



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

Colegio de Geografía

**CARACTERIZACIÓN DE LA TECTÓNICA ACTIVA MEDIANTE EL
USO DE ÍNDICES GEOMÓRFICOS EN EL SEGMENTO AGUA DEL
PERRO, FALLA LA VENTA, GUERRERO, MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

Dulce María del Carmen Benítez Martínez

ASESOR DE TESIS:

Dra. María Teresa Ramírez Herrera

Ciudad Universitaria, CD. MX. 2023





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.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo de la Dra. María Teresa Ramírez Herrera a través de los proyectos del Instituto de Geografía:

- 1. Proyecto IN107721 Financiado por PAPIIT, DAGAPA-UNAM.*
- 2. Proyecto CONACYT-SEP CB 234865.*

***A la Dra. María teresa Ramírez Herrera...** Usted ha sido quien me ha guiado y apoyado durante la realización de este trabajo de investigación tan importante en mi vida académica, gracias porque creyó, confió en mí y por impulsarme hacer cada día mejor.*

***A mis sinodales...** quienes estudiaron y realizaron aportaciones que ayudaron a mejorar mi trabajo.*

***A mis compañeros...** Fernanda Arenas, Oswaldo Coca, Víctor Vargas, Eduardo Vázquez y David Romero por su apoyo académico en el transcurso de esta investigación.*

***A Jorge Jaime Mengelle López...** por su amor, apoyo y compañía en este proceso...*

***A mi mamá y hermana...** que con su amor y apoyo incondicional ayudaron en mi formación personal.*

***A la universidad Autónoma de México y Facultad de Filosofía y Letras...** por mi formación académica y las experiencias vividas que llevaré para siempre en mi mente.*

¡Gracias!

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Antecedentes	7
1.2 Justificación del Tema	10
1.3 Planteamiento del problema	10
1.4 Hipótesis	11
1.5 Objetivos	11
1.5.1 General	11
1.5.2. Particulares	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Placas tectónicas	13
2.2 Sismos	15
2.3 Fallas geológicas activas	19
2.4 Geomorfología tectónica	24
CAÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO	25
3.1 Localización	25
3.2 Geografía Física	26
3.2.1 Clima	26
3.2.2 Precipitación	27
3.2.3 Vegetación y uso de suelo	28
3.2.4 Hidrología	29
3.2.5 Geología	30

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	31
4.1 Percepción Remota	31
4.1.1 Ortofotos	32
4.2 Modelo Digital de Elevación (MDE)	32
4.3 Sistemas de Información Geográfica	33
4.4 Interpretación Geomorfológica	34
4.5 Índice Geomórficos	35
4.5.1 Sinuosidad del Frente de Montaña (Smf)	35
4.5.2 Índice del Gradiente (SL)	37
4.5.3 Elongación de la Cuenca	39
 CAPÍTULO 5. RESULTADOS	 41
5.1 Mapa Geomorfológico	42
5.1.1 Formas del Relieve de origen endógeno	43
5.1.2 Formas del Relieve de origen exógeno	45
5.2 Índices Geomórficos	52
5.2.1 Sinuosidad del frente de montaña (Smf)	52
5.2.2 Índice del Gradiente (SL)	52
5.2.3 Elongación de la cuenca	56
5.3 Reconocimiento de campo	57
 CONCLUSIONES	 60
 REFERENCIAS	 61

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Con la creciente preocupación sobre los distintos fenómenos de naturaleza tectónica, como son terremotos, tsunamis, entre otros ocurridos en nuestro planeta se ha generado un marcado interés por parte de la ciencia para analizar, describir y demostrar la importancia de esta dinámica activa y las posibles repercusiones que puedan generarse ante un acontecimiento de amplia magnitud. Las fuerzas provocadas por los movimientos convectivos en el manto terrestre generan el desplazamiento de las placas tectónicas conservando una dirección de deslizamiento, dando como resultado la actividad tectónica en nuestro planeta (Keller y Pinter, 2002). En el mundo existen zonas representativas provocadas por estos procesos como lo son: el Sistema de fallas de San Andrés (EE. UU), Rift continental de África del Este (África), Rift continental del Lago Baikal (Rusia), Sistema de fallas del sector Guerrero (Gaidzik *et al.*, 2016).

El ejemplo más representativo a nivel mundial es el Sistema de Fallas de San Andrés, el cual está ubicado a lo largo de la costa oeste del territorio estadounidense, con una amplitud que oscila entre los 80 y 150 km, una extensión de 1300 km, presentando fallas con un deslizamiento lateral derecho (placa norteamericana y la placa Pacífico) (Wallace, 1990). Estudios de *paleosismología* son aplicados para evaluar los patrones espaciales y temporales de la ruptura de la superficie para entender cómo interactúan las fallas y describir el comportamiento de los terremotos en cientos a miles de años (Onderdonk, 2018).

En el continente africano se tiene localizado el Rift continental de África del Este, el cual se dispone como un gran valle de rift, conformando un sistema de fallas normales con dirección norte-sur, ubicada en el este de África el cual tiene una extensión aproximada de 4 830 km generada por el proceso de extensión, se localiza al oriente del continente africano (océano Índico), es considerado como un rift de tipo continental activo con una velocidad de extensión (o expansión) que ronda los 2 mm/año aproximadamente. En esta región se ha aplicado la técnica de

interferometría (InSAR) diferencial para comprender la deformación del terreno durante periodos de tiempo determinados mediante la emisión de microondas desde el sensor que se encuentra en un satélite, permitiendo la medición de diferentes parámetros que ayudan a construir un modelo tridimensional de los rasgos topográficos del terreno. Repitiendo este procedimiento en un periodo de tiempo determinado (distintos momentos a través del tiempo) se podrá distinguir a partir de la interferencia mediante la superposición de los registros existentes la presencia de zonas que hayan sufrido un cambio en su configuración espacial, sea por movimientos sísmicos, deslizamientos de tierra, entre otros (Sahadevan, 2019).

En el continente asiático se encuentra otro caso de enorme importancia, el Rift continental del Lago Baikal (Rusia), cuyo sistema de fallas es considerado como una zona tectónicamente activa la cual es formada por la dinámica divergente entre la placa Eurasiática y Amuria, se localiza al sureste de Rusia con una orientación suroeste-noreste y una longitud aproximada de 1,500 km.

Este sistema de fallas se compone básicamente de tres regiones (norte, centro y sur) la cuales presentan características morfológicas y tectónicas diferentes debido al proceso evolutivo que ha sufrido desde hace millones de años. A lo largo de este sistema se observan fallas tanto normales como de cizallamiento con un desplazamiento lateral derecho a lo largo de la estructura principal, con una distancia de separación en sus límites de entre 3 a 6.5 mm por año pudiendo variar a lo largo del sistema, producto de los esfuerzos tensionales diferenciales en la zona (Shchetnikov, et. al., 2012). En esta región se han realizado estudios de monitoreo con una red *geodinámica GPS*, que se utiliza para entender la dirección, desplazamiento y la velocidad de movimiento del sistema de fallas, que, junto con los mecanismos focales permite la identificación de la deformación por deslizamiento (Lukhnev, et. al., 2013).

México está localizado en una de las regiones tectónicas más activas del planeta debido a que se encuentra en su porción occidental con un límite convergente donde la placa del Pacífico subduce bajo la placa de Norteamérica. Es por ello por lo que grandes sistemas de fallas activas se localizan en este litoral (océano Pacífico).

La región costera del Pacífico en México está definida por la zona de subducción mexicana (placas de Cocos y Norteamérica), donde se han identificado fallas de rumbo como: La Venta, Cacahuantepec y Dos Arroyos, así como los segmentos de la falla la Venta, Coyuca, y Agua del Perro. Cada una de ellas perteneciente a un sistema de fallas que se extienden por la zona de subducción mexicana, donde los movimientos tectónicos y la deformación de la placa continental (de Norteamérica) provocan el rompimiento y el fallamiento de la zona costera, principalmente en Guerrero y Oaxaca. Se han aplicado métodos como los *índices Geomorfológicos*, para determinar la actividad tectónica relativa y diferenciar entre áreas de tasas de elevación relativas de acuerdo con a las características geofísicas y geomorfológicas propias de la zona de estudio. (Gaidzik y Ramírez-Herrera, 2017).

En el 1 capítulo se aborda la importancia de analizar la potencial actividad tectónica en el sector Guerrero, de la zona de subducción mexicana en el Segmento Agua del Perro (SFAP), que corresponde a un segmento de la Falla La Venta, ubicada en Guerrero, que se determina a partir de índices geomórficos.

En el capítulo 2 se describe el origen y características de las fallas activas, sismos y los indicadores de expresión topográfica que se podrían encontrar asociados a este segmento de falla.

En el capítulo 3 se describen las características físicas geográficas del área de estudio como localización, clima, vegetación, geología etc. En el capítulo 4 se describe como mediante el análisis de las imágenes de satélite, ortofotos y el Modelo digital de elevación (MDE), serializo la interpretación de las expresiones topográficas. Para reforzar este análisis se calculan los índices geomórficos los cuales son una herramienta para medir el potencial de la actividad tectónica de la Falla.

Finalmente, en el capítulo 5 se muestran los resultados del análisis de la interpretación geomorfológica en conjunto con la aplicación de índices geomórficos y la visita a campo.

1.1 Antecedentes

Los estudios sobre fallas activas de la corteza ubicados en la región de antearco, principalmente en el sector de Guerrero de la Zona de Subducción Mexicana muestran algunos de los procesos tectónicos activos en esta región en el patrón de red fluvial, topografía y datos estructurales (Gaidzik, et.al.2016). *El trabajo de Gaidzik, et. al. (2016) reveló que el patrón de la red de drenaje presenta dos direcciones principales (lineamientos): (1) paralela (WNW-ESE a NW-SE) y (2) perpendicular (NE-SW) a la orientación de la zona de subducción de Cocos y a la tendencia general del frente de montaña.*

Las fallas se dividieron en 4 conjuntos según su orientación espacial: (1) fallas sub-latitudinales verticales a muy inclinadas, representadas principalmente por estructuras de rumbo, localmente también por fallas normales, (2) fallas normales de inclinación pronunciada orientadas NNE-SSW, NE-SW, (3) fallas de rumbo verticales N-S, y (4) estructuras NW-SE representadas por fallas de rumbo y fallas normales. Las fallas de rumbo sub-latitudinales suelen formar grandes superficies con estructuras asociadas bien desarrolladas que indican inequívocamente la cinemática de fallamiento. Los indicadores cinemáticos sugieren ambos sentidos de desplazamiento relativo: (a) lateral derecho determinado principalmente por líneas de deslizamiento, irregularidades en la superficie de la falla, fracturas subordinadas, principalmente cizallas de Riedel de ángulo bajo (R) y desplazamientos de vetas pequeñas y viejas y (b) lateral izquierda indicada por estructuras menores que ocurren en planos de fallas, estrías, fracturas subordinadas, particularmente de cizallas de bajo ángulo de Riedel, pero también de cizalla R' y P y fracturas extensionales T, así como el desplazamiento de las vetas. Los autores resaltan en su estudio que existen fallas de rumbo lateral izquierdo en los dos tipos de rocas principales: rocas metamórficas del Complejo Xolapa y granitoides cenozoicos.

