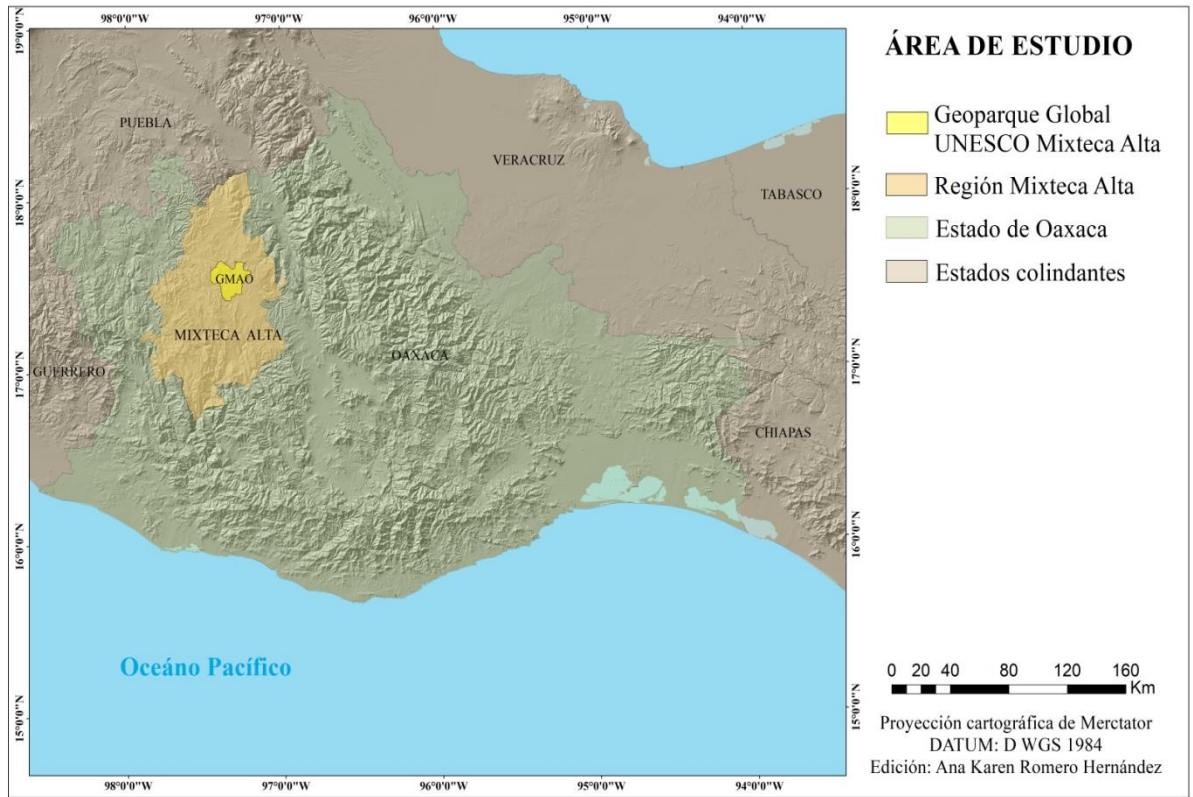


Figura 2.1. Ubicación de Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

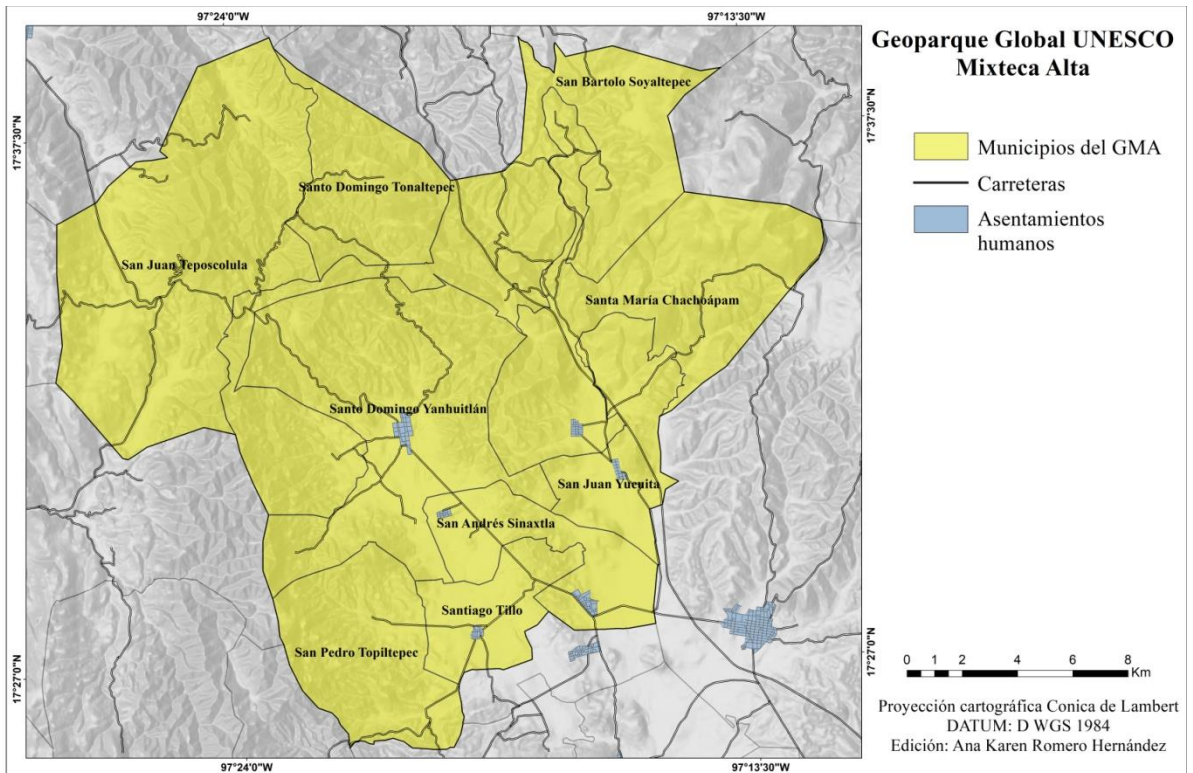


Figura 2.2 Municipios que componen al Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

2.2.2 Hidrología

Dentro de la Mixteca Alta convergen tres de las regiones hidrológico-administrativas (RHA) del país, la RHA Balsas, Pacífico Sur y Golfo Centro, las cuales responden a los límites político administrativos con el fin de gestionar el recurso agua. Con respecto a las 731 cuencas hidrológicas que se definen por las características del relieve y se encuentran organizadas en 32 regiones hidrológicas (RH), la Balsas, Costa Chica de Guerrero o Costa Chica-Río Verde y Papaloapan, se sitúan dentro del territorio de la Mixteca Alta (Fig. 2.3) (CONAGUA, 2014 en López, 2016).

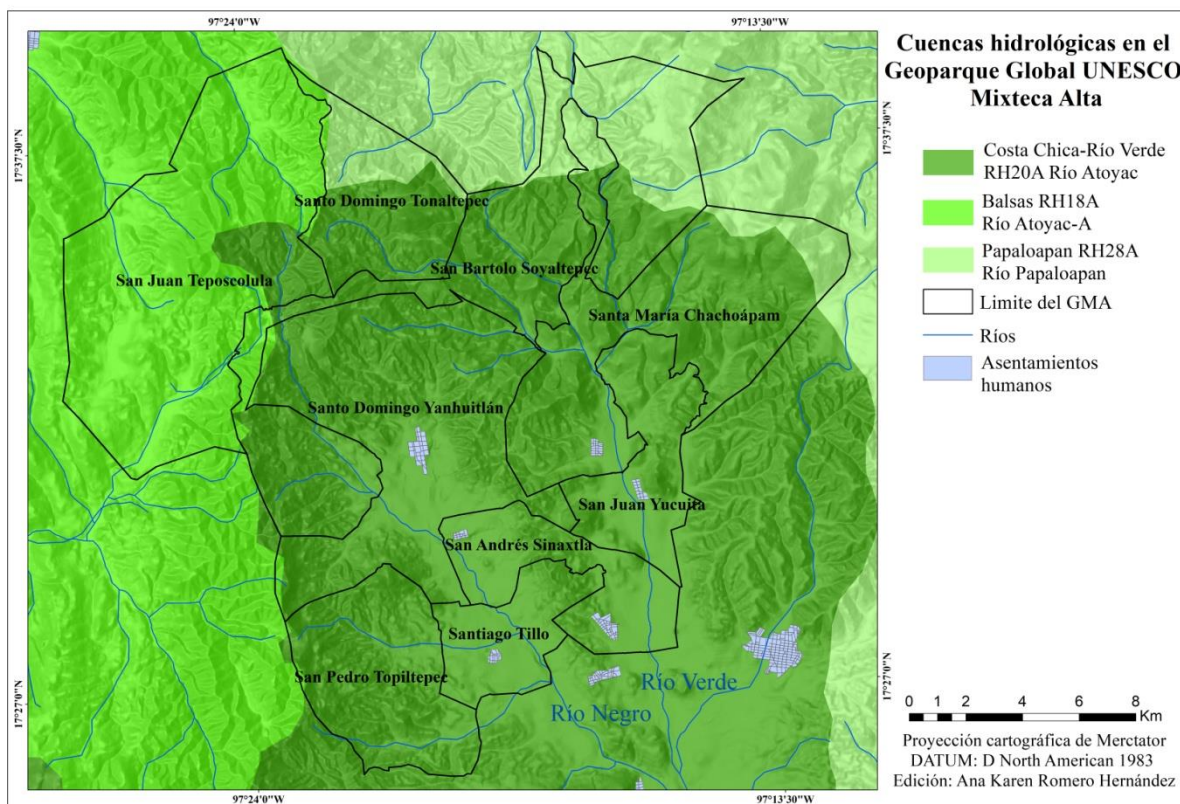


Figura 2.3 Mapa de cuencas hidrológicas. Elaborado con base en INEGI (2015).

Existen tres ríos con sus cabeceras en la zona. El Nudo Mixteco o Cerro Verde, que es el punto más alto dentro del Geoparque (2892 msnm), representa la división de aguas a nivel

continental. El río Papaloapan drena una pequeña porción de la parte noroeste de la zona y desemboca en el Golfo de México; el río Verde drena una porción de la parte del sureste y fluye hacia el océano Pacífico; y el río Balsas drena la zona del noroeste y también desemboca en el océano Pacífico.

2.2.3 *Clima*

El estado de Oaxaca cuenta con una amplia diversidad climática gracias a la presencia de factores que propician distintas condiciones contrastantes. Algunos de los que influyen son: en primer lugar la posición geográfica, que lo ubica en la parte sur del trópico de Cáncer propiciando la influencia de los sistemas tropicales. Sin embargo el factor topografía modifica tales condiciones por su amplia complejidad; además cuenta con la influencia del desarrollo de sistemas meteorológicos en las vertientes Pacífico y Golfo de México. Como sistemas meteorológicos, se mencionan entre otros, los vientos Alisos y Ondas del Este, los Nortes, la Zona Intertropical de Convergencia, los ciclones que se originan en el Océano Atlántico, Caribe, Golfo de México y la porción del istmo de Tehuantepec en el Pacífico (Trejo, 2004).

La zona de estudio presenta dos de los cinco grupos climáticos fundamentales, B (secos) y C (templados húmedos) (Fig. 2.4). De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (INEGI, 2005), una pequeña porción de la región sureste del área de estudio se clasifica con un clima semiseco con lluvias en verano BS1kw (w); de los climas templados recaen tres en la zona de estudio que corresponden a los subhúmedos con lluvias en verano pero difieren en la cantidad de humedad. De esta forma se tiene la zona que va del centro al este con baja humedad C(w0)(w) y que se extiende de norte a sur; con humedad media C(w1)(w), está la zona que va del centro al oeste y se extiende también de

norte a sur, con excepción de la región que corresponde a una parte de las cimas y laderas volcánicas que se extienden al oeste del geoparque y tienen un régimen de alta humedad C(w2)(w).

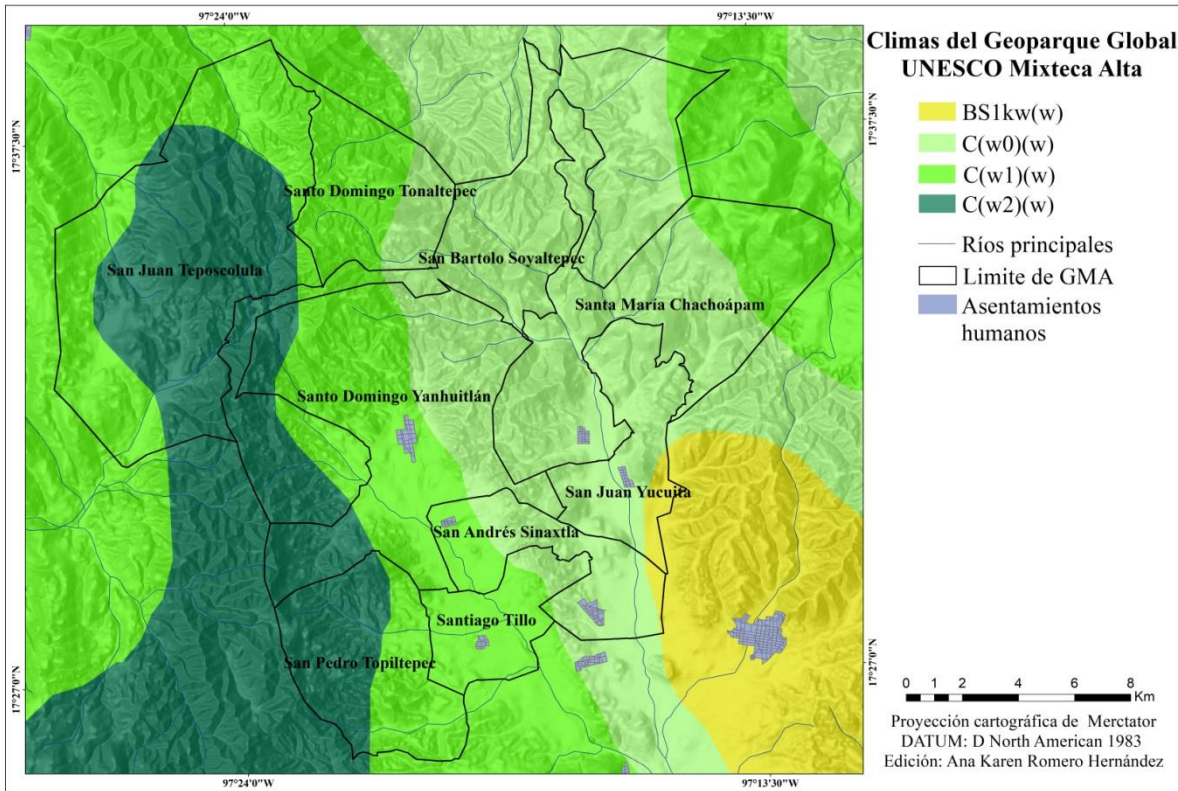


Figura 2.4. Mapa de climas. Elaborado con base en INEGI 2015.

2.2.4 Suelos

Dentro del área del Geoparque se tienen cuatro diferentes asociaciones de suelo principales (Cambisol, Feozem, Litosol y Regosol; ver Fig. 2.5), las cuales se describen de acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo (WRB, por sus siglas en inglés, 2014).

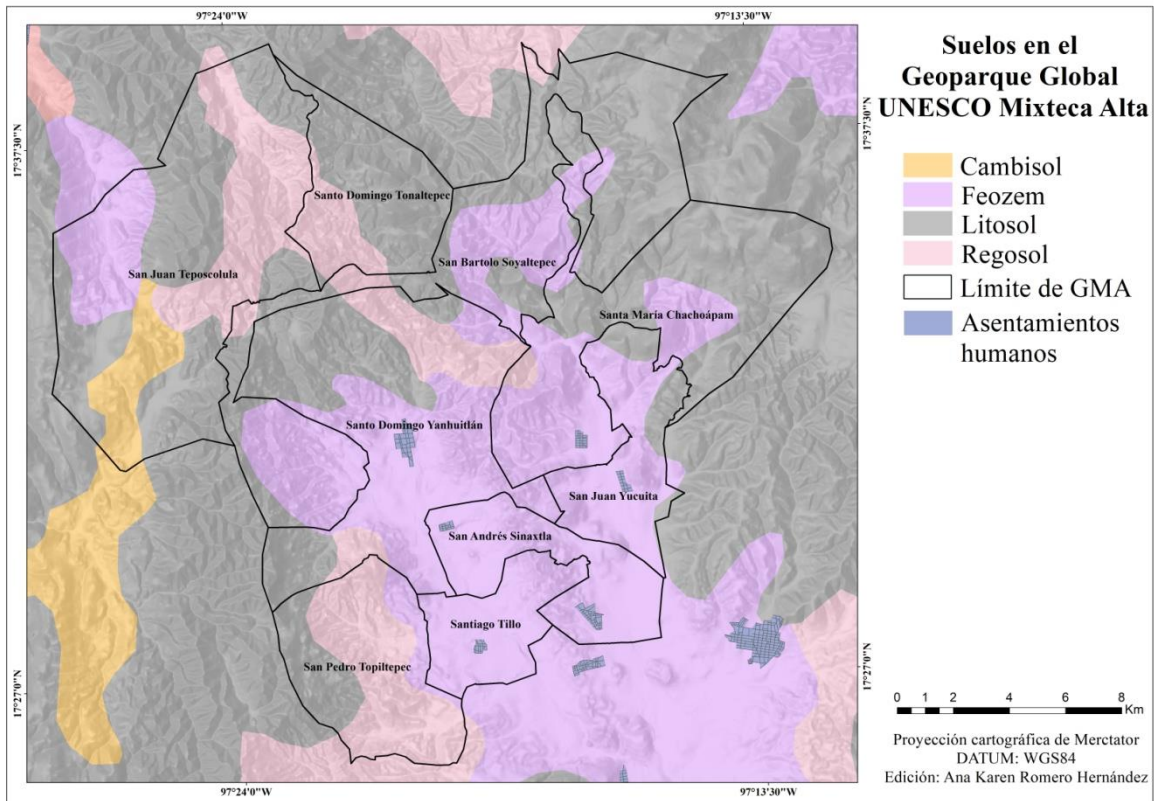


Figura 2.5. Mapa de asociaciones de suelo. Elaborado con base en INEGI, 2015.

Los cambisoles se caracterizan por combinar suelos de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente de forma regular. Tienen de poco a moderado desarrollo, evidente por el cambio de estructura y su decoloración a principalmente pardo, tienen un incremento en el porcentaje de arcillas y remoción de los carbonatos. Su meteorización es ligera a moderada del material parental y se caracterizan por su ausencia de arcillas iluviales, materia orgánica y compuestos de Al y/o Fe. Regularmente se encuentran en terrenos llanos a montañosos de todos los climas. Su nivel de erosión va de moderado a alto. Son suelos que constituyen generalmente buenas tierras agrícolas de uso intensivo. Estos suelos los encontramos en el lado Oeste en un polígono alargado, tiene un área de 9 km² y ocupa el 2% del área total del Geoparque (Fig. 2.5).

Los Feozem cuentan con un horizonte A mólico, capa oscura superficial rica en materia orgánica y nutrientes. Son suelos muy diversos y se pueden formar en condiciones ambientales variadas, los encontramos desde zonas planas de pradera hasta zonas montañosas con pendientes pronunciadas. Dentro del Geoparque se distribuyen en toda la parte central y sur como una gran unidad y en el noreste y noroeste se encuentran otras unidades menores. En conjunto tienen un área total de 160 km² y ocupan el 39% del área total del Geoparque (Fig. 2.5).

Los litosoles, actualmente clasificados como leptosoles, conjugan tres unidades (Litosoles, Rendiznas y Rankers). Los limitan la profundidad y la topografía (Alfaro, 2004). Son suelos que en los primeros 25 cm de profundidad se limitan por roca dura y masiva o materiales calcáreos, o bien cuentan con menos del 20% de tierra fina dentro de los primeros 75 cm de profundidad. Dependiendo del material parental que los forme pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos y la susceptibilidad a la erosión depende de su ubicación topográfica, que puede ser moderada hasta muy alta. Pueden tener uso forestal de pastos y matorrales, pecuario y agrícola con rendimiento variable y limitado por la erosión y el recurso agua. Estos suelos son los de mayor presencia dentro del Geoparque y se distribuyen de forma heterogénea en toda la zona norte y cubren una pequeña zona del suroeste. Tienen un área de 179 km² y ocupan el 43% del área total de Geoparque (Fig. 2.5).

Los regosoles son suelos minerales de débil desarrollo, no son ricos ni muy someros. Regularmente se encuentran en zonas de tierras erosionadas de áreas áridas y semiáridas en terrenos montañosos. Tienen un desarrollo de perfil mínimo por la lenta formación de suelo debido a la aridez o bien por la edad joven, son parecidos a la roca que los subyace cuando

tienen poca profundidad, el material parental de estos suelos es material no consolidado de grano fino. Su uso es forestal, pecuario, agrícola. Sin embargo, su producción agrícola es mínima y requiere de aplicaciones frecuentes de agua. Son todos los suelos que no se acomodan a ningún otro de los Grupos de Suelo de Referencia. Este tipo de suelo se encuentra distribuido de forma irregular dentro del Geoparque, una porción en la zona sur y otra del centro hacia el norte. Tiene un área de 67 km² y ocupa el 16% del área total del Geoparque (Fig. 2.6).

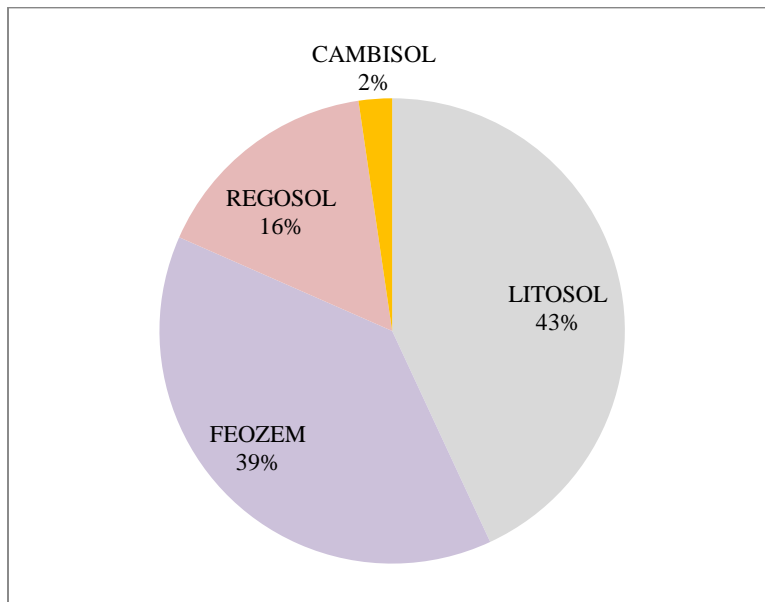


Figura 2.6 Porcentaje de superficie que ocupa cada unidad de suelo.

2.2.5 Vegetación y uso del suelo

El estado de Oaxaca cuenta con la mayor biodiversidad del país. El GMA se encuentra dentro de la provincia fisiográfico-florística de la Mixteca Alta, es bien conocida por su riqueza botánica, la cual aún no se encuentra explorada en su totalidad. Dentro de esta provincia se encuentran algunas especies endémicas como: herbáceas, suculentas, arbustos, trepadoras, rastreadoras, epífitas y árboles, las cuales han logrado su desarrollo gracias a la

diversidad geológica y geomorfológica de la Mixteca Alta (García *et al.*, 1994; García y Torres, 1999; García, 2004 en Oropeza *et al.*, 2016).

Dentro de los municipios que conforman al Geoparque, los tipos de vegetación que se pueden encontrar son: bosque de encino en las zonas montañosas del este y oeste (19%), una pequeña área en la zona centro de bosque de pino-encino (3%), la mayor área la ocupa el pastizal inducido (50%) y en la zona centro y los límites del Geoparque también se presenta el matorral xerófilo (12%) (Torres, 2004) (Fig. 2.7 y 2.8).

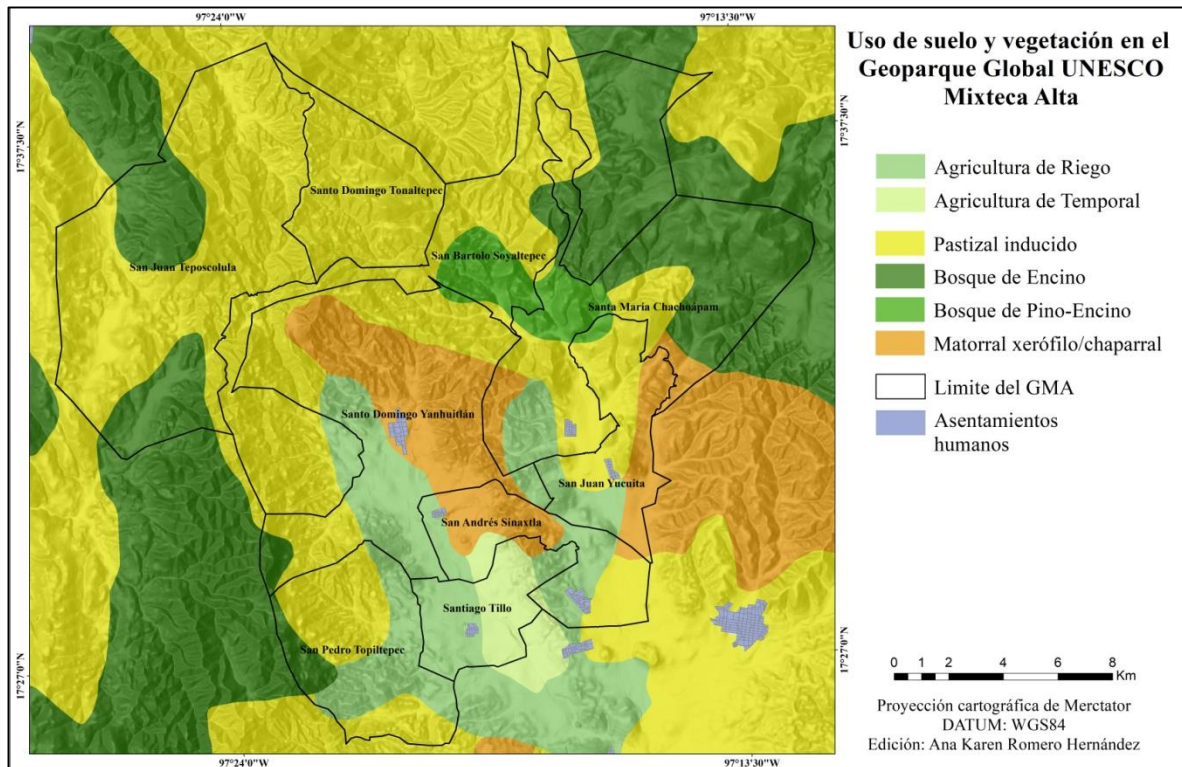


Figura 2.7 Mapa de vegetación y uso de suelo. Elaborado con base en INEGI 2015.

Las coberturas de uso de suelo son generadas por las actividades socioeconómicas; dentro del área de estudio las más importantes son: la agricultura de temporal (2%) y de riego (14%), las plantaciones forestales y los asentamientos humanos que se distribuyen de la zona centro hacia el sur (Oropeza *et al.*, 2016).

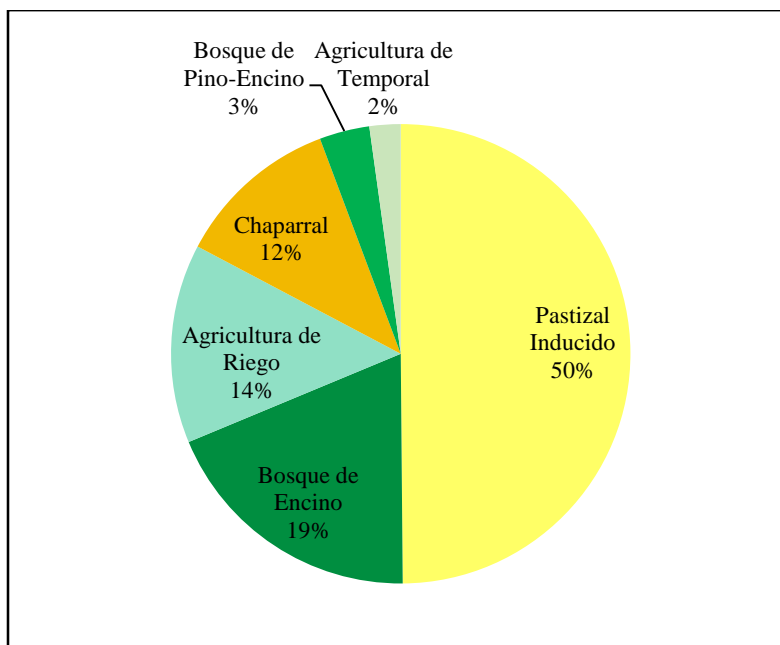


Figura 2.8 Porcentaje de superficie que ocupa cada tipo de vegetación y uso de suelo.

2.2.6 Condiciones socioeconómicas

De acuerdo con González (2009), el valle más extenso de la Mixteca Alta es el de Nochixtlán-Yanhuitlán, y además poseía las tierras más fértiles, las cuales permitieron el abastecimiento de las necesidades alimenticias para la numerosa población que habitó la región. Fueron distintos grupos prehispánicos lo que habitaron este valle, desde el Preclásico inferior (2300 a.C.) hasta el Posclásico (1500 d.C.). En la actualidad la población predominante sigue siendo la indígena, principalmente mixteca, sin embargo, de forma muy reducida. Esto se debe a la falta de oportunidades en el ámbito económico, que provoca la constante emigración a zonas urbanas dejando un número reducido de pobladores. Los principales grupos indígenas que habitan el estado de Oaxaca son los Chinantecos, los Mixes, los Mazatecos, los Zapotecos y los Mixtecos, siendo los últimos los que dan el nombre de la Región Mixteca y los que habitan actualmente los municipios que conforman

el GMA, de acuerdo con INEGI 2010, 55% de los mixtecos habitan en el estado de Oaxaca (Rosado, 2016).

La principal actividad económica de la región Mixteca es la agricultura de subsistencia, principalmente de maíz, frijol, calabaza y chile. Esta agricultura depende de la temporada de lluvias y es llevada a cabo dentro de unidades de suelo pequeñas y algunas ya erosionadas por la falta de mantenimiento, esto hace la actividad poco productiva. Como una alternativa de desarrollo económico dentro de la región ha surgido entre los pobladores la producción de artesanías de cerámica y tejidos de palma, sin embargo no marca gran diferencia en cuanto al sistema económico no redituable de la región.

Como un acercamiento a lo que sucede en el área de estudio, particularmente en los nueve municipios que conforman al Geoparque, se tiene una población total de 7,061 de los cuales 3,298 son hombres y 3,763 mujeres. La mayor población se encuentra en el municipio de Santo Domingo Yanhuitlán con el 23% del total poblacional y el de menor es Santo Domingo Tonaltepec con 4%.

La Población Económicamente Activa (PEA) es de 2,669 que equivale al 38% de la población total del Geoparque de los cuales 1,705 son hombres y 964 mujeres. El municipio de Santo Domingo Yanhuitlán tiene la mayor con 26% y San Pedro Topiltepec la menor con 4%, aunque el municipio con menor población es Santo Domingo Tonaltepec casi el 60% de su población es considerada PEA y San Pedro Topiltepec se encuentra por encima de éste en población total, solo el 28% es considerada PEA (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 .Características poblacionales de cada municipio que conforma al GMA.

Municipios	Población				PEA			
	Masculina	Femenina	Total	%	Masculina	Femenina	Total	%
San Andrés Sinaxtla	364	408	772	11%	181	120	301	11%
San Bartolo Soyaltepec	291	364	655	9%	128	72	200	7%
San Juan Teposcolula	646	694	1340	19%	315	148	463	17%
San Juan Yucuita	314	370	684	10%	161	91	252	9%
San Pedro Topiltepec	199	207	406	6%	86	31	117	4%
Santa María Chachoapam	355	411	766	11%	187	91	278	10%
Santiago Tillo	258	295	553	8%	142	68	210	8%
Santo Domingo Tonaltepec	111	165	276	4%	70	91	161	6%
Santo Domingo Yanhuitlán	760	849	1609	23%	435	252	687	26%
Total del GMAO	3298	3763	7061	100%	1705	964	2669	100%

Elaborado con base en INEGI y SEDESOL, 2010.

El Índice de Marginación es la estimación de las carencias que presenta la población de acuerdo con nueve indicadores de exclusión que las reflejan, éstas a su vez se agrupan en cuatro dimensiones socioeconómicas: 1. Educación, se refiere al nivel educativo y el analfabetismo de la población mayor de 15 años; 2. Vivienda, se refiere al disponibilidad de instalaciones para el desalojo de desechos humanos como escusado o drenaje, energía eléctrica, agua entubada, hacinamiento de la vivienda y material del piso; 3. Distribución de la población, se refiere a las personas que viven en localidades con menos de 5000 habitantes; 4. Ingresos monetarios, es la cantidad de salarios mínimos que percibe un persona (CONAPO, 2010).

De acuerdo con el INEGI (2010), la Mixteca es una de las regiones con condiciones precarias y de gran marginación, ya que de los 155 municipios de la Mixteca Alta (99, es decir el 64%), son considerados con alto grado de marginación; 31 municipios (20%) con muy alto grado; 23 municipios (15%) con grado medio de marginación y dos municipios (1%) con grado bajo de marginación (Rosado, 2016). El grado de marginación municipal aplicado a los nueve municipios que conforman el GMAO se distribuye: con grado medio

de marginación en siete municipios (78%), grado alto un municipio (11%) y grado muy alto un municipio (11%) (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Grado de marginación municipal de los nueve municipios que conforman el GMA.



Elaborado con base en CONAPO, 2010.

2.3 Geología y grandes unidades de relieve

Desde el punto de vista geológico, esta región es considerada la más compleja de México (Centeno, 2004). Se compone de rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico y plutónicas que forman el complejo de sótano, una alfombra de rocas del Mesozoico, marina en su mayor parte, y la roca volcánica cenozoica.

2.3.1 Terrenos tectonoestratigráficos

El concepto de Terreno es utilizado para referirse a entidades geológicas de extensión regional que se caracterizan por tener una secuencia estratigráfica coherente pero diferente a la de los bloques adyacentes y que además se encuentran delimitados por grandes discontinuidades tectónicas (Coney, 1989). Sedlok *et al.* (1993) propusieron 17 terrenos

tectonoestratigráficos de México. La zona de estudio ocupa dos de estos terrenos: el Mixteco y el Zapoteco (Fig. 2.9).

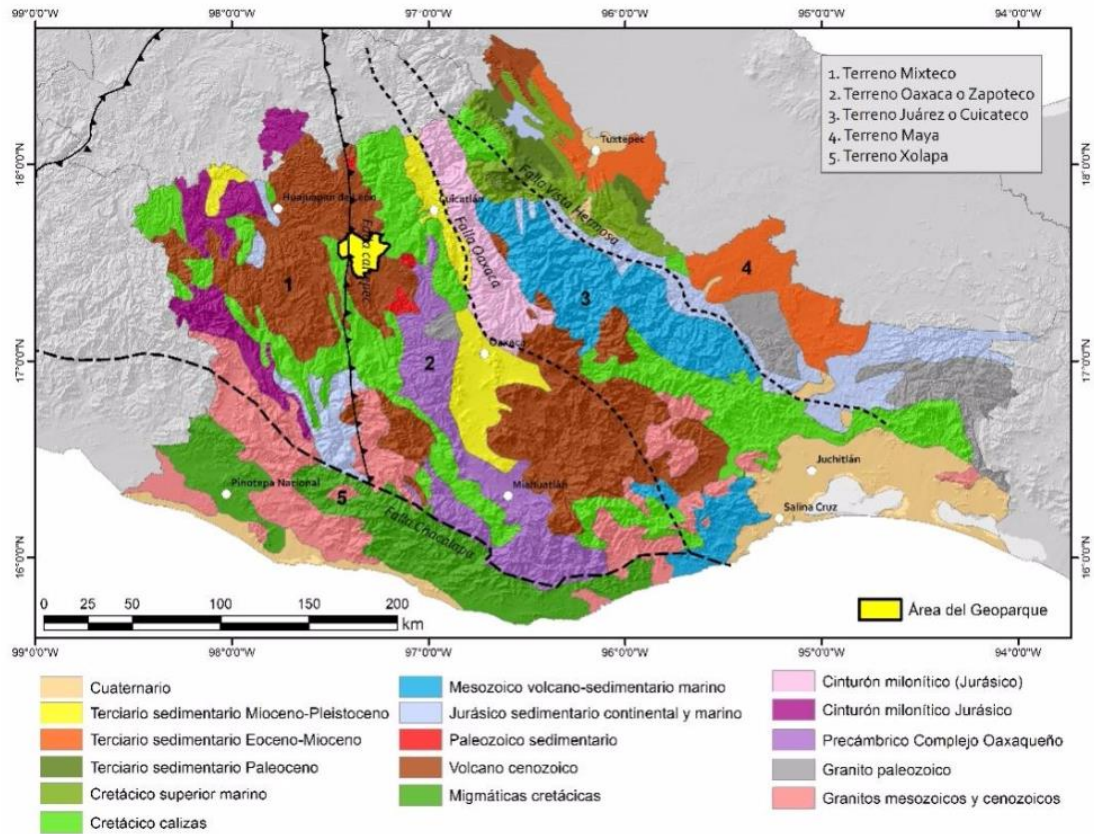


Figura 2.9. Terrenos tectonoestratigráficos y geología de Oaxaca. Con base en Centeno, 2004 y Elías, 2005 en Rosado, 2016.