Con base en las relaciones transversales que describieron en el campo entre las fallas de rumbo y su ocurrencia en rocas de diferentes edades, se interpretó que las estructuras laterales derechas son las más antiguas, probablemente generadas antes de la formación de los granitoides más jóvenes, mientras que en las

estructuras laterales izquierdas, (observadas en todas las unidades geológicas desde el Precámbrico al Cenozoico, como las más jóvenes) se desarrollaron después de la formación de las vetas más jóvenes, las cuales se cortan y encuentran desplazadas. Esta explicación también se respalda en la influencia de estas fallas sobre el patrón de la red de drenaje (Gaidzik *et al.*, 2016).

Las fallas normales de inclinación moderada a, abrupta están orientadas W-E a NE-SW y con inmersión de S a SE, son frecuentes dentro de Técpan (principalmente en los afloramientos septentrionales ubicados en las rocas metamórficas), Atoyac (granitoides), Coyuca (granitoides), La Sabana (gneisses) y el drenaje de las cuencas Papagayo, particularmente en los afloramientos del norte, ubicados cerca de La Venta, tanto dentro de los gneis como de los granitoides. Estas estructuras producen escarpes, cascadas y meso-grabens. Los dos últimos conjuntos de fallas los identificados en el campo, son fallas de rumbo N-S y fallas de rumbo NW-SE son mucho más escasos (Gaidzik *et al.*, 2016).

La falla La Venta de casi 200 km de largo es una estructura compleja que incluye segmentos más pequeños que se reflejan de manera diferente en el paisaje, con escalonamientos, pequeñas fallas subsidiarias y pequeñas variaciones en el rumbo dentro de los segmentos definidos. En general, los segmentos de Agua del Perro y Coyuca están bien delimitados en cuanto a características del paisaje, mientras que el segmento de Técpan, con la excepción del lineamiento claro en la cuenca de drenaje de Coyuca y meso fallas registradas en la cuenca Atoyac, no tienen una buena expresión en el paisaje (Gaidzik *et. al.* 2016).

Estudios sobre variaciones espaciales y temporales del levantamiento tectónico en esta región del ante arco de Guerrero, México (Ramírez, *et. al.* 2021) evalúan y cuantifican el levantamiento tectónico, la deformación tectónica y fallas activas a través del tiempo geológico utilizando los métodos de índices geomórficos y datación de la tasa de levantamiento vertical del Holoceno en terrazas ubicadas dentro de la cuenca del río Técpan.

Los levantamientos diferenciales presentes en la zona de subducción son un elemento muy importante en este estudio, ya que a partir de ellos se puede verificar el cambio en el curso de los ríos dando respuesta a la deformación tectónica, y que a su vez genera la erosión y modifica la sinuosidad de la cuenca.

El estudio de las terrazas aluviales presentes en los diferentes segmentos del río Tépán da cuenta del cambio continuo en la circulación de los escurrimientos fluviales a través del tiempo, por lo que estudiar sus densidades (grosor/profundidad) y sus edades es posible inferir de qué manera fue evolucionando el paisaje (Ramírez, et. al. 2021).

Se aplicaron Índices geomórficos en segmentos sobre el río Tépán para determinar la actividad tectónica y diferenciar entre áreas de mayor y menor dinámica en cuanto a tasas de incisión, erosión y levantamiento.

A partir de la datación de los sedimentos que configuran las terrazas fluviales se determinó que la tasa de incisión en el área de estudio se ha mantenido relativamente constante en el tiempo con una medición promedio de 3.6 ± 0.3 mm/año, no así en el espacio dado donde es más evidente la presencia de valles profundos en V debido a mayores tasas de incisión río arriba, contrario a lo que sucede aguas abajo del río donde es más frecuente la presencia de valles anchos y de poca profundidad. De esta manera, es posible identificar que las Tasas de incisión determinan las variaciones espacio temporales en las tasas de elevación a largo plazo (Ramírez, et. al. 2021).

Con relación a lo anterior, este estudio evidenció que las tasas de deformación tectónica vertical del Holoceno se utilizan para evaluar la actividad de las fallas de la corteza, lo cual explica claramente las variaciones en el levantamiento del terreno debido a los movimientos de subducción y la configuración de la corteza superior.

“Las Tasas de levantamiento derivaron de las tasas de incisión del río calculadas con las alturas de las terrazas de estratos y la datación asociada, variando desde $\sim 1 \pm 0.3$ mm/año hasta $\sim 5 \pm 0.6$ mm/año durante el Holoceno, de acuerdo con la alta actividad tectónica inferida en esta zona. Estos resultados varían significativamente espacialmente, es decir, aumentando aguas arriba “(Ramírez, et. al. 2021).

Las tasas de levantamiento tienen una relación directa con la evidencia de fallas activas presentes debido a los esfuerzos que la corteza sufre por la actividad tectónica, y va a variar espacialmente debido a la diferente geometría que presente la placa que subduce y/o fallas corticales. Con ello se determina que existe una estrecha relación entre el levantamiento diferencial, la topografía y rugosidad de la placa que subduce (Ramírez, et. al. 2021).

Kazachkina (2020), analizó el monitoreo de datos GPS y estudios geomorfológicos a lo largo del sur de la costa de México, entre Guerrero y Oaxaca, que demuestran la existencia de una falla activa de 650 km de largo paralela a la fosa de Mesoamérica con un desplazamiento lateral izquierdo de 3 a 6 mm/año que se limita al norte y asocia con la dinámica del ante arco Xolapa siendo este de suma importancia para la evolución tectónica de la región. Se utilizaron estaciones GPS permanentes con datos de 5 a 16 años de mediciones, operadas por diferentes instituciones y datos de estaciones GPS (International GNSS Service) globales, procesando los datos en el software GAMIT-GLOBK (versión 10.60) del área de Guerrero y Oaxaca para estimar deformaciones y velocidades tectónicas seculares.

1.2 Justificación del tema

La presente investigación proporcionará más elementos para evaluar el potencial peligro sísmico en fallas activas en la región de subducción de México, aplicando índices geomórficos en el Segmento de Falla Agua del Perro (**SFAP**).

1.3 Planteamiento del problema

En la zona sur de la República Mexicana se localiza una zona con actividad tectónica causada por la dinámica que existe entre las placas continental de Norteamérica y la oceánica de Cocos. Debido a esto se han creado distintos sistemas de fallas en la superficie terrestre los cuales son visibles en rasgos geomorfológicos. Desde hace tiempo la zona denominada *Brecha Sísmica de Guerrero* (**BSG**) se ha convertido en un tema de interés debido a que no se ha

presentado un sismo de gran magnitud en la Zona de Subducción Mexicana (ZSM). Gaidzik et. al (2016), Gaidzik y Ramírez-Herrera (2017) mencionan que en dicha Brecha no se han presentado sismos mayores a 6 grados de magnitud desde el siglo XX.

El segmento de falla denominado Agua del Perro (**SFAP**), (Gaidzik y Ramírez-Herrera, 2017), está localizado al oriente del sistema de fallas La Venta (**SFLV**), y es parte de este sistema, por lo que es posible que exista actividad tectónica la cual puede estar relacionada con la sismicidad de la región. En esta investigación nos planteamos entender la probable actividad tectónica con el estudio detallado de las formas del relieve y otros parámetros geomórficos que nos puedan revelar indicios de cómo se comporta esta región.

1.4 Hipótesis

De acuerdo con la información que se conoce de la región, se considera que existe actividad tectónica del SFAP, la cual puede estar asociada a sismicidad importante en la zona de estudio.

1.6 Objetivos

1.5.1 General

- Determinar a partir de índices geomórficos, la potencial actividad tectónica del SFAP, que es un segmento de la Falla La Venta.

1.5.2 Particulares

- Llevar a cabo el análisis morfotectónico de la zona de estudio utilizando imágenes como ortofotos, Modelo Digital de Elevación (MDE) y topografía.
- Describir las formas del relieve y elaborar un mapa geomorfológico.
- Calcular los Índices geomórficos y determinar el grado relativo de actividad tectónica.
- Determinar la probable relación que existe entre la actividad tectónica del SFAP y la sismicidad de la zona de subducción de México.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Placas tectónicas.

Alfred Wegener, meteorólogo alemán, sugirió por primera vez a principios del siglo XX (1910) que los continentes se movían o se desplazaban, creando su teoría conocida como Deriva Continental la cual puede comprobarse con estudios que aportaron otros científicos de áreas distintas como lo son: 1) **geográficas**, el ajuste en los litorales continentales se refiere a la similitud que existe en el contorno de las tierras emergidas dando a entender que pudieron haber estado unidas; 2) **geológicas y tectónicas**, algunas partes de los continentes comparten un mismo tipo de roca y formas del relieve, por ejemplo, las cadenas montañosas de los Montes Apalaches que presentan una semejanza con los Montes Escandinavos; 3) **climáticas**, en la parte sur de los continentes Americano, Africano y Oceanía se encontró evidencia de glaciación lo que en el Hemisferio Norte no se presentó debido a que se pudo haber encontrado en latitudes medias o cercanas al ecuador; 4) **paleontológicas**, la evidencia de fósiles (flora y fauna) encontrados en los continentes del hemisferio sur presentan una gran similitud abriendo la posibilidad de que hubo un tránsito directo de estos seres vivos; 5) **paleomagnétismo y deriva polar**, la orientación magnética sirvió como guía para detectar algún movimiento en el pasado registrado en las rocas. Así se demostró las diferentes direcciones antiguas comparándolas con los polos magnéticos actuales, siendo un indicador en el movimiento que han experimentado (Frish et al 2010, Kearey, et. al, 2010).

Con la contribución de los geólogos como **Otto Ampferer** (1906), quien presentó la teoría de las corrientes subterráneas, postularon que la compresión y el transporte de la placa tectónica fueron por corrientes masivas debajo de las cadenas montañosas (Frisch et al 2010, kearey et al 2009). **Robert Schwinner** (1920) tomó estas ideas para desarrollar una teoría de mayor alcance que asumió que corrientes en el interior de la Tierra son producidas por transporte de calor por convección.