2.3.1.1 Terreno Mixteco

De acuerdo con Ortega (1993), este terreno fue formado por rocas oceánicas atrapadas en la zona de choque entre continentes. El basamento de este terreno es el Complejo Acatlán, que se conforma de rocas ígneas y sedimentarias que presentan metamorfismo de bajo a alto grado. Se compone principalmente de areniscas, lutitas, conglomerados, rocas volcánicas, de composición basáltica a riolítica, volcanoclásticos, granitos deformados y rocas ultramáficas, presenta metamorfismo que varía de esquistos verdes a eclogitas (Ortega,

1978; Campa y Coney, 1983, en Centeno, 2004). Se ha interpretado que estuvo inmerso en un Océano Paleozoico. Las edades se infieren para la fase sedimentaria pre-Devónico medio (antes de 391 Ma) y pre-Mississípico (antes de 354 Ma) para al menos uno de los mayores eventos de deformación por el recubrimiento discordante de rocas marinas de dicha edad; sin embargo, existen datos geocronológicos que indican eventos de deformación de edad pérmica (Centeno, 2004).

De acuerdo con la evolución geológica del Complejo Acatlán, las rocas que originalmente lo componían fueron formadas en ambientes marinos de aguas profundas como un piso oceánico, en arcos de islas volcánicas y en zonas de trincheras asociadas a subducción. Se ha inferido que por su deformación y metamorfismo similar al de los Himalaya, fueron deformadas por la colisión entre dos continentes. Posteriormente las montañas se erosionaron hasta crear planicies y algunas de ellas fueron cubiertas por mares durante distintas etapas de su evolución geológica. De acuerdo con Centeno (2004), es probable que el Complejo Oaxaqueño representó uno de los continentes que chocaron durante el Devónico (de 412 a 354 Ma).

Las primeras fases de deformación del terreno Mixteco se relacionan con la orogenia Acatecana del Ordovícico Tardío-Silúrico temprano y las otras fases en la orogenia Ouachita (Pérmico temprano). En el Mesozoico han propuesto una deformación contractiva por la cual se formaron pliegues y cabalgaduras convergencia al oriente a finales del Maastrichtiano, la cual ha sido asociada con la orogenia Laramide. En el Cenozoico se presentan dos eventos de deformación transcurrente en la zona de Taxco, Guerrero, la primera con extensión al NNNW-SSE y la segunda con extensión al NE-SW en el Eoceno tardío-Oligoceno temprano (Alaniz-Álvarez et al., 2002; Moran-Zenteno et al., 2004 en

Centeno, 2004). El límite entre los terrenos Mixteco y Zapoteco es la falla de Caltepec de edad pérmica (Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez, 2002, Elías-Herrera *et al.*, 2005 en Santa María, 2009).

2.3.1.2 Terreno Zapoteco

El Terreno Zapoteco tiene un basamento de rocas metamórficas en facies granulíticas y anortosíticas que cuenta con un recubrimiento de sedimentos del Paleozoico (Campa y Coney, 1983).

En el Terreno Zapoteco, el Complejo Oaxaqueño es la unidad más antigua. Se trata de un conjunto metamórfico con la mayor variedad litológica de México, compuesto por rocas metamórficas cristalinas con un bandeamiento mineral bien desarrollado y entre ellas se presenta ortogénesis, mármoles, granulitas y meta-anortositas (Centeno, 2004). La edad de estas rocas se han determinado entre 990 a 1300 Ma (U-Pb en zircones) (Santa María, 2009).

De acuerdo con Solari *et al.* (2000; 2003), el Complejo Oaxaqueño cuenta con estructuras por deformación dúctil las cuales tuvieron seis eventos de deformación de los cuales dos eventos tectonotermales predominan la deformación, uno de 1100 Ma (Olmecano) y otro de 979 a 1004 aproximadamente (Zapotecano) (Santa María, 2009). Posteriormente, una secuencia del Paleozoico inferior y superior sobreyace de forma discordante al Complejo Oaxaqueño y esta a su vez, se encuentra cubierta por secuencias del Cretácico y del Cenozoico, marinas y continentales que son similares a las del terreno Mixteco (López-Ticha, 1969, 1970, 1985; Ferrusquía-Villafranca, 1976; Ortega-González y Lambarria-

Silva, 1991; González, 1970; Zaldívar-Ruiz *et al.*, 1993; Schlaepfer, 1970; Hisazumi, 1932; Salas, 1949 en Santa María, 2009).

De acuerdo con Ortega (1995), el Complejo Oaxaqueño perteneció originalmente al bloque continental de gran dimensión llamado Oaxaquia. Éste tuvo una evolución tectónica que ha sido ligada a las rocas proterozoicas de Sudamérica (Gondwana), las cuales posiblemente se acrecionaron a Norteamérica durante el Paleozoico tardío, en la formación de la Pangea. Keppie y Ortega (1999), determinaron que las rocas de este Complejo fueron ígneas y sedimentarias y fueron metamorfizadas aproximadamente a los 900 Ma. El evento de deformación se relaciona como probable de la Orogenia Grenville que formó el supercontinente Rodinia (Centeno, 2004).

2.3.2 Unidades geológicas dentro del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta

Dentro del área del GMA hay nueve unidades geológicas que pertenecen a distintas edades y sistemas (Sistema Cretácico, Sistema Terciario y Sistema Cuaternario), ver Fig. 2.10 "Columna estratigráfica" y 2.11 "Mapa Geológico".

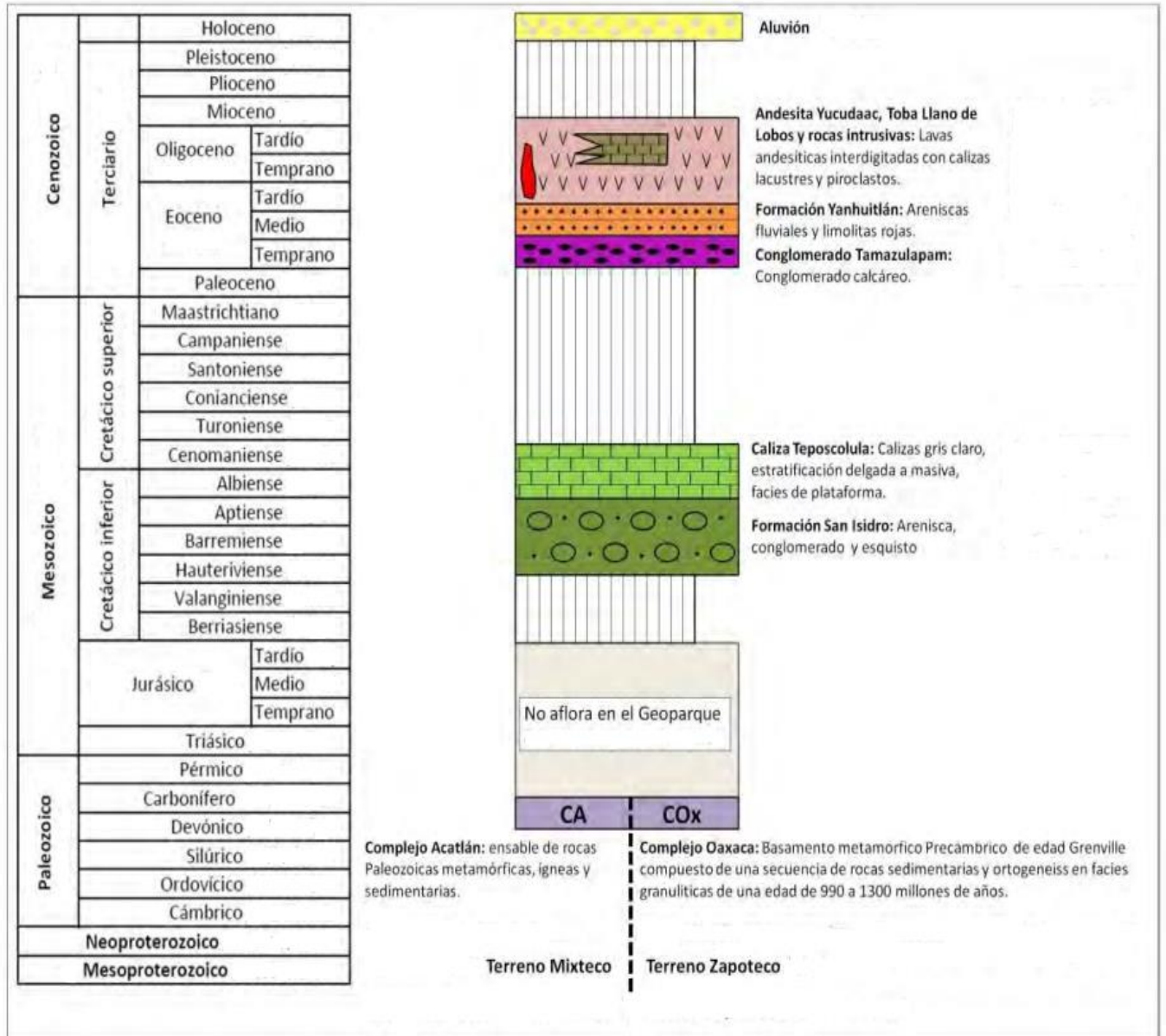


Figura 2.10 Columna estratigráfica del área de estudio (redibujado de Ferrusquia, 1970 y Santamaria, 2009).

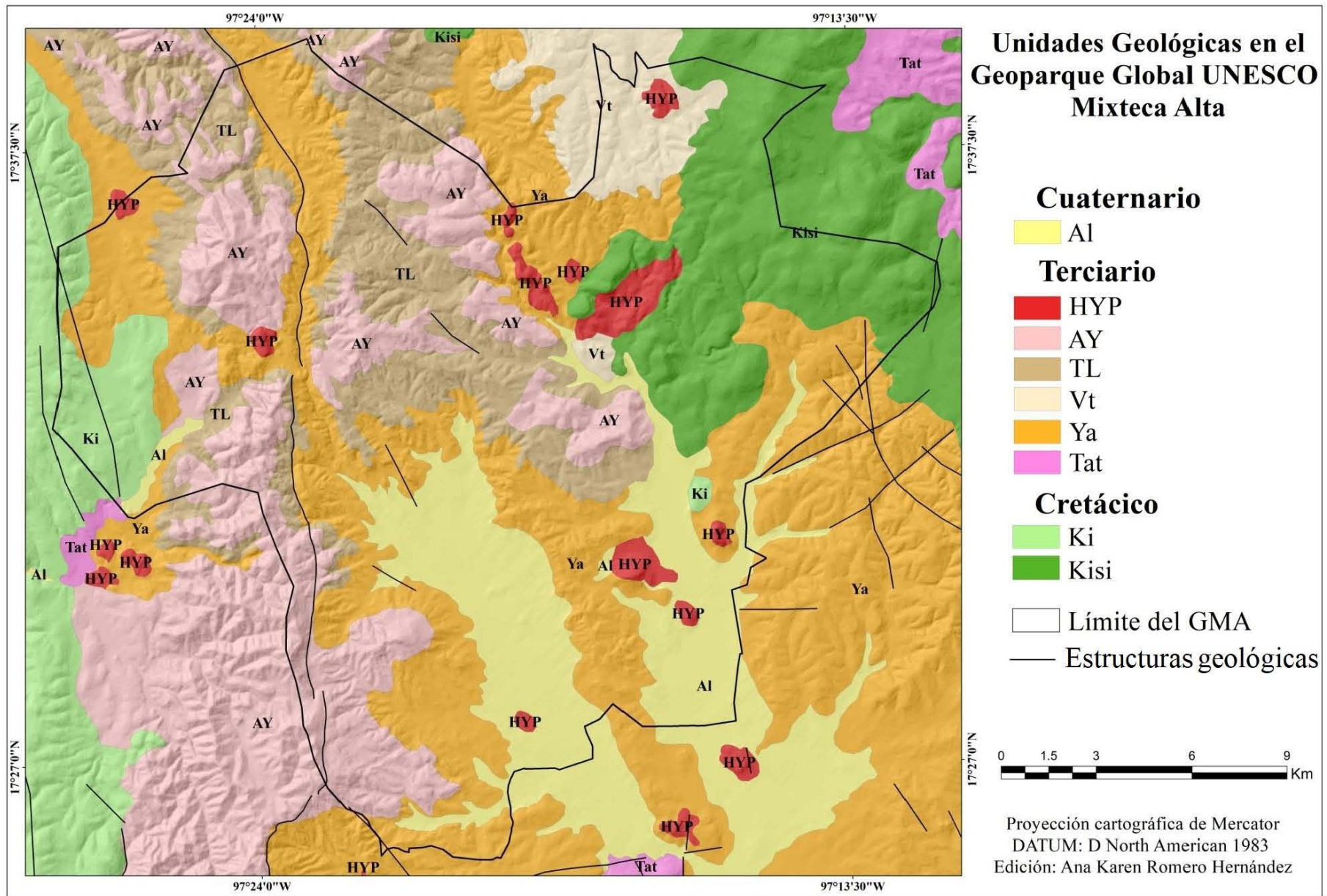


Figura 2.11 Mapa geológico. Al: depósitos aluviales, HYP: cuerpos hipabisales, AY: Andesita Yucudaac, TL: Toba Llano de Lobos, Vt: Depósito Teotongo, Ya: Formación Yanhuilán, Tat: Conglomerado Tamazulapan, Ki: Caliza Teposcolula, Kisi: Formación San Isidro. Elaborado con base en Ortiz *et al.*(2016)

Del Sistema Cretácico se describen las siguientes unidades geológicas que conforman la estructura del área de estudio:

2.3.2.1 Formación San Isidro (Kisi)

Esta unidad comprende una secuencia de areniscas, conglomerados, limolitas y lutitas; se trata de una secuencia de rocas del Cretácico temprano (Santa María-Díaz et al., 2006); La infrayacen las rocas del grupo Tecocoyunca y le suprayacen las de la formación San Juan Teita (Santa María, 2009). El grupo se compone de gneis y cuarzo metamórfico sin clasificación en la matriz arcillo-arenosa; por su parte, el cuarzo es color verde claro de la roca arenisca, delgada con clasificación de grano medio en un conglomerado y con intercalación de limolita, pizarra marrón, bentonita verde, arcilla y roca caliza microdolomía en la parte superior de la secuencia (Ortega González y Lambarria-Silva, 1991). Su ambiente de depósito es en un abanico aluvial en condiciones continentales como resultado de la erosión de las secuencias volcánicas de piroclastos (López-Palomino, 2010). Esta formación se localiza en la porción nororiental, ocupando un área total de 54 km² equivalente al 13% del área total, dentro del Geoparque (Fig. 2.11).

2.3.2.2 Caliza Teposcolula (Ki)

El nombre de esta unidad proviene de la ciudad San Pedro y San Pablo Teposcolula, la cual se ubica a unos 5 km al este del GMA, el contacto inferior no está expuesto y en la parte superior encuentra una discordancia erosiva; el espesor total de la formación Caliza de Teposcolula no se conoce, sin embargo, se estima que va de 500 a 600 metros (Ferrusquía-Villafranca, 1976). Le infrayace la formación San Juan Teita y le suprayace la Formación Yucunama (Santa María, 2009). Se trata de calizas de color crema a gris oscura que poseen

horizontes fosilíferos con abundancia de rudistas (Ramírez- Garza y López- Palomino, 2008) (Fig. 2.12 y 2.13).

De acuerdo con Folk, 1968, su ambiente de depósito fue uno de baja energía en el cual los depósitos son rápidos y sin disturbios en aguas superficiales no muy profundas de condiciones estables no muy cerca de la costa, además de que el color claro es un indicador de que el depósito fue realizado en aguas bien oxigenadas. Es una unidad de rocas masivas y se estimó su edad en el Cretácico Temprano Tardío (Albiano-Coniaciano), su estratificación es masiva en capas de un metro de espesor en promedio, en alternancia con capas que presentan microbandeamiento (Ferrusquía-Villafranca, 1976). La mayor parte de esta unidad se distribuye dentro del Geoparque de norte a sur en la porción occidental y una pequeña área aislada que aflora en la zona centro-oriente, esta formación tiene un total de 16 km² equivalente a 4% del área total del Geoparque (Fig. 2.11).

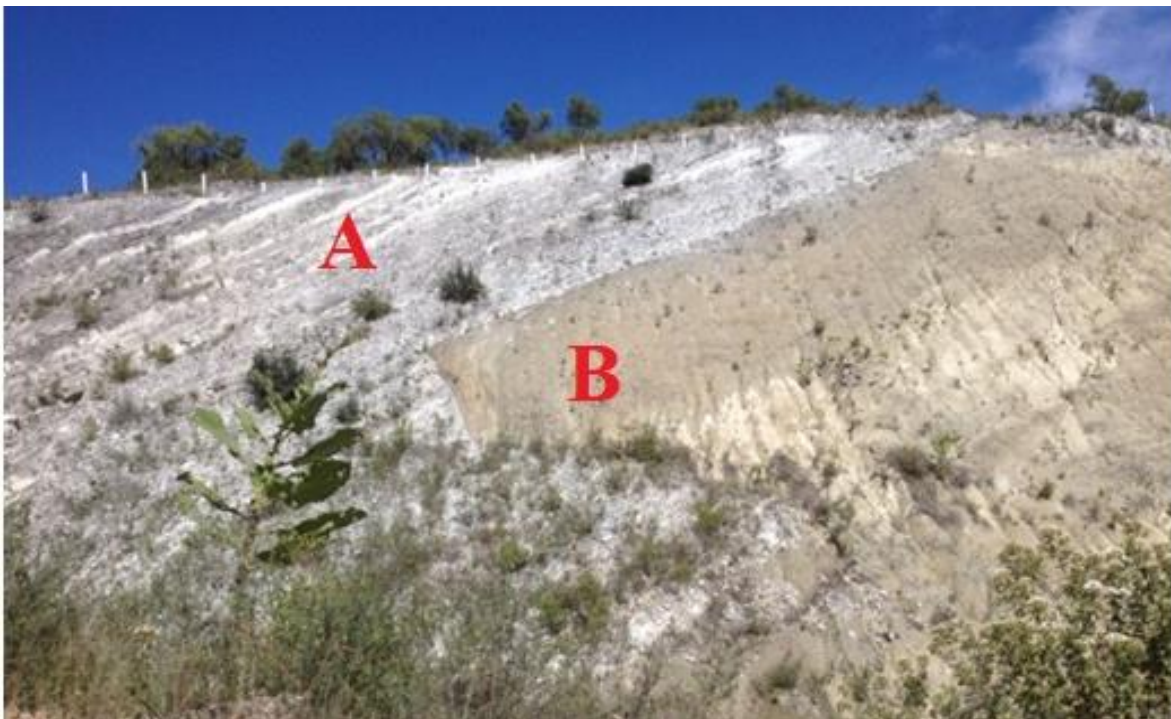


Figura 2.12 Caliza Teposcolula (A) e intrusivo de andesitas hipabisales (B), Río Verde, San Bartolo Soyaltepec.



Figura 2.13 Afloramiento de la Caliza Teposcolula en San Bartolo Soyaltepec.

Del Sistema Terciario se describen a continuación las siguientes unidades geológicas:

2.3.2.3 Conglomerado Tamazulapan (*Tat*)

La edad de esta unidad de rocas se estima en el Cretácico Tardío-Paleógeno (Maastrichtiano-Eoceno Tardío) (Ferrusquía-Villafranca, 1976). Se trata de un conglomerado con estratificación masiva; se constituye de fragmentos de Caliza Teposcolula, margas de la Formación Yucunama, cuenta con una matriz arenosa color rojo debido a la presencia de limolita y hematita cementadas por carbonatos de calcio (Sáenz-Pita y López-Palomino, 2008). De acuerdo con Santa María (2009), la infrayacen los materiales de la formación Tilantongo y la suprayacen los de la Formación Yanhuitlán.

Esta unidad asocia su origen con conglomerados de calizas cretácicas, los clastos tienen un grado de conservación indicativo de poca disolución dentro de su área de origen y se asocian a condiciones de climas áridos y semiáridos; además, se puede deducir que la

distancia de recorrido de la zona de origen al depósito fue corta. Es probable que sean depósitos de inundaciones torrenciales a consecuencia de la erosión de las partes altas y la deposición de los materiales al pie de las montañas, los que posteriormente fueron afectados por plegamiento, fallamiento y levantamiento (Ferrusquía- Villafranca, 1976). Aunque esta unidad se distribuye en los alrededores del Geoparque, sólo una pequeña parte está dentro del mismo (un total de apenas 42,500 m²), la cual ocupa 0.01% del área total del Geoparque (Fig. 2.11).

2.3.2.4 Formación Yanhuitlán (Ya)

La edad de esta unidad se estima en el Paleoceno Tardío-Eoceno Medio (Sáenz- Pita *et al.*, 2009). Esta Formación es una secuencia de arcillas estratificadas con intercalaciones de areniscas y ceniza volcánica endurecida y conglomerados de color rosa o rojo, y cuenta también con pocas capas de conglomerados de estratificación cruzada, tiene una consolidación de media a pobre (Fig. 2.14). En ocasiones presenta intrusiones de sills de extensión lateral y diques. Según Santa María, 2009, a esta unidad la infrayacen los materiales del Conglomerado Tecomatlán y la Formación Tamazulapan, le suprayacen el volcanoclástico Teotongo y la Toba Llano de Lobos.

De acuerdo con Ferrusquía, 1976, ésta es una secuencia de capas rítmicas de limos y arcillas que van del color crema al rojizo (por presencia de hematita) de estratificación delgada a media, las capas cremas son de 15 centímetros en promedio mientras que las rojas son 10 veces más espesas, los granos tiene el tamaño de limos en ambas capas y se encuentran de poco a nada cementadas, contienen además venillas de yeso distribuidas de forma irregular en toda la formación. La matriz de esta formación se constituye principalmente por sedimentos compuestos por montmorillonita, illita y caliza.

La litología de esta unidad indica un área fuente de rocas metamórficas del complejo oaxaqueño, además debido a la presencia de montmorillonita y la alteración que presentan los feldespatos, esta área pudo estar cubierta de vegetación de forma muy escasa. Las cenizas volcánicas indican actividad ígnea explosiva durante su formación. Respecto al área de depósito se cree que pudo ser una cuenca con lago somero con exposición periódica a oxidación subaérea, lo que pudo favorecer la formación de las capas rojas, mientras que las capas de color crema se originaron en episodio de inundación que acentuó la presencia de detritos orgánicos en descomposición (Sáenz- Pita *et al.*, 2009; Ferrusquía-Villafranca, 1976). Esta unidad es la que tiene una mayor expresión dentro del área de estudio, se cubriendo un total de 124 km² y ocupa el 30% del área total del Geoparque (Fig. 2.11).



Figura 2.14 Formación Yanhuítlán en el sendero las Conchas.

2.3.2.5 Depósito Teotongo (Vt)

A esta unidad, de acuerdo con Santa María (2009) le infrayacen las rocas de la Formación Yanhuítlán y le suprayacen las de la Toba Llano de Lobos. La edad de estos depósitos son

del Oligoceno y es una secuencia de sedimentos de areniscas con algunas intercalaciones de ceniza volcánica, depósitos volcanoclásticos y tobas líticas. Esta unidad se encuentra en la zona noreste del Geoparque con un total de 12 km² equivalente al 3% del área total (Fig. 2.11).

2.3.2.6 Toba Llano de Lobos (TL)

La edad de la Toba se estima entre el Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Esta unidad se conforma de piroclastos, formando una secuencia de color rosa pálido, verde pálido, gris o crema; tiene una composición riódacítica a andesítica y las cenizas tienen características de textura vítrica o vitroclástica no soldada (Fig. 2.15). Además, se tiene una interstratificación de lutitas depositadas en ambientes acuosos (Ferrusquía-Villafranca, 1976). De acuerdo con Santa María, 2009, le infrayacen los depósitos Teotongo y le suprayacen las rocas de la Andesita Yucudaac.

De acuerdo con Ferrusquía (1976), son capas de un espesor mediano llegando al masivo; se estima que tiene un espesor de 300 a 350 metros, con una dureza que va de suave, deleznable, altamente cohesiva y endurecida. Estas tobas tienen una composición de piroclastos líticos que indican presencia de andesita y pómez, cristalinos por presencia de plagioclasas, feldespatos alcalinos, cuarzo, biotita, clorita, hornblenda, clinopiroxenos, magnetita, hematita y goethita; y vítricos por esquirlas de vidrio. Tiene una posición horizontal y únicamente muestra inclinaciones que se asocian a fallas o intrusiones (López, 2016). Esta unidad se emplaza del centro al norte hacia la parte occidental, tiene un área 58 km² y ocupa el 14% del área total del Geoparque (Fig. 2.11).



Figura 2.15 Toba Llano de Lobos en Río Verde, San Bartolo Soyaltepec.

2.3.2.7 *Andesita Yucudaac (AY)*

Esta unidad corresponde al Oligoceno Tardío. Se encuentra constituida por secuencias de derrames lávicos de andesita color gris oscuro de composición intermedia a básica. Se trata de estratovolcanes que detonan un campo de lava y en los frentes de lava son de tipo “aa” (Ferrusquía- Villafranca, 1976) (Fig. 2.16). De acuerdo con Santa María, 2009, a esta unidad la infrayacen las rocas de la Toba Llano de Lobos o a la Formación Yanhuatlán por discordancia erosional y le suprayace el aluvión. Una parte de esta unidad se emplaza del centro al norte y otra se extiende de norte a sur en la zona de occidente del Geoparque. Tiene una área de 76 km² y ocupa el 18.22% del área total del Geoparque (Fig. 2.11).



Figura 2.16 Andesita Yucudaac en Santo Domingo Tonaltepec.

2.3.2.8 Cuerpos Hipabisales (HYP)

Se trata de una gran cantidad de cuerpos intrusivos que son diques o domos y tienen una composición andesítica, además de que se encuentran asociados con la presencia de fallas dentro del Geoparque (Fig. 2.17). De acuerdo con Santa María (2009) tienen una edad entre el Pérmico y el Mioceno. Estos cuerpos se encuentran distribuidos aisladamente por toda la zona del Geoparque, cubren un área total 11 km² y ocupan 3% del área total del Geoparque (Fig. 2.11), aunque su expresión es mínima se pueden observar fácilmente dentro del Geoparque y son un factor importante para los fines educativos del Geoparque.

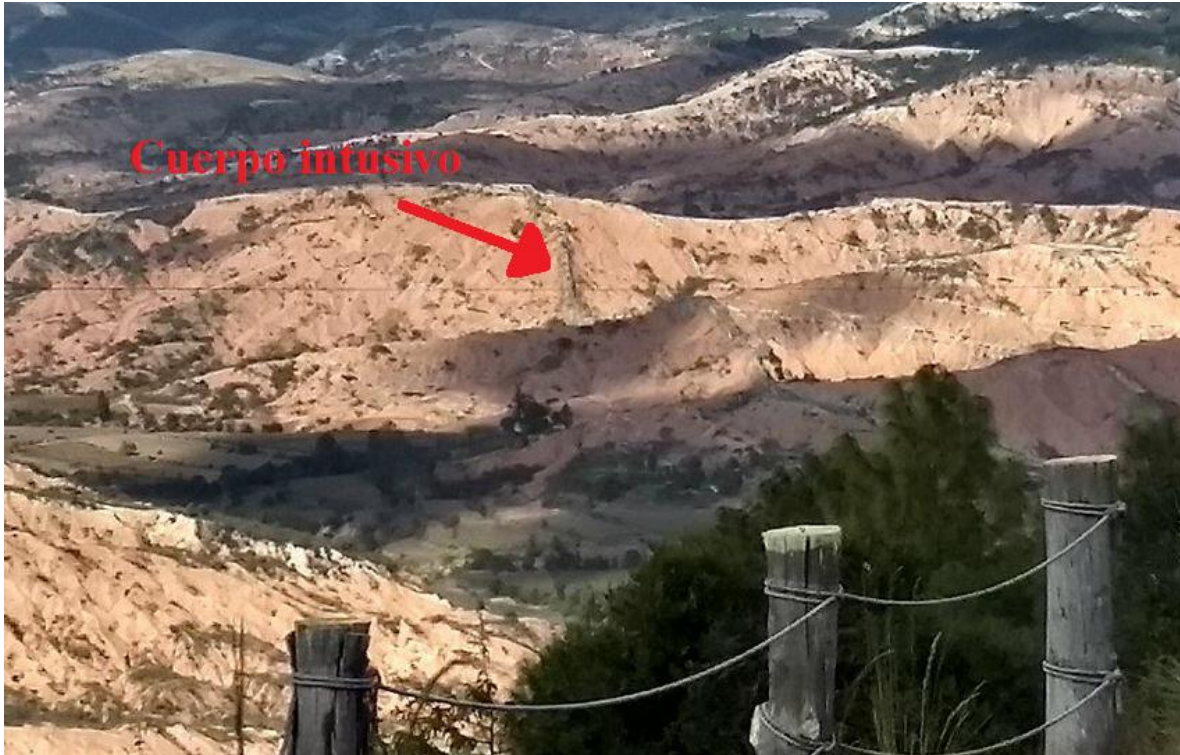


Figura 2.17 Cuerpo intrusivo (dique) que aflora en el geositio Vista Hermosa, municipio de Santo Domingo Tonaltepec.

Del Sistema Cuaternario se describen a continuación las siguientes unidades litológicas:

2.3.2.9 *Depósitos aluviales (Al)*

La edad de esta unidad se estima en el Pleistoceno. Se compone de grava no consolidada, arena, limo y arcilla que proviene del material parental preexistente que ha sido transportado a los sitios de depósito por la acción de las corrientes fluviales. Los materiales litológicos del Valle de Yanhuitlán, se componen de detritos de limo (Fig. 2.18). El espesor de los depósitos van de los 30 a los 50 metros y en algunas áreas sólo se forma una capa delgada de entre 1 y 10 metros (Ferrusquía-Villafranca, 1976). Los depósitos aluviales tienen una distribución en el fondo de los valles de Yanhuitlán, Yucuita y Nochixtlán principalmente en la zona centro y sur oriental del Geoparque, tienen una área total de 64

km² y ocupan el 15% del área total del Geoparque (Fig. 2.11). Es posible apreciar paleosuelos intercalados en los perfiles aluviales en varios puntos del Geoparque, cuya edad se estima alrededor de los 14 mil años (Leigh, 2013; Muller, 2012).



Figura 2.18 Perfiles aluviales en las Conchas, se aprecia una secuencia de paleosuelos.

2.3.2.10 Depósitos de caliche

Se trata de depósitos que se componen de carbonato de calcio y provienen de la exudación capilar del mineral disuelto en los suelos provenientes de la capa freática, éstos cuando se encuentran en una condición de estrés hídrico dan el origen al caliche. También se pudo originar por la intemperización de calizas durante un régimen de sequía. Los depósitos de caliche no tienen la dimensión suficiente para ser representados cartográficamente (Ferrusquía-Villafranca, 1976), pero es común observarlos cubriendo a la Formación Yanhuitlán.

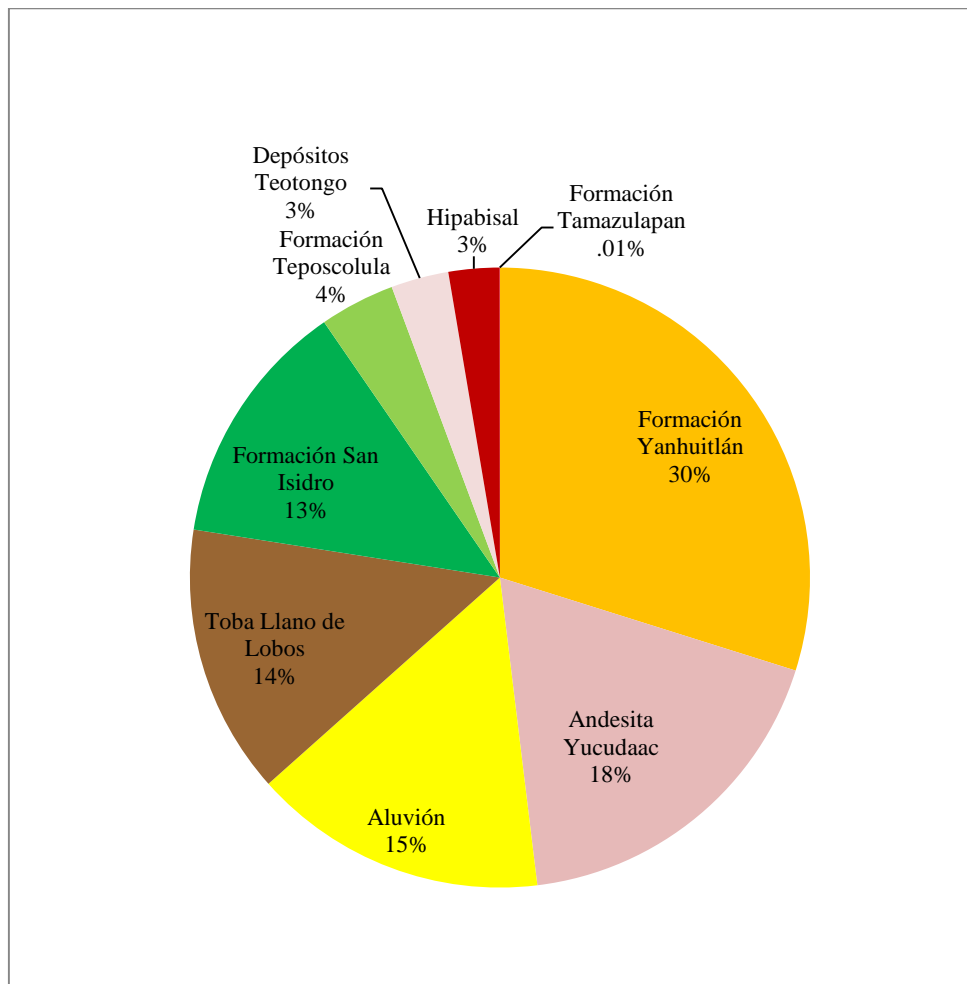


Figura 2.19 Porcentaje de superficie que ocupa cada unidad geológica.

2.3.3 Estructuras geológicas principales dentro del Geoparque Global UESCO Mixteca Alta

Las principales estructuras geológicas comprenden fallas, anticlinales y sinclinales. Destaca Falla Cieneguilla, una falla normal con una orientación N-S, ubicada en el sector occidental del geoparque, con echado hacia el poniente y una longitud de 22 km de trazo continuo en el sur desde Duixi, que continua hacia el Norte en 32 km como segmento de falla. Su proyección norte corta a la Toba Llano de Lobos y la Andesita Yucudaac y en el sur a la Formación Yanhuitlán (Santa María, 2009). Además, en el límite Oeste sobre la Caliza Teposcolula pueden observarse anticlinales y sinclinales (Fig. 2.11 y 2.20).

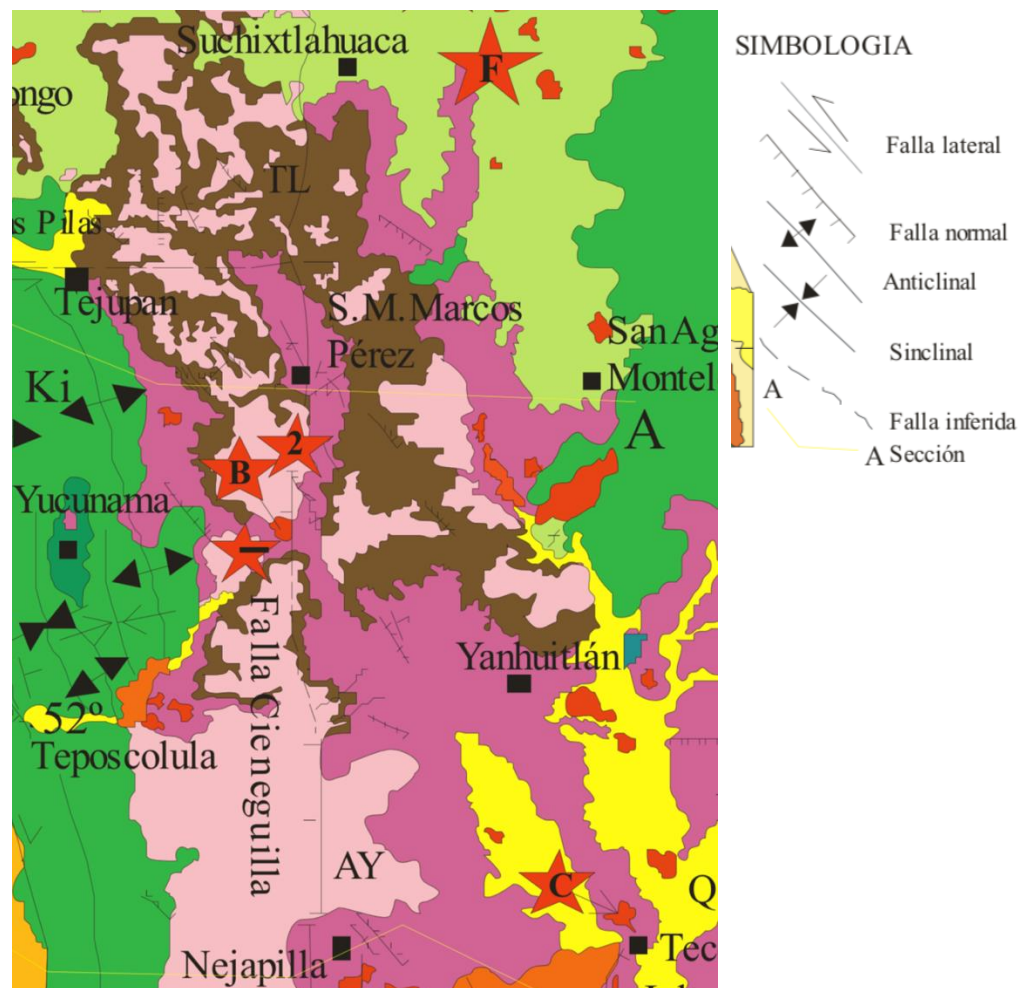


Figura 2.20 Sección del mapa geológico de Santa María (2009), donde se muestra la Falla Cieneguilla.

2.3.3 Unidades Geomorfológicas del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta

Para la zona de estudio se han elaborado trabajos geomorfológicos, el aquí citado hace una aproximación que define los diferentes paisajes geomorfológicos tomando en cuenta las formas y estructuras de la geología, clima, hidrología y posteriormente se precisan con la información de la vegetación, uso de suelo y tipo de suelo (Ortiz *et al.*, 2016). A continuación se describen los aspectos principales de cada paisaje geomorfológico (Fig 2.21 y 2.22).

- Valles erosivos: de acuerdo con Lugo (2011), son depresiones estrechas y alargadas en el relieve que se forman por la acción erosiva de los ríos.
- Planicie aluvial denudativa: una planicie aluvial es una superficie amplia de acumulación fluvial a manera de terraza, se asocia con la llanura de inundación de una corriente fluvial y tienen pendientes que va de los 0 a los 3° (Lugo, 2011). Esta planicie se formó a partir de sedimentos residuales aluvio-proluvial y recientemente denudativa con disección fluvial escasa y no cuenta con procesos acumulativos por lo cual ha comenzado con la formación de suelos de tipo aluvial. Tal condición se puede deber a un levantamiento tectónico o bien a un cambio climático (Ortiz *et al.*, 2016).
- Piedemonte: Se trata de las superficies que están en el margen de las montañas y tienen una pendiente aproximada de 6° en el contacto con la ladera y que desciende de forma gradual (Lugo, 2011). En la zona de estudio el piedemonte se encuentra en una llanura ligeramente inclinada y cuenta con lomeríos aislados y su pendiente va de los 3 a los 12°. Se encuentra limitado por todos sus flancos y tiene contacto con la planicie aluvial por lo que es una zona de transición entre ésta y las cuestas y

laderas bajas. Los materiales que lo forman son sedimentos retenidos por obras de construcción de terrazas o lama-bordos para la conservación de suelos y control de la erosión (Ortiz et al., 2016).

- Lomas aisladas denudativas: Se trata de elevaciones pequeñas que no superan los 300 m de altura, se caracterizan por tener suaves laderas (Lugo, 2011). En la zona de estudio se trata de lomas originadas por procesos denudativos y se encuentran ubicadas entre el piedemonte y la planicie aluvial (Ortiz *et al.*, 2016).
- Cuestas y laderas bajas y medias de elevaciones erosivas, lomeríos y campo de cárcavas en rocas ígneas piroclásticas: De acuerdo con Lugo (2011), es un conjunto de topofomas que se caracteriza por tener pendientes de los 12° a los 30°. Los sedimentos que la conforman son de textura fina alternando con capas de limolita rojas, arena fina, lutita roja y conglomerado calcáreo, además se intercalan algunos horizontes de toba volcánica de tipo andesita, la consolidación en general es débil y son materiales permeables. Estos elementos favorecen la erosión hídrica concentrada y presenta un alto desarrollo de cárcavas y *badlands* y procesos de remoción en masa que se dan principalmente en las cabeceras de cárcavas formando circos erosivos (Ortiz *et al.*, 2016).
- Laderas de montañas y cimas erosivas en rocas ígneas: Para esta unidad las formas geométricas y su apariencia se relacionan y dependen principalmente del sustrato en el que se desarrollan. Las laderas son la porción inclinada de la superficie terrestre en general tienen pendientes que van de los 18 a 45° o más (Lugo, 2011). En la zona de estudio las laderas medias y bajas están dominadas por materiales

volcanoclásticos pertenecientes a la Formación Toba Llano de Lobos y derrames lávicos de la Andesita Yucudaac (Ortiz *et al.*, 2016).

- Laderas de montañas y cimas denudativas en rocas ígneas extrusivas o intrusivas: Esta unidad se diferencia de la anterior ya que el sustrato sobre el que se desarrollan no es el mismo. Por lo tanto, los procesos que la dominan también serán diferentes. Los materiales que dominan esta unidad son los Cuerpos Hipabisales de composición andesítica y algunos también por la Andesita Yucudaac.
- Laderas de montaña y cimas denudo-erosivas en rocas sedimentarias: Esta unidad se relaciona con las rocas de origen sedimentario y su basamento está dominado por los materiales de la Formación San Isidro y la Caliza Teposcolula. Debido a lo anterior la diferencia en las condiciones de modelado de esta unidad son notables en cuanto al grado de erosión y el desarrollo de cauces fluviales.
- Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas sedimentarias: Esta unidad está relacionada con rocas de origen sedimentario. Su basamento lo dominan los materiales del Depósito Teotongo. Al ser este depósito una secuencia sedimentaria de areniscas y tobas volcánicas, principalmente, permiten un mayor grado de erosión y modelado que el paisaje anterior.
- Depresión Kárstica: De acuerdo con Lugo (2011), una depresión es una porción de la superficie terrestre más baja que las contiguas y en su mayoría son cerradas. En este caso se ha originado por la disolución de las rocas sedimentarias, en particular las de la Caliza Teposcolula.

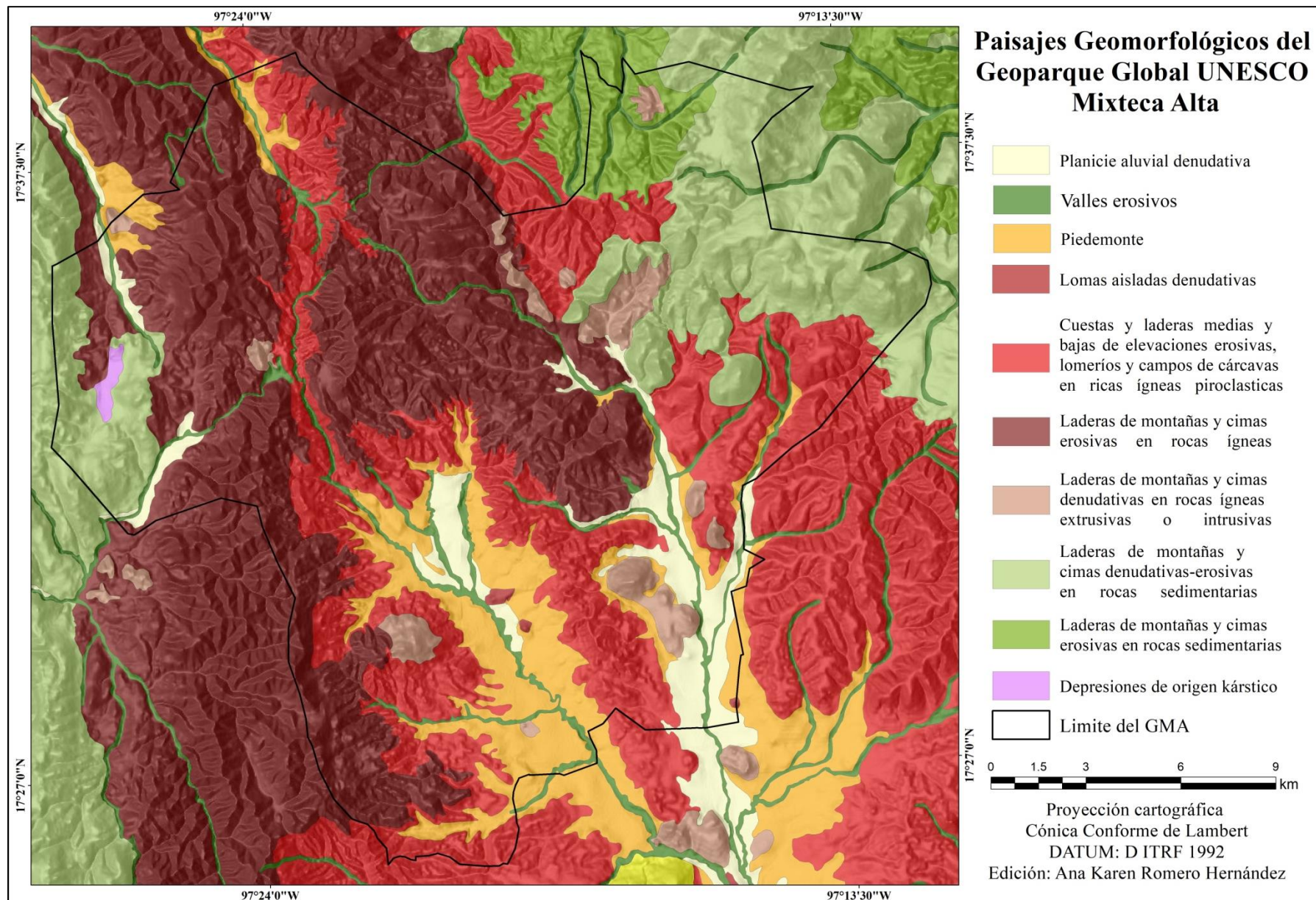


Figura 2.21 Mapa de Paisajes Geomorfológicos. Elaborado con base en Ortiz et al. (2016).

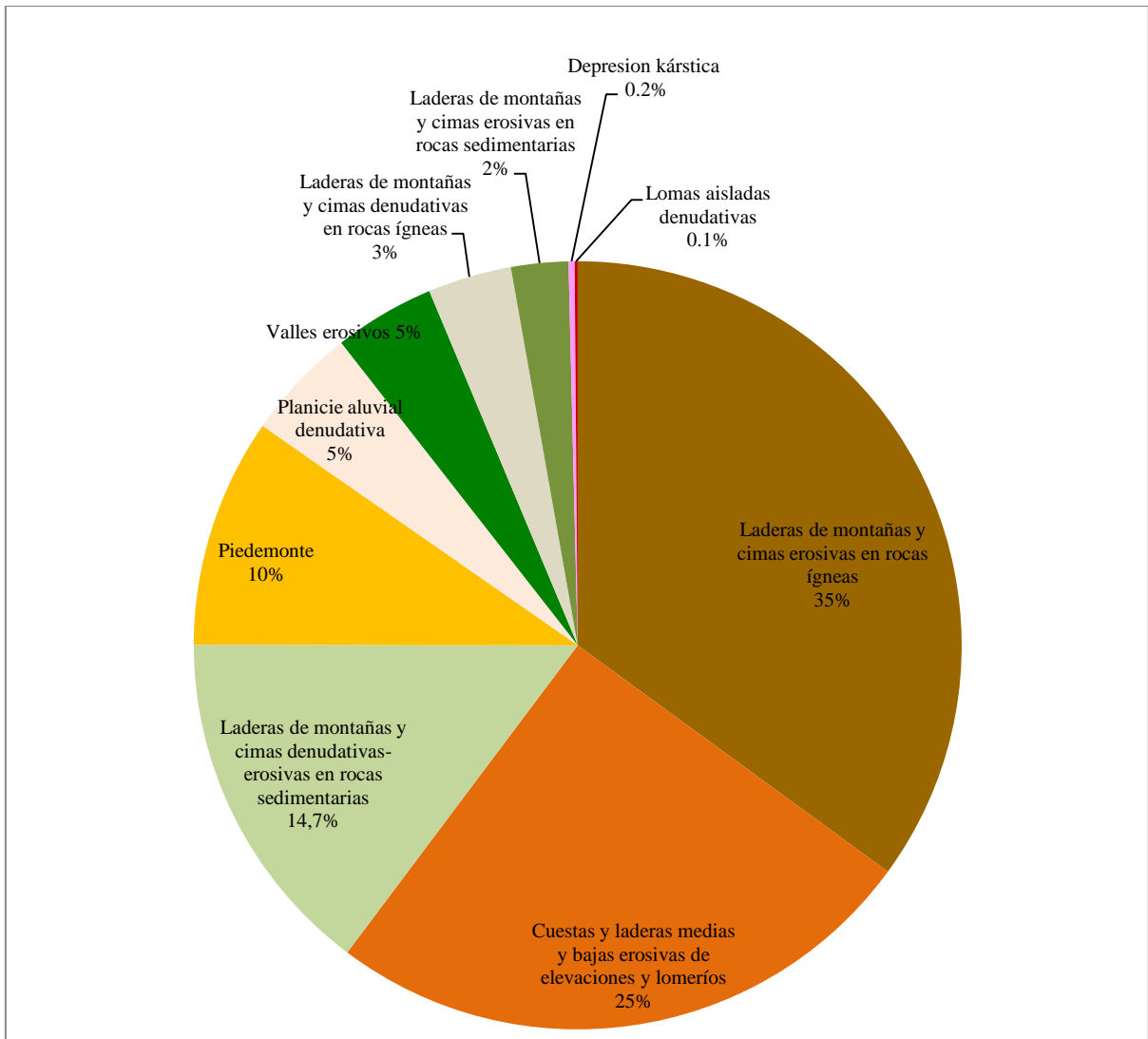


Figura 2.22 Porcentaje de superficie que ocupa cada unidad geomorfológica dentro del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta.

CAPÍTULO 3. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO MIXTECA ALTA

En este capítulo se explican las actividades realizadas para la obtención de los distintos mapas como producto final, los cuales se elaboraron con la finalidad de conocer y comprender los parámetros medibles de las formas del relieve y sus principales características así como los procesos geomorfológicos que actúan sobre él.

Para el análisis morfométrico de la zona de estudio se realizó la interpretación de los siguientes indicadores morfométricos: 1. Altimetría, 2. Pendiente, 3. Densidad de la disección, 4. Profundidad de la disección, 5. Disección general y 6. Energía del relieve.

3.1 Modelo Digital de Elevación y Red de drenaje

Como base para la elaboración de los mapas morfométricos se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE). De acuerdo con Felicísimo (1994), el MDE es una representación de la distribución espacial de los valores altitudinales de la superficie terrestre, a través de una estructura numérica. Esta representación se encuentra georreferenciada en un sistema de proyección cartográfico y se almacena como una base de datos digital (Ramírez, 2015). Esto nos permite caracterizar las formas del relieve con los elementos y objetos que lo componen.

Para la elaboración del MDE se debe tomar en cuenta la escala y el método de interpolación que se desea aplicar según los objetivos del trabajo de investigación (Parrot, 2009). Los tratamientos generales que se realizaron para este trabajo se basan en un conjunto de programas y software en acceso libre elaborados por J.-F. Parrot (ver http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/Intro.php).

El uso de este conjunto se explica a continuación.

El Modelo Digital de Elevación que se generó en este trabajo utiliza datos vectoriales de formato dxf. El formato dxf que provee el INEGI es de tipo Autocad ©, es decir que a cada valor útil de este archivo le precede un índice que precisa el tipo de variable que se trata. En el caso de los MDE, se necesita buscar dentro del archivo dxf los valores que corresponden respectivamente a x, y (coordenadas UTM) y z (valor de la altitud del punto x,y). Las curvas de nivel corresponden a una sucesión de puntos (*VERTEX*) que tienen la misma altitud. Existen dos tipos de agrupamientos considerados como entidades (*ENTITIES*): el agrupamiento de tipo *POLYLINE* y el agrupamiento de tipo *LWPOLYLINE*. Cada una de dichas entidades indica cuál es la altitud de la curva de nivel; la principal diferencia concierne a los vértices; en el primer caso, se indica para cada vértice sus coordenadas x,y y el valor z; esta repetición inútil del valor z desaparece en el caso de los *LWPOLYLINE*. En los dos casos el valor de altitud se da en metros.

Los datos vectoriales que corresponden a las curvas de nivel utilizadas para generar el MDE se obtuvieron de los conjuntos vectoriales de cuatro cartas a escala 1:50,000 (INEGI, 2012), dentro de las cuales queda comprendida la zona de estudio (E14D25 "Villa de Tamazulapam del Progreso", E14D26 "San Juan Bautista Coixtlahuaca", E14D35 "Santiago Yolomécatl" y E14D36 "Asunción Nochixtlán").

Los algoritmos desarrollados por Parrot (ver arriba) se realizan en el ambiente *raster*, de tal manera que se necesita transformar los datos vectoriales en imágenes de tipo *raster*. De acuerdo con Raper (1989), el formato *raster*, dentro de una imagen de tamaño $m \times n$ (líneas por columnas), corresponde a una malla regular de celdas llamadas "píxel" (*Picture*

Element); cada píxel tiene un valor z de altitud. En este sentido, es posible decir que, en el mundo *raster*, $z = f(x, y)$.

En primer lugar, si la zona en estudio corresponde a varios archivos *dx**f*, es necesario, antes de realizar la transferencia a los datos *raster*, juntar la información que contiene cada carta en un solo archivo. El módulo ejecutable *Sum_dx**f* asegura este tratamiento. Por su parte, el módulo *Transf_dx**f_v2* realiza la transferencia, creando la imagen *raster* (extensión *.raw*) de las curvas de nivel, imagen que servirá de base para las fases finales de la interpolación. También, es posible transformar los datos *dx**f* en el formato vectorial *jfp* (extensión proveniente del nombre y apellido de su autor) que corresponde a un archivo simplificado, lo que representa una estructura económica de la información. El programa *Transf_dif_dx**f* realiza esta transformación, tomando en cuenta o bien el archivo único proveniente del uso del módulo *Sum_dx**f*, o bien cada uno de los archivos vectoriales originales; en este último caso, se necesita sumar los diversos archivos *jfp* con el módulo ejecutable *Sum_jfp*.

Es decir que existen diversas estrategias para transformar datos vectoriales (*dx**f* o *jfp*): el módulo ejecutable *Transf_dx**f_raster* si los datos de entrada son de tipo *dx**f*; el módulo *Transf_jfp_raster* si los datos de entrada son de tipo *jfp*. También existe un módulo desarrollado recientemente (*Transf_jfp_extract*; Parrot, 2017c) que se puede utilizar para extraer y transferir de manera selectiva una zona dentro del archivo global.

Como resultado de estos pretratamientos, se obtiene una imagen de 8 bits (256 tonos de gris) que, sobre un fondo con el valor 255, contiene la totalidad de las curvas de nivel en tonos de gris, un archivo descriptivo (número de líneas y columnas de la imagen, número de bytes u octetos (un octeto contiene 8 bits) y una tabla de correspondencia entre el valor de los tonos de gris y la altitud real. También es posible generar dicha tabla de

correspondencia entre tono de gris y altitud, utilizando el módulo *Crear_tabla* (Parrot y Ramírez-Núñez, 2012). Este módulo permite definir, dentro de la correspondencia, la escala de los valores de altitud (metros, decímetros, centímetros o milímetros). En el presente caso, se definió una escala en centímetros.

Antes de pasar a la etapa final de la interpolación, es recomendable hacer una revisión de las curvas de nivel para asegurarse que no existan errores como hiatos o caminos de tipo 4 (En el mundo *raster*, el camino 8 es una curva formada por pixeles y la distancia entre sus centros puede ser igual a 1 y a la raíz cuadrada de 2. En el caso del camino 4, la distancia es solamente igual a 1, ver Fig. 3.1), lo cual es posible corregir con el programa *Net_curve2* (Parrot, 2013).

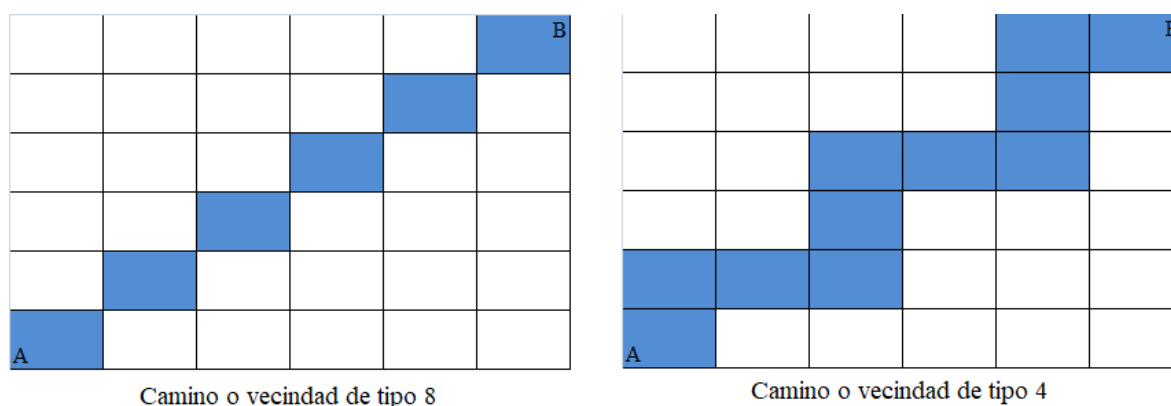


Figura 3.1 Tipos de caminos en pixeles que se pueden encontrar en el mundo *raster*.

La imagen de las curvas de nivel y la tabla de correspondencia se utilizan para generar una imagen de las curvas de nivel con valores de altitud sobre un fondo neutro (valor -99999) de lo cual resulta una imagen de 32 bits con extensión *_c4.raw* (Brod5_Mx; Parrot, 2017a).

A partir de este archivo se aplicó la interpolación basada en la dilatación de curvas (Taud *et al.*, 1999) con el programa *Dilat_curves* (Parrot, 2017b¹).

El método de dilatación de las curvas implica que las curvas de nivel se van a expandir hasta que cada superficie que se crea por la dilatación de una curva se una con la otra. De este modo todos los puntos dentro de la superficie tendrán un mismo valor de altitud. El límite entre estas superficies define una curva de nivel de valor intermedio. El proceso se repite creando nuevas curvas intermedias hasta que se atribuye un valor de altitud a cada pixel del fondo neutro. Este método utiliza la alternancia de elementos estructurales de la morfología matemática, la cruz y el cuadrado, lo que permite obtener una dilatación casi isotrópica (Fig. 3.2). El MDE resultante tiene una resolución espacial de 15 m y resolución hipsométrica en centímetros (Fig. 3.3 y 3.4).

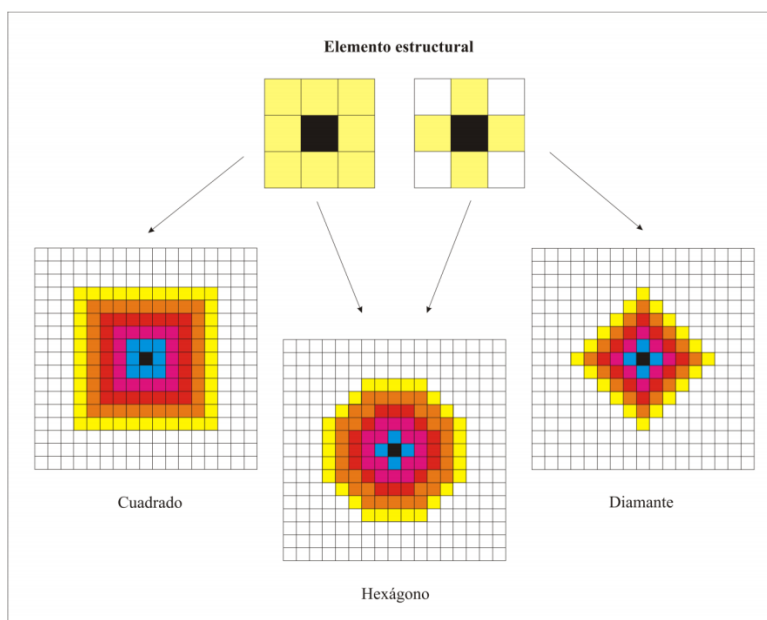


Figura 3.2 Elementos estructurales utilizados para la dilatación de curvas (Parrot y Ochoa-Tejeda, 2005).

¹ Basado en el programa *Dilat_Curves* (Parrot y Taud 1997)

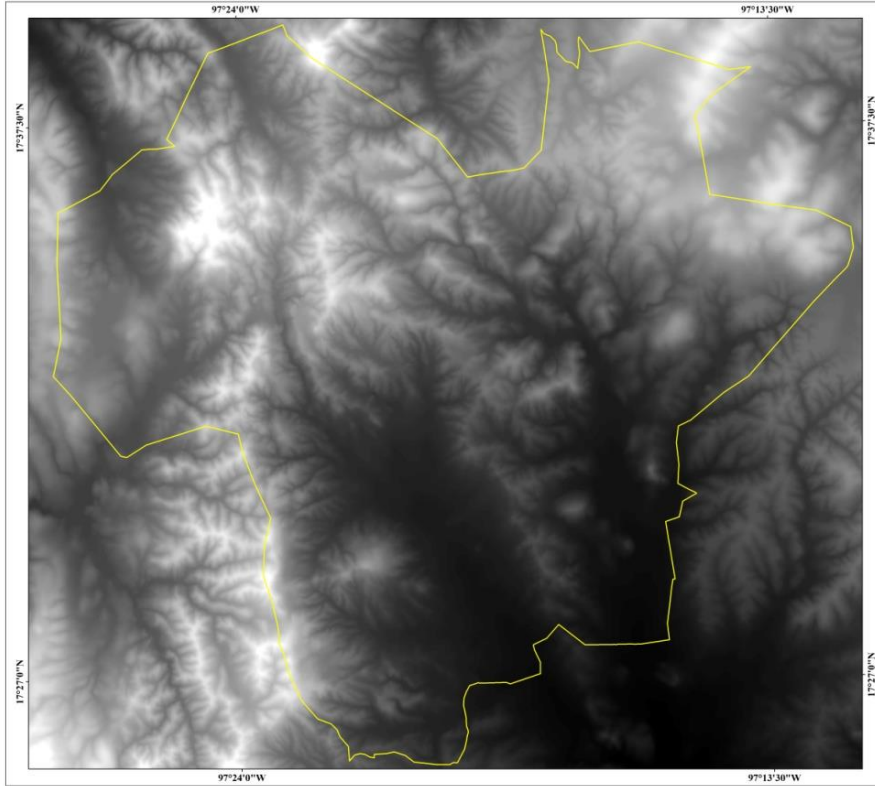


Figura 3.3 Modelo Digital de Elevación del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta generado en Dilat_curves y recuperado en ArcMap 10.2.2.

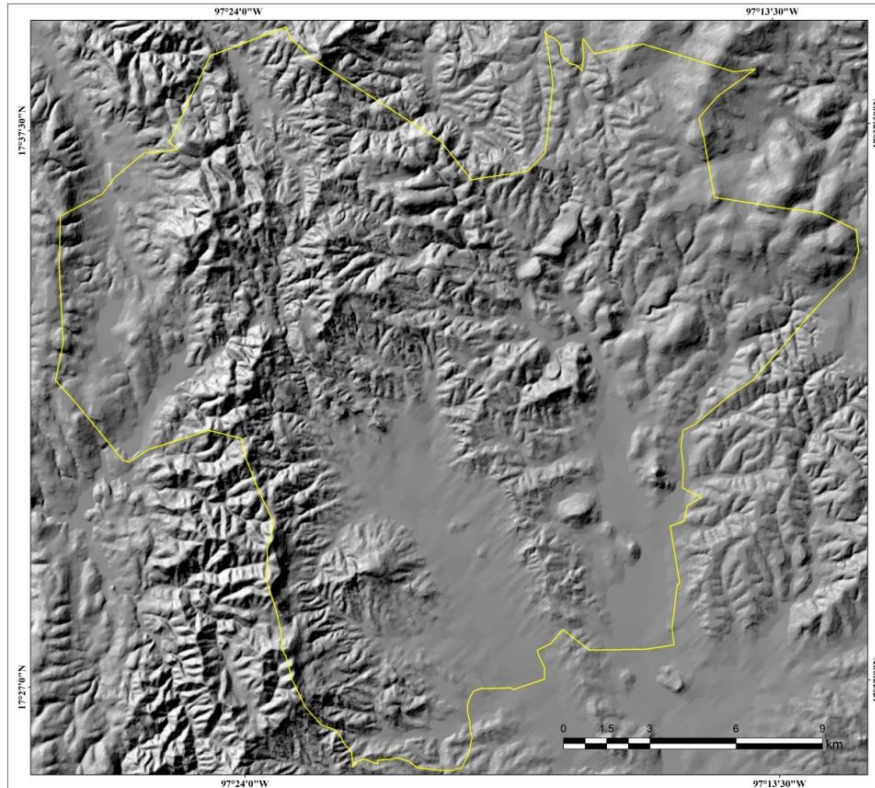


Figura 3.4 Sombreado del Modelo Digital de Elevación.

A partir del MDE *raster* obtenido, se extrajo la red de drenaje a partir del programa *Tridimensional Landscape Analysis Local Operating Computation (TLALOC*, Parrot, 2006). La red de drenaje obtenida se sometió a dos tratamientos principales, el primer tratamiento para la eliminación de puntos aislados (*FROG_V2*; Parrot, 2014) y el segundo para la corrección de la vecindad 4 a vecindad de tipo 8 (*Net_curve2*; Parrot, 2003). Por último, se hizo una corrección con un editor de pantalla de la imagen de la red de drenaje (formato *bmp*) a través del software *Paint Shop Pro*, con la cual fue posible eliminar el resto de puntos aislados y la vecindad de tipo 4 remanente. Para esto se utilizó como base el MDE y el aspecto (orientación) para además redibujar los cauces incompletos y eliminar aquellos que invadían las cabeceras (figura 3.5 y 3.6).

Por otro lado, otros tratamientos utilizados en el cuadro de esta tesis se basan en algoritmos contenidos en diferentes Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para ello, existe un mini-software (*Extract_V2*; Parrot, 2011) que asegura la transformación del MDE generado y la imagen de la red de drenaje obtenida, a archivos de tipo *ascii* (extensión *.asc*). Para el uso de estos archivos en software comercial como ArcGis 10.2.2, se utiliza la función *ASCII to Raster*. Los archivos resultantes corresponden a los requerimientos de este *software*.

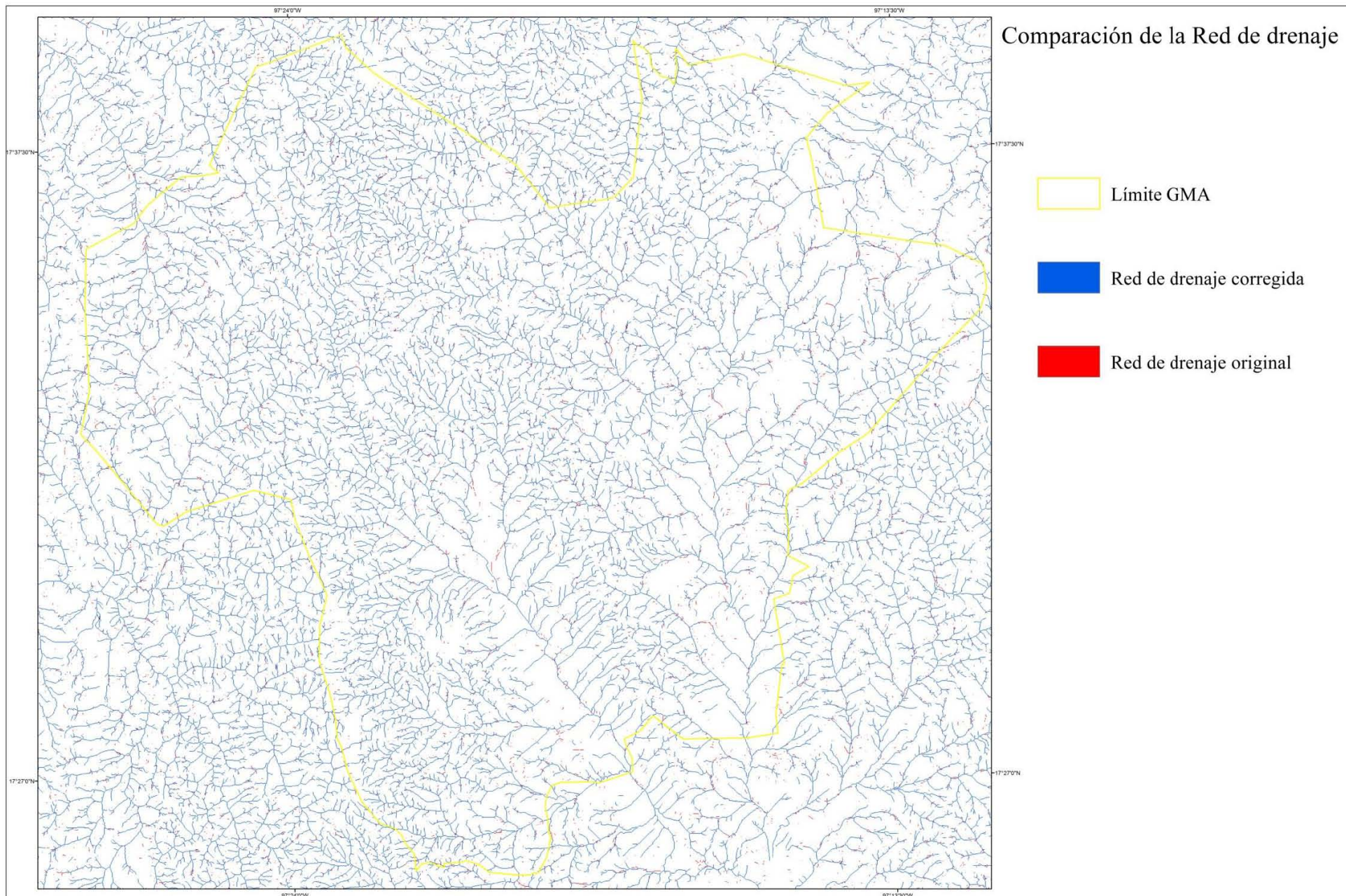


Figura 3.5 Sobreposición de la red de drenaje corregida (en azul) sobre la red original (en rojo).

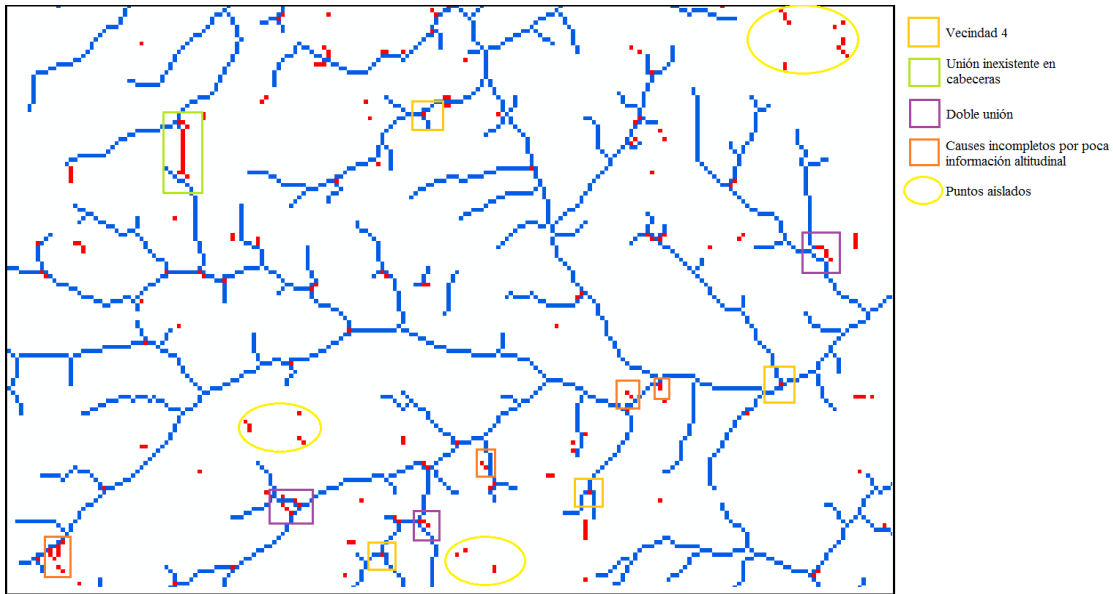


Figura 3.6 Ejemplificación de las correcciones en la red de drenaje. En rojo la red original con errores y en azul el resultado de la corrección.