Basándose en estas ideas Arthur Holmes (1931-1944) contribuyó a la teoría sobre la convección en el manto, establecieron que los movimientos convectivos se pueden tener tanto en el manto líquido como en el sólido (Frisch et al 2010, Kearey et al 2009). De acuerdo con los indicios mencionados previamente se determina que esta dinámica interna de la tierra genera la ruptura y movimiento de la litosfera. La Teoría de la Deriva Continental fue aceptada en la década de 1960 con el desarrollo de la Tectónica de Placas, tomando su nombre de las placas litosféricas rígidas que forman la capa más rígida y que se ha fragmentado debido a las corrientes de convección en el manto. Estas placas se han movido a través de millones de años desde la ruptura de los grandes super continentes (Frisch et al 2010, Kearey et al 2010).

El modelo de tectónica de placas unifica una variedad de características y acontecimientos geológicos que explican la dinámica interna de la litosfera, proporcionando una estructura para el entendimiento de muchos procesos geodinámicos como los sismos, vulcanismo y la creación de montañas (Turcotte y Schubert, 2002). La litosfera está fragmentada en placas que pueden ser continentales y oceánicas, teniendo un desplazamiento sobre la astenosfera con diferentes direcciones y velocidades, que dan forma a la superficie terrestre como los continentes, montañas y las cuencas oceánicas. Existen 7 placas tectónicas principales (Figura 1); Norteamérica, Sudamérica, Pacífico, Africana, Euroasiática, Australiana y Antártica; y 7 placas tectónicas secundarias: Caribeña, Nazca, Filipina, Cocos, Scotia y Juan de Fuca, existiendo placas de menores dimensiones (Tarbuk, 2005).

Este movimiento de placas se debe al aumento y disminución del calor interno de la tierra provocando corrientes de convección lo que hace que se separen algunos centímetros al año (Figura 1). La deformación que se presenta entre los límites de las placas se diferencia por la función del tipo de movimiento que presentan; estos pueden ser: **Divergente**, donde las placas se alejan una de la otra permitiendo que el magma ascienda formándose como consecuencia nueva

litosfera; **Convergente**, la placa más densa desciende por debajo de la placa continental, llegando al manto (**subducción**), esto genera fricción y fuerzas que produce el levantamiento de una cordillera y el ascenso del magma que genera volcanes y sismos, y el **Transformante** donde las placas se desplazan de manera lateral existiendo poca sismicidad y magmatismo (Tarbuk, 2005).

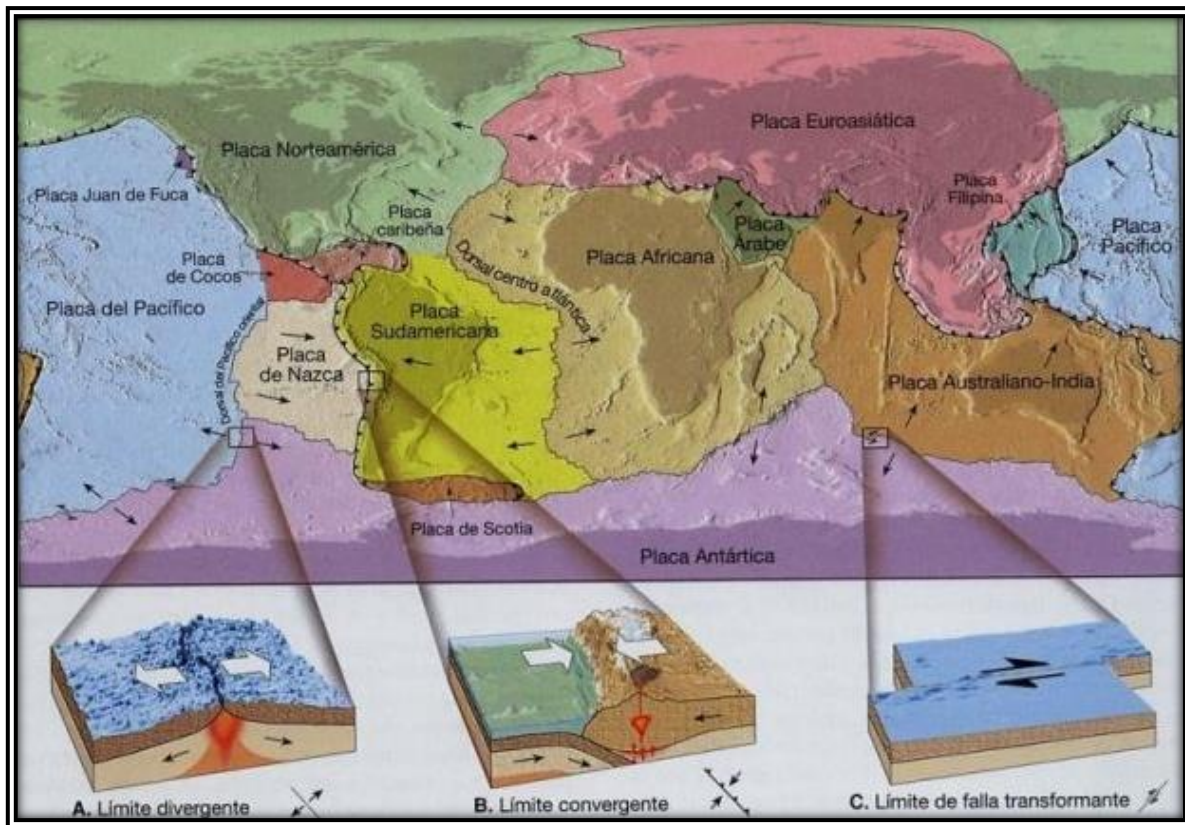


Figura 1: Placas tectónicas actuales y tipos de límites de placas (Fuente: Tarbuk, 2005).

2.2 Sismos

El estudio de la sismología se da a partir de la observación de los fenómenos geofísicos de la corteza terrestre, específicamente los sismos, los cuales son fenómenos geológicos producto de la dinámica interna que existe entre los límites de placas tectónicas en donde se genera un rompimiento por la acumulación de energía. Esta es liberada a través de un plano de falla, generando una ruptura en las placas tectónicas, produciendo un sismo (hipocentro), desplazándose hacia

todas direcciones llegando hasta la superficie de la tierra (epicentro) el cual genera ondas sísmicas elásticas que se propagan a través de la corteza terrestre (Tarbuk y et al. 2005, Keller y Pinter, 2002).

Existen dos tipos de ondas sísmicas según su propagación en la tierra (Figura 2):

- **Internas:** ondas P (onda primaria), son ondas longitudinales capaces de atravesar cualquier tipo de material, cuando lo hacen en un material sólido de mayor rigidez aumenta su velocidad, pero disminuye si se dispersa en materiales líquidos y gaseosos, onda S (onda secundaria), estas se desplazan transversal a la dirección de propagación, su velocidad es menor y no se propaga en masas líquidas (Tarbuk, 2005, Keller y Pinter, 2002).
- **Superficiales:** son aquellas que a partir del epicentro son más lentas que las ondas internas, ondas Love (L), se originan en la interfase de dos medios con propiedades mecánicas diferentes, en este caso el movimiento es de lado a lado y perpendicular a su dirección de propagación, ondas Rayleigh (R), se desplazan según una trayectoria elíptica retrograda que viaja en dirección de la propagación de la onda (Tarbuk, 2005, Keller y Pinter, 2002).



Figura 2: Tipos de ondas sísmicas según su propagación en la tierra. Fuente: Británica, 2009.

México está afectado por la interacción de las placas tectónicas, Cocos y Norteamérica, definiéndose una zona de subducción entre la placa norteamericana y Cocos (Tarbuk, 2005).

En México como en otros países surgió el interés por establecer estaciones sismológicas, que permitieran tener un registro de los sismos, datos que con el paso del tiempo se utilizaron para localizar las zonas sísmicas. Los sismos fueron representados en un mapa, y que en conjunto dibujan el límite actual de las placas (Gutiérrez, 2014) (Figura 3).

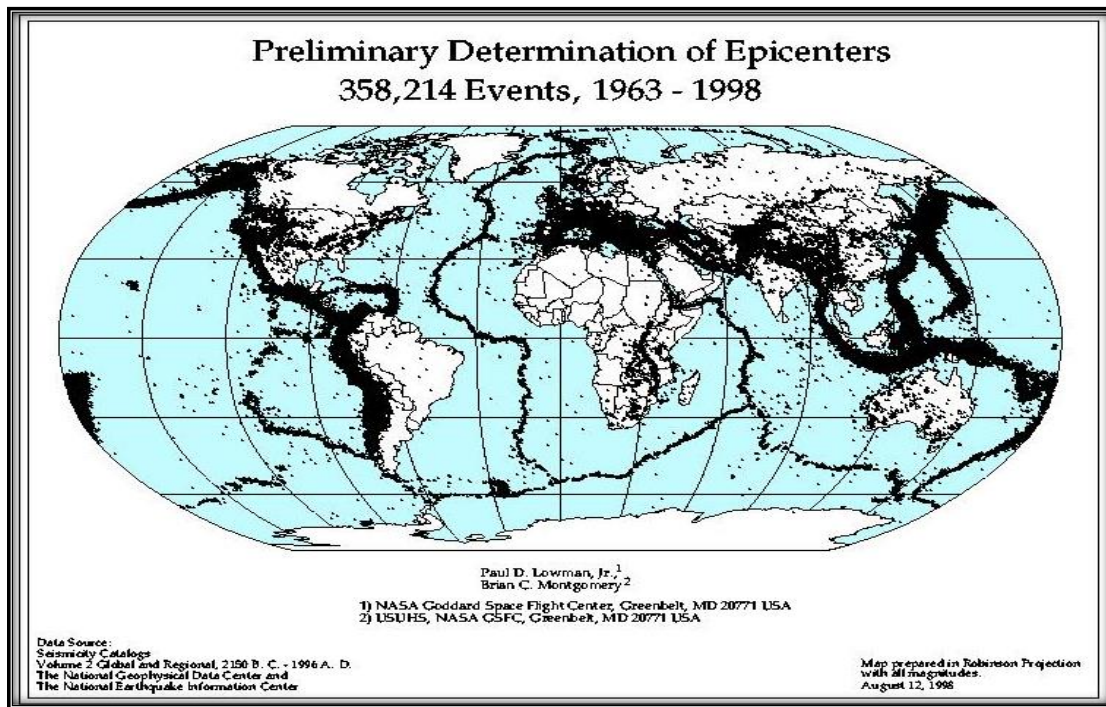


Figura 3. Localización de epicentros en el planeta entre 1963 y 1998. Fuente: Lowman Jr., 2002.