Una vez corregidos los errores y obtenidos los elementos básicos necesarios, se procedió a la elaboración de cada mapa morfométrico en el programa ArcGis 10.2.2.

3.2 Altimetría

Con la finalidad de obtener una mejor visualización de las diferencias altitudinales de la zona de estudio, a partir del archivo *raster* del MDE, se hicieron cinco clasificaciones de altitud diferentes. Para ello, se utilizaron 5 intervalos equivalentes a cada 180 m, 9 intervalos equivalente a cada 100 m, 12 intervalos equivalente a cada 75 m, 15 intervalos equivalente a cada 60 m y 18 intervalos equivalente a cada 50 m. Esto fue posible a través de la herramienta *Reclassify*.

Se hizo un análisis de las diferentes clasificaciones para elegir el que mejor representa las diferencias del relieve. Se eligió como mejor representación el de 18 intervalos (equivalente a cada 50 metros) por tener un mejor ajuste con el mapa de paisajes geomorfológicos así

como con la geología. Esto permite determinar de una mejor forma los rangos altitudinales que presenta cada uno de los paisajes geomorfológicos así como las unidades geológicas.

Se consideró que para una mejor interpretación de los datos sería necesario sacar los datos altitudinales de cada unidad geológica además de los de la zona en conjunto. Para esto se exportó el polígono o *shapefile* de cada unidad geológica y posteriormente los recortes (con la herramienta clip) del mapa altimétrico (9 recortes en total, equivalentes a las 9 unidades geológicas). En el mismo SIG se hicieron los cálculos de área (km²) de cada rango altitudinal en cada uno de las nueve unidades geológicas. Se exportaron las tablas de atributos a Excel para los siguientes cálculos: curva hipsométrica del GMA, curvas hipsométricas de cada unidad geológica, histograma de GMA e histogramas de cada unidad geológica.

3.3 Pendiente

La pendiente del terreno es otro factor importante para el análisis morfométrico ya que puede ser condicionante y resultado de la acción de los agentes exógenos que se encargan de la modelación del relieve, tomando en cuenta que en las zonas con mayor pendiente se manifiestan algunos procesos con una mayor intensidad como los erosivos y los de remoción en masa. De ahí la importancia de la elaboración de un mapa de pendientes del terreno, el cual se construye tomando en cuenta la distancia horizontal entre las curvas de nivel y la distancia vertical que se obtiene directamente de los valores de las cotas de las curvas de nivel y se aplica la función de la tangente. Los valores que se utilizan para categorizar son, según Lugo (1978) los que se adecuen a la orientación del trabajo, las características de la zona y la escala de trabajo que se piense utilizar.

El mapa de pendientes en la zona de estudio se obtuvo a través del MDE con el SIG ArcGIS 10.2.2, se utilizó directamente la herramienta *Slope* que da como resultado un archivo *raster* donde clasifica las pendientes en 9 intervalos equitativos según los resultados de pendiente mínima y máxima; la clasificación que nos da es en grados. Para clasificar el mapa de acuerdo con nuestros objetivos utilizamos la herramienta *Reclassify* que permite poner el número de intervalos deseados y editar el rango de cada uno. Se hizo la clasificación en 8 intervalos de pendiente: 0 a 1.5, 1.6 a 3.0, 3.1 a 6.0, 6.1 a 12.0, 12.1 a 20.0, 20.1 a 30.0, 30.1 a 45.0 y >45.

3.4 Densidad de disección

La densidad de la disección muestra el equivalente de las corrientes fluviales pero con la diferencia de mostrar el resultado de su acción sobre el terreno, es decir la erosión de la superficie en cuanto a la longitud de talwegs por km², tomando en cuenta los talwegs como líneas originadas por la erosión fluvial.

Para elaborar este mapa en ArcGis 10.2.2 se utilizó la red de drenaje que se obtuvo del programa TLALOC ya corregida. Es necesario crear una cuadrícula o malla, conocida como *fishnet* en el SIG, a esta malla se le dará la medida de 1 km² para cada celda. Al tener lista la capa de drenaje es necesario unificarla como un sólo elemento, esto con la finalidad de que no se tengan las divisiones de cada polilínea que pertenece a cada cauce, sino que sea una capa completa, esto se logra con la herramienta *Dissolve*. Posteriormente se hizo una intersección (*Intersect*) de la capa de drenajes unificada con el *fishnet*, lo que sirve para obtener una delimitación de la red de drenajes de acuerdo con cada km² del *fishnet* (esto nos dará una nueva capa de la red de drenaje con la nueva delimitación). Una vez que se

tiene delimitada cada km² de la red de drenaje se hace el cálculo de la longitud de los drenajes (en km) sobre la tabla de atributos de esta capa.

El siguiente paso es hacer una interpolación de los datos con la finalidad de que nuestro mapa no quede sólo con la cuadrícula clasificada. Lo primero que se debe hacer es crear una capa de puntos (*Feature to Point*) que se sobreponen en cada celda para que en el momento de la interpolación lo haga a partir del punto central de cada celda. Se debe unir la tabla de atributos de la capa con las medidas de la longitud por cada km² a la de la capa de puntos a través de un *Join*. Con el archivo de puntos se pasa finalmente a realizar la interpolación *Kriging*, esto nos dará como resultado un archivo *raster* que es posible reclasificar de acuerdo a nuestros objetivos. En la reclasificación de este mapa se eligieron los valores <1, 1 a 2, 2 a 3, 3 a 4 y >4 km/km².

3.5 Profundidad de disección

De acuerdo con Lugo (1991), la profundidad de la erosión (o profundidad de la disección), considera la erosión en un perfil y es el equivalente de la altura vertical medida entre el talweg y la divisoria. Esto, visto en un plano, se trata de una distancia transversal al talweg y cuantifica la profundidad que han alcanzado las corrientes.

Para la elaboración de este mapa también se utilizó como base el MDE. Para que el SIG realice los cálculos se necesita tener también la malla *fishnet* que cubra la zona de estudio y que cada cuadro o celda sea de 1 km por 1 km. En la tabla de atributos del *fishnet* creado es necesario agregar una fila donde se calcule el área en metros cuadrados (debe ser de 1,000,000 m², es decir, 1 km²) y otra donde se calcula el perímetro (4000 m) (estos cálculos se realizan a través de la función *Calculate Geometry*). Posteriormente se realiza el cálculo

a través de la herramienta *Zonal Statistics as Table*, donde hará un cálculo estadístico del MDE por cada km² del *fishnet* y nos dará como resultado una tabla de datos la cual se debe juntar con la tabla de atributos del *fishnet* (*Joins and Relates > Join*).

A partir de aquí el cálculo para la profundidad de la disección en cada celda del *fishnet* ya está hecho. Sin embargo, para obtener mejores resultados se realizó la interpolación de datos. De igual forma que el caso anterior se utilizó la capa de puntos medios (*Feature to Point*) y se le unió la tabla de atributos del *fishnet* (*Join*) para darle el valor de la densidad; posteriormente se eligió el tipo de interpolación *Kriging*. Nuevamente, se hizo una reclasificación del resultado para acoplarlo a nuestros valores de profundidad de disección elegidos. Se eligieron los valores <40, de 41 a 100, de 101 a 200, de 201 a 300 y >300 m/km².

3.6 Disección general

El mapa de disección general conjunta la densidad y la profundidad de la disección y refleja de manera general la disección del terreno. Esto se realiza midiendo la longitud total de las curvas de nivel (en km) en un área establecida; en este caso, las celdas serán también de 1 km², de esta forma la relación es de km/km².

Para su elaboración en ArcGIS 10.2.2 se retomó la metodología que utilizamos para el mapa de densidad de la disección. Esto tomando en cuenta que el principio de relación es el mismo y es posible medir la longitud de cualquier vector por cada kilómetro cuadrado. Por lo tanto, se cargaron en el SIG las curvas de nivel de la zona de estudio del conjunto topográfico de INEGI a escala 1:50,000 con una equidistancia de 20 metros. Las curvas de nivel se unificaron como un solo elemento con la herramienta *Dissolve* y se creó el *fishnet*

como en los casos anteriores (de 1 km² cada celda). El siguiente paso fue la intersección de la capa de curvas de nivel con el *fishnet*, esto con la finalidad de dividir, por cada km², las curvas de nivel y posteriormente hacer la medición de la longitud de curvas de nivel en km que quedan dentro de cada km².

Al tener la medición por cada kilómetro cuadrado se hace una capa de puntos medios (*Feature tu Point*) a la cual se le debe unir la tabla de atributos con los datos de longitud para que al hacer la interpolación cuente con los datos necesarios. También, para este índice, se utilizó el tipo de interpolación *Kriging*. Este mapa se reclasificó con los siguientes intervalos: <5.0, 5.1-15.0, 15.1-25.0, 25.1-35.0 y >35.0 km/km².

3.7 Energía de relieve

La energía del relieve refleja la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena, por lo tanto los valores altos de energía corresponden a zonas de mayor actividad tectónica y en el caso contrario a zonas con mayor estabilidad.

Para elaborar este mapa se utilizó el MDE en ArcGIS 10.2.2, con la herramienta *Focal Statistics* la cual hará una interpolación del tipo de estadística que se desea obtener, en este caso será el de *rango*, que es la altura máxima menos la mínima. En segundo lugar, se debe especificar qué tipo de celda se desea utilizar, en este caso fue circular ya que da una mejor visualización de los resultados. Por último, se especifica el tamaño de la celda la cual se respetó con un área de 1 km², sin embargo se debe establecer de acuerdo al tamaño del pixel de nuestro MDE el cual es de 15m, por lo tanto se define que el radio ocupe 33 pixeles lo cual suma 500 m igual a 1000 m de diámetro.

El resultado será un archivo *raster* que muestra la energía del relieve. El mapa se reclasificó en 5 intervalos iguales que son: <100, 101-200, 201-300, 301-400 y >400 m.

Posteriormente, se hizo la conversión de todos los archivos *raster* a polígonos lo cual nos permite integrar los valores para cada índice y editar los mapas de acuerdo con los resultados deseados. Finalmente se hicieron los recortes de cada índice morfométrico realizado por unidad geológica (*Clip*).

En la tabla de atributos de cada mapa se calculó el área en km² de cada rango; posteriormente se exportaron todas las tablas a Excel para calcular los histogramas de frecuencia del GMA y de cada unidad geológica por separado y realizar el análisis morfométrico de cada unidad.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOMÉTRICA DEL GEOPARQUE GLOBAL UNESCO MIXTECA ALTA

4.1 Morfometría del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta

En este capítulo se muestran los resultados de los seis indicadores morfométricos que se aplicaron y que resultan en seis mapas diferentes. Además se hace una relación con los paisajes geomorfológicos antes mencionados; para facilitar tal correspondencia se elaboró un cuadro de los diferentes paisajes con un número de identificación (Tabla 4.0).

ID	PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS
I	Laderas de montaña y cimas denudativas en rocas ígneas.
II	Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas ígneas.
III	Laderas de montaña y cimas denudativas- erosivas en rocas sedimentarias.
IV	Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas sedimentarias.
VI	Lomas aisladas denudativas.
VII	Laderas medias y bajas de elevaciones erosivas cuestras y lomeríos erosivos y campos de cárcavas en rocas ígneas piroclásticas.
VIII	Piedemonte.
IX	Planicie aluvial.
X	Valles erosivos.
XI	Depresión de origen Kárstico.

Tabla 4.0 Clasificación numérica de los paisajes geomorfológicos.

4.1.1 Altimetría

El mapa altimétrico (Fig. 4.1) nos ayuda a ver de forma simple los pisos altitudinales dentro del GMA. Ya que el mapa se especificó con intervalos a cada 50 metros, es posible diferenciar claramente las zonas bajas, medias y altas. El relieve del Geoparque tiene su punto más bajo en los 2050 msnm al sur-sureste. Esta zona pertenece a dos valles, el de Yanhuítlán en la zona centro-oeste y el de Nochixtlán en el este, y llegan hasta los 2200 msnm. Respecto al valle de Nochixtlán hacia el noreste se encuentran las zonas medias y altas, las que pertenecen a la zona de piedemonte y elevaciones montañosas.

El punto más alto se encuentra al noroeste del GMA y en general la zona de mayor elevación se encuentra al norte, oeste y suroeste. El 60% del territorio se encuentra entre los 2100 y 2450 msnm, y 40% entre los 2500 y 2900 msnm junto con el rango de 2050 msnm (Fig. 4.2).

Aunque la delimitación de la zona de estudio no es una cuenca como tal, sino es socialmente construida y corresponde a límites municipales, se tomó la decisión de realizar la curva hipsométrica para la zona. Con la curva hipsométrica del GMA se puede observar que en las zonas de mayor altitud comienza como una curva de tipo C lo cual indica una cuenca sedimentaria; sin embargo, a partir de los 2600-2200 msnm cambia su comportamiento a una de tipo B que indica un equilibrio y finalmente de los 2150-2050 se comporta como una de tipo A, lo cual quiere decir que tiene en esta zona un gran potencial erosivo (Fig. 4.3).

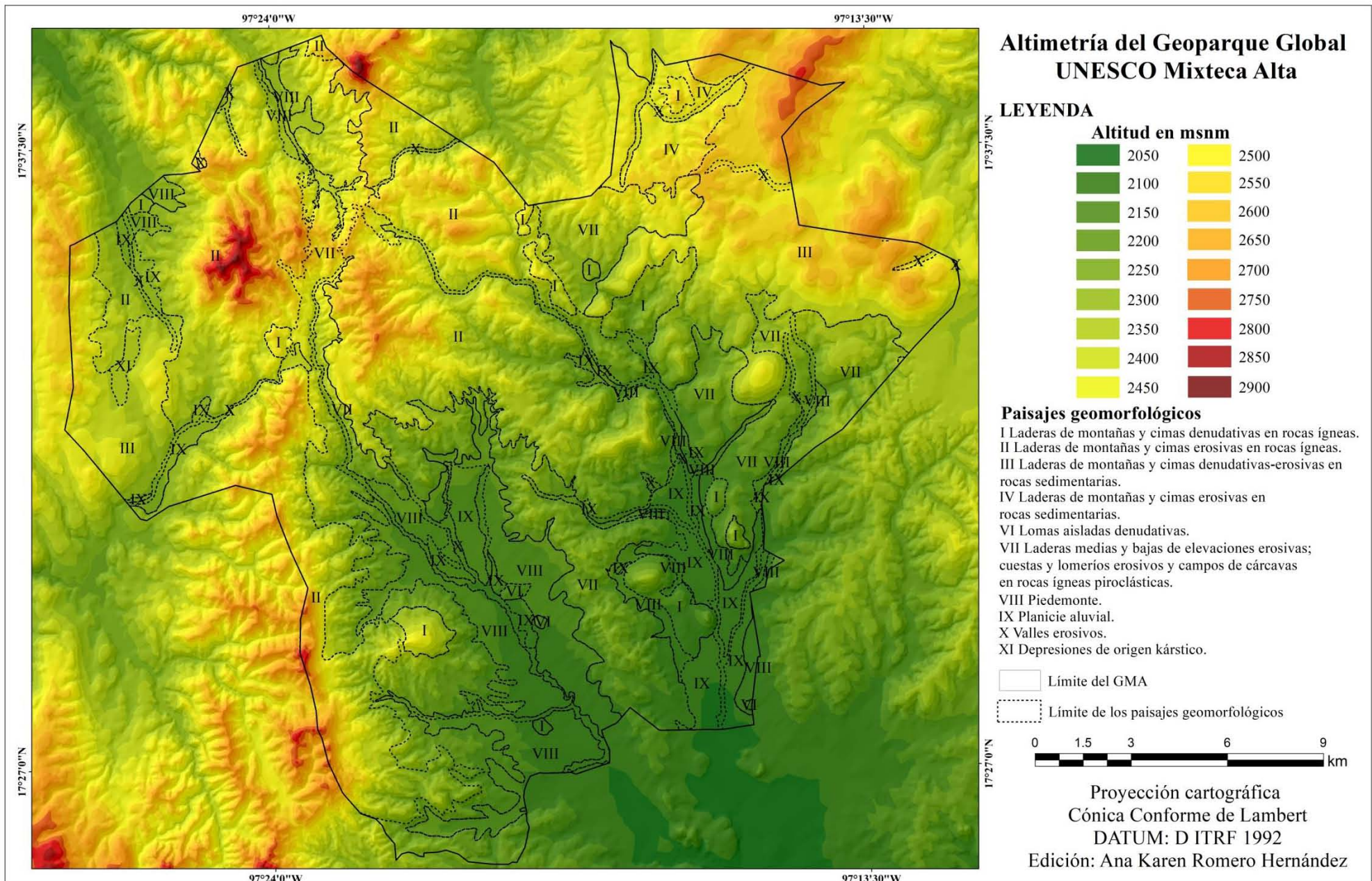


Figura 4.1 Mapa altimétrico del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

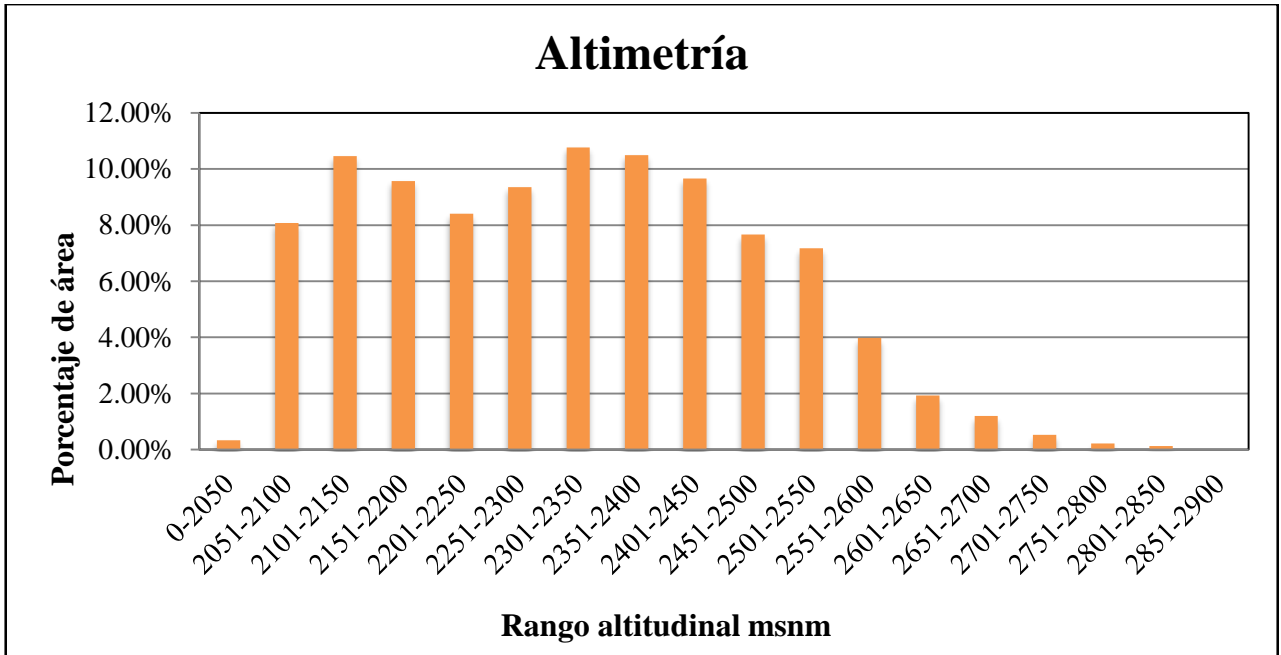


Figura 4.2 Histograma de altitudes del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta.

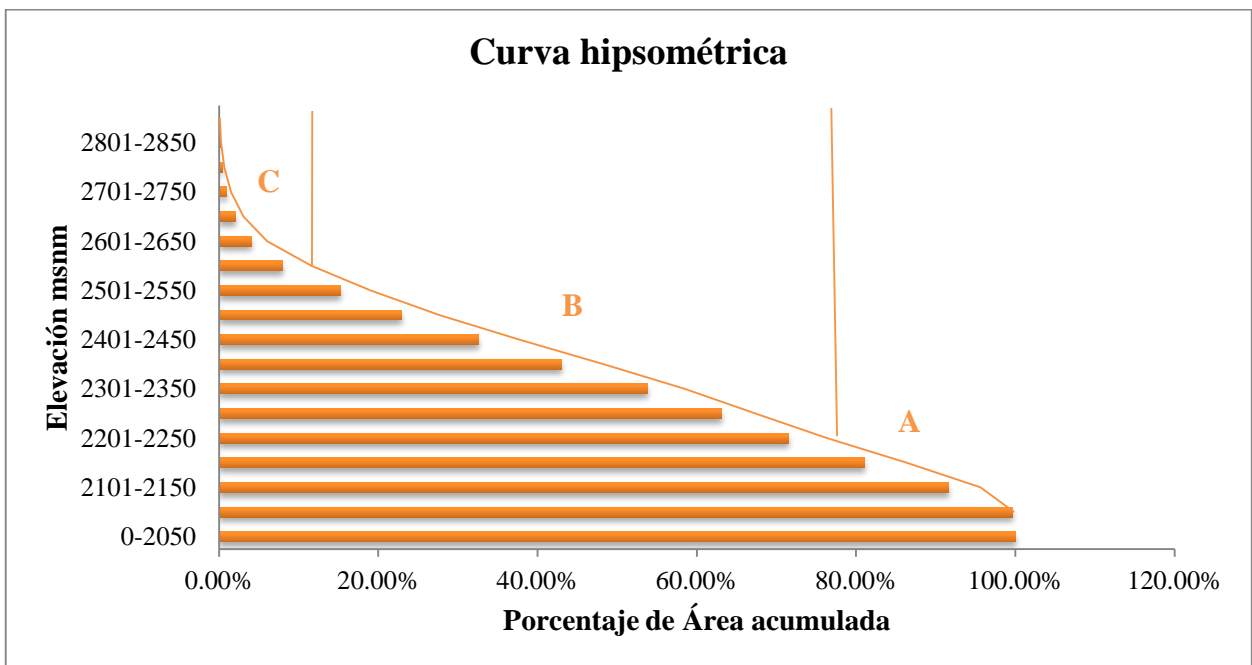


Figura 4.3 Curva Hipsométrica del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta. Rango de curva tipo C, rango de curva tipo B, rango de curva tipo A.

4.1.2 Pendiente

El mapa de pendientes se clasificó en ocho valores (en grados de inclinación) que se refieren en la tabla 4.1.

PENDIENTE (EN GRADOS DE INCLINACIÓN)	VALORES
0-1.5	MUY BAJO
1.6-3.0	BAJO
3.1-6.0	
6.1-12.0	MEDIO
12.1-20.0	
20.1-30.0	ALTO
30.1-45.0	
>45.0	MUY ALTO

Tabla 4.1 Clasificación de los rangos de pendiente del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

El mapa de pendientes muestra una distribución similar al de altimetría ya que las pendientes más bajas se encuentran en los dos valles y zonas bajas, que corresponden a la Planicie aluvial (IX) y a los Valles erosivos (X) e incluso algunas en la zona de Piedemonte (VII).

Las mayores pendientes responden a las zonas de mayor altitud que predominan en el Oeste y unas cuantas en el Centro-Norte que coinciden con la zona de Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas ígneas (II). Existe una transición conforme aumenta la altitud, de pendientes bajas a medias y finalmente altas. En cuanto a las pendientes mayores a 45° ocupan áreas pequeñas y se encuentran distribuidas algunas en el límite Suroeste del Geoparque; también se presentan otras en el sector Noroeste que pertenece igualmente al paisaje geomorfológico II. Finalmente, se observa una mayor homogeneidad en parte del

Noreste donde predominan las pendientes medias y corresponden a los paisajes geomorfológicos III (Laderas de montaña y cimas denudativas- erosivas en rocas sedimentarias) y IV (Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas sedimentarias) (Fig. 4.5).

De acuerdo con los datos obtenidos 32% del área total está entre los 0° y 6° que son pendientes muy bajas y bajas. El 52% del área del GMA se encuentra en los rangos de pendiente catalogados como medios de 6-12° 27% y de 12-20° 25%. Esto quiere decir que predominan las pendientes medias; sin embargo, un las pendientes más altas ocupan un área importante, de 20°-45° ocupan 16% del área. El rango de pendiente > 45° tiene el menor porcentaje de área 0.02%, sin embargo, su presencia es importante ya que indica zonas de muy altas pendientes (Fig. 4.4). Si se toma en cuenta que las pendientes mayores a 12° según los paisajes geomorfológicos son la transición entre el piedemonte y las laderas de montaña, tenemos que en total para el geoparque 41% del área se encuentra en pendientes medias-altas y muy altas, que con fines geoturísticos pueden ser de difícil acceso.

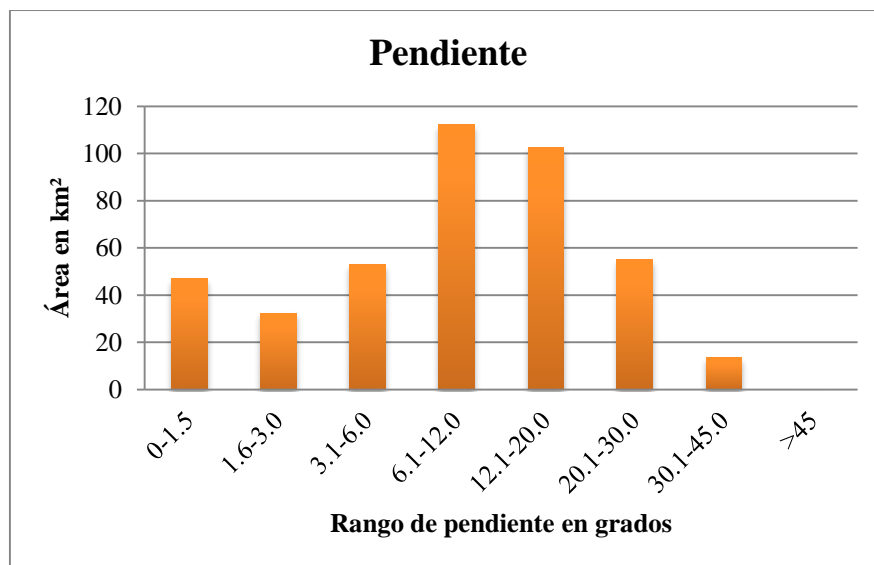


Figura 4.4 Histograma de pendientes del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

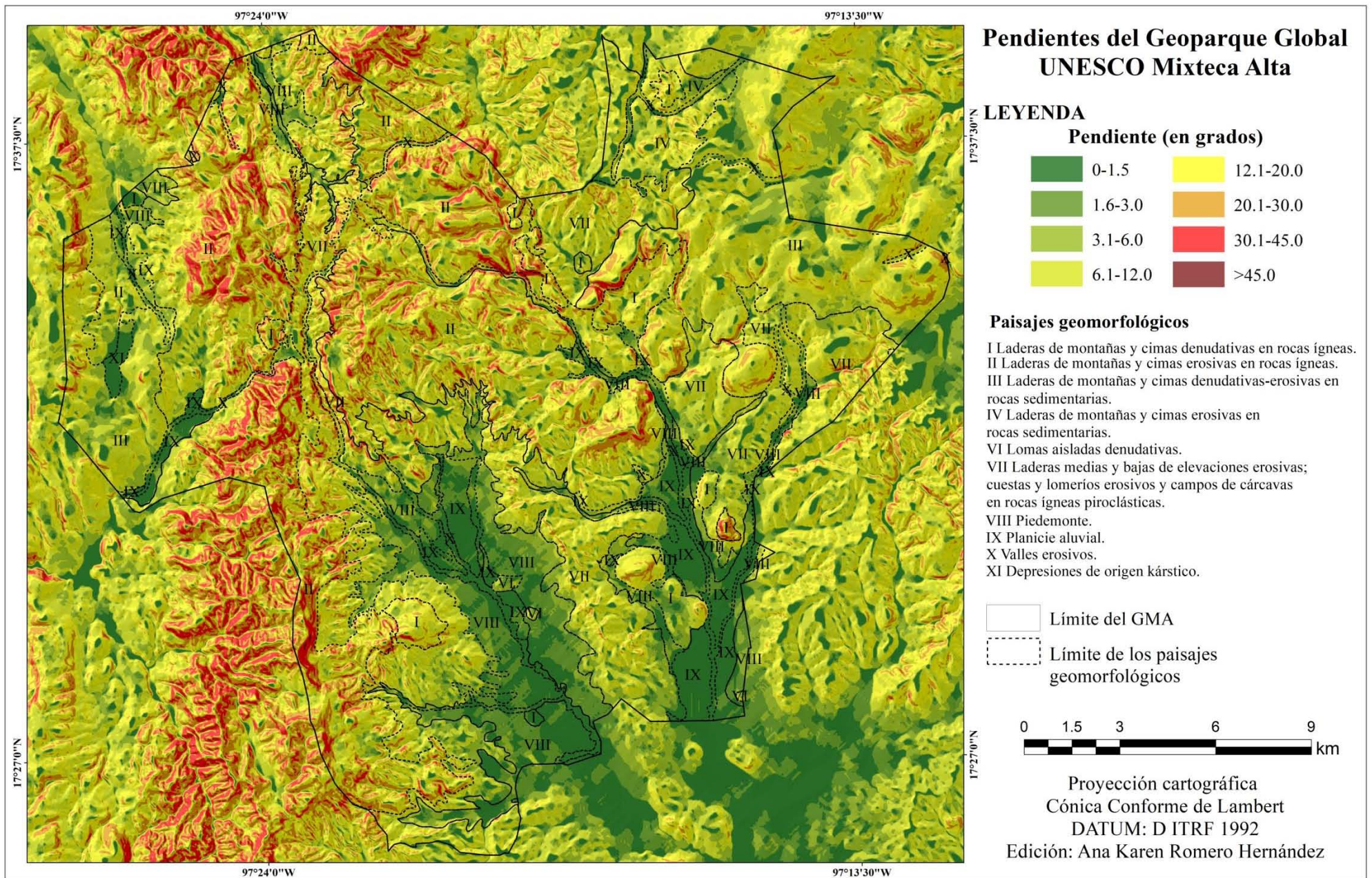


Figura 4.5 Mapa de pendientes del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

4.1.3 Densidad de disección

La densidad de la disección en el GMA se hizo en cinco valores (ver tabla 4.2):

DENSIDAD DE DISECCIÓN (km/km ²)	VALORES
< 3.0	MUY BAJO
3.1-4.0	BAJO
4.1-5.0	MEDIO
5.1-6.0	ALTO
>6.0	MUY ALTO

Tabla 4.2 Clasificación de la densidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Valores muy bajos:

El rango clasificado como muy bajo ocupa 7% del área del GMA, la mayor parte de este porcentaje se distribuye dentro del valle de Nochixtlán, al sureste del GMA, sobre la Planicie aluvial, valles erosivos y una parte del Piedemonte. Otra parte muy pequeña en el Piedemonte dentro del valle de Yanhuitlán, lo cual es de esperarse en este tipo de zonas que suelen ser más acumulativas que erosivas. También lo podemos encontrar en la parte Noreste donde sólo ocupa el paisaje III, esto se debe, por una parte, a que las zonas con menor desarrollo de cauces se relacionan con zonas de parteaguas que permiten, por su geometría e inclinación, la dispersión del agua; y por otra parte está la condicionante litológica, la cual se compone en esa zona por rocas sedimentarias.

Valores bajos:

Estos valores ocupa 29% del área y se distribuye dentro de la zona sur en ambos valles, que son las zonas más bajas y con pendientes menores, ocupando en el valle de Yanhuitlán los paisajes X, IX y una parte del VIII y en el de Nochixtlán principalmente sus áreas de

Piedemonte (VIII), la Planicie aluvial (IX) y algunos valles erosivos (X). A partir de aquí se extiende hacia el Noreste sobre los paisajes VII, una parte del III y IV. En el Oeste, el rango bajo ocupa los paisajes XI, III y una parte del II y IX. Como se puede observar, se tiene una distribución similar pero en mayor porcentaje al rango muy bajo, esto debido a que son zonas de acumulación, y de menor formación de cauces debido a las de origen sedimentario que suelen tener mayor resistencia a la erosión. Otro factor a tomar en cuenta es la pendiente de estas zonas que va de muy baja a media.

Valores medios:

Este es el rango que predomina en el índice de densidad de disección (DD) y ocupa el 35% del área total de GMA; su distribución se puede dividir en tres partes, una rodeando al valle de Yanhuatlán a partir de la zona más alta del Piedemonte (VIII) hasta el paisaje VII principalmente, otra está hacia la zona Centro-Norte y se encuentra sobre los paisajes I, II y VII principalmente, y en menor proporción sobre el III y IV. Por último, se encuentra de forma importante en el Oeste de Centro a Norte, principalmente sobre el paisaje geomorfológico II, VII, IX y X. Aunque no parece tener un arreglo aparente, estos valores medios se establecen principalmente en las rocas de origen volcánico y parece ser una transición hacia las zonas más susceptibles.

Valores altos:

Posteriormente, está el rango de DD alto ocupando 28% del área, forma una franja de Norte a Sur en la zona Oeste del Geoparque, ocupa principalmente el paisaje VII, II y I, aunque también en esa zona se tienen algunos valles erosivos y en algunas partes del piedemonte de esta zona. Este rango parece tener una distribución definida que se asocia con las pendientes altas, zonas de mayor altitud o cercanas a ellas, así como el tipo de roca que son principalmente tobas y andesitas, así como algunas partes de la Formación Yanhuatlán.

Valores muy altos:

Finalmente, el rango que ocupa menor área 1%, es el de DD muy alto y se encuentra en el noroeste formando un polígono casi circular sobre el paisaje VII y X que pertenece a un gran valle erosivo, el cual es posible que sea la causa principal de tener el valor más alto de DD (Fig. 4.6).

Tomando en cuenta la distribución de los rangos de DD dentro del GMA, se observa una relación si se comparan con el mapa de pendientes, ya que la mayor parte de la zona que ocupa los rangos altos de DD coincide en gran parte con la zona donde las pendientes son mayores a 20° de inclinación y llegan a más de 45°.

A partir de este índice morfométrico podemos tomar en cuenta las estructuras geológicas como una posible relación entre los datos obtenidos y las mismas. Dentro de la zona de estudio se tienen varias fallas geológicas, sin embargo, es de nuestro interés la que se conoce como Falla Cieneguilla. Ésta se encuentra exactamente en la zona de mayor densidad de disección al Este del geoparque, de Norte a Sur (Fig. 4.7).