Una brecha sísmica (gap sísmico) es una zona de falla o un segmento de borde entre placas tectónicas particularmente de tipo de subducción o de movimiento lateral, de conocida sismicidad histórica e instrumental, donde no ha ocurrido un sismo (mayor o igual a 7) durante un periodo prolongado de tiempo teniendo un largo lapso de calma sísmica en la cual se ha acumulado energía elástica por deformación y que por lo tanto presenta una mayor probabilidad de ruptura y de

ocurrencia de un evento sísmico. “Una región de alto potencial sísmico es una brecha sísmica que, por razones históricas o tectónicas, se considera probable que produzca un gran impacto durante las próximas décadas” (McCann, et al. 1979), (Allabay, 2008).

Actualmente, la brecha sísmica más importante en México es la correspondiente a la costa de Guerrero, la cual es un segmento de ~200 km del límite de la placa Cocos-Norteamérica entre 99.2 ° W y 101.2 ° W; en donde no se han producido grandes sismos de subducción en la parte NW desde 1911 (la región SE de Acapulco, a 99.2° W, ha experimentado sismos $M_w \leq 7.1$ desde 1957) (Kostoglodov, et al. 2003). El ancho de la interfaz de placas sismogénicas acopladas en la zona de subducción mexicana se estima en unos 60 km; si toda la brecha se rompiera en un sismo, daría lugar a un evento de magnitud $M_w = 8.1-8.4$ (Singh y Mortera, 1991) por lo que tal evento podría ser devastador para Acapulco y otras ciudades del estado de Guerrero, así como para la Ciudad de México (Kostoglodov, et al. 2003, Figura 4).

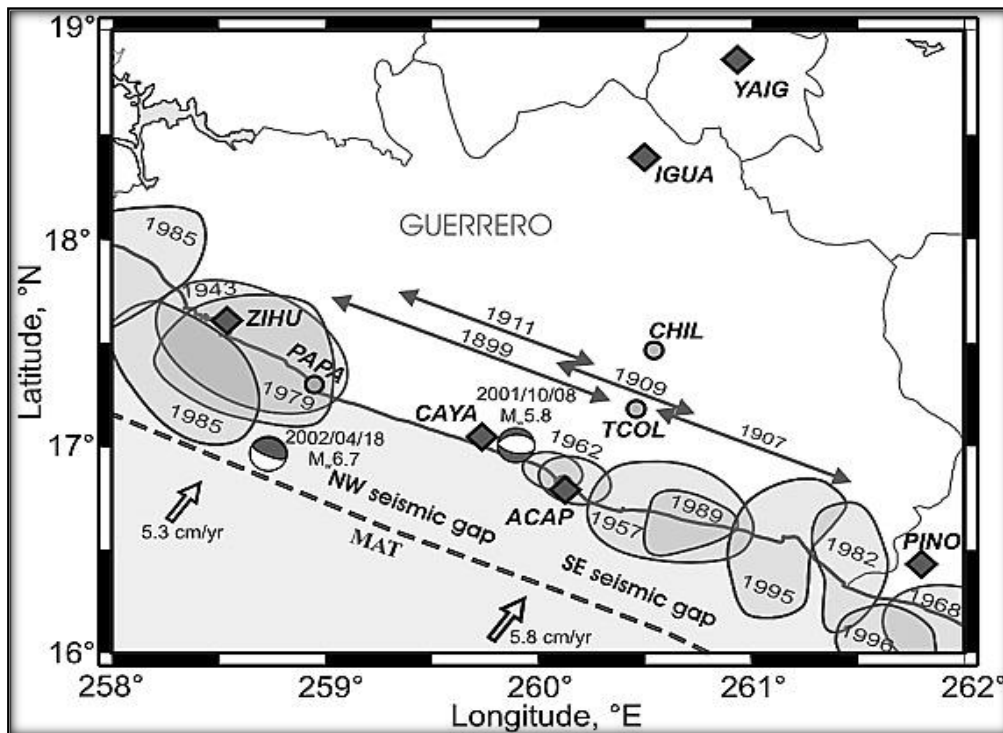


Figura 4. Brecha Sísmica de Guerrero. Fuente: Kostoglodov, 2003.

La Brecha Sísmica de Guerrero (**BSG**) es importante por su baja actividad tectónica, a pesar de ser un límite convergente ubicado en una zona con una dinámica interna compleja; Gutiérrez (2014) describe que es una de las brechas sísmicas que en México pueden generar uno o varios sismos de gran magnitud en un futuro cercano como en la costa de Guerrero. En la comunidad científica existe consenso acerca de que actualmente la zona de mayor potencial sísmico en nuestro país es la (**BSG**).

Las zonas con mayor actividad sísmica en nuestro país se encuentran principalmente en los estados de *“Guerrero, Oaxaca y Chiapas, el estado de Jalisco también presenta eventos, pero con menor frecuencia, esto es debido a la presencia de la Zona de Subducción Mexicana (ZSM) donde la actividad tectónica provoca el rompimiento de las placas, estas rupturas son identificadas como fallas”* (Romero, 2019).

2.3 Fallas geológicas activas

Como ya se ha mencionado nuestro planeta es tectónicamente activo y genera accidentes geográficos que modifican el paisaje como lo son las fallas geológicas, que es una ruptura en el sustrato rocoso a lo largo de la cual se produce un desplazamiento (Lugo, 2011).

“Una falla se define como una fractura o un sistema de fracturas a lo largo del cual las rocas han sido desplazadas; es decir, las rocas de un lado de la falla se han movido en relación con las rocas del otro lado. Las zonas de falla varían en ancho, desde un metro aproximadamente hasta varios kilómetros de ancho” (Keller y Pinter, 2002).

Existen dos tipos de fallas que se pueden clasificar por el tipo de desplazamiento en el terreno; fallas con desplazamiento vertical (normal e inversas) y fallas con desplazamiento horizontal (fallas laterales o strik-slip) (Tarbuk, et al. 2005) (Tabla 1). Las fallas con desplazamiento vertical tienen un movimiento paralelo al buzamiento del plano de falla, existiendo dos tipos; fallas normales, donde el bloque

de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de piso, y que son producto de fuerzas extensionales que separan la corteza. Estos son evidencias geomorfológicas que se pueden encontrar en frentes de montaña, pilares y fosas entre otros (Tabla 2). El otro tipo son las fallas inversas, donde el bloque de techo se mueve hacia arriba sobre el bloque de piso por fuerzas compresionales (como en las zonas de subducción y otros bordes convergentes), también pueden ser visibles en pliegues y escarpes además de cabalgamientos (Tarbuk, et al. 2005; Keller y Pinter, 2002) (Tabla 3).

En las fallas con deslizamiento horizontal su movimiento es paralelo al rumbo de la falla, los bloques se pueden desplazar uno respecto al otro, al observar la falla de frente un bloque puede tener movimiento a la derecha (dextral) o si el bloque se mueve a la izquierda (sinistral). En estas zonas podemos encontrar formas del relieve como valles lineales, ríos desviados y escarpes entre otros. En las Tablas 1, 2 y 3 que se muestran a continuación se describen los indicadores del relieve que caracterizan a las fallas activas (Tarbuk, et al. 2005; Keller y Pinter, 2002).

De acuerdo con Kelle y Pinter (2002) “Una falla se considera activa si se ha movido durante los pasados 10,000 años (Holoceno), el periodo Cuaternario (los últimos pasados 1.65 M.a.) es el más reciente periodo del tiempo geológico, donde la mayoría de nuestro paisaje ha sido producido. Cualquier falla que se ha movido durante el periodo Cuaternario puede ser clasificada como potencialmente activa, mientras que las fallas que no se han movido en este periodo son clasificadas generalmente como inactivas. Para probar que una falla es activa es necesario determinar la historia de los sismos históricos (paleosismicidad) basado en el registro geológico, el cual involucra identificar los materiales terrestres fallados y la determinación de los más recientes desplazamientos” (Keller y Pinter, 2002).





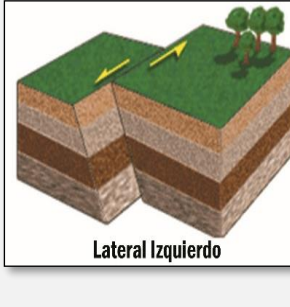


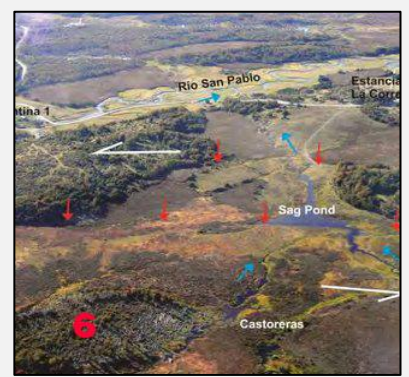



Tipos de Fallas	Indicadores de expresión topográfica de fallas	Representación		
<p>Falla de rumbo (Strike-slip)</p>  <p>Lateral Derecha</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1) Valles Lineales ▪ 2) Ríos Desviados y ▪ 3) Desplazadas ▪ 4) Escarpes ▪ 5) Shutter-ridge (obstrucción del relieve) (Obstrucción de las corrientes de drenaje por deslizamiento de colinas o conjunto de ellas a través de la zona de falla). 			
 <p>Lateral Izquierdo</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 6) Sag-ponds (depresión topográfica) (son hundimientos en zonas de falla en los cuales puede o no retener agua) ▪ 7) Springs (manantiales) (por la fracturación de la falla el agua subterránea tiende a drenar hacia la superficie). ▪ 8) Bench (Levantamiento) (Superficies relativamente planas elevadas que pueden ser deformadas o inclinadas). ▪ 9) Pressure-ridges (Levantamiento del relieve) (pequeñas áreas deformadas por compresión en una zona de falla) 			
				

Tabla 1): Expresiones topográficas en el terreno por fallas de rumbo. imágenes tomadas de: 1,2,3 (Pucci,2006), 4 (Wallace,1990) 5 (Russell,1903) 6 (Onorato, et al. 2019) 7 (Autoría propia) 8 (Benito, et al. 2003) 9 (Ghassemi,2016).

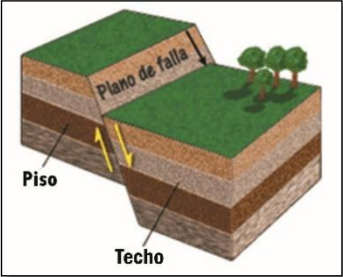
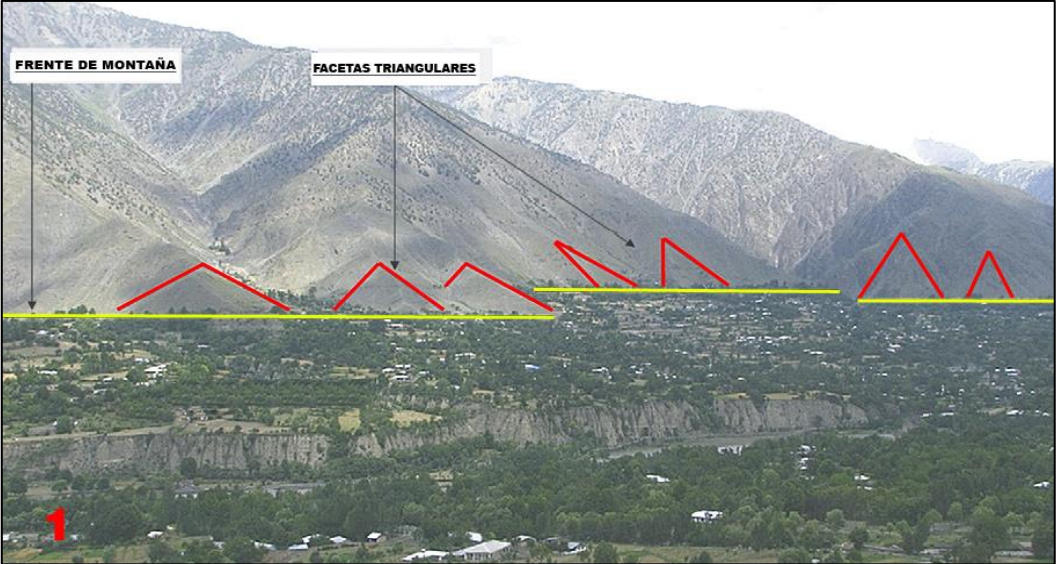



Tipos de Fallas	Indicadores de expresión topográfica de fallas	Representación
<p data-bbox="176 164 327 228">Falla Normal (Dip-Slip)</p>  <p data-bbox="121 745 384 773">Deslizamiento vertical</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="512 237 772 407">▪ 1) Frentes de montaña (pueden ser lineales o con pendientes pronunciadas). <li data-bbox="512 483 800 691">▪ 1) Facetas triangulares (son geometrías triangulares formadas por el sistema de drenaje). <li data-bbox="512 732 695 760">▪ 2) Escarpes <li data-bbox="512 837 783 902">▪ 3) Incremento de actividad volcánica <li data-bbox="512 943 751 1008">▪ 4) Horts-Graben (pilar y fosa) 	   

Tabla 2): Expresiones topográficas en el terreno por falla normal. imágenes tomadas de: 1 (Mahmood y Gloaguen, 2012), 2 (Silva y Rodríguez, 2018), 3 (Volcano Discovery,2015), 4 (Everything Is Electric,2016).

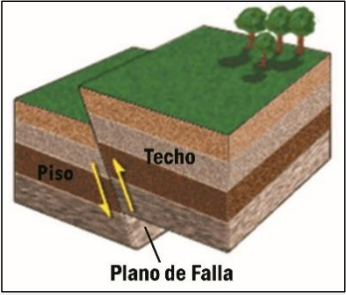



Tipos de Fallas	Indicadores de expresión topográfica de fallas	Representación
<p data-bbox="100 235 394 337">Falla de desplazamiento Vertical. (dip-slip).</p>  <p data-bbox="117 852 380 881">Deslizamiento vertical</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="506 451 688 513">▪ 1) Pliegues anticlinales <li data-bbox="506 591 743 620">▪ 2) Cabalgaduras <li data-bbox="506 698 688 727">▪ 3) Escarpes 	  

Tabla 3): Expresiones topográficas en el terreno por falla inversa. Imágenes tomadas de: 1) (Autoría propia), 2 (Oliveros, S.F), 3 (Benavente Escobar, et al. 2016).

2.4 Geomorfología tectónica

La geomorfología es una ciencia que se encarga del estudio de las formas de la superficie terrestre tomando en cuenta tanto las tierras emergidas como las que se encuentran cubiertas por agua (sean estos océanos, lagos, ríos y glaciares). Su estudio comprende la morfología, los procesos físicos que las originan, la estructura que la sustenta, su historia de desarrollo y la dinámica actual que tiene un efecto directo sobre los seres vivos presentes en ella (Lugo H, 2011). Una de las disciplinas que surgen de la geomorfología se especializa en temas relacionados con la actividad tectónica de la superficie terrestre, resultando así un nuevo campo del conocimiento llamado **geomorfología tectónica**, el cual estudia el resultado de la evolución del relieve a través del estudio de los procesos tectónicos y los procesos que contribuyen a su destrucción (erosión) tomando como fuente primaria de información la descripción y medición de las formas del relieve (Burbank y Anderson, 2001).

La geomorfometría se encarga del estudio de las características cuantitativas de las formas del relieve, generando como resultados índices morfométricos (Lugo, 2011). Los Índices morfométricos presentan características cuantitativas propias de los diferentes accidentes geográficos, como: tamaño, elevación y pendiente (medios, máximos y mínimos) del relieve. Los datos morfométricos permiten calcular índices geomórficos más detallados, que al combinarse nos proporcionan una característica particular de un área específica, como lo puede ser el nivel de actividad tectónica. Los índices geomórficos al ser útiles para los estudios tectónicos servirán para obtener información precisa del comportamiento de la tectónica activa en áreas más grandes. Existen diferentes fuentes de información que nos proporcionan datos y mediciones propias de los índices geomórficos, como las, imágenes de satélite, modelos digitales de elevación y mapas topográficos, así como el análisis geoespacial con el uso de sistemas de información geográfica, entre otros (Keller y Pinter, 2002).

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización

El área de estudio en el (**SFAP**) se localiza en la vertiente interior de la sierra Madre del Sur, al oriente del sistema de fallas La Venta (**SFLV**), situado a 48 km al sur de Chilpancingo, Guerrero, en la región sur occidental de la República Mexicana estando al occidente del poblado Tierra Colorada con coordenadas geográficas 17°06′34.80″ N Y 99°33′10.36″ O (INEGI, 2021, Figura 5).

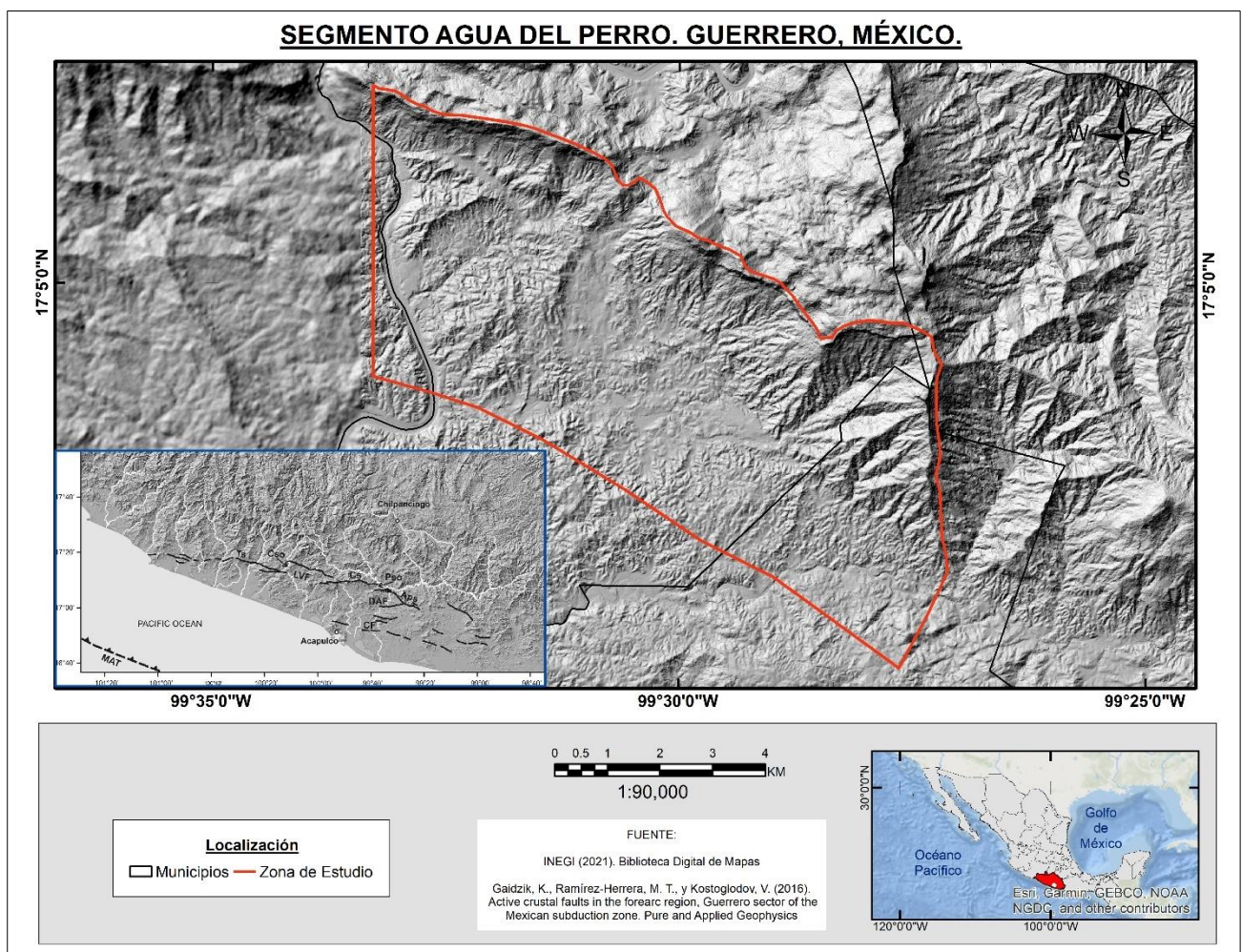


Figura 5. Localización del área de estudio. Elaboración propia con datos de (INEGI, 2021) y mapa recuadro de la zona de fallas La Venta en la Sierra Madre del Sur. Fuente: Gaidzik et. al 2016.