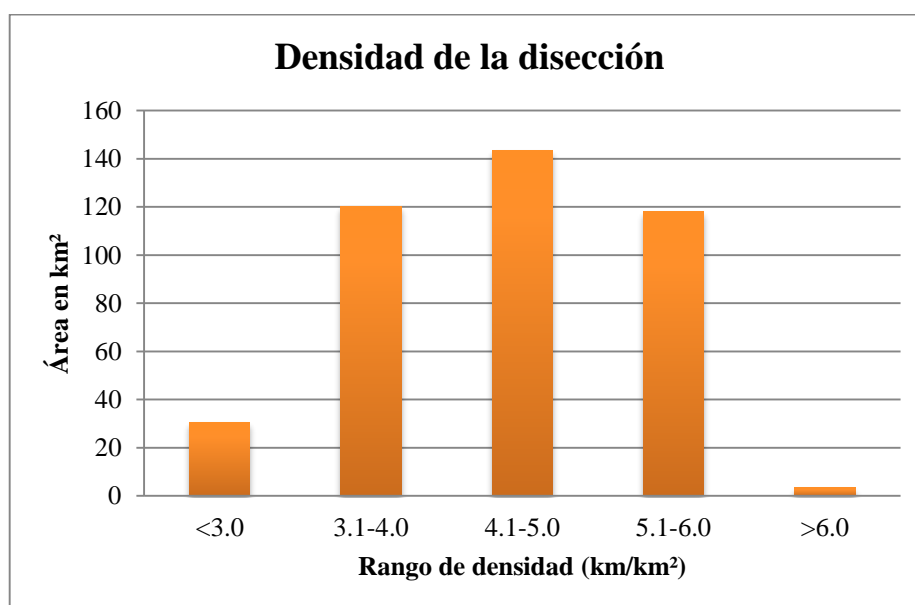


Figura 4.6 Histograma de densidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

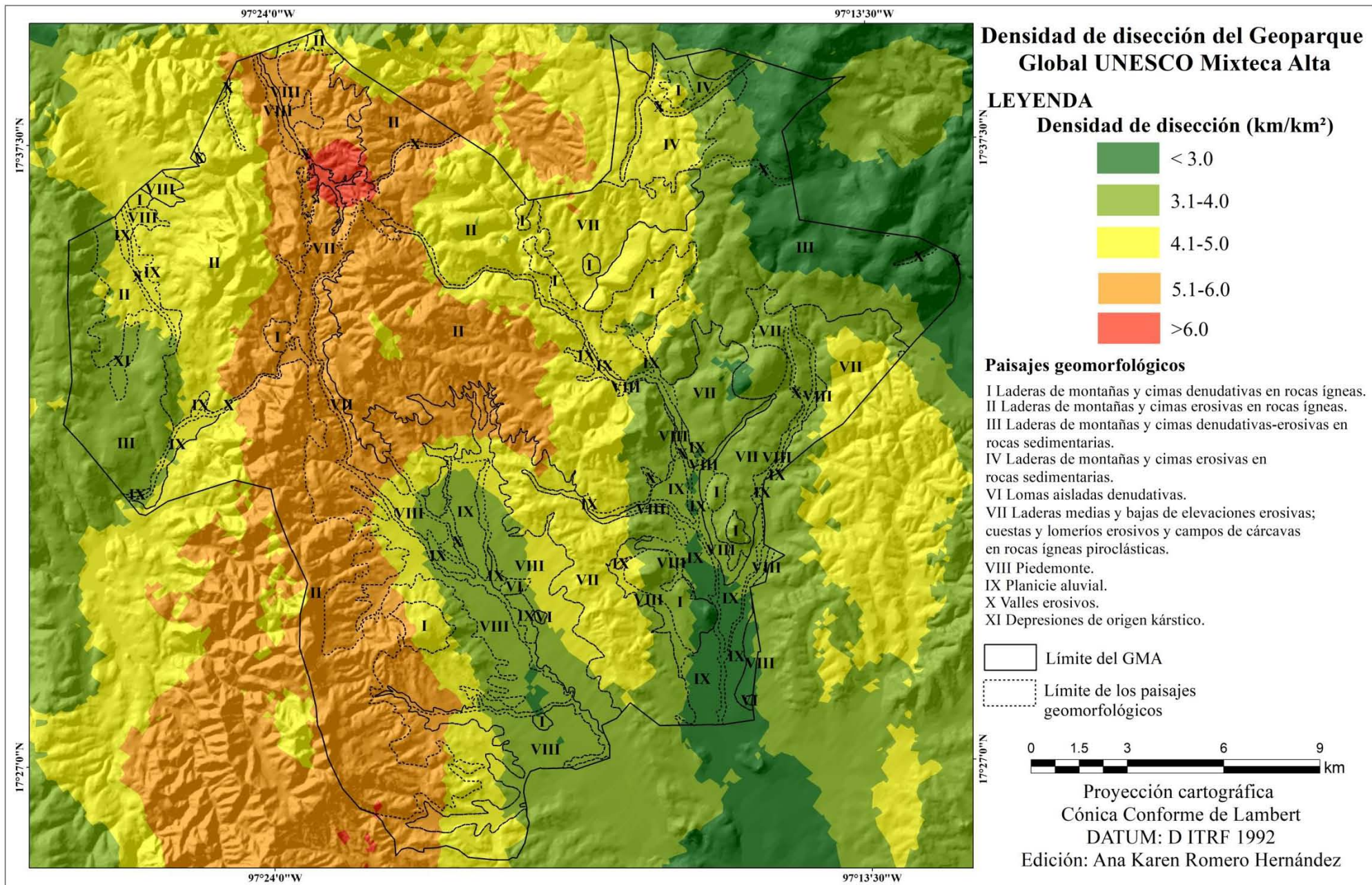


Figura 4.7 Mapa de densidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

4.1.4 Profundidad de disección

La profundidad de la disección se hizo en cinco valores que se clasifican en la tabla 4.3:

PROFUNDIDAD DE DISECCIÓN (m/km ²)	VALORES
< 40	MUY BAJO
40-100	BAJO
101-200	MEDIO
201-300	ALTO
>300	MUY ALTO

Tabla 4.3 Clasificación de la profundidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

El índice de profundidad de la disección (PD) es variable en el territorio del geoparque y va desde 40 metros o menos, hasta más de 300 m/km².

Valores muy bajos y bajos:

El bajo abarca apenas un 1.5% del área total de Geoparque, el rango bajo con 16% del área; coinciden con las zonas más bajas de los valles de Yanhuitlán y Nochixtlán donde se encuentran los paisajes VIII, IX y X; otra pequeña parte de estos rangos se encuentra en el norte en el paisaje IV (Fig. 4.8 y 4.9).

Valores medios:

Del área total del Geoparque 57% se encuentra en un rango medio de PD siendo así el valor predominante. Este rango se caracteriza por estar en las zonas montañosas y laderas principalmente y se asocia a la pendiente para generar la erosión vertical. Se localiza principalmente en el Centro-Este y Noreste del Geoparque sobre los paisajes geomorfológicos I, II, III, VII; y sobre la Planicie aluvial que se extiende del valle de Nochixtlán al Norte así como los valles erosivos de esa zona. Otra parte rodea el valle de

Yanhuitlán sobre los paisajes I, VII y parte del VIII. En el límite Oeste, éste rango ocupa los paisajes I, II, III, XI y una parte del Piedemonte (VIII) y la Planicie aluvial y valles erosivos de esta zona. En el Noroeste, este rango ocupa una parte del paisaje II, VII, VIII y X.

Valores altos:

Los rangos de PD alto ocupan 25% del área y son el segundo valor predominante de la zona. Se encuentran en el lado Oeste del GMA, forman una franja de norte a sur sobre los paisajes I, II y VII con sus respectivos valles erosivos, sobre la zona montañosa que se compone principalmente de rocas ígneas.

Valores muy altos:

El rango de PD muy alto ocupa apenas 0.5%, este valor define aéreas pequeñas de la zona de montaña, del paisaje geomorfológico II en la zona Oeste del GMA.

Los rangos de profundidad de disección tienen coincidencias con la densidad de la disección. Se observa un comportamiento similar en los rangos, bajos medios y altos; están en las mismas zonas y solo varían por ocupar algunos metros, más o menos, de diferencia. El rango que no llega a coincidir entre estos dos índices es el muy alto (en rojo), debido a que las profundidades muy altas están relacionadas con algunas cimas de montaña y las densidades se relacionan con zonas de muchos valles que no necesariamente son muy profundos.

De igual forma los datos obtenidos en este índice se relacionan con las zonas donde las pendientes son muy altas (20° a $> 45^\circ$). Y aunque el rango de PD alto no es el que

predomina, si es el que se presenta en la zona Este de Norte a Sur donde están las litologías de origen volcánico, las mayores altitudes, pendientes, y la Falla de Cieneguilla.

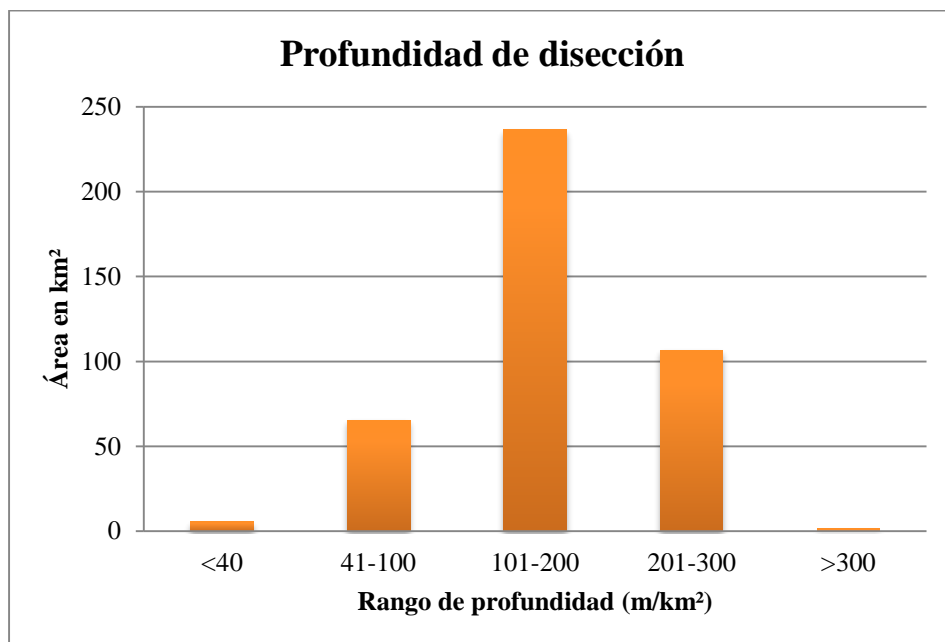


Figura 4.8 Histograma de profundidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

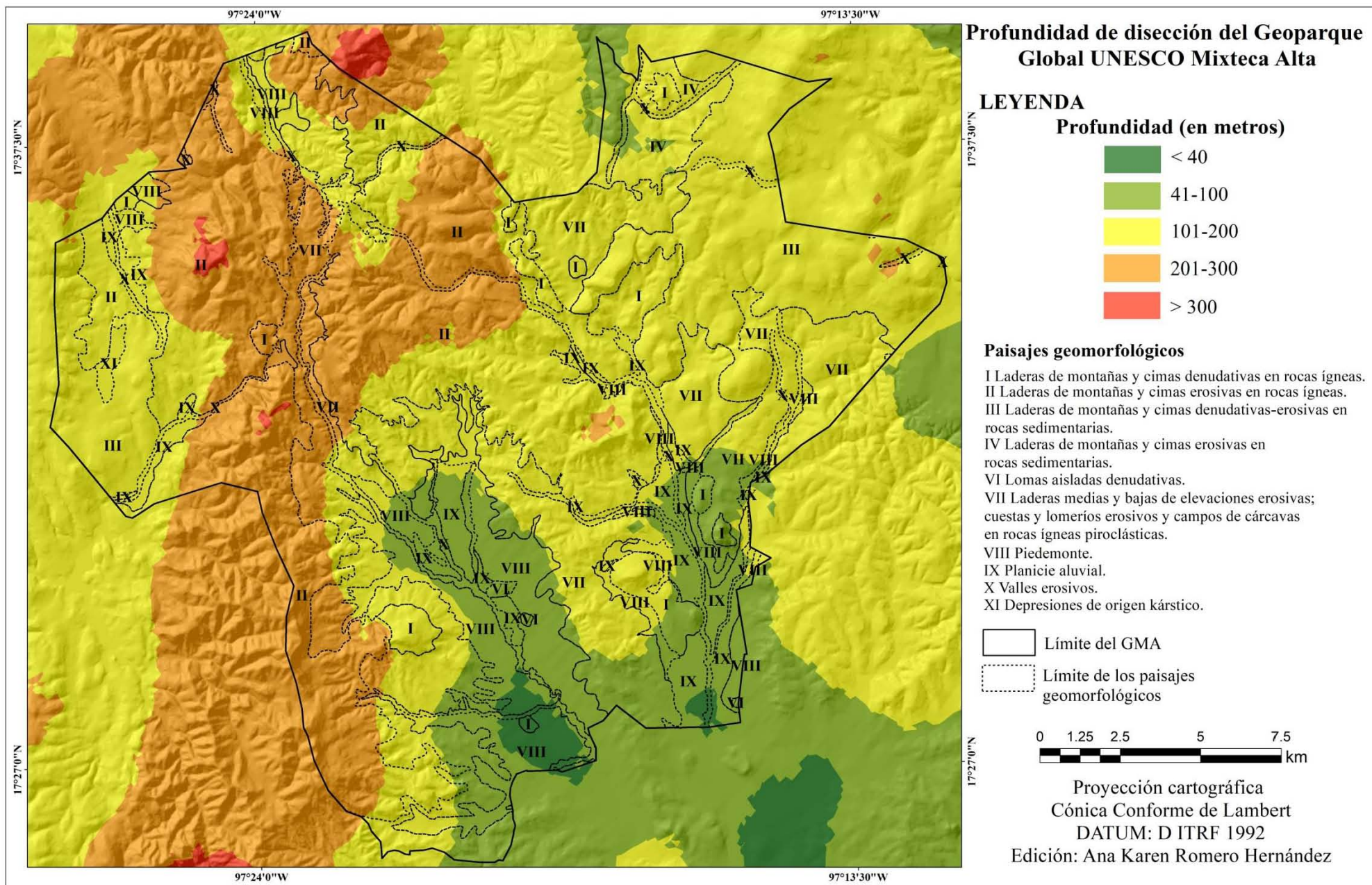


Figura 4.9 Mapa de profundidad de disección del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

4.1.5 Disección general

La disección general se realizó con cinco valores y se clasifican en la tabla 4.4:

DISECCIÓN GENERAL (km/km ²)	VALORES
< 5.0	MUY BAJO
5.1-15.0	BAJO
15.1-25.0	MEDIO
25.1-35.0	ALTO
>35.0	MUY ALTO

Tabla 4.4 Clasificación de la disección general del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Valores muy bajos:

El rango de DG muy bajo representa un 8% del área total y se distribuye dentro de los dos valles principales, sobre los paisajes de planicie aluvial X, valles erosivos IX y piedemonte VIII de esa zona, esto es característico de zonas planas u homogéneas con pocos cambios altitudinales (Fig. 4.10 y 4.11).

Valores bajos:

De acuerdo con los datos sobre la disección general (DG), predomina en 57% del área del GMA un rango bajo. Se distribuye principalmente en la zona Este del Geoparque de Norte a Sur y sobre casi todo el valle de Nochixtlán, en la zona Centro, y rodea el valle de Yanhuitlán sobre la zona de Piedemonte y el Paisaje VII principalmente, otra pequeña porción de este rango se encuentra en el límite Oeste sobre los paisaje II, III, VIII y IX.

Valores medios:

El segundo rango que predomina es el medio y ocupa 33% del área, su distribución forma una franja que va de Norte a Sur en el Oeste del Geoparque; principalmente en las zonas de montaña, con mayor altitud y pendiente, sobre los paisajes I, II y VII principalmente.

Valores altos y valores muy altos:

El rango de DG muy alto, equivale a 1.2% del área total y se distribuye sobre los paisajes II y VII. Define una pequeña área al Suroeste del geoparque. Junto al rango muy alto se encuentra una zona definida de menor tamaño con el rango alto (0.8% del área total del Geoparque) y se encuentra sobre la transición del paisaje II y VII. La zona en la que se encuentran estos dos rangos se caracteriza por tener pendientes muy altas, incluso mayores a 45°, lo cual puede ser el motivo principal de su distribución. Esto sumado a que justo en esa zona atraviesa una sector de la Falla de Cieneguilla y se observa un cambio altitudinal muy brusco.

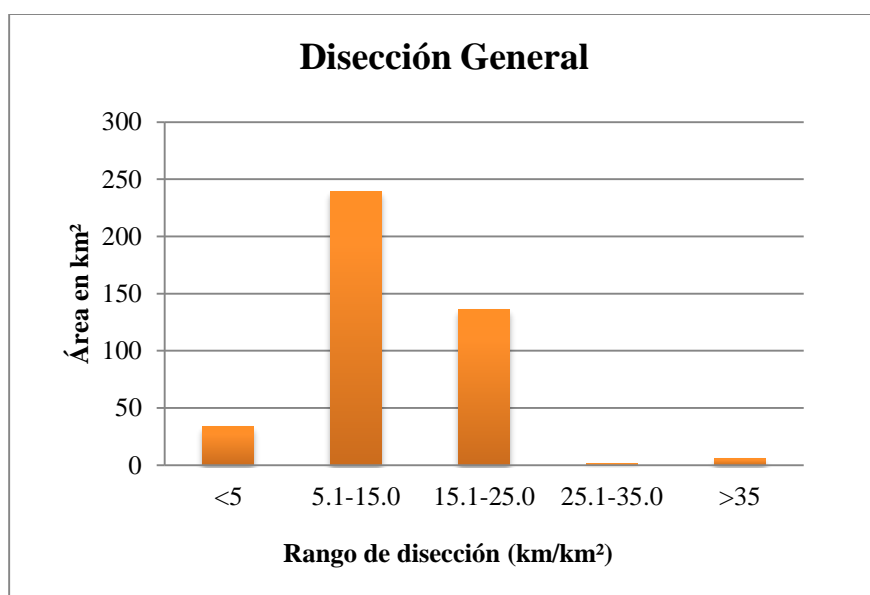


Figura 4.10 Histograma de disección general del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

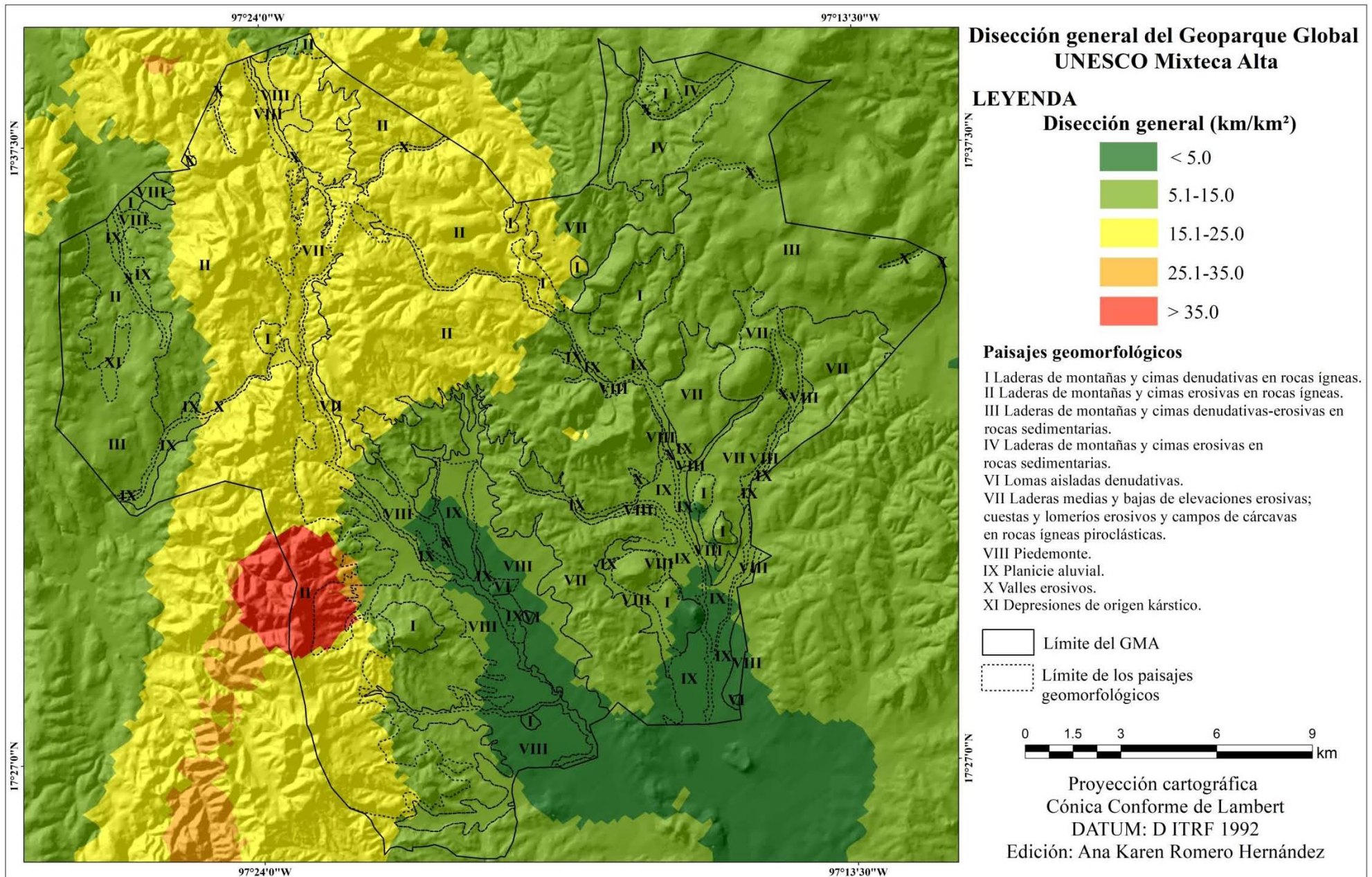


Figura 4.11 Mapa de disección general del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

4.1.6 Energía del relieve

La energía del relieve se realizó con cinco valores que se clasifican en la tabla 4.5:

ENERGÍA DEL RELIEVE (m/km ²)	VALORES
< 100	MUY BAJO
100-200	BAJO
201-300	MEDIO
301-400	ALTO
>400	MUY ALTO

Tabla 4.5 Clasificación de la energía del relieve del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

Valores muy bajos y bajos:

De acuerdo con los datos obtenidos, el GMA se caracteriza por tener en la mayor parte de su territorio un rango de energía del relieve (ER) que va de bajo (en 48% del área) a muy bajo (en 32% del área). El muy bajo se distribuye principalmente en la zona sur dentro de los valles aluviales en los paisajes de Planicie aluvial, Valles erosivos y Piedemonte principalmente, y una parte del paisaje VII. Este rango se distribuye también en el Noreste en los paisajes III, IV y VII; y en el límite Oeste donde se tienen los paisajes II, III, VIII, XI y X. El rango bajo se encuentra en las zonas delimitadas como paisaje VII en el Sur y del centro al Norte se distribuye por las zonas de altitud media sobre casi todos los paisajes geomorfológicos.

Valores medios:

El rango de energía media se distribuye en las laderas medias y cimas de montaña de la zona Centro-Norte, y sobre la zona montañosa del lado Oeste en los paisajes I y II principalmente, y ocupa 17% del área del Geoparque.

Valores altos y muy altos:

El rango de ER alto se distribuye en el Oeste de N-S sobre las laderas altas y no en cimas de montaña, las de rango muy alto definen áreas más pequeñas y se encuentran en el Noroeste y coincide con las zonas de mayor profundidad de disección; y al Suroeste con la zona de DG muy alta. Ambos rangos encajan con el paisaje geomorfológico II. Además se observa una relación con las laderas que dieron los datos de pendiente alto y muy alto, estos dos últimos rangos juntos ocupan 3% del área total del Geoparque (Fig. 4.12 y 4.13).

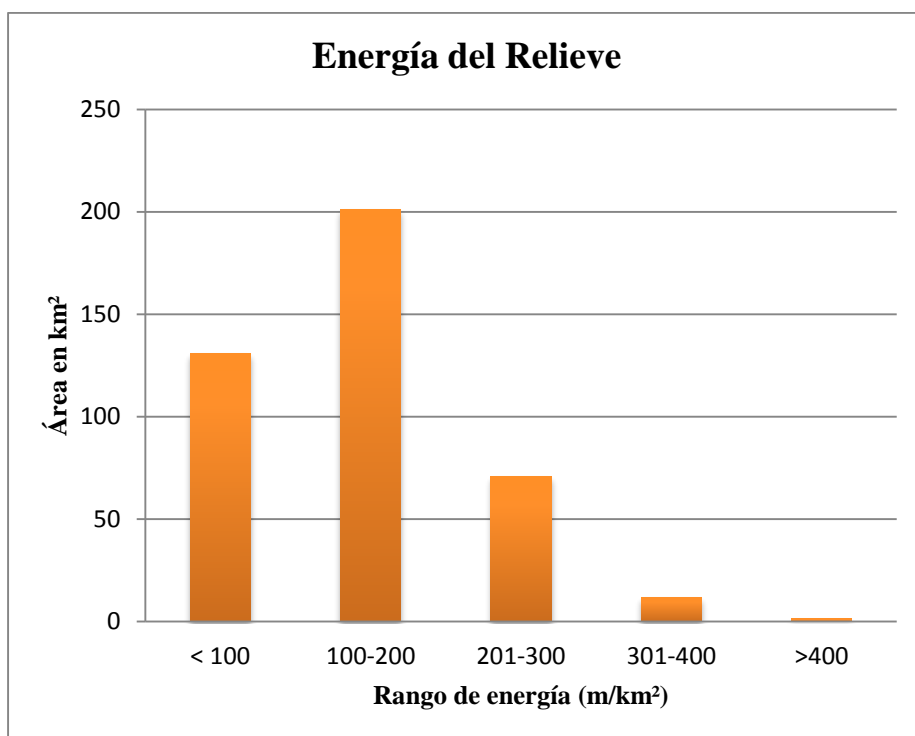


Figura 4.12 Histograma de energía del relieve del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

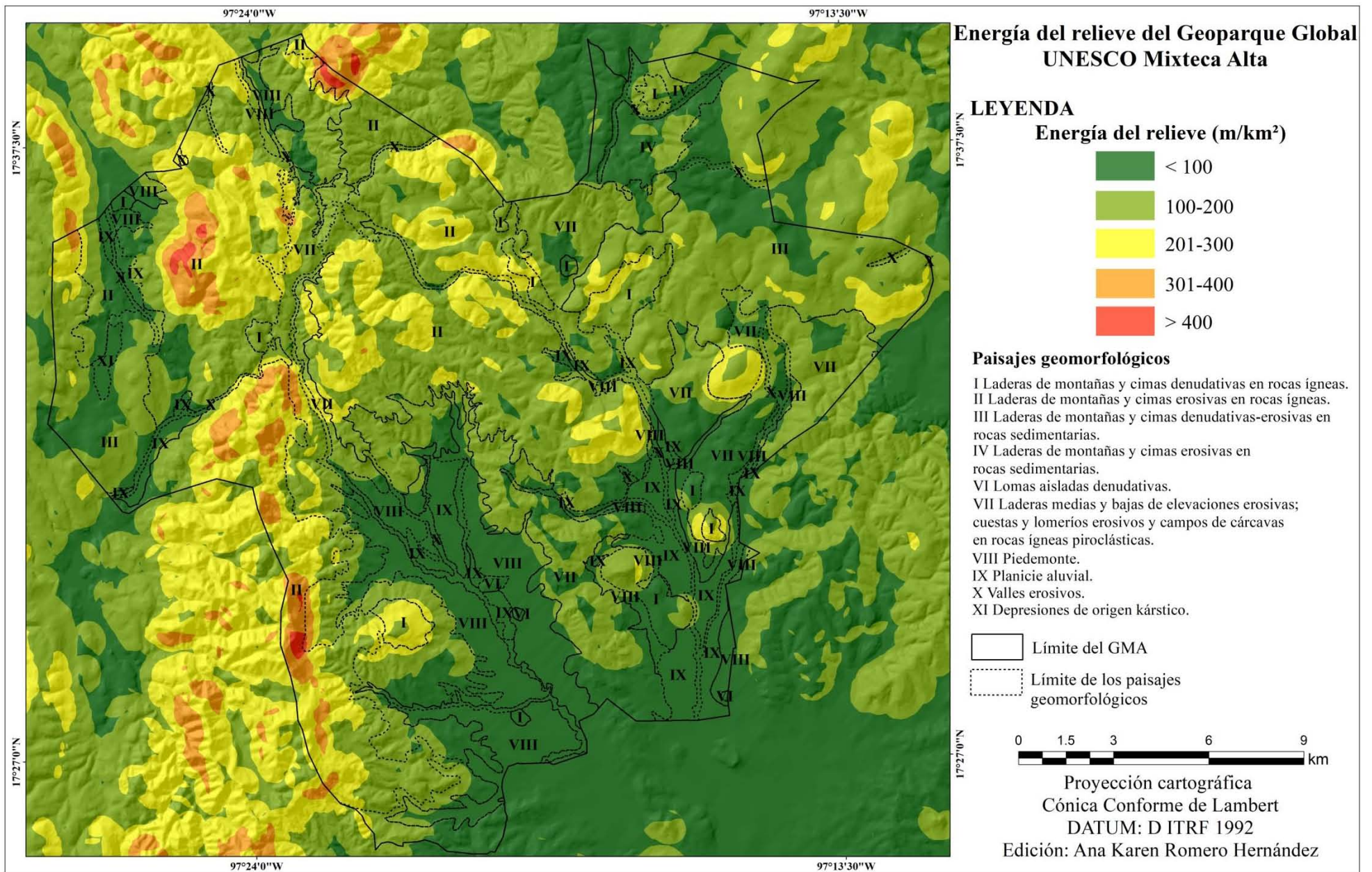


Figura 4.13 Mapa de energía del relieve del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta.

4.2 Características Morfométricas por unidad geológica

4.2.1 Formación San Isidro (Kisi)

La Formación San Isidro tiene un área total de 54 kilómetros cuadrados dentro del GMA y se ubica en el sector Noreste. Pertenece a los paisajes geomorfológicos III (Laderas de montaña y cimas denudativas- erosivas en rocas sedimentarias) y VII (Laderas medias y bajas de elevaciones erosivas cuevas y lomeríos erosivos y campos de cárcavas en rocas ígneas piroclásticas).

Altimétricamente, el rango más bajo de esta unidad se encuentra a 2150 msnm (que coincide con la zona Centro-Este del Geoparque) y el más alto es de 2800 msnm (en el Noreste). La altitud que predomina con 22% de su superficie, se encuentra en el rango de 2501-2550 msnm. En total 60% se encuentra de forma ascendente de 2101 a 2550 msnm y 40% de 2551 a 2800 msnm (Fig. 4.14A y 4.15A).

Pendiente

La Formación San Isidro tiene siete de los ocho rangos de pendiente que se utilizaron. La mayor parte de su superficie se encuentra entre los 3.1° y los 20° grados de inclinación (del rango bajo al medio). El que predomina en 41% del área total es el rango medio que va de 6.1° a 12.0° grados de inclinación, 27% en el rango de 12.1° a 20.0° y 14% en el rango bajo de 3.1° a 6.0°. El resto del área, 10% se encuentra entre 0° y 3° (muy bajo) y 8% entre 20.1° a 45° (alto). Las pendientes más bajas se encuentran en las zonas que están al Norte de esta unidad geológica y las altas se encuentran del centro al sur, las pendientes medias se distribuyen sobre toda la unidad (Fig. 4.14B y 4.15B).

Densidad de disección (DD)

Respecto a la densidad de la disección, el 89% del área total de la Formación San Isidro se encuentra en los rangos más bajos que son de menor a 3 y hasta 6 km/km². De estos el 52% se ubica entre 3.1-4.0 km/km² y 37% es menor a 3 km/km². El 11% restante se encuentra entre 4.1 a 6.0 km/km². Se distribuye el rango muy bajo en el lado Este, bajo en el centro y medio en el Oeste, la zona del rango alto no se percibe cartográficamente (Fig. 4.14C y 4.15C).

Profundidad de disección (PD)

El 98% de la superficie de esta unidad geológica se encuentra en un rango de PD media que es de 101 a 200 m/km². El 2% restante se divide entre un rango bajo de 41 a 100 m/km² (.5%) y uno alto de 201 a 300 m/km² (1.5%). Su distribución es con el rango medio en casi toda la unidad y alto en una pequeña zona en el Este, la zona que ocupa el rango bajo no se percibe cartográficamente (Fig. 4.14D y 4.15D).

Disección general (DG)

Con respecto a la DG el 98% de la superficie se encuentra en un rango bajo que va de 5.1 a 15.0 km/km². El 1.6% se encuentra en el rango medio de 15.1 a 25.0 km/km² y .4% en el rango muy bajo <5 km/km². Cartográficamente, predomina el rango bajo en toda el área de la Formación geológica y los otros dos rangos están en la zona Oeste aunque no se logran percibir (Fig. 4.14E y 4.15E).

Energía del relieve (ER)

La energía de relieve en la Formación San Isidro se encuentra en tres rangos, predomina en 66% del área el rango bajo (100-200 m/km²), posteriormente en 23% muy bajo (< 100 m/km²) y finalmente el rango medio (201-300 m/km²) en 11% del área total. El rango muy

bajo se distribuye una parte en el Norte y otra al Sur y el rango medio se encuentra en pequeñas zonas del Este y Oeste y el resto lo cubre el rango bajo (Fig. 4.14F y 4.15F).

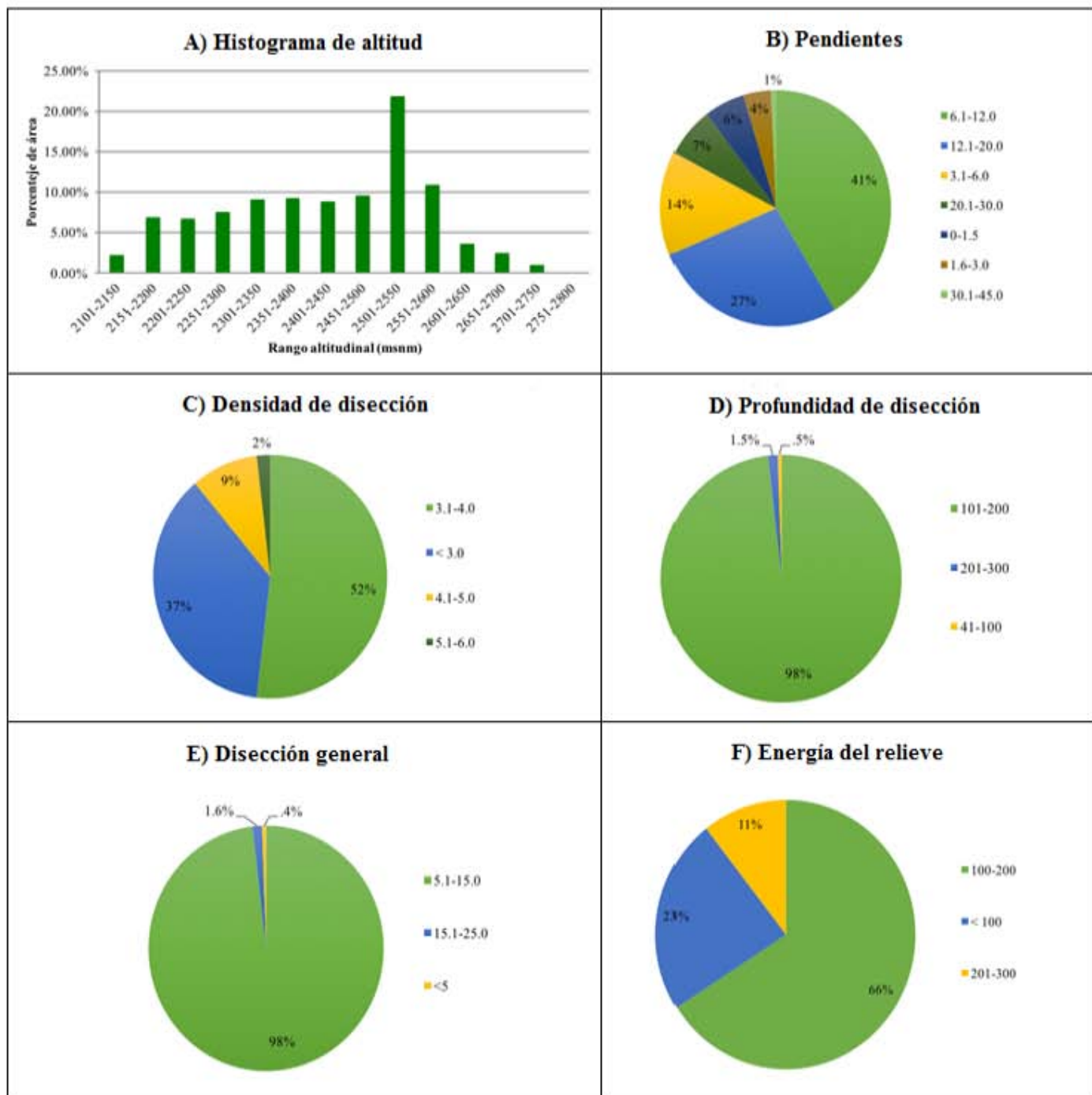


Figura 4.14 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Formación San Isidro (Kisi).

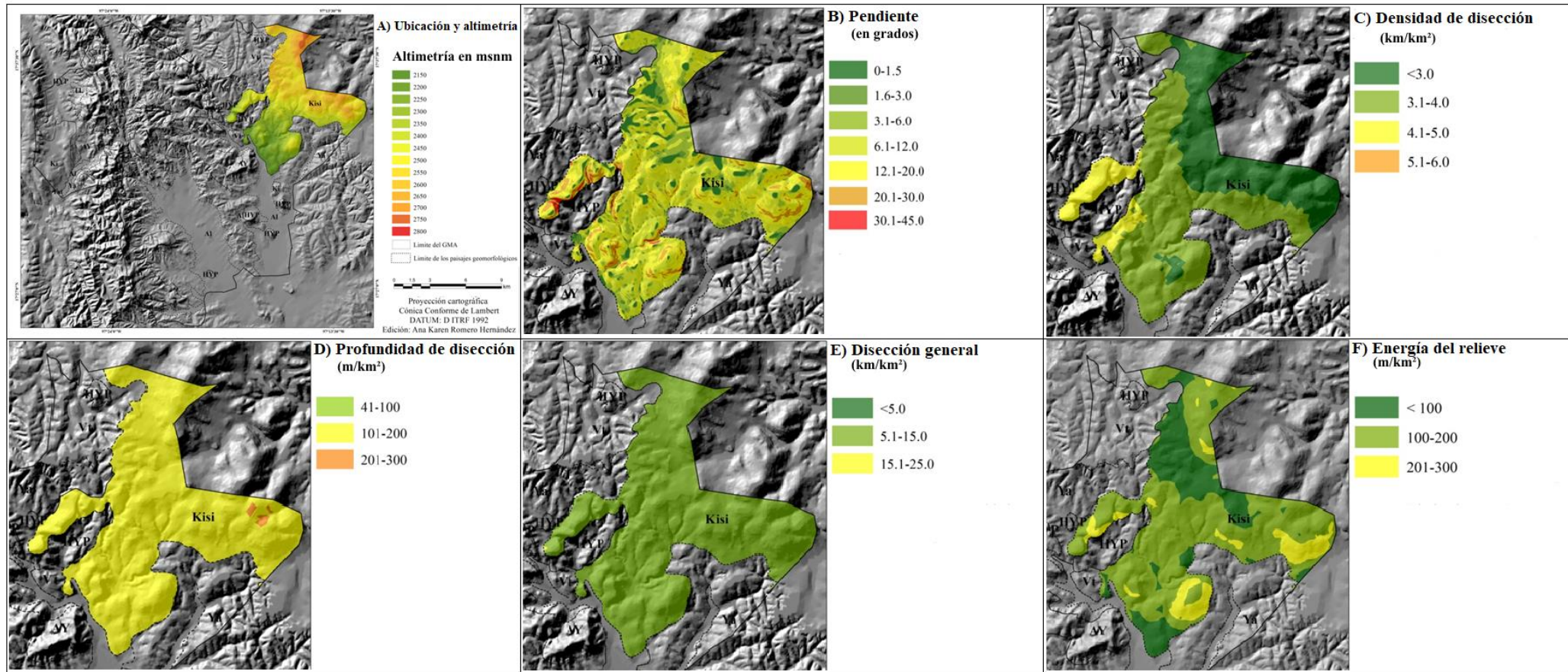


Figura 4.15 Mapas morfométricos de la Formación San Isidro (Kisi).