3.2 Geografía Física

3.2.1 Clima

El clima está determinado por diferentes factores, entre los que se encuentran la altitud, la latitud y la distribución existente de tierra y agua (por mencionar algunos). Con base a los datos de INEGI, los climas predominantes en la zona de estudio es el cálido subhúmedo Awo, Aw1 (w) y Aw2 (w) representados en la Figura 6 se basan en la clasificación de Köppen (modificado de García, 2004), (CONABIO, 1998).

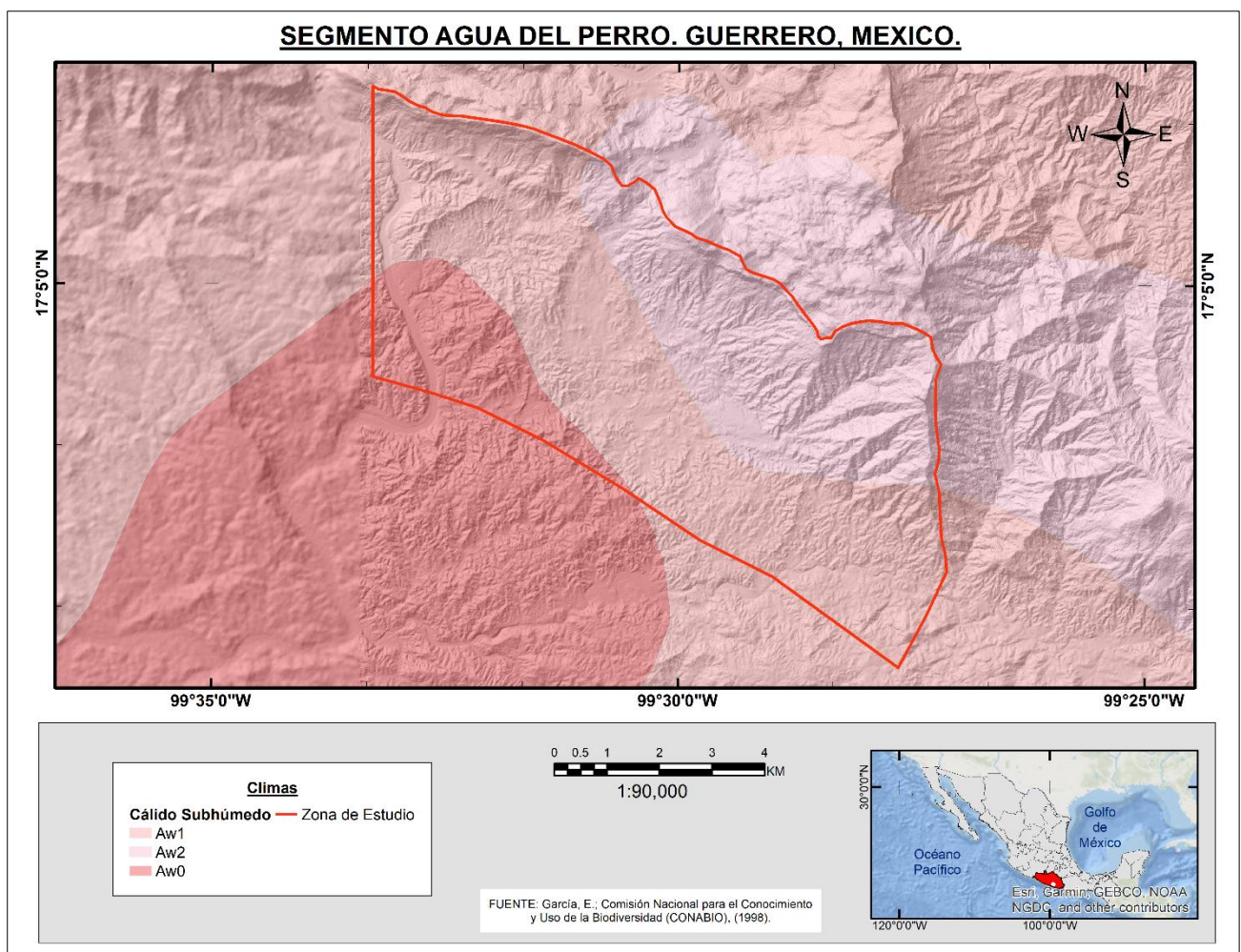


Figura 6. Tipos de climas que se localizan en el área de estudio. Fuente elaboración propia con datos de (CONABIO, 1998).

3.2.2 Precipitación

Al estar cercano a la costa y en la planicie costera la evaporación del océano Pacífico permite que exista una precipitación moderada hacia la Sierra Madre del Sur, permitiendo así que en la zona de estudio existan tres zonas bien diferenciadas una al oeste de 1200mm, y en la parte centro, norte y noroeste va de 1200 a 1400 y al este 1500mm promedio anual, (UNIATMOS, 2021,) (Figura 7). Según los datos de precipitación bimodal, la época seca es en los meses de diciembre a abril mientras que en la época húmeda se da en los meses de mayo a noviembre, donde las precipitaciones mayores son durante los meses de agosto y septiembre total mensual media, en el periodo 1989-2018 (CONAGUA, 2023), (Figura 8).

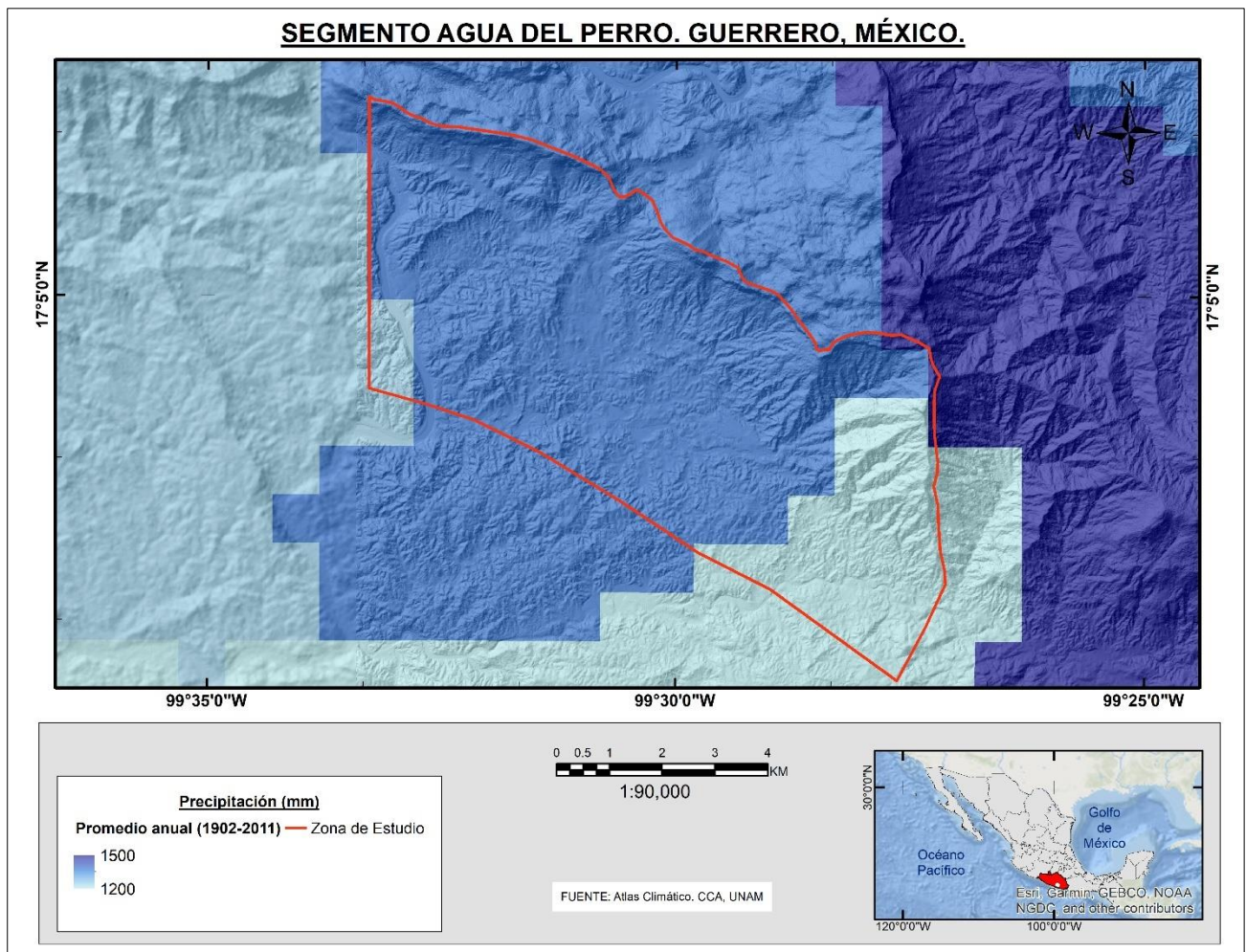


Figura 7. Precipitación Anual Promedio (mm) de la zona de estudio del intervalo 1902-2011. Fuente elaboración propia con datos de (UNIATMOS, 2021)

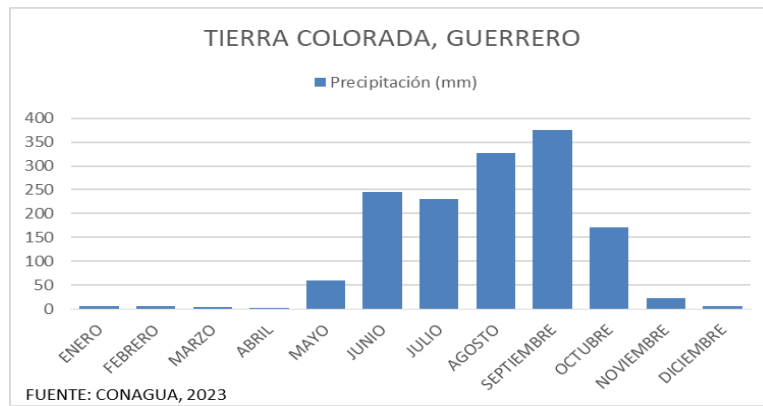


Figura 8. Lluvia Total Mensual (media, periodo 1989-2018), Fuente: CONAGUA (2023)

3.2.3 Vegetación y uso de suelo

Debido al clima y los factores ambientales existentes en la zona de estudio la vegetación que predomina en esta área es la selva caducifolia secundaria, y la agricultura de temporal (INEGI, 2014-2017), (Figura 9).