4.2.2 Caliza Teposcolula (Ki)

La unidad geológica Caliza Teposcolula (Ki) tiene un área total de 16 km² y se localiza en dos partes, un polígono mayor en el límite Oeste que pertenece a los paisajes geomorfológicos III (Laderas de montaña y cimas denudativas- erosivas en rocas sedimentarias) y XI (Depresión de origen Kárstico.) y uno menor en el Este que pertenece al paisaje I (Laderas de montaña y cimas denudativas en rocas ígneas) dentro de GMA. Altimétricamente, el rango más bajo de esta unidad se encuentra a 2051 msnm y el más alto es de 2650 msnm. El rango altitudinal que predomina es de 2351-2400 msnm que ocupa 28% de su superficie, en segundo lugar está el rango de 2301-2350 msnm que es el 24% y otro 20% se encuentra de 2401-2450 msnm. En total 62% se encuentra de forma descendiente de 2351 a 2650 msnm y 38% de forma ascendente de 2051 a 2350 msnm. Las mayores altitudes se distribuyen en el Norte y límite Oeste de esta unidad, las menores en el Centro y las medias en el Este y Suroeste (Fig. 4.16A y 4.17A).

Pendiente

La unidad Caliza Teposcolula tiene siete rangos de pendiente. Predominan los rangos de pendiente media. En 38% de la superficie total el rango de 6.1°-12.0° y en 19% el rango de 12.1°-20.0° (grados de inclinación). Otro 36% de la superficie está entre los rangos bajos que van de 0° a 6°. Apenas 7% de la superficie tiene una pendiente entre 20° y 45°. Dentro del polígono principal que representa esta unidad, las pendientes medias se encuentran principalmente en el Este, Sur y parte del Oeste. Las pendientes bajas se concentran en el Centro y las altas en el Norte y Oeste. El polígono menor tiene principalmente pendientes medias (Fig. 4.16B y 4.17B).

Densidad de disección (DD)

En esta unidad geológica se presenta dos rangos de DD y va de bajo a medio. En 93% del área el de 3.1-4.0 km/km² y en el 7% restante de la superficie total el de 4.1-5.0 km/km². El rango medio ocupa una pequeña parte al Noreste del polígono principal. El resto de la superficie es de rango bajo (Fig. 4.16C y 4.17C).

Profundidad de disección (PD)

En cuanto al índice de profundidad de disección dentro de esta unidad predomina el rango medio ya que 95% de su área total va de 101-200 m/km². El resto de la superficie se divide en 4% un rango de PD bajo (41-100 m/km²) y sólo en 1% el rango de PD alto (201-300 m/km²). El rango medio se distribuye en toda la unidad del polígono principal, solo una pequeña parte en el Norte es de rango alto. El rango bajo cubre el segundo polígono que es de menor tamaño (Fig. 4.16D y 4.17D).

Disección general (DG)

La Caliza Teposcolula tiene dos rangos de DG. El muy bajo (<5 km/km²) en 2% de la superficie y el bajo (5.1-15.0 km/km²) en 98% de la superficie total. Cartográficamente solo se representa con claridad el rango bajo, el muy bajo se encuentra al Sur del polígono principal, aunque no se percibe (Fig. 4.16E y 4.17E).

Energía del relieve (ER)

En esta unidad geológica se tienen cuatro de los cinco rangos de energía del relieve (ER). Predomina la ER baja (100-200 m/km²) en 51% del área y la ER muy baja (< 100 m/km²) en 39% del área. El 10% de área restante tiene una ER media (201-300 m/km²) en 9% y en 1% se encuentra la ER alta (301-400 m/km²). Los rangos de energía se distribuyen dentro del polígono principal el rango muy bajo en el Centro, el bajo en el Este y Oeste y el rango

medio y alto en el Norte. El segundo polígono es de rango muy bajo y una pequeña zona al sur de éste tiene rango bajo (Fig. 4.16F y 4.17F).

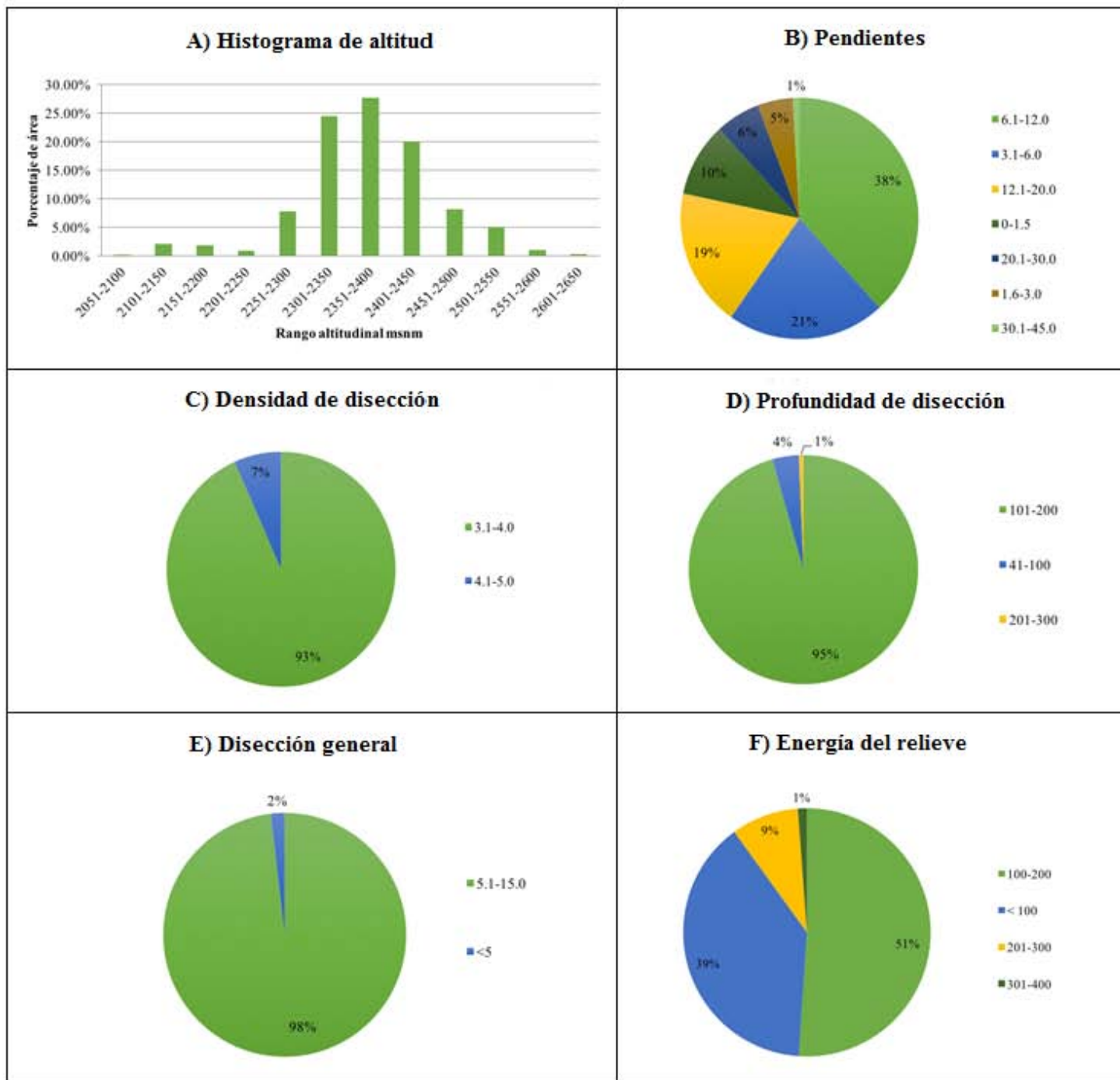


Figura 4.16 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Caliza Teposcolula (Ki).

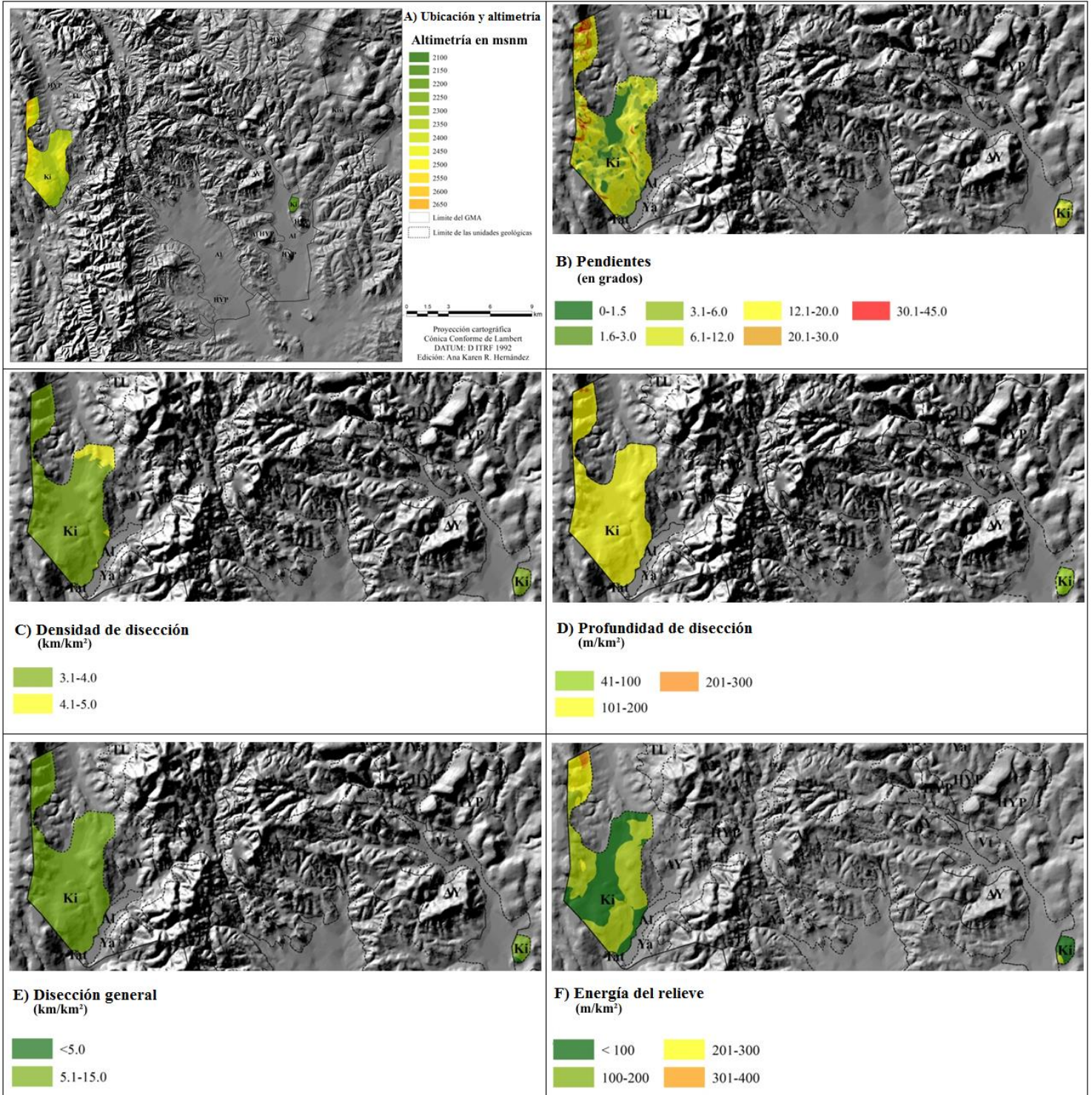


Figura 4.17 Mapas morfométricos de la Caliza Teposcolula (Ki).

4.2.4 Formación Yanhuitlán (Ya)

La Formación Yanhuitlán tiene un área total de 124 kilómetros cuadrados y es la unidad de mayor tamaño y se distribuye por todo el GMA, principalmente alrededor de ambos valles (Yanhuitlán y Nochixtlán) y en el Norte y Noroeste dentro del GMA. Pertenecen principalmente a los paisajes geomorfológicos II y VII, en algunas zonas llega al VIII, IX y X.

Altimétricamente, el rango más bajo de la unidad se encuentra a 2100 msnm y el más alto a 2650 msnm. La Formación Yanhuitlán tiene 16% de área en los dos rangos menores, 2051-2100 (2%) y 2101-2150 (14%). El rango que ocupa mayor área de esta unidad es de 2151-2200 (19%) y a partir de aquí conforme aumenta la altitud desciende el porcentaje de área que ocupa cada rango de forma gradual. Las altitudes medias y altas se localizan principalmente en el Norte y Oeste, y las altitudes bajas en el resto de la Formación principalmente en las zonas más al Sur (Fig. 4.18A y 4.19A).

Pendiente

En cuanto al índice de pendiente, la Formación Yanhuitlán se caracteriza por tener los ocho rangos establecidos. En esta unidad predominan en 67% del área total las pendientes medias (de 6.1°-12.0° en 37% y de 12.1°-20.0° en 27%). Posteriormente se encuentra el rango de pendiente bajo en 22% del área (de 3.1°-6.0° en 16% y de 1.6°-3.0° en 6%) y el rango de pendiente muy bajo (de 0°-1.6°) en 5% del área. Las pendientes altas ocupan 8.6% del área total (de 20.1°-30.0° en 8% y de 30.1°-45.0° en .6%). El rango muy alto (< 45°) apenas llega a estar en 0.4% del área total de esta Formación geológica. Las pendientes bajas se distribuyen al Sur, Noroeste y Este. Las pendientes medias predominan en toda la

Formación y por último las pendientes altas en la zona Norte, Oeste y Noroeste (Fig. 4.18B y 4.19B).

Densidad de disección (DD)

Dentro de la Formación Yanhuitlán también se encuentran todos los rangos de DD, el rango DD muy bajo ($< 3.0 \text{ km/km}^2$) y DD muy alto ($> 6.0 \text{ km/km}^2$) ocupan apenas el 2% del área. Predomina en 45% el rango de DD media ($4.1\text{-}5.0 \text{ km/km}^2$), posteriormente está el rango de DD alto ($5.1\text{-}6.0 \text{ km/km}^2$) en 31% del área. Por último está el rango de DD bajo en 22% del área total de esta Formación geológica. El rango medio y bajo se distribuyen en el límite que rodea el valle de Yanhuitlán, la zona Norte y los Límites Este y Oeste. El rango alto se distribuye en la zona Oeste de Norte a Sur y el rango muy alto se localiza en una pequeña zona del Noroeste (Fig. 4.18C y 4.19C).

Profundidad de disección (PD)

También se tienen los cinco rangos de profundidad de disección. Predomina el rango de PD medio ($101\text{-}200 \text{ m/km}^2$) en 69% del área total de la Formación Yanhuitlán. Otro 16% lo ocupa el rango alto ($201\text{-}300 \text{ m/km}^2$) y 14% el rango bajo ($41\text{-}100 \text{ m/km}^2$). Por último el rango muy bajo ($< 40 \text{ m/km}^2$) y el muy alto ($> 300 \text{ m/km}^2$) ocupan en conjunto 1% del área. El rango bajo se distribuye al Sur y Este en los límites de los valles principales al igual que el rango medio, pero este a su vez se presenta en la zona Norte, Oeste y Noroeste. El rango alto se localiza en sector Oeste en una franja de Norte a Sur (Fig. 4.18D y 4.19D).

Disección general (DG)

A pesar de que los cinco rangos de la disección general están presentes en la Formación Yanhuitlán predominan solo dos rangos, el bajo ($5.1\text{-}15.0 \text{ km/km}^2$) en 69% del área y el rango medio ($15.1\text{-}25.0 \text{ km/km}^2$) en 27% del área. El 4% restante se divide en 1.9% el

rango muy bajo ($< 5 \text{ km/km}^2$), en 1.7% el rango muy alto ($>35 \text{ km/km}^2$) y en .4% el rango alto ($25.1\text{-}35.0 \text{ km/km}^2$). El rango muy bajo se localiza al Sur y el bajo en la zona Centro y Sur que rodea el valle de Yanhuitlán, también en el Este, Norte y Oeste. El rango medio se localiza en el Oeste en una franja continua que comienza Norte y se interrumpe en la zona Centro. Finalmente, los rangos muy alto y alto se localizan hacia el suroeste (Fig. 4.18E y 4.19E).

Energía del relieve (ER)

En la Formación Yanhuitlán predomina el rango de ER bajo ($100\text{-}200 \text{ m/km}^2$) en 61% del área total, y en 32% se tiene el rango de ER muy bajo ($< 100 \text{ m/km}^2$). El área restante se divide en 6% de área el rango medio de ER ($201\text{-}300 \text{ m/km}^2$) y en 1% de área el rango alto de ER ($301\text{-}400 \text{ m/km}^2$). La energía del relieve muy baja y baja se distribuye por toda la Formación de forma similar. Las zonas con ER media y alta son pequeñas y se localizan principalmente en el lado Oeste. En el Norte y Este hay pequeñas zonas de rango medio (Fig. 4.18F y 4.19F).

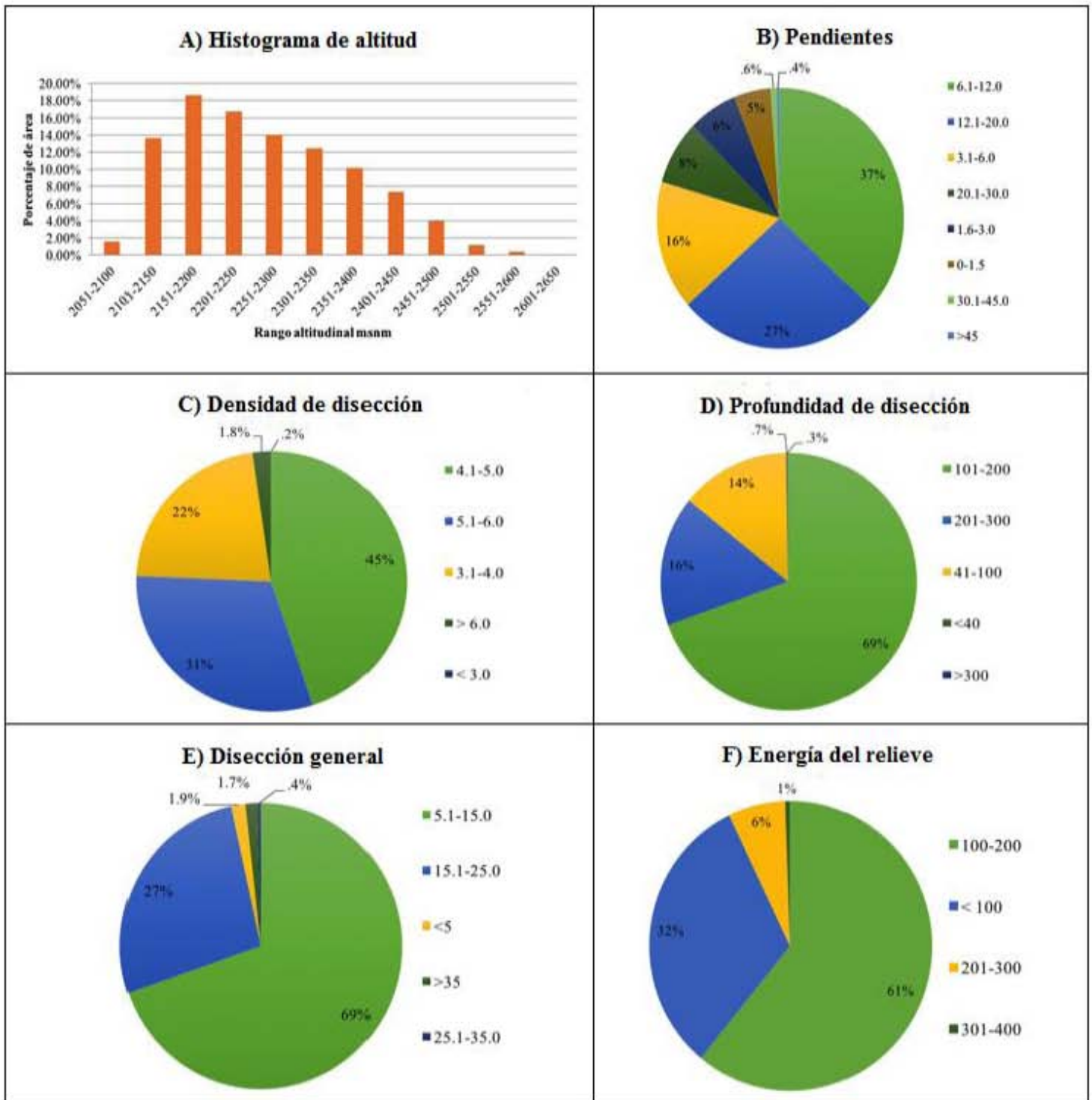


Figura 4.18 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Formación Yanhuatlán (Ya).

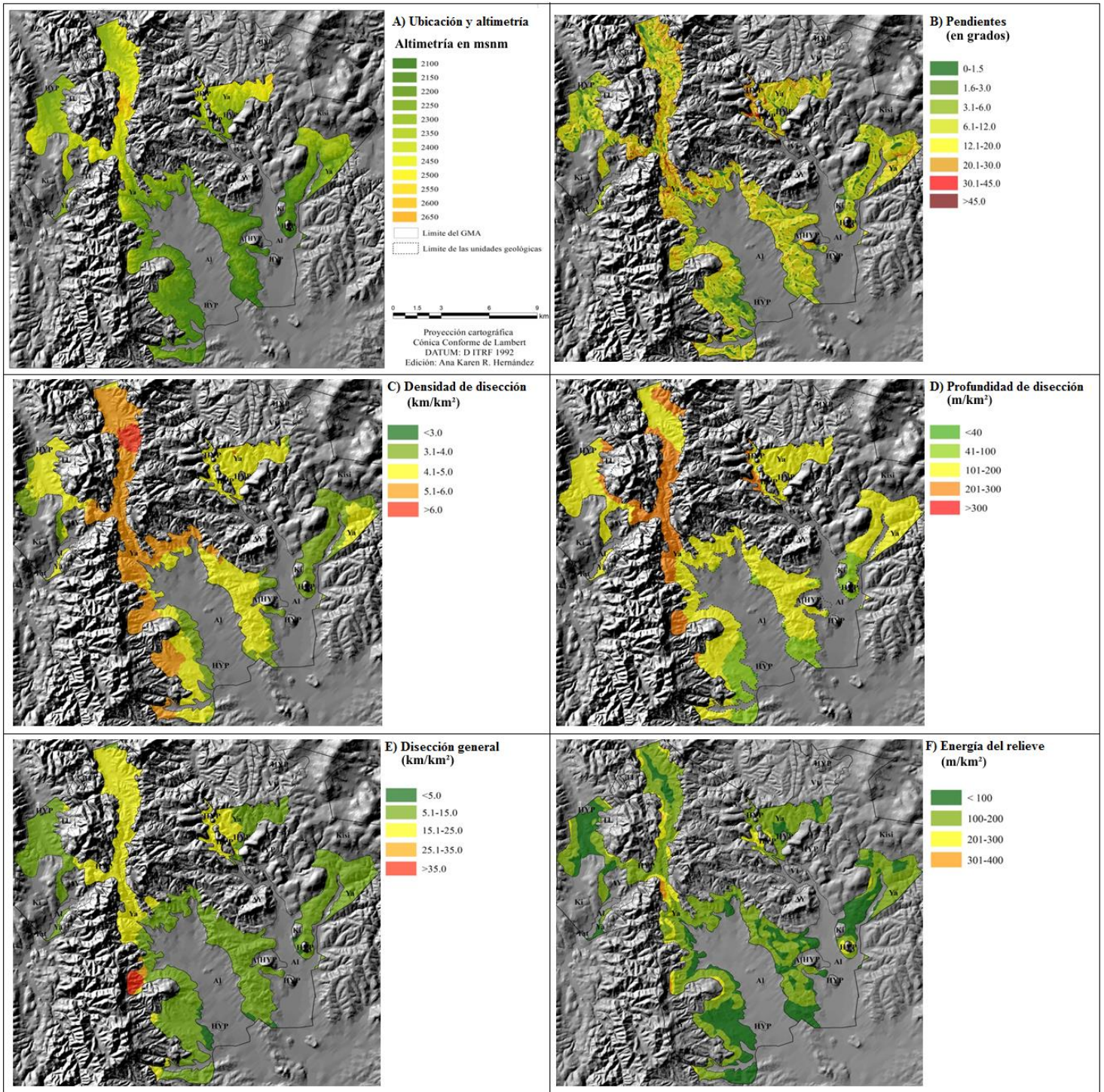


Figura 4.19 Mapas morfométricos de la Formación Yanhuilán (Ya).

4.2.5 Depósito Teotongo (Vt)

El Depósito Teotongo tiene un área total de 12 kilómetros cuadrados y se localiza un polígono mayor al Norte que pertenece al paisaje geomorfológico IV (Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas sedimentarias) y uno menor cerca del Centro que pertenece al paisaje II (Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas ígneas) dentro del GMA.

Altimétricamente, el rango más bajo de esta unidad se encuentra a 2150 msnm y el más alto a 2550 msnm. El Depósito Teotongo tiene la mayor parte de su superficie, 46% del área total, en el rango altitudinal de 2401-2450 msnm, 25% de 2351-2400 msnm y 18% de 2451-2500 msnm. El 15% restante está entre los 2100 a 2350 y 2550 msnm. el polígono principal de esta unidad geológica va de altitudes medias al Norte a altas en el Sur y bajas en el segundo polígono (Fig. 4.20A y 4.21A).

Pendiente

El Depósito Teotongo tiene seis rangos de pendiente, predomina el rango medio de inclinación en 64% del área total (de 6.1°-12.0° en 38% y de 12.1°-20.0° en 26%). El rango muy bajo en 23% del área (de 3.1°-6.0° en 16% y de 1.6°-3.0° en 7%). Por último, en 10% se encuentra el rango muy bajo (0|-1.5°) y en 3% el rango alto (20.1°-30.0°). Las pendientes altas se distribuyen en el lado Este del polígono principal, las medias y bajas se distribuyen de manera similar por todo el polígono. En el segundo polígono predominan las pendientes medias (Fig. 4.20B y 4.21B).

Densidad de disección (DD)

En esta unidad geológica predomina la DD media (4.1-5.0 km/km²) en 76% del área total. El 24% restante se divide en tres rangos, 21% tiene DD baja (3.1-4.0 km/km²), 2.9% tiene DD muy baja (< 3.0 km/km²) y mínimamente en 0.1% tiene una DD alta (5.1-6.0 km/km²). En el polígono principal se distribuyen en el Este los rangos muy bajo y bajo, en el Centro

y Oeste está el rango medio. El segundo polígono solamente tiene rango medio (Fig. 4.20C y 4.21C).

Profundidad de disección

El rango de profundidad de la disección que presenta esta unidad geológica es principalmente medio (101-200 m/km²) en 79% de su área y en el 21% de área restante tiene el rango de PD bajo (41-100 m/km²). El rango de PD bajo se encuentra en el lado Noroeste del polígono principal y el resto de la unidad tiene rango medio (Fig. 4.20D y 4.21D).

Disección general (DG)

El Depósito Teotongo tiene en el 100% de su área un rango de DG bajo que va de 5.1 a 15.0 km/km² (Fig. 4.20E y 4.21E).

Energía del relieve (ER)

El rango de energía del relieve que presenta es muy bajo (< 100) en 67% de su área y el rango de ER bajo (100-200 m/km²) en el 33% de área restante. El rango bajo se localiza en el lado Este y Sur del polígono principal, el resto es de rango muy bajo. El segundo polígono tiene rango bajo a excepción de una pequeña parte al Noroeste que tiene rango muy bajo (Fig. 4.20F y 4.21F).

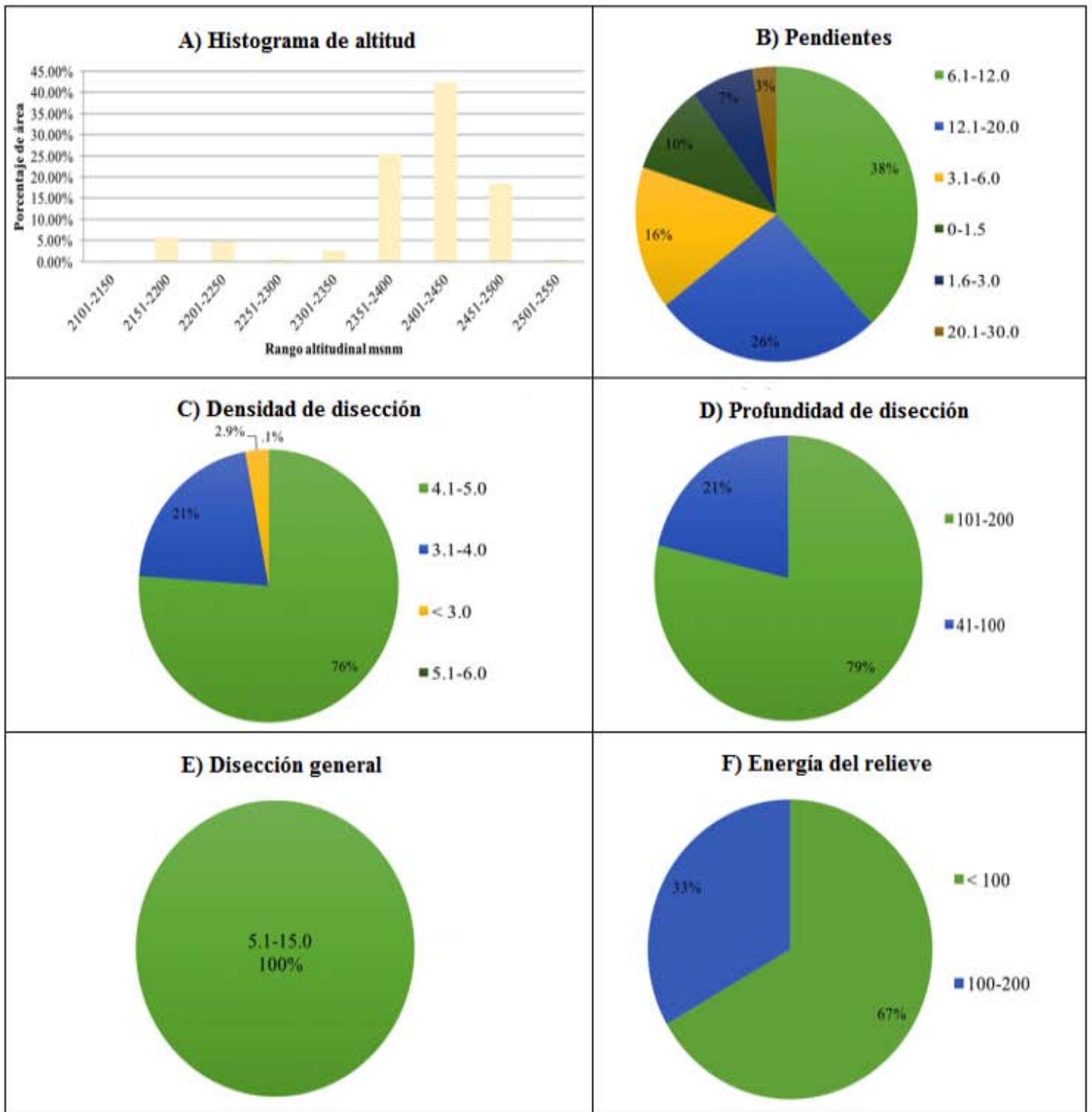


Figura 4.20 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico del Depósito Teotongo (Vt).

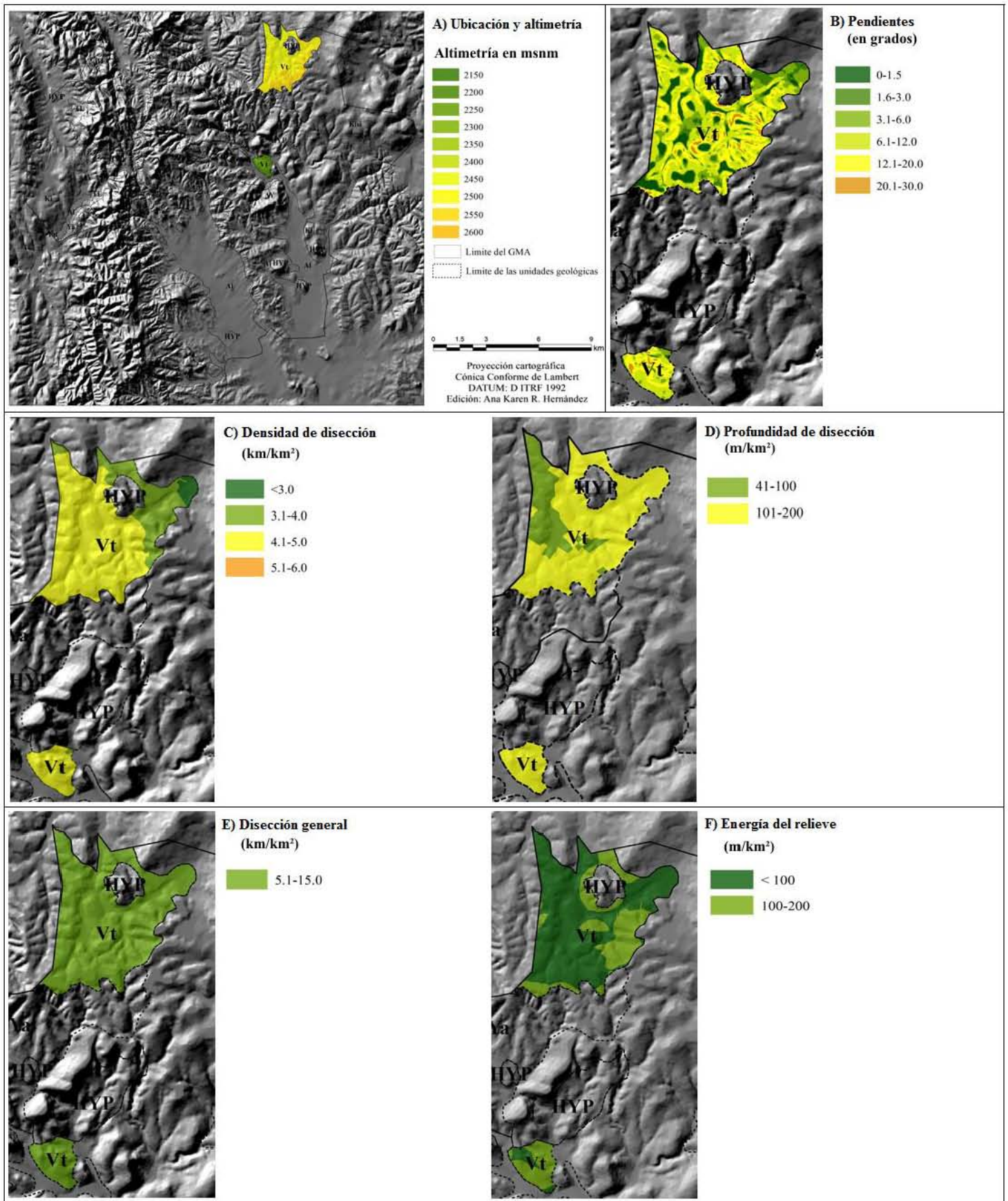


Figura 4.21 Mapas morfométricos del Depósito Teotongo (Vt).

4.2.6 Toba Llano de Lobos (TL)

La unidad geológica Toba Llano de Lobos tiene un área total de 58 kilómetros cuadrados y se localiza principalmente en el Oeste, Noroeste y Centro dentro del GMA. Además esta unidad pertenece al paisaje II (Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas ígneas) principalmente laderas.