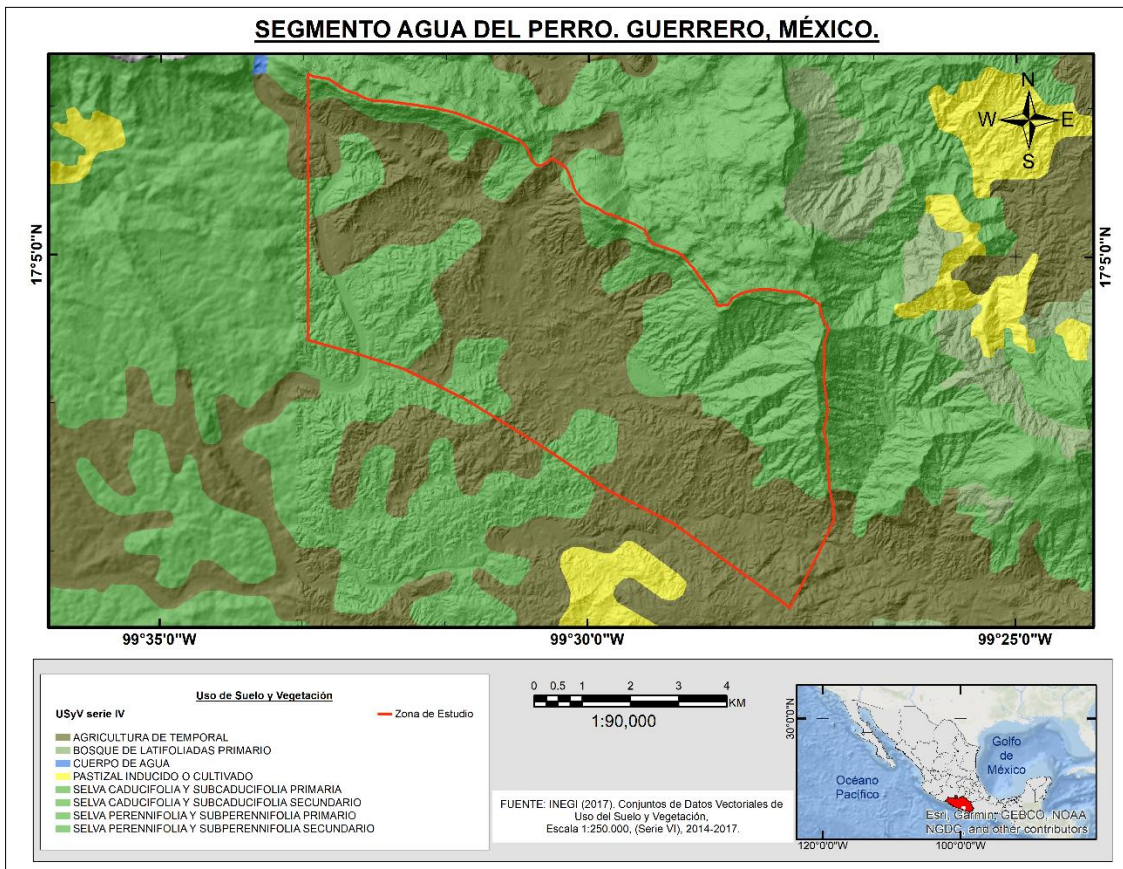


Figura 9. Vegetación y uso de suelo predominante en la zona de estudio. Fuente elaboración propia con datos de (INEGI, (2014-2017).

3.2.4 Hidrología

La localización geográfica de la zona de estudio se caracteriza por su morfología ya que es producto de la actividad tectónica regional, causada por la subducción de las placas, debido al tipo de roca y erosión presentes se va creando un patrón de drenaje hasta desarrollar dos importantes subcuencas hidrológicas, la del río Papagayo y la del río Omítlán (INEGI, 2010, Figura 10).

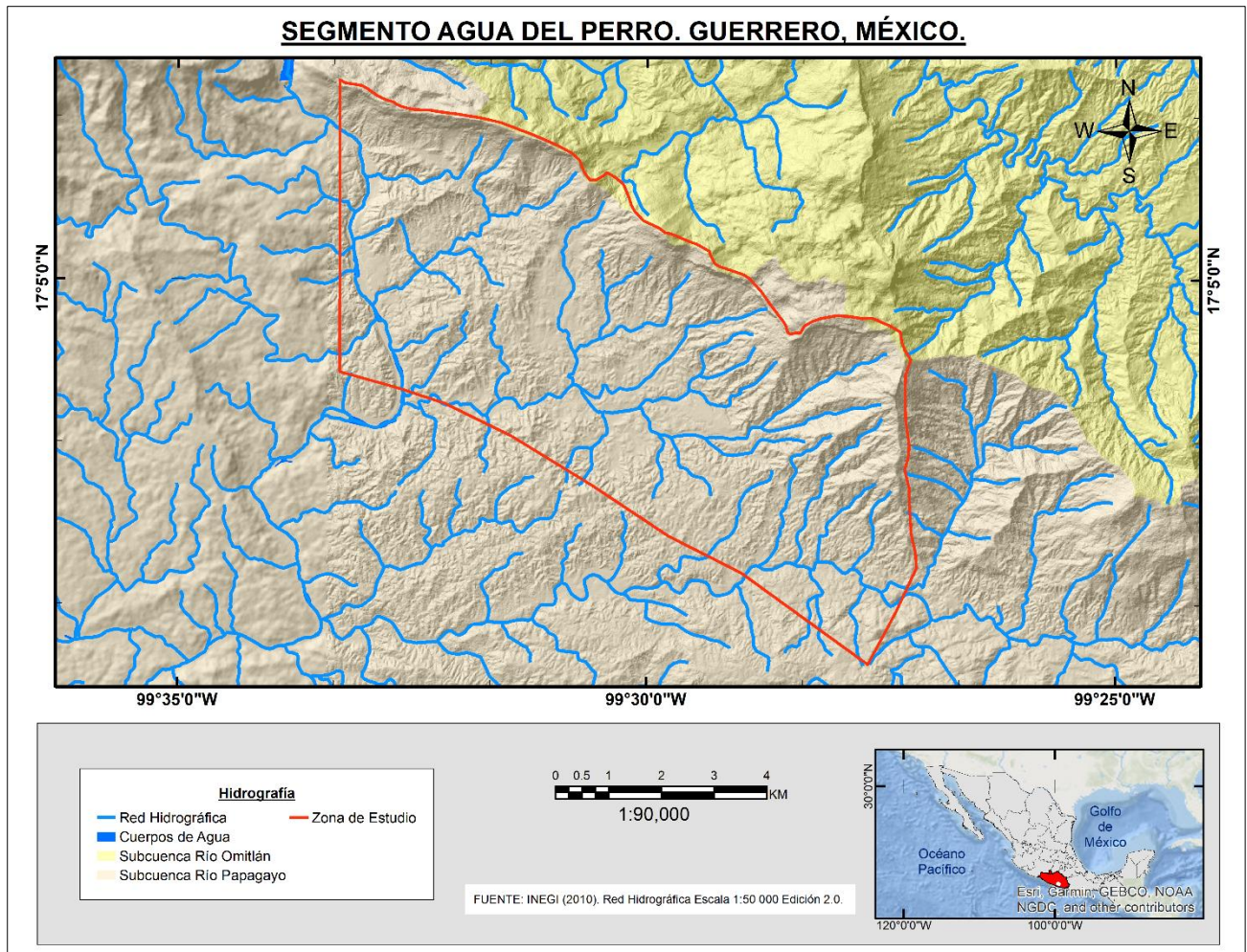


Figura 10. Hidrología de la zona de estudio. Fuente elaboración propia con datos de (INEGI, 2010).

3.2.5 Geología

El área de estudio se encuentra casi en su totalidad dentro del terreno tectono-estratigráfico Xolapa, sólo la parte más septentrional y noreste se encuentran dentro del terreno del arco de Guerrero (Campa y Coney, 1983). En la zona de estudio afloran rocas como: riolita, caliza, metaconglomerado y complejo metamórfico (INEGI,1991), (Figura 11).

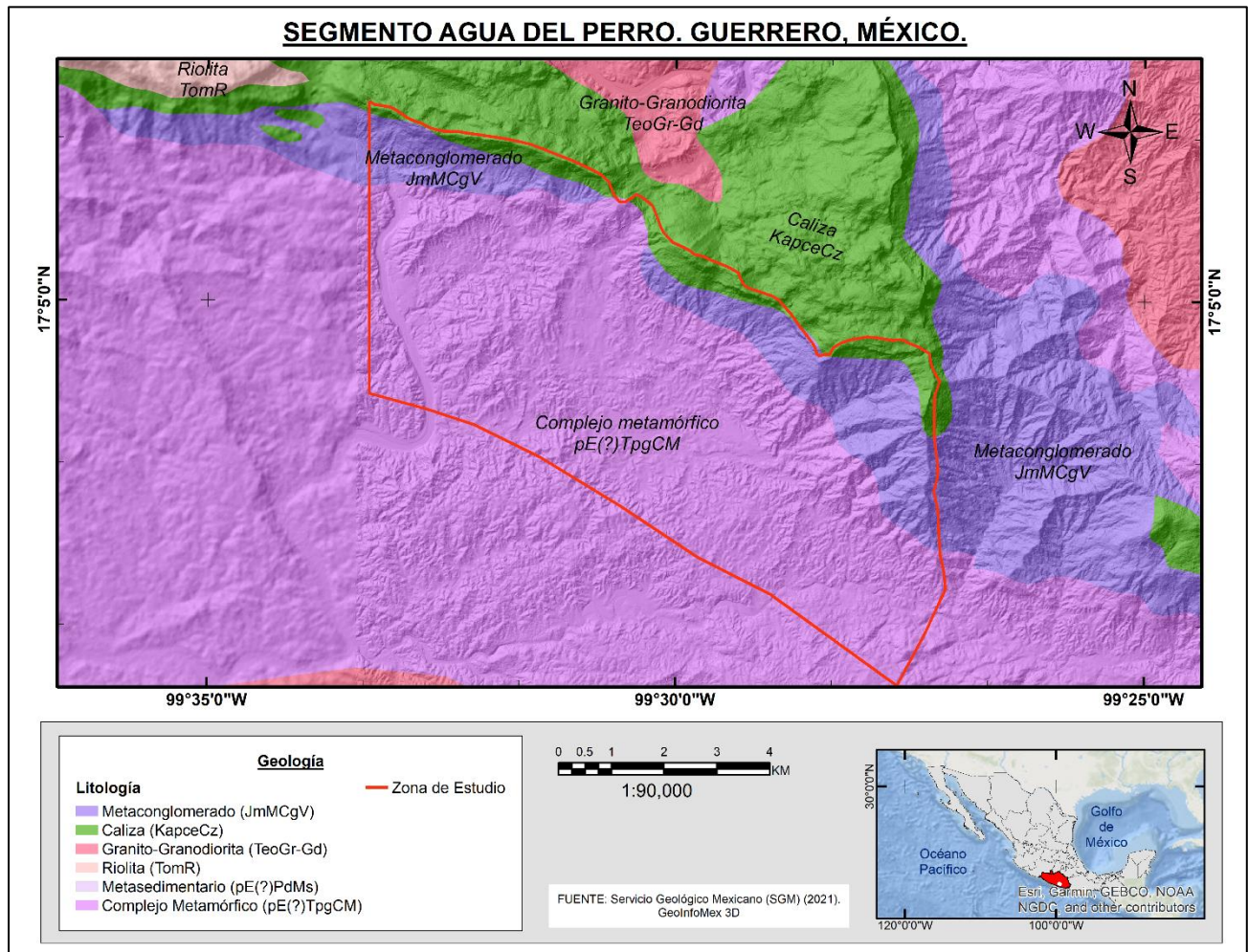


Figura 11. Geología del área de estudio. Fuente elaboración propia con datos de (INEGI,1991).