Altimétricamente, el rango más bajo de esta unidad se encuentra a 2150 msnm y el más alto a 2700 msnm. El 53% de su superficie se encuentra entre los 2301 y 2450 msnm y un 13% en el rango de 2451-2500 msnm. De los 2501 a 2700 msnm se encuentra 13% del área y finalmente de las zonas más bajas de 2150-2300 msnm se encuentra el 21% restante del área total de esta unidad geológica. Las mayores altitudes se localizan al centro de la unidad y las bajas hacia el Sureste (Fig. 4.22A y 4.23A).

Pendiente

Esta unidad geológica tiene los ocho rangos de pendiente establecidos. Predominan en 60% del área las pendientes medias (de 12.1°-20.0° en 36% y de 6.1°-12.0° en 24%). En segundo lugar está el rango de pendientes altas en 29% del área (de 20.1°-30.0° en 24% y de 30.1°-45.0° en 5%). Las pendientes bajas y muy bajas ocupan en conjunto el 10.8% restante de área. Finalmente una mínima parte (en .2% de área) se encuentra el rango de pendiente muy alta (>45°). Los rangos de pendientes mayores se localizan en Norte y Centro de la unidad geológica. Las pendientes menores se localizan principalmente en el Sureste (Fig. 4.22B y 4.23B).

Densidad de disección (DD)

Presenta principalmente el rango de DD alto (5.1-6.0 km/km²) en 62% del área total de esta unidad. Otro 34% está en un rango de DD medio (4.1-5.0 km/km²). Finalmente el área restante se divide en 3% el rango de DD bajo (3.1-4.0 km/km²) y en 1% el rango de DD

muy alto (>6.0 km/km²). El rango bajo se localiza en el Sureste, junto con una parte del rango medio el cual se localiza también en el Este y Oeste. El rango alto se localiza en el centro de la unidad en una franja que va de Norte a Sur. Finalmente, el rango muy alto se encuentra en el Norte (Fig. 4.22C y 23C).

Profundidad de disección (PD)

Esta unidad tiene tres rangos de PD, que van de medio a muy alto. Predomina en 51% del área el rango de PD alto (201-300 m/km²). Posteriormente en 48.5% del área está el rango de PD media (101-200 m/km²). Finalmente en el .5% del área restante se tiene el rango de PD muy alto (>300 m/km²). El rango medio se localiza en el Sur- Sureste, Suroeste y una parte en el Noreste de la unidad. El rango muy alto se localiza en una parte del Centro en dirección hacia el Sur. El rango alto predomina en el Oeste de Norte a Sur y en el Este (Fig. 4.22D y 4.23D).

Disección general (DG)

En la disección general predomina en 75% del área el rango medio (15.1-25.0 km/km²). Y otro 24% del área tiene el rango de DG bajo (5.1-15.0 km/km²). El 1% de área restante tiene los rangos de DG alto (25.1-35.0 km/km²) y muy alto (>35 km/km²) con .5% de área en cada uno. Se localiza en casi toda el área el rango medio. Sin embargo, el rango bajo se localiza en la zona Sur- Sureste y en menor proporción en el Oeste y Suroeste, y los rangos alto y muy altos se localizan al Sur (Fig. 4.22E y 4.23E).

Energía del relieve

El 66.5% del área de esta unidad se concentra en los rangos de energía del relieve bajo (100-200 m/km²) en 63% y muy bajo (< 100 m/km²) en 3.5%. También se tiene de forma significativa el rango de ER medio (201-300 m/km²) en 29% del área. Finalmente, el rango

de ER alto (301-400 m/km²) en 4% y el muy alto (> 400 m/km²) en .5% del área total (Fig. 4.22F y 4.23F).

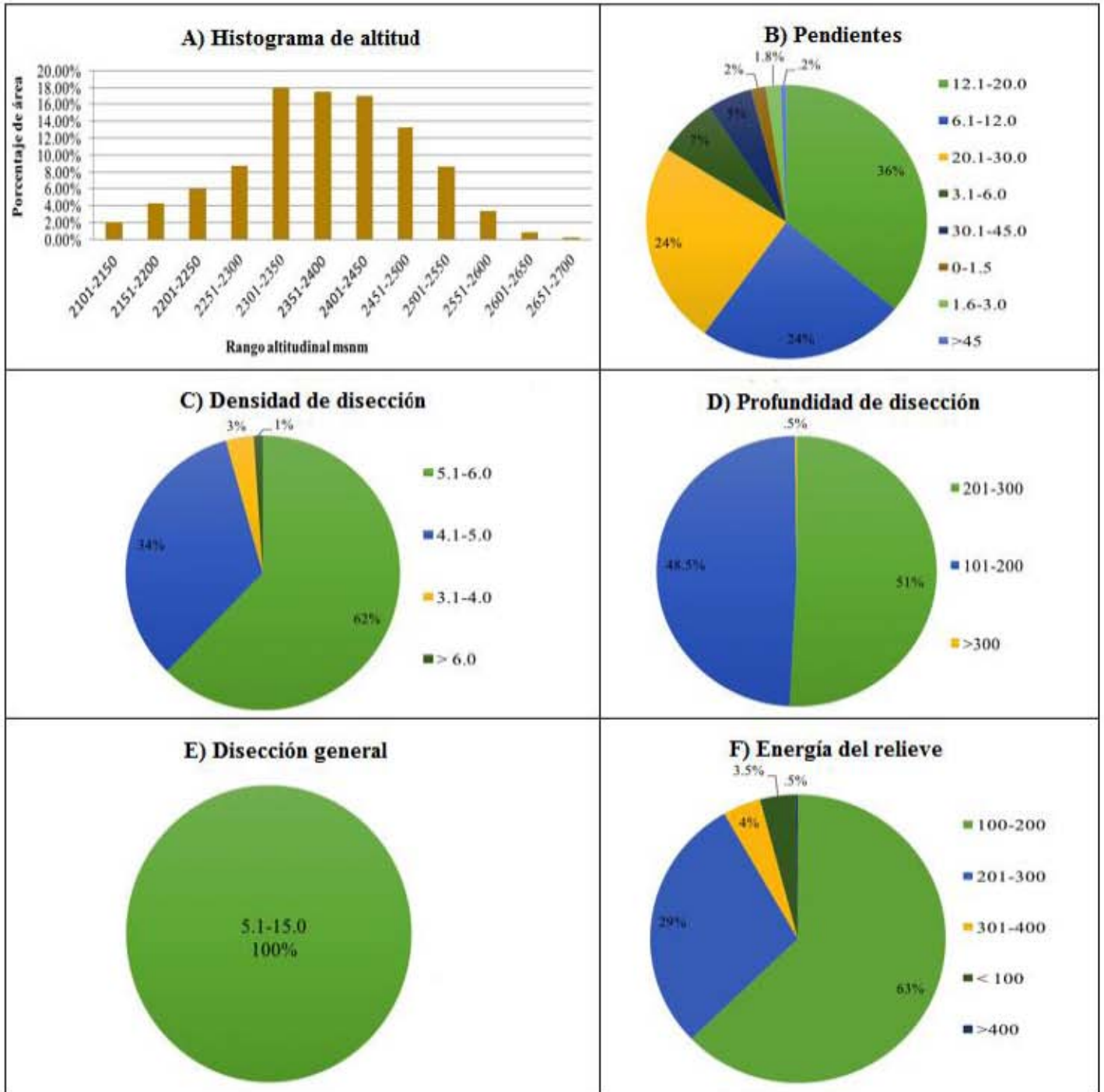


Figura 4.22 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Toba Llano de Lobos (TL).

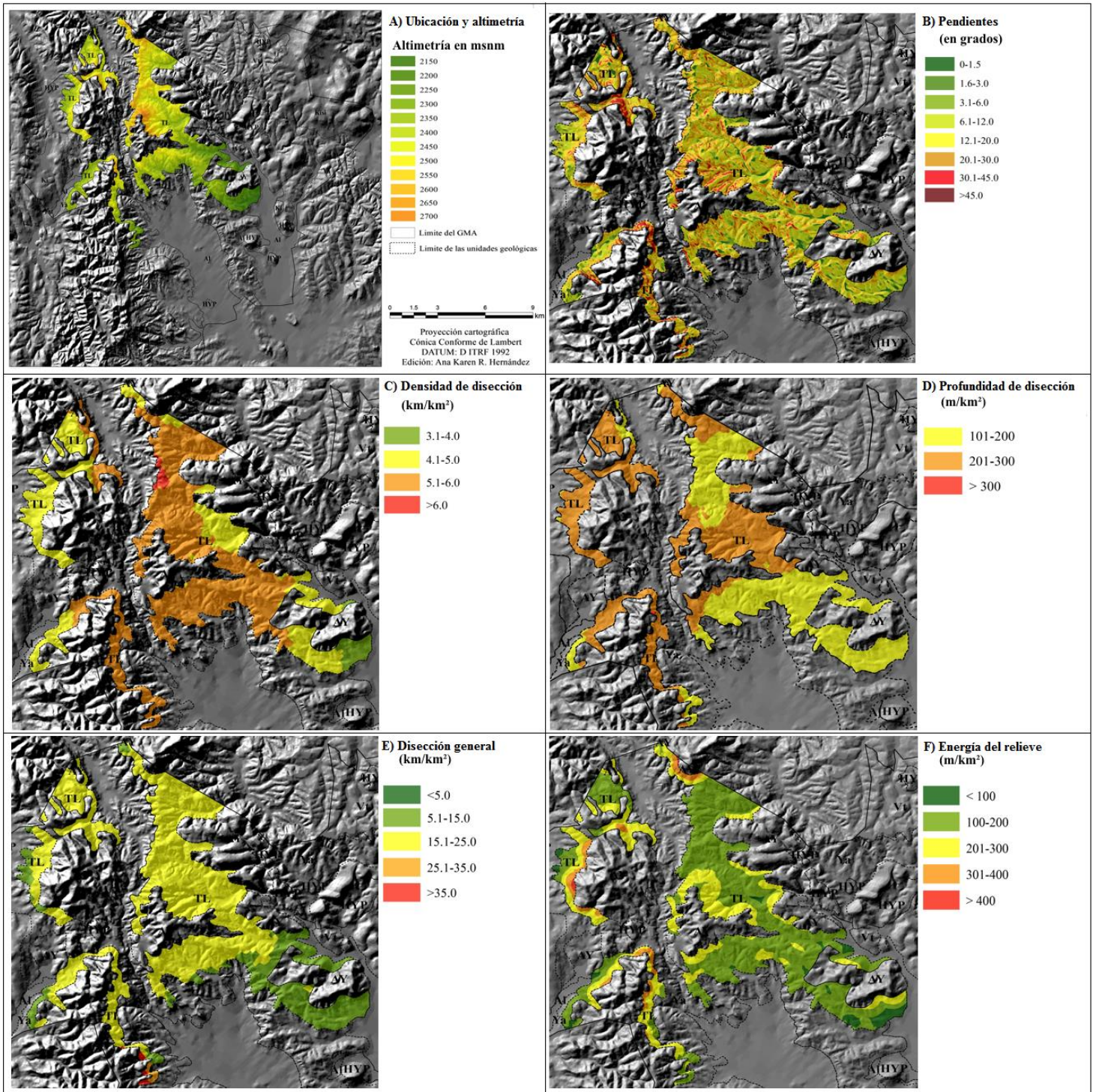


Figura 4.23 Mapas morfométricos de la Toba Llano de Lobos (TL).

4.2.7 Andesita Yucudaac (AY)

La Andesita Yucudaac tiene un área total de 76 kilómetros cuadrados dentro del GMA y se localiza principalmente en el Oeste del Geoparque y Centro-Norte. También pertenece al paisaje geomorfológico II (Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas ígneas) principalmente cimas.

Altimétricamente, esta unidad geológica tiene muchas variaciones ya que entra en todos los rangos altitudinales, su rango de menor altitud está a 2150 msnm y el de mayor altitud está a 2900 msnm que es el punto más alto del GMA. Las mayores altitudes se encuentran en el lado Oeste de Norte a Sur y las menores se localizan en el Sur y Este de la unidad geológica (Fig. 4.24A y 4.25A).

Pendiente

En la Andesita predomina el rango de pendiente medio en 48% del área (de 12.1°-20.0° en 31% y de 6.1°-12.0° en 17%). El rango de pendiente alto ocupa 43% del área (de 20.1°-30.0° en 32% y de 30.1°-45.0° en 11%). Finalmente, se tiene en 6.5% los rangos bajos (de 3.1°-6.0° en 5% y de 1.6°-3.0° en 1.5%). En el resto del área se tiene en 2% el rango muy bajo (de 0°-1.5°) y en .5% el rango de pendiente muy alta (>45°). Las mayores pendientes se localizan en la zona Oeste de Norte a Sur y en menor proporción en el Este (Fig. 4.24B y 4.25B).

Densidad de disección (DD)

Esta unidad tiene un rango de densidad de disección alto (5.1-6.0 km/km²) en 55% del área. También predomina el rango de DD media (4.1-5.0 km/km²) en 42% del área. Por último, en 2.7% del área tiene un rango de DD bajo (3.1-4.0 km/km²) y mínimamente en .3% del área está el rango de DD muy alto (>6.0 km/km²). El rango bajo se localiza en el límite Este

y el rango medio en los límites Este y Oeste de la unidad. Por último el rango alto se localiza en toda la zona Centro de Norte a Sur, y el rango muy alto en el Sur (Fig. 4.24C y 4.25C).

Profundidad de disección (PD)

La profundidad de disección de esta unidad se concentra en los rangos alta (201-300 m/km²) en 73% del área y en 24% el rango de PD media (101-200 m/km²). También se tiene el rango de PD muy alta (>300 m/km²) en 1.8% del área y de forma mínima en .2% se encuentra el rango de PD bajo (41-100 m/km²), (Fig. 4.24D y 4.25D).

Disección general (DG)

En la Andesita, el 74% de su área tiene una disección general media que va de 15.1-25.0 km/km². En otro 20% del área se concentra el rango de DG baja que va de 5.1-15.0 km/km². Finalmente, se tiene en menos proporción con 5.5% el rango de DG muy alto >35.0 km/km² y de forma mínima en .5% el rango de DG alto que va de 25.1-35.0 km/km².(Fig.4.24E y 4.25E)

Energía del relieve (ER)

En esta unidad están los cinco rangos que miden la energía del relieve. Sin embargo el que ocupa una mayor área (48%) es el rango de medio que va de 201-300 m/km². Posteriormente se encuentra el rango bajo en 37% del área, que va de 100-200 m/km² y el rango alto en 11% del área, que va de 301-400 m/km². Por último en el 4% restante se tiene en menor porción los extremos, el rango muy bajo (<100 m/km²) en 2% y el muy alto (>400 m/km²) también en 2% del área total. Los rangos más altos de ER se localizan en la zona Oeste de Norte a Sur (Fig. 4.24F y 4.25F).

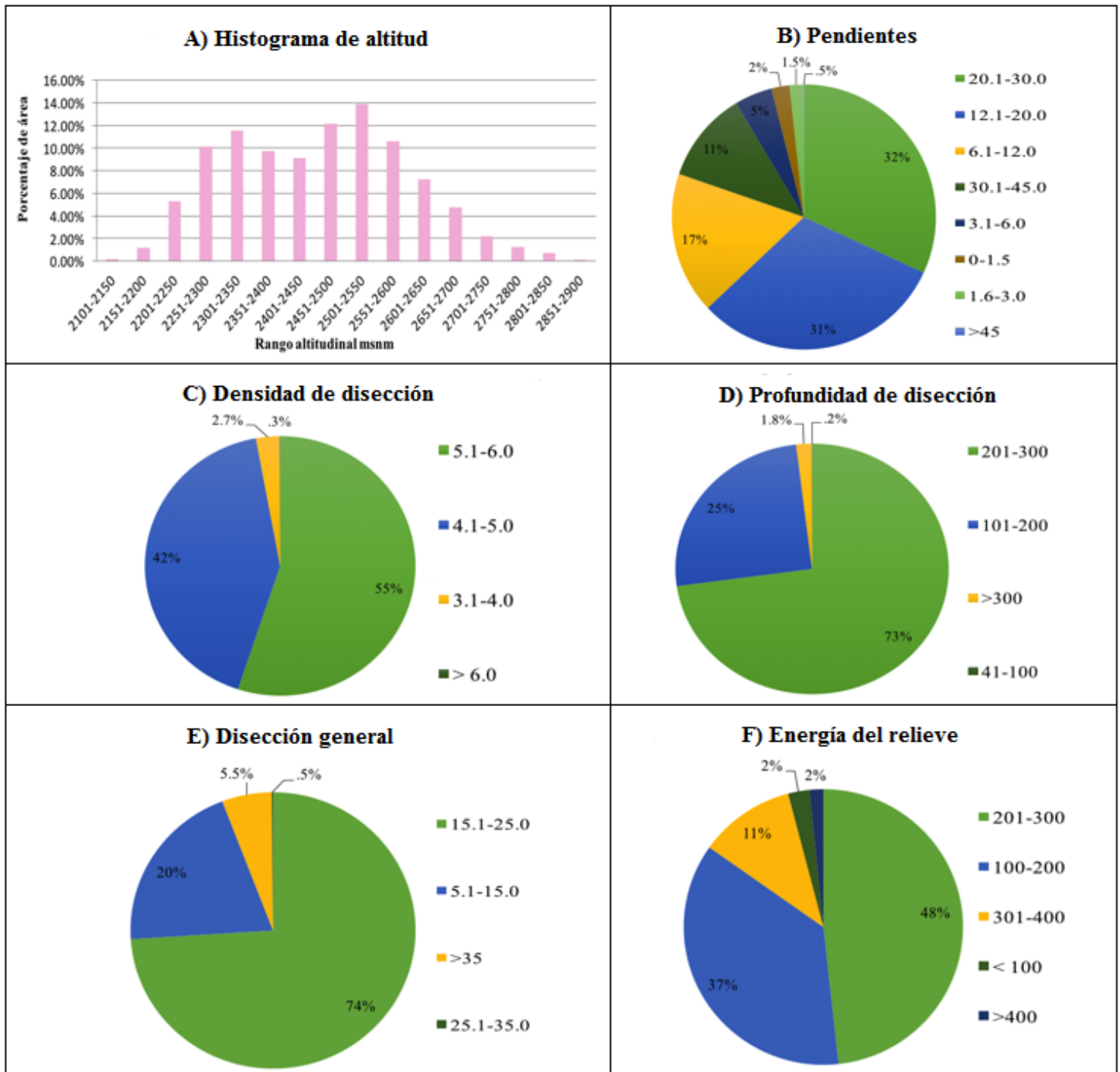


Figura 4.24 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de la Andesita Yucudaac (AY).

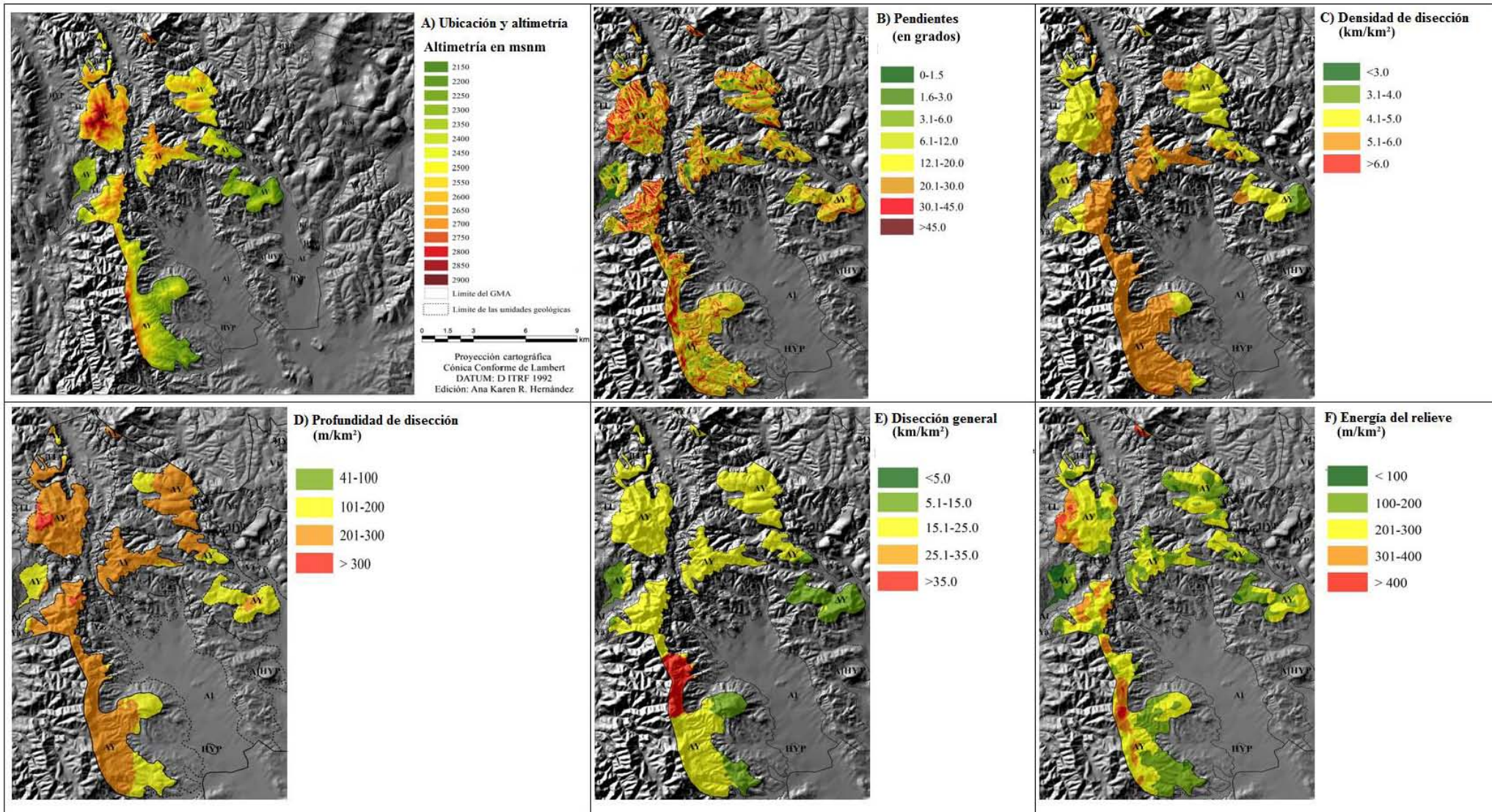


Figura 4.25 Mapas morfométricos de la Andesita Yucudaac (AY).

4.2.8 Cuerpos Hipabisales (HYP)

Los Cuerpos Hipabisales tienen un área total de 11 kilómetros cuadrados dentro del GMA. Pertenecen al paisaje I (Laderas de montaña y cimas denudativas en rocas ígneas) y se encuentran dispersos por todo el Geoparque, principalmente en el Noreste y Sureste.

Altimétricamente, los cuerpos hipabisales se encuentran entre los 2100 msnm y hasta los 2550 msnm. El 36% del total de su área se encuentra en entre 2201 a 2300 msnm, 12% en el rango mínimo (2051-2100 msnm) y 11% en el rango de 2451-2500 msnm. El resto de los rangos altimétricos ocupan en promedio 8% de área cada uno (Fig. 4.26A y 4.27A).

Pendiente

Esta unidad geológica presenta principalmente pendientes medias en 58% de su área, de 12.1°-20.0° (34%) y de 6.1°-12.0° (24%). en 18.8% de su área tiene pendientes altas (20.1°-30.0° en 16% y de 30.1°-45.0° en 2.8%) y de forma mínima presenta pendientes muy altas >45° (.8%). Finalmente, los rangos bajos esta en 23% del área total, de 0°-1.5° (9%), de 1.6°-3.0° (5%) y de 3.1°-6.0° (9%) (Fig. 4.26B y 4.27B).

Densidad de disección (DD)

La densidad de disección que predomina es media (4.1-5.0 km/km²) en 60% del área total de esta unidad geológica, otro 29% ocupa una DD baja (3.1-4.0 km/km²). Por último, en 6% se tiene una DD alta (5.1-6.0 km/km²) y en 5% una DD muy baja < 3.0 km/km² (Fig. 4.26C y 4.27C).

Profundidad de disección (PD)

Los Cuerpos Hipabisales presentan una profundidad de disección media (101-200 m/km²) en 83% su área. La PD baja (41-100 m/km²) ocupa 8% y la PD muy baja (< 40 m/km²) está

en sólo 3% del área. Finalmente, el 6% restante tiene una PD alta (201-300 m/km²) (Fig. 4.26D y 4.27D).

Disección general (DG)

En esta unidad geológica tiene los rangos de DG muy bajo, bajo y medio. Predomina en el 71% del área total el rango de DG bajo (5.1-15.0 km/km²), en 22% ésta el rango de DG medio (15.1-25.0 km/km²) y en el 7% restante está el rango de DG muy bajo (< 5 km/km²) (Fig. 4.26E y 4.27E)

Energía del relieve (ER)

Al igual que en el índice anterior, encontramos los tres rangos de ER muy bajo, bajo y medio. Predomina la ER baja en 67% del área total, en 17% se tiene un ER media y en 16% está la ER muy baja (Fig. 4.26F y 4.27F).

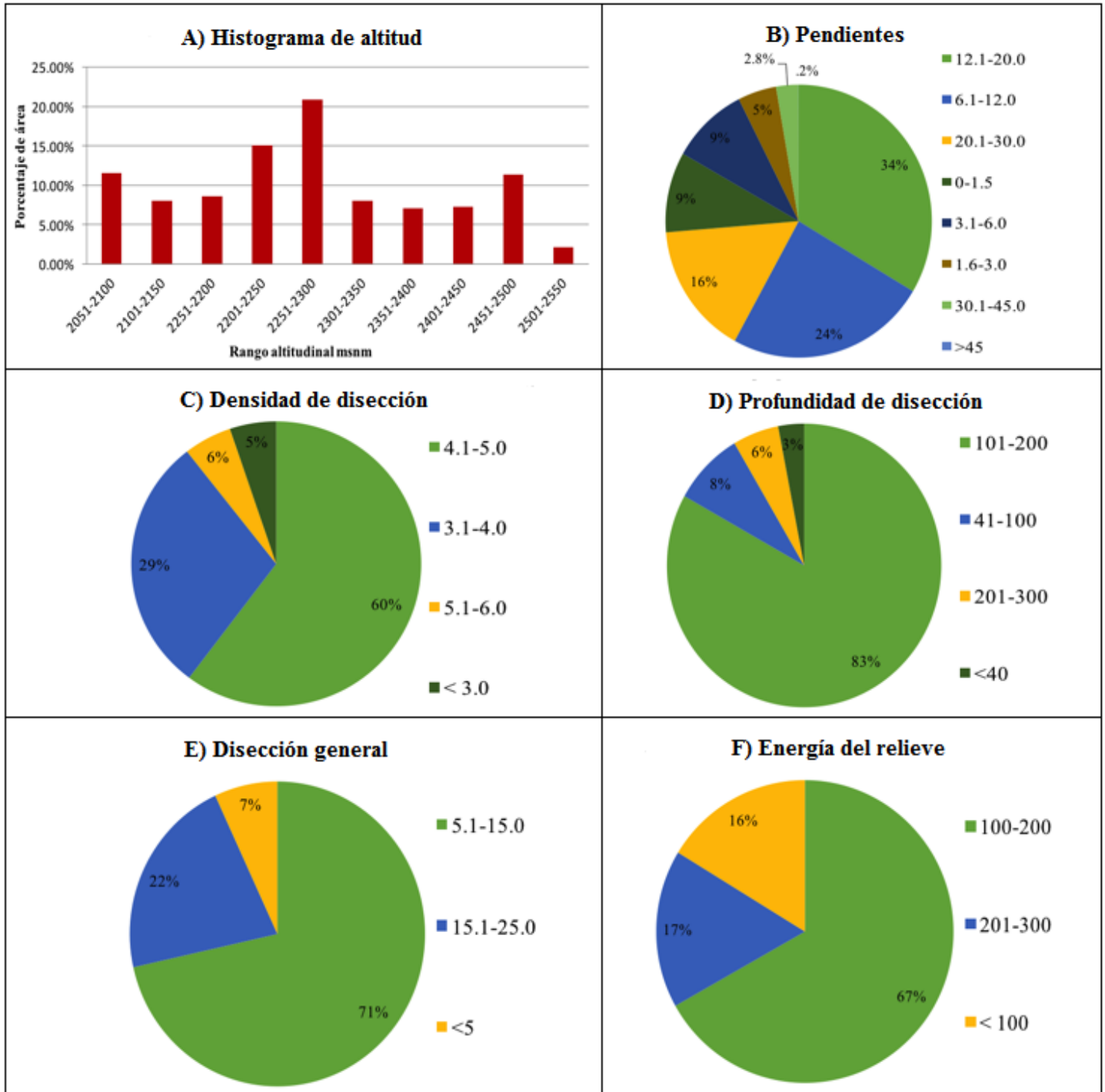


Figura 4.26 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico de los Cuerpos Hipabisales (HYP).

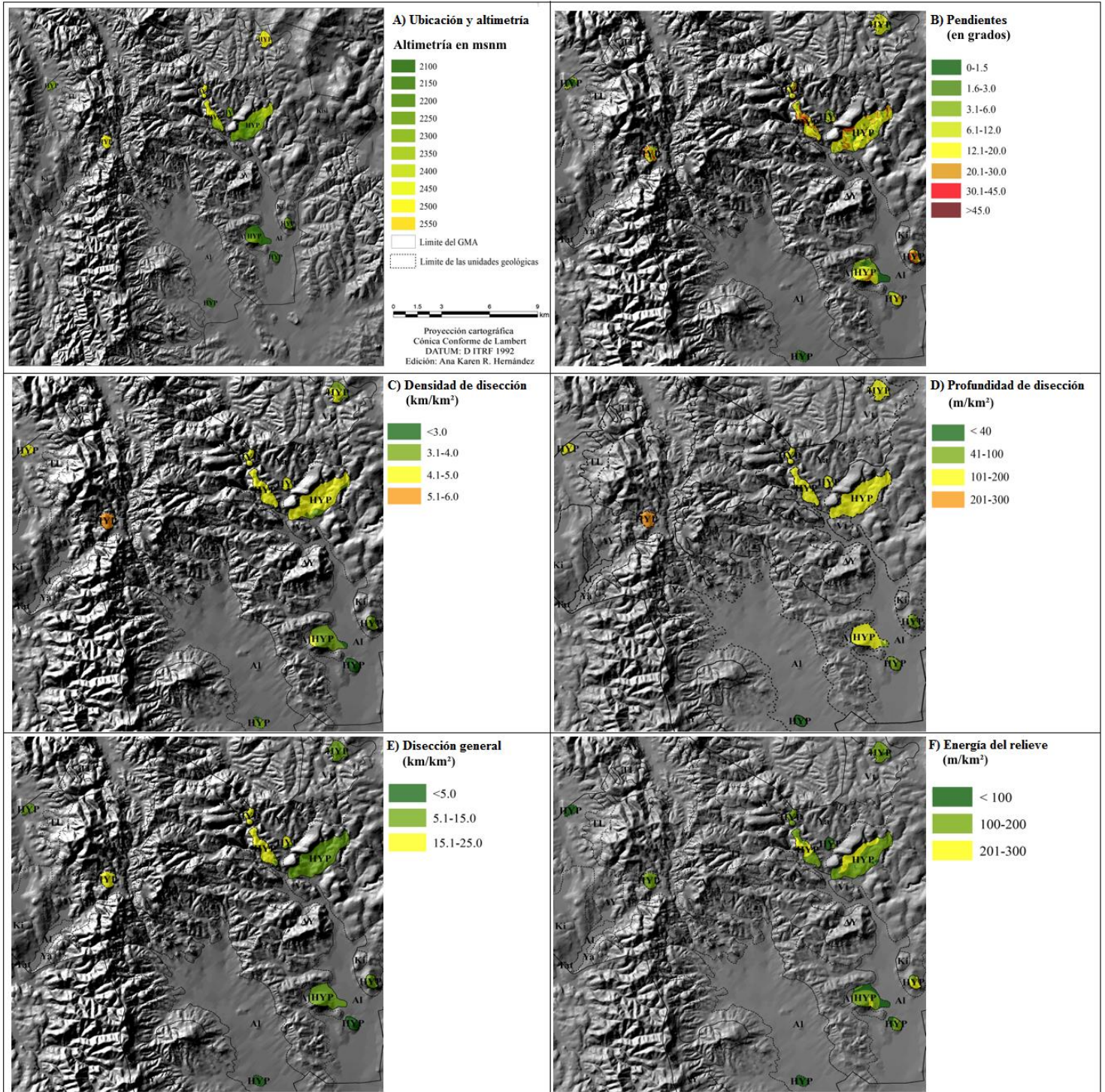


Figura 4.27 Mapas morfométricos de los Cuerpos Hipabisales (HYP).

4.2.9 Aluvión (Al)

El Aluvión tiene un área total de 64 kilómetros cuadrados dentro del GMA y se localiza al Sur y Sureste principalmente. Pertenece los paisajes geomorfológicos VI, VIII y IX, con sus respectivos valles erosivos (X).

Altimétricamente el Aluvión se encuentra desde los 2050 msnm hasta los 2300 msnm. Predomina en 48% de su área total el rango de 2051-2100 msnm, en 36% el de 2101-2150 msnm y en 12% el de 2151-2200 msnm. El resto se divide entre el rango menor y los dos rangos mayores (Fig. 4.28A y 4.29A).

Pendiente

En esta unidad geológica predominan los rangos de pendiente muy bajo y bajo. El 48% de su área total corresponde al rango muy bajo (0° - 1.5°) y en 45.9% al rango bajo (de 1.6° - 3.0° en 28% y de 3.1° - 6.0° en 17.9%). También tiene pendientes medias en los límites de ambos valles, de 6.1° - 12.0° en 5% y de 12.1° - 20.0° en .8%. El 3% restante lo ocupan las pendientes altas, éstas se encuentra en la zona Norte del valle de Nochixtlán (20.1° - 45.0°) (Fig. 4.28B y 4.29B).

Densidad de disección (DD)

El Aluvión presenta principalmente un rango de DD bajo (3.1 - 4.0 km/km²) en 62% de su área total. Posteriormente, está la DD media (4.1 - 5.0 km/km²) en 21% del área, 15% tiene una DD muy baja (< 3.0 km/km²) y, finalmente, en 2% del área tiene una DD alta (5.1 - 6.0 km/km²) (Fig. 4.28C y 4.29C).

Profundidad de disección (PD)

El 68% del área total del Aluvión tiene un rango de PD bajo (41 - 100 m/km²) mientras que en el 24% hay una PD media en los límites de ambos valles (101 - 200 m/km²). También

presenta una PD muy baja al sur de ambos valles ($< 40 \text{ m/km}^2$) en 9.8% del área y, mínimamente, en .2% tiene una PD alta en el pequeño valle al Oeste del Geoparque (201-300 m/km^2), (Fig. 4.28D y 4.29D).

Disección general (DG)

En cuanto a la disección general el Aluvión tiene en 52% del área una DG baja que va de 5.1-15.0 km/km^2 y en 47.5% una DG media que va de 15.1-25.0 km/km^2 . El .5% de área restante tiene una DG muy baja $< 5 \text{ km/km}^2$ (Fig. 4.28E y 4.29E).

Energía del relieve (ER)

La energía del relieve que presenta el Aluvión es casi en su totalidad muy baja ($< 100 \text{ m/km}^2$) en 90.8% de su área total. En 9% restante muestra valores bajos (100-200 m/km^2) y finalmente en el .25 restante tiene una ER media (201-300 m/km^2) (Fig. 4.28F y 4.29F).

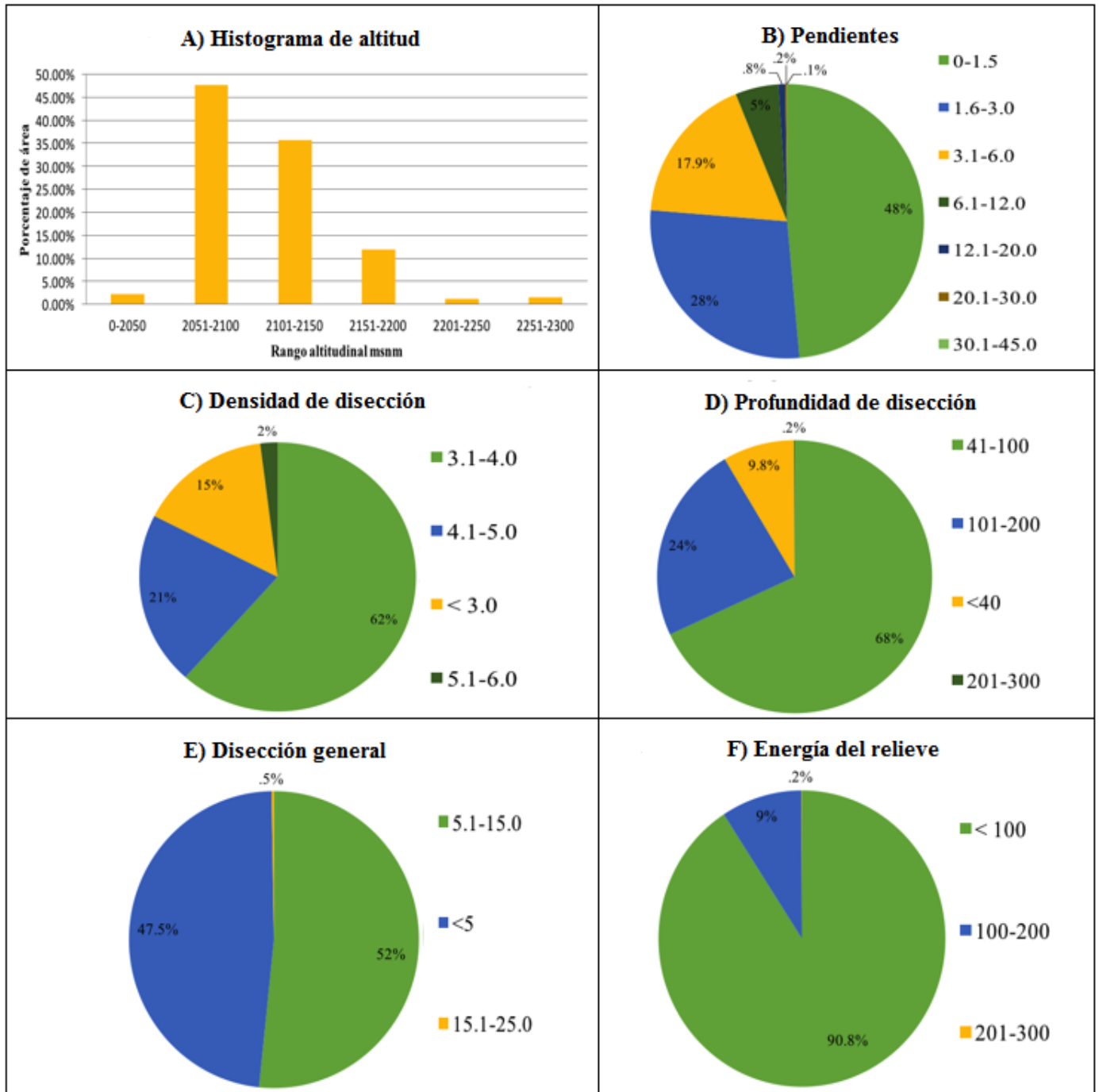


Figura 4.28 Gráficas en porcentaje de cada rango por índice morfométrico del Aluvión (AI).

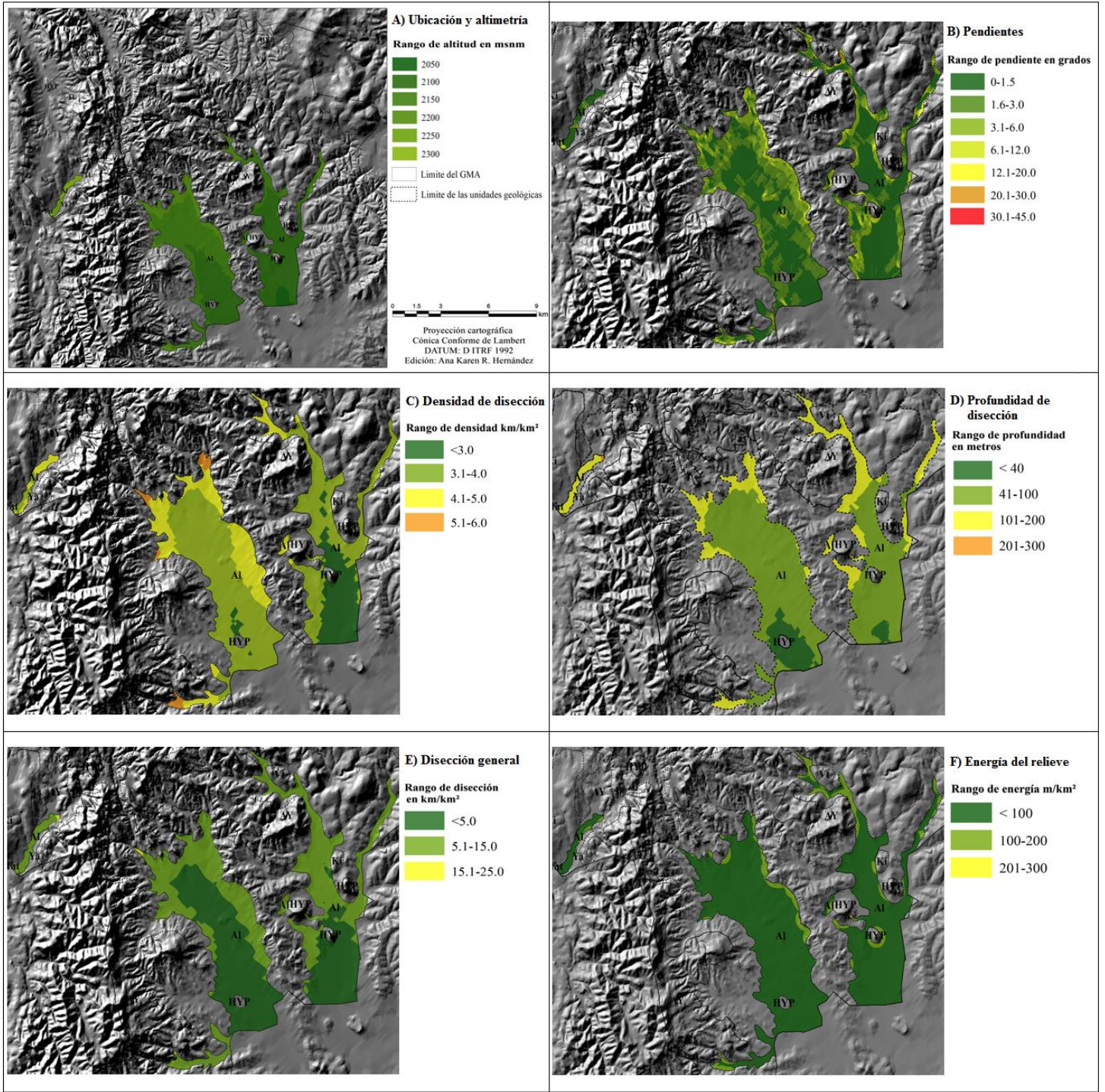


Figura 4.29 Mapas morfom3tricos del Aluvi3n (Al).

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados descritos en el capítulo anterior es necesario hacer referencia, por un lado, a los aspectos metodológicos y los materiales utilizados y, por otro, al comportamiento de los indicadores obtenidos.

El insumo fundamental para la elaboración de los indicadores geomorfométricos por medios automatizados es el modelo digital de elevación (MDE). Las características de dicho modelo, particularmente su resolución espacial, es un aspecto central que define los alcances de la caracterización morfométrica y de la interpretación de las formas de relieve y su dinámica. El MDE utilizado deriva de la interpolación de curvas de nivel en escala 1:50,000 cuya resolución espacial resulta en un modelo *raster* de 15 m. Esta característica limita la posibilidad de identificar la evidente dinámica erosiva actual de algunas unidades, en particular de las constituidas por la Formación Yanhuatlán, caracterizada por una densa y extendida red de cárcavas que si bien es fácilmente identificable en el campo, no resulta evidenciada en los resultados obtenidos.

En este sentido, la resolución espacial del MDE tiende a homogeneizar las unidades de manera que los detalles que permitirían identificar la dinámica erosiva actual quedan enmascarados y no diferencian los rasgos específicos de cada unidad. De esta manera, los

indicadores, si bien caracterizan la morfología general del relieve, no permiten identificar de manera clara los procesos dinámicos actuales del mismo.

Como se había mencionado antes, el Geoparque cuenta con nueve unidades geológicas que van del Cretácico, Terciario al Cuaternario. Otra característica es su distinto origen: sedimentario y volcánico (extrusivo e intrusivo). Geomorfométricamente, casi ninguna unidad tiene un comportamiento homogéneo, todas cuentan con variaciones dentro de los índices que se aplicaron, salvo algunas que se encuadran al 100% en un solo rango de algún índice, como la Toba Llano de Lobos y el Depósito Teotongo en el índice de disección general.

Los resultados de la Formación San Isidro muestran que el 65% de su área contiene pendientes bajas y medias, de 0° a 12° grados de inclinación máxima. Este puede ser el factor principal por el cual el 89% de su área tenga una densidad de disección baja, ya que las inclinaciones de sus geoformas no facilitan la formación de múltiples cauces por erosión vertical. Sin embargo, el porcentaje de pendientes entre los 20° y 45° de inclinación, permiten que se desarrolle una profundidad de disección media en 98% del área, ya que si no existieran estas pendientes podría presentar, por las características de las rocas, valores de profundidad mucho más bajos. Tomando en cuenta que se trata de rocas areniscas principalmente, su dureza y resistencia a la erosión son elementos que determinan los resultados anteriores. Al predominar baja DD es normal tener datos de DG similares que no

rebasan los 15 km/km². Se observa una relación entre profundidad de disección y la energía del relieve, ya que se encuentran en el mismo rango de 100-200 m/km².

La Caliza Teposcolula tiene en 74% de su área total pendientes de bajas a medias, entre los 0° y 12° de inclinación. Al igual que la unidad geológica anterior se tiene como consecuencia una DD baja, PD media y DG baja. La energía del relieve es muy baja y en 51% del total de su área no supera los 100 m/km² a pesar de que su espesor se estima entre los 500 y 600 m. Sin embargo, también se trata de rocas sedimentarias, en este caso de calizas, las cuales son de mayor resistencia a la erosión, siendo esta la causa principal de los valores bajos en todos los índices junto con las pendientes que presenta.

En la Formación Yanhuitlán las pendientes son medias y altas (6 a 20°) en 67% de su área. Se tiene como consecuencia una densidad de disección media y alta, al igual que la profundidad de disección (45% DD media y 31% alta; 69% PD media y 16% alta). A pesar de esto, por su composición arcillosa y su consolidación que es de media a pobre, es una roca deleznable y fácil de erosionar, esto se puede visualizar en campo con una alta cantidad de cárcavas. Por lo tanto, se esperaría que predominaran los rangos altos e incluso muy altos, principalmente de densidad de disección y disección general. En cuanto a la profundidad de disección es frecuente encontrar valores medios, ya que el constante removimiento de material no permite gran profundización de los cauces y los valores altos

que aparecen en la zona se relacionan más con las pendientes altas, que suelen ser las cabeceras o circos erosivos, lo mismo sucede en cuanto a la energía del relieve.

Los resultados para el Depósito Teotongo muestran pendientes medias altas (6° a 20° de inclinación) en 64% del área. Predomina el rango medio en densidad de disección y en profundidad de disección. Esto puede deberse a las pendientes presentes mayores a 12° de inclinación que facilitan la erosión, pero no llegan a ser altos ya que se trata también de areniscas suficientemente resistentes a la erosión. Por lo tanto, es frecuente encontrar rangos de DG baja y ER muy baja.

En la Toba Llano de Lobos las pendientes son medias en el 60% y altas en el 29%; este tipo de pendientes, sobre todo las mayores a 18 grados de inclinación, propician la erosión vertical y pueden ser además un factor desencadenante de procesos de remoción en masa.

La densidad y profundidad de disección que presenta es alta, esto puede estar relacionado con la inclinación de las laderas, que permite la formación de cauces profundos, pero sobre todo por su composición piroclástica y su dureza que va de suave a deleznable y que facilita la densidad y profundidad de cauces. Predomina la densidad general media y energía del relieve baja, esto último puede estar relacionado con que el espesor máximo de esta unidad geológica no supera los 350 metros.

La Andesita Yucudaac es la unidad geológica con mayor presencia de pendientes altas, de 20° a 45° de inclinación en 43% de su área total y además en otro 48% pendiente media 6° -

20°. Esto la ubica como la unidad con más potencial a tener procesos de remoción en masa, como caída de roca principalmente. Esto también es un factor principal por el cual resulta tener una densidad y profundidad de disección alta (55% y 73%, respectivamente) ya que la inclinación de sus laderas permiten una importante acción de la erosión vertical. Además se caracteriza por ser una unidad intemperizada y fracturada, lo que facilita la erosión de la roca. Tiene una densidad general media en tres cuartas partes de su superficie, la energía del relieve que predomina también es media, lo cual explica la dinámica erosiva.

Los cuerpos hipabisales que afloran en algunas zonas del geoparque tienen pendientes medias en su mayor parte pero llegan a tener algunas paredes entre los 20° y 45° (18%). Su densidad y profundidad de disección es media, ya que son afloramientos rocosos discontinuos y de dimensiones menores, que a pesar de tener múltiples fracturas por ser cuerpos que se rompen fácilmente por descompresión y si están en una zona tectónica suelen romperse ya que son rígidos, no desarrollan grandes cauces. La densidad general y la energía de relieve que tienen es baja, por sus dimensiones no llegan a presentar grandes cambios altitudinales.

El aluvión es consecuencia del depósito de materiales acarreados por las corrientes fluviales, se encuentra en la zona más baja del geoparque y es casi plana, tiene pendientes entre 0° y 6° de inclinación, por lo tanto, apenas se logran desarrollar algunos cauces pocos profundos, dando como resultado una densidad y profundidad de disección baja al igual que

la disección general. La energía del relieve es muy baja ya que es una zona casi plana y de poca pendiente.

En conjunto, la distribución de los rangos de cada índice tiene un comportamiento bien definido. La zona montañosa que se localiza en el Oeste del geoparque es la que tiene los indicadores con valores más elevados, altos y muy altos en pendiente, densidad de disección, profundidad de disección y energía del relieve, además de que es la zona de mayor altitud. Esta zona se relaciona con las unidades geológicas: Andesita Yucudaac (AY), Toba Llano de Lobos (TL) y la Formación Yanhuitlán (Ya). Coinciden con los paisajes geomorfológicos: Laderas de montaña y cimas erosivas en rocas ígneas (II), Laderas medias y bajas de elevaciones erosivas cuestras y lomeríos erosivos y campos de cárcavas en rocas ígneas piroclásticas (VII) y algunas zonas del Piedemonte (VIII) y Laderas de montaña y cimas denudativas en rocas ígneas (I).

Al considerar las características geomorfométricas de cada unidad geológica por separado se pudo observar lo siguiente:

En las unidades de rocas sedimentarias (Formación San Isidro, Kisi, Caliza Teposcolula, Ki y el Conglomerado Tamazulapan, Vt) predominan los rangos bajos y medios de DD y PD (Tabla 5). La energía del relieve se relaciona principalmente con la variación de las pendientes; mientras aumenta la pendiente aumenta la ER. (Mayor pendiente = mayor

energía y viceversa). Por lo tanto se puede decir que la zona más homogénea y menos dinámica es la zona donde afloran estas tres unidades geológicas.

Posteriormente, están las unidades de origen volcánico (Toba Llano de Lobos, TL y Andesita Yucudaac, AY) que dieron resultados donde predominan los rangos altos, principalmente en pendiente, densidad de disección y profundidad de disección (Tabla 5).

Es por esto que se puede considerar como la zona de mayor dinámica.

También están los cuerpos hipabisales (HYP) que tienen principalmente rangos medios (pendiente, densidad y profundidad de disección) y bajos (disección general y energía del relieve). En estas unidades también se puede apreciar la relación entre la pendiente y la energía del relieve. Sin embargo, no muestran resultados con los que se pueda determinar su dinámica o estabilidad (Tabla 5).

La Formación Yanhuitlán es la unidad con mayor variabilidad de los índices, ya que en ella recaen todos los rangos (Tabla 5). Va desde rangos muy bajos hasta muy altos, aunque predominan los rangos medios, lo cual parece ponerla como una zona con una dinámica regular, sin embargo, sus características actuales, de múltiples cárcavas y *badlands* demuestran lo contrario.

Las planicies aluviales se caracterizan por tener rangos muy bajos y bajos en general, es una zona estable y acumulativa principalmente; sin embargo, es interesante ver que en

algunas pequeñas zonas también llega a tener rangos altos en densidad de disección y profundidad de disección (Tabla 5 y Fig. 4.29).

ÍNDICE MORFOMÉTRICO	VALORES PREDOMINANTES POR UNIDAD GEOLÓGICA							
	Kisi	Ki	Ya	Vt	TL	AY	HYP	AI
ALTIMETRÍA (MSNM)	2501-2550	2351-2400	2151-2200	2401-2450	2301-2350	2501-2550	2551-2300	2051-2100
PENDIENTE (GRADOS)	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO-ALTO	MEDIO	MUY BAJO-BAJO
DENSIDAD DE DISECCIÓN (KM/KM ²)	BAJO-MEDIO	BAJO	MEDIO-ALTO	MEDIO	ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO
PROFUNDIDAD DE DISECCIÓN (M/KM ²)	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO
DISECCIÓN GENERAL (KM/KM ²)	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO	BAJO	BAJO
ENERGÍA DEL RELIEVE (M/KM ²)	BAJO	MUY BAJO-BAJO	BAJO	MUY BAJO	BAJO	BAJO-MEDIO	BAJO	BAJO-MUY BAJO

Tabla 5 Valores de los índices morfométricos predominantes en cada unidad geológica.

CONCLUSIONES

Finalmente a manera de conclusión se pueden decir lo siguiente:

- Existe un control geológico en cuanto a caracterización geomorfométrica, lo cual se evidencia por las diferencias en los valores obtenidos entre las nueve unidades geológicas, principalmente entre las de origen sedimentario y las volcánicas. Las de origen volcánico intrusivo se encuentran en rangos bajos y medios de cada índice y las volcánicas extrusivas van de rangos medios a altos. También es posible observar que la región con mayor dinámica (rangos altos) se encuentra en la zona Oeste del Geoparque y que corresponde a la unidad geológica Andesita Yucudaac y en menor proporción a la Toba Llano de Lobos. En contraste a esto están, por un lado, las regiones que conforman la Formación San Isidro, la Caliza Teposcolula y el Depósito Teotongo y, por otro, las que se conforman de Aluvión, que tienen una tendencia hacia los rangos bajos con menor dinámica. También está la Formación Yanhuitlán que se encuentra principalmente en rangos medios, aunque en campo presenta valores muy altos de erosión.
- Existe además un posible control tectónico-estructural, ya que en el sector Oeste donde resultó estar el sector con valores más elevados en los indicadores utilizados, se encuentra la Falla Cieneguilla que se alinea en la misma dirección.
- La utilización del método para obtener el MDE permitió eliminar errores que podrían modificar los resultados y se logró obtener de manera digital una red de drenaje más cercana a la realidad y con mayor densidad a diferencia de las otras que se podían obtener de los archivos de INEGI o a través de ArcGis. Sin embargo, la

resolución del modelo no tiene los alcances adecuados para mostrar la dinámica actual (morfodinámica) de la zona de estudio la cual resulta evidente en la visualización del terreno. A pesar de estas limitaciones se han podido definir zonas con diferente dinámica determinadas por las distintas litologías, pero que se relaciona más con el tiempo geológico (morfogénesis) de la zona de estudio. Es posible que un MDE con mayor resolución u otro tipo de información espacial más fina logre indicar la morfodinámica de la zona de estudio.

- De igual forma, es importante mencionar que el actual desarrollo de los sistemas de información geográfica facilita la generación de mapas específicos y que con el adecuado arreglo de datos según los objetivos de cada trabajo se tiene la oportunidad de trabajar con la calidad que se requiera de insumos, lo cual es de gran importancia ya que de esto dependerán los resultados que se obtengan y pueden o no cubrir las necesidades de cada investigación. Otra ventaja de los métodos digitales es que nos dan la posibilidad de trabajar con diferentes software pero compatibles entre ellos, y de esta forma obtener mejores resultados que los que nos podría proporcionar un solo Sistema de Información Geográfica.
- En el caso del análisis de las características geomorfométricas de cada unidad geológica, los índices que se desarrollaron fueron útiles para una primera aproximación en reconocer los contrastes entre cada unidad geológica, lo cual es de gran ayuda para una regionalización de mayor especificación geomorfológica y para el reconocimiento de zonas potenciales – de procesos geomorfológicos que pueden ser erosivos o de remoción en masa. Los datos obtenidos nos aproximan a su reconocimiento; la profundidad y densidad de disección nos muestran el carácter

erosivo y los datos de pendiente y energía del relieve se pueden asociar con los procesos de remoción en masa.

- La información morfométrica que utilizamos resulta ser más valiosa cuando se cruza además con otra información espacial (hidrológica, de vegetación, climática etc.). Esto dependerá de cada investigación, de los objetivos y alcances que se tengan.
- Se debe tomar en cuenta que los resultados obtenidos y todos los datos que se han arrojado a partir de este trabajo son de suma importancia para el geoparque. Esta información es un insumo básico para el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica del geoparque, ya que es indispensable para el conocimiento y correcto manejo de datos de los distintos temas de interés dentro del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. (2002), *Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, Southern México*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 118, pp. 1-14.
- Alfaro Sánchez, G. (2004), "Suelos", En: A.J. García-Mendoza, M.J. Ordoñez y M. Briones-Salas (eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 55-65.
- Alcántara A. I. (1993), *Estudio Geomorfológico de Aguascalientes*. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Campa-Uranga, M, Coney, P. (1983) *Tectonostratigraphic terranes and mineral resources distribution in Mexico*. Canadian Journal Earth Sciences, vol. 20, pp. 1040-1051.
- Centeno-García, E., Ortega-Gutiérrez, F., and Corona-Esquivel, R. (1990), *Oaxaca fault: Cenozoic reactivation of the suture between the Zapoteco and Cuicateco terranes, southern Mexico*. Geological Society of America Abstracts with Programs, vol. 22, pp. 13.
- Centeno-García, E. (2004), "Configuración geológica del estado", En: A.J. García-Mendoza, M.J. Ordoñez y M. Briones-Salas (eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 29-42.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, (2014), *Atlas del Agua en México 2014*, Biblioteca Mexicana del Conocimiento, Programa Editorial de la República Territorios de México, México.
- Consejo Nacional de Población (2010) *Índice de marginación a nivel localidad 2010*, México, CONAPO
- Coney, P. J. (1989), *Structural aspects of suspect terranes and accretionary tectonics in western North America*. Journal of Structural Geology, vol. 11, pp. 107-125.
- Durán Calderón Lisel, Oscar Escolero Fuentes, Esperanza Muñoz Salinas, Miguel Castillo Rodríguez, Gilberto Silva Romo (2014), *Cartografía geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas (México)*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 66, No. 2, pp. 263-277.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F. (2002), *Caltepec fault zone: An Early Permian dextral transpressional boundary between the Proterozoic Oaxacan and Paleozoic Acatlán implications*. Tectonics, vol. 21, No. 3, pp. 4-1-4-18.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala, J. L., Macías-Romo, C., Ortega-Rivera, A., Iriondo, A. (2005), *La falla Caltepec: raíces expuestas de una*

frontera tectónica de larga vida entre los terrenos continentales del sur de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 52, No. 1, pp. 83-109.

Felicísimo, A. M. (1994), *Parametric statistical method for error detection in digital evaluation models.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 49(4), pp. 29-33.

Ferrusquía, I. (1970), *Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca, Excursión geológica México-Oaxaca,* Sociedad Geológica Mexicana, pp. 97-119.

Ferrusquía-Villafranca, I. (1976), "Part 1: Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán", *Estudios geológicos-paleontológicos en la región Mixteca, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca, México.* Boletín de Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, vol. 97, pp. 160.

Folk, R. (1968) *Petrology of sedimentary rocks,* Austin, Hemphill's, 170 p.

García-Mendoza, A. y R. Torres, (1999), *Estado actual del conocimiento sobre la flora de Oaxaca.* Sociedad y naturaleza en Oaxaca, 3, pp. 49-86.

Gaspari, F. J. (2012), *Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande,* Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata Argentina.

González, A., I. (1970), *Estudio geológico del área de Chilapa-Tlaxiaco.* Informe inédito, PEMEX-IGZS-548.

González, L. A. (2009), *Geografía, lingüística, arqueología e historia de la Mixteca Alta antes de la conquista española.* Anuario de Historia, vol.1, pp.45-66.

Hisazumi, H. (1932), *Geología de la región Mixteca del estado de Oaxaca,* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Informe inédito, pp.98.

Horton, R. E. (1945), *Erosional development of streams and their drainage basins; hydrofísica approach to quantitative morphology.* Bulletin of the Geological Society of America, vol. 56, pp. 275-370.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2005), *Guía para la interpretación de cartografía climatológica.* México. pp. 21-31. Consultado en agosto 2017 en:
http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231781/702825231781_1.pdf

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2010), *Censo de población y vivienda.*

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2012), *Conjunto topográfico vectorial de las cartas topográficas 1:50,000: e14d25, e14d26, e14d35 y e14d36.*

IUSS Working Group WRB. (2015), *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Keppie, J.D. Y G.F. Ortega, (1999), *Middle American Precambrian basement. A missing piece of reconstructed I-Ga Orogen*. Geological Society of America Special Paper 336, pp 199-201.

Leigh, D.S., Kowalewski, S.A., Holdridge, G. (2013), *3400 years of agricultural engineering in Mesoamerica: lama-bordos of the Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico*. Journal of Archaeological Science 40 (2013) pp. 4107-4111.

López, C. N. (2016), *Transformación del paisaje por prácticas agrícolas en Yanhuitlán Oaxaca*, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

López-Ticha, D. (1969), *Evaluación petrolífera de la Cuenca de Tlaxiaco, estado de Oaxaca*, mesa redonda, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.

López-Ticha, D. (1970), *Reconocimiento geológico de la Cuenca de Tlaxiaco*, Informe Inédito, PEMEX. IGZS-551.

López-Ticha, D. (1985), *Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la Cuenca de Tlaxiaco*. Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, vol. XXXVII, No. 1, p. 49-92.

López-Palomino, I. (2010), *Formación San Isidro*, Lexico Estatigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano, Consultado en junio 2017 en: http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html

Lugo Hubp, J. I. (1986), *Los métodos geomorfológicos*, Revista de Geografía, vol. 1, No. 1, México, pp. 13-26.

Lugo Hubp, J. I. (1991), *Elementos de cartografía aplicada (métodos cartográficos)*, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 23-49.

Lugo Hubp, J. I. (2011), *Diccionario geomorfológico: con equivalentes de los términos de uso más común en alemán, francés, inglés y ruso*, Instituto de Geografía, UNAM.

Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. A., Solé, J., Iriando, A. (2004), *A major resurgent caldera in southern Mexico: the source of the late Eocene Tilzapotla ignimbrite*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 136, pp. 97-119.

Muller, R.G., Joyce, A.A y Borejsza, A. (2012), *Alluvial archives of the Nochixtlán valley Oaxaca, Mexico*, Age and significance for reconstructions of environmental change, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology, pp 121-136.

Oropeza, O., Vences, D., Cram, S., Ortiz, M. y Hermann, M. (2016). “Caracterización del medio natural de la cuenca de Yanhuitlán”. En M. Hermann (Coord.), *Configuraciones territoriales en la Mixteca. Volumen II. Estudios de geografía y arqueología*, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México, pp. 35-76.

Ortega-González, J. V., Lambarria-Silva, C. (1991), *Informe geológico del prospecto Hoja Oaxaca, compilación geológica I. G. R. S. 1129*, PEMEX, Coordinación Divisional de Exploración, Gerencia de Exploración Región Sur, Subgerencia de Geología superficial y Geoquímica, Inédito, 190 p.

Ortega-Gutiérrez, F., (1978), *Geología del contacto entre la Formación Acatlán paleozoica y el Complejo Oaxaqueño precámbrico, al oriente de Acatlán*, Estado de Puebla: IV Convención Geológica Nacional. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. XXXIX, No. 1, pp. 27-28.

Ortega-Gutiérrez, F., (1993), *Tectonostratigraphic analysis and significance of the Paleozoic Acatlán Complex of southern Mexico*, en Ortega-Gutiérrez, F., Centeno-García, E., Morán-Centeno, D. J., Gómez-Caballero, A. (eds). First Circum-Pacific and Atlantic Terrane Conference: Terrane geology of southern Mexico. Guidebook of field trip B: Guanajuato, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, p. 54-60.

Ortega-Gutiérrez F., J. Ruiz y E. Centeno-García (1995), *Oaxaquia- A Proterozoic microcontinent accreted to North America during the Late Paleozoic*. *Geology*, 23, pp 1127-1130.

Ortiz, M., Oropeza, O. O., Cram H. S., Figueroa Mah-Eng, J.M., Hermann, L. M., Vences-Sánchez, D.A., Villar, P.S.C. (2016), "Reconocimiento de las unidades del paisaje geomorfológico en la cuenca hidrográfica y el municipio de Yanhuitlán." En M. Hermann (Coord.), *Configuraciones territoriales en la Mixteca, vol. II, Estudios de Geografía y Arqueología*, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México, pp. 77-98.

Palacio Prieto, J. L. (2013), *Geositios, geomorfositos y geoparques; importancia, situación actual y perspectivas en México*, Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, pp.107-124, México.

Palacio Prieto, J. L. (1982), *Análisis geomorfológico de la región de Cuernavaca Tenancingo-Ixtapan de la Sal, estados de Morelos y México*, Posgrado en Geografía, UNAM, México.

Panizza, M., (2001), *Geomorphosites: concepts, methods and examples of geomorphological survey*. Chinese Science Bulletin, vol. 46, Supp. December.

Pantoja-Alor, J., and Robison, R. (1967), *Paleozoic sedimentary rocks in Oaxaca*. Science, Mexico, vol. 157, pp. 1033-1035.

Parada, C. G. (2003), *Cartografía geomorfológica del municipio de Atizapán de Zaragoza, Estado de México*, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Parrot, J.-F. (2012) Sum_jfp. Módulo ejecutable MS-DOS. Inédito.

Parrot, J.-F. (2017a) Brod5_Mx. Módulo ejecutable MS-DOS. Inédito.

Parrot, J.-F. (2017b) Dilat_curves_5. Módulo ejecutable MS-DOS. Inédito.

Parrot, J.-F. (2017c) Transf_jfp_extract. Módulo ejecutable MS-DOS. Inédito.

- Parrot, J.-F. Taud, H. (1997) Dilat_curves. Módulo ejecutable MS-DOS. Inédito.
- Parrot, J.-F. (2006), TLALOC (Tridimensional Landscape Analysis and Local Operating Computation) INDA: 03-2006-092112451400-01.
<http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/parrot.php>
- Parrot, J.-F. 2014. FROG_V2. (Fractal Research On Geosciences, Version 2). INDA: 03-2014-022712194900-01.
http://www.igeograf.unam.mx/sigg/investigacion/lage/que_hacemos/spn/parrot3.php
- Parrot, J.-F. (2013), Net_curve2. Nueva versión. Módulo ejecutable MS-DOS. Inédito.
- Parrot, J.-F. (2009), *DEM simulation of petroleum flux extension and diffusion due to pipeline ruptures in México*, En: *MODSIM2009*, ISBN:978-0-978400-7-8, Anderssen, R.S., R.D. Braddock and L. T. H. Newham (Eds.), 2701-2705.
- Parrot, J.-F., Ochoa-Tejeda, V. (2005), *Generación de Modelos Digitales de Terreno. Método de digitalización*, Geografía para el Siglo XXI, Instituto de Geografía, UNAM (en línea).
- Parrot, J.-F., Ramirez-Núñez, C. (2012), Manual del software MultiDim_V2.
- Pedraza, J. (1996), *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*, Editorial Rueda. Madrid, España. 414 pp.
- Peña-Monné, J. L. (1997), *Cartografía Geomorfológica: Básica y Aplicada*, Geoforma Ediciones. Logroño, España. 227 pp.
- Pike, R.J.I.S. Evans and T.Hengl (2008), *Geomorphometry. A Brief Guide*, vol. 33, DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00001-9.
- Pike, R. J. (2000), *Geomorphometry diversity in quantitative surface analysis*. Progress in Physical Geography 24 (1), 1–20.
- Quesada, R. A. (2016), *Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del Río General, Pérez Zeledón, Costa Rica*, Posgrado en Geografía, UNAM, México.
- Ramírez-Garza, B.M. y López-Palomino, I. (2008), *Caliza Teposcolula*, Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano, Consultado en junio 2017 en: http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html
- Ramírez Núñez, C. (2007), *Cartografía morfogenética de Pénjamo, Guanajuato*. Facultad de Filosofía y letras, UNAM, México.
- Ramírez Núñez, C. (2015), *Modelación geomorfológica de los meandros del curso bajo del Río Coatzacoalcos y la Simulación de inundaciones*. Posgrado Ciencias de la Tierra, UNAM, México.
- Rosado, G. E. (2016), *El geoparque Mixteca Alta, Oaxaca; propuesta de incorporación a los Geoparques Globales de la UNESCO*, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

- Sáenz-Pita, M.R., y López-Palomino, I. (2008), *Conglomerado Tamazulapam*, Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano, Consultado en junio 2017 en: http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html
- Sáenz-Pita, M.R., Ramírez-Garza, B.M. y López-Palomino, I. (2009), *Formación Yanhuítlán*, Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano, Consultado en junio 2017 en: http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html
- Salas, G. P. (1949), Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, vol. 1, No. 2, p. 79-156.
- Salinas, M. A. (1994), *Geomorfología de la sierra de Guadalupe y riesgos naturales*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, tesis profesional, 102p. (Inédita).
- Santa María-Díaz, A., Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F. (2006), *Diferencias estratigráficas entre el lado poniente y oriente de la Falla Tamazulapam, en la región de Oaxaca*, México (online): Convención Geológica Nacional, México, www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/RESUMENCONV2006.htm, acceso libre, consulta: 12 de agosto de 2016, pp. 120.
- Santa María, D. A. (2009), *Influencia de la falla de basamento no expuesta en la deformación Cenozoica: la falla de Caltepec en la región de Tamazulapam, en el sur de México*, Posgrado Ciencias de la Tierra, UNAM, México.
- Schlaepfer, C. J., (1970), *Geología Terciaria del área de Yanhuítlán-Nochixtlán, Oaxaca, Excursión geológica México-Oaxaca*, Sociedad Geológica Mexicana, pp.85-96.
- Sedlock, R., Ortega-Gutiérrez, F., y Speed, C. R. (1993), *Tectonostratigraphic terranes and Tectonic Evolution of Mexico*, Geological Society of America, Special Paper 278, Boulder, Colorado, 153 p.
- Secretaría de Desarrollo Social (2010), “Reporte Anual 2010”, México, SEDESOL, mimeo.
- Solari, L. A., Keppie, D. J., Ortega-Gutiérrez (2000), Deformación dúctil en la porción del Complejo Oaxaqueño (Edo. de Oaxaca). GEOS, vol., 20, No. 3, pp. 32.
- Solari, L. A., Keppie, D. J., Ortega-Gutiérrez, F., Cameron, K. L., Lopez, R., Hames, W. E. (2003), 990 and 1100 Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: roots of an orogen. Tectonophysics, vol. 365, pp. 257-282.
- Spirinov, A.I., (1952) Cartografía Geomorfológica, Editorial Estatal de Literatura Geográfica, Moscú.
- Spores, R. (1969), Settlement, farming technology, and environment in the Nochixtlán Valley. Science, 166, pp. 557-69.
- Strahler, A. (1952a), Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of de Geological Society of America, vol.63, pp. 1117-1142.

Strahler, A. (1952b), Dynamic basis of Geomorphology. Bulletin of de Geological Society of America, vol.63, pp. 923-938.

Strahler, A. (1957), Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Transactions, American Geophysical Union, vol. 63, No.6.

Taud, H., Parrot, J.-F., Álvarez, R. (1999), DEM generation by contour line dilation. Computers and Geosciences, 25, pp. 775-783.

Trejo, I. (2004), "Clima", En: A.J. García-Mendoza, M.J. Ordoñez y M. Briones-Salas (eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 67-85.

Torres Colin, R. (2004), "Tipos de vegetación", En: A.J. García-Mendoza, M.J. Ordoñez y M. Briones-Salas (eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 105-117.

UNESCO (2010), Guidelines and Criteria for National Geoparks seeking UNESCO's assistance to join the Global Geoparks Network (GGN), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), April.

Vázquez, C. M. (2001), *Cartografía geomorfológica de la zona comprendida en la hoja Ciudad Sahagún escala 1:50,000*. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Verstappen, H.Th., van Zuidam, R. (1991), El Sistema ITC para Levantamientos Geomorfológicos ITC: The Netherlands ITC Enschede, Publication number 10, 87 p.

Williams Méndez, Juan Carrera y Larry Rivas (2014), Geomorfometría de cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (estado Vargas, Venezuela), Implicaciones hidromorfodinámicas, LXIV Convención Anual de la Asociación Venezolana para el Avance de la Ciencia (AsoVAC), Venezuela. DOI:10.20502/rbg.v16i3.657.

Zaldívar-Ruiz, J., Santamaría-Orozco, D., Ortuño-Arzate, S., Guzmán,-Vega, M., Adatte, T., Soto-Navarro, P., Soto-Jaramillo, F., Hernández-Jiménez, M. A., Bertrand-Camargo, C. (1993), *Estudio de la evolución geodinámica de la Cuenca de Tlaxiaco*, Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Tecnología de Exploración, Gerencia de Investigación Aplicada a la Exploración, CAO-3509, Inédito, 170 p.