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

Se muestra en un diagrama de flujo las diferentes actividades y materiales cartográficos y productos que se utilizaron y obtuvieron en esta investigación (Figura 12):

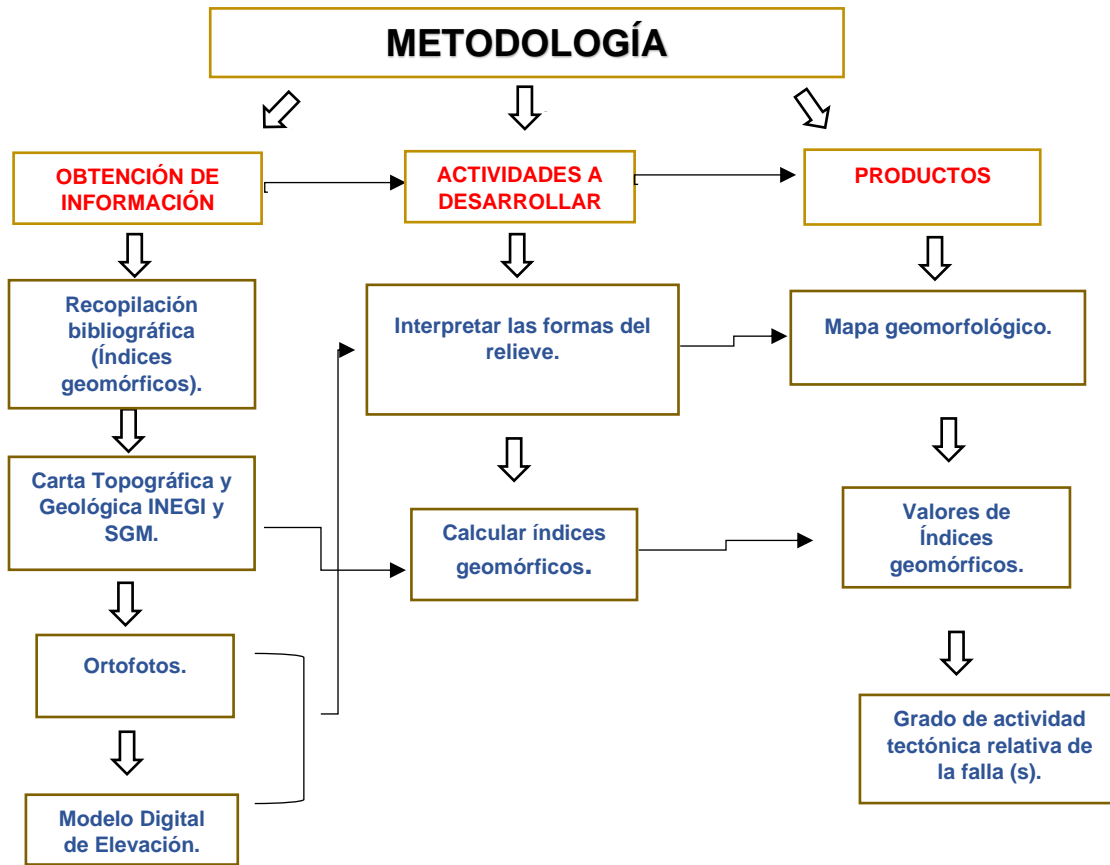


Figura 12. Diagrama de flujo que muestra las etapas de esta investigación.

4.1 Percepción Remota

La Percepción Remota (**PR**) es una herramienta que permite obtener información de la superficie terrestre, utilizando instrumentos y sensores que no están en contacto directo con la superficie terrestre, sino que de manera alejada (remota) permite capturar, procesar y analizar imágenes. Con el desarrollo de la PR se ha permitido la generación de nuevos sistemas de procesamiento digital con propósitos específicos (Lira, 2011). De manera general se pueden mencionar que existen diversos métodos para la obtención de información de datos relacionados a la superficie terrestre dependiendo de la tecnología que sea empleada para dichos propósitos.

5.24.1.1 Ortofotos

De acuerdo con Khorram (2012). Señala que “Antes de la amplia disponibilidad de imágenes de satélite, la fotografía aérea sirvió como base principal para una amplia variedad de esfuerzos cartográficos y análisis geográficos”. La ortofoto es derivada de fotografías aéreas, las cuales al verse influenciadas por la curvatura de la superficie terrestre presentan distorsiones en las partes extremas de la fotografía, por lo que debe pasar por un proceso de rectificación matemática para poder ser útiles a la hora de ser utilizadas con fines cartográficos (Ortofotos) (Khorram, 2012).

Las Ortofotos a color natural, utilizadas fueron obtenidas de los productos cartográficos de INEGI a una escala 1:10 000, con una resolución de 1m, las cuales se visualizan en un SIG para identificar, analizar e interpretar las formas del relieve, incluyendo rasgos que pudieran representar fallas.

4.2 Modelo Digital de Elevación (MDE).

De acuerdo con INEGI *“Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo”*. Los valores altitudinales del terreno se modelan en un archivo cartográfico de tipo ráster de estructura regular, los cuales son elaborados con el empleo de una diversidad de metodologías y herramientas, además de ser creadas con datos provenientes de diferentes fuentes de información. Estos MDE pueden ser complementados con el uso de recursos como curvas de nivel, redes de drenaje, mapas de pendientes, divisiones político-administrativas, entre muchos otros. Las ventajas de hacer uso de un MDE es que al usarlo vamos a obtener un grado de exactitud muy alto y una resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital suficiente como para utilizarlo en situaciones relacionadas con la identificación de los rasgos del relieve y sus distintas características físicas (INEGI, s.f.).

Los MDE se pueden diferenciar en dos tipos: Modelo Digital del Terreno y Modelo Digital de Superficie (MDS), en donde el MDT únicamente va a contener la altura del terreno eliminando aquellos elementos como estructuras antrópicas y vegetación que lleguen a causar conflicto en las estimaciones del terreno, a diferencia del MDS, donde sí va a contener información relacionada a estructuras antrópicas como edificios, tendidos eléctricos, y vegetación, entre otros (SIGLA, 2014). Como ya se ha mencionado el avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de nuevas técnicas de PR, haciendo uso de los satélites los cuales con ayuda de sensores remotos captan las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético de la radiación solar, obteniéndose diferentes imágenes de satélite, como: Landsat, SPOT, LIDAR entre otros.

Para la interpretación de las formas del relieve se utilizó un MDE de 5m de resolución de tipo terreno, generando una capa de sombreado (Hillshade) en escala de grises con la simulación de un relieve iluminado. Este mapa de sombras se utilizó como base para la mayoría de los procedimientos que se llevaron a cabo para realizar la elaboración del mapa geomorfológico y las mediciones geomórfica.

4.3 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (**SIG**) son “herramientas informáticas para recopilar, almacenar, procesar, analizar y visualizar información geográfica, que mejoran la eficiencia y eficacia del manejo de la información sobre objetos y eventos ubicados en el espacio geográfico. Se pueden utilizar para realizar muchas tareas, incluido el almacenamiento de grandes cantidades de información geográfica en bases de datos, la realización de operaciones analíticas en una fracción del tiempo que tardarían en hacer a mano, y automatizar el proceso de elaboración de mapas útiles” (Longley, 2015).

Con ayuda de un SIG (ArcMap. versión 10.3), se generó un mapa de sombras a partir del MDE (resolución 5m) obtenido de INEGI, a partir de la herramienta: ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Hillshade. Este mapa es importante ya que fue la base para toda la cartografía de este estudio.

Mapa de pendientes se generó a partir del MDE con las herramientas: ArcToolbox > Spatial Analyst Tools >Surface >Slope, aplicando una clasificación de 5 clases de porcentaje de pendiente que nos permitió identificar las partes con mayor y menor pendiente, el cual sirvió para la interpretación de las formas del relieve.

Para generar los perfiles transversales en los ríos, se utilizó un TIN el cual fue generado a partir de un MDE con las herramientas: 3D Analyst Tools > Data Management >TIN > Create TIN. Después de tener la red de triángulos (TIN) se creó una nueva carpeta en Arc Catalog, donde se creó un shapefile que lleva el nombre de “secciones” con un formato de geometría tipo línea (las cuales serán trazadas sobre los ríos ya identificados) una vez realizadas las secciones se interpolan a la forma del MDE en la herramienta: ArcToolbox > 3D Analyst Tools> Funcional Surface > Interpolate Shape, a partir de aquí ya contamos con secciones en 3D y podemos generar los gráficos apoyándonos con la barra de herramienta (3D Analyst).

Para la generación de los mapas de los índices geomorfológicos se utilizó el mapa de sombras donde a partir de la generación de capas (Shapefiles) se inicia una sesión de edición para agregar los elementos gráficos para representar las longitudes y los polígonos requeridos para los cálculos que se describen más adelante.

El mapa geomorfológico se creó a partir de las técnicas de fotointerpretación de las imágenes de satélite, ortofotos (escala 1:20 000), MDE (resolución de 5m) y carta topográfica (escala 1:10 000); para esto se crearon capas (Shapefiles) (líneas, polígonos y puntos) con diferentes geometrías para cada tipo de proceso endógeno y exógeno.

4.4 Interpretación Geomorfológica

Un mapa geomorfológico es la representación del análisis e interpretación de las formas del relieve, con base en la morfología y la génesis (Lugo, 2011). Los rasgos geomorfológicos interpretados fueron obtenidos a partir del análisis de las ortofotos (escala 1:10 000), carta topográfica (E14C48e) (escala 1:20 000), MDE (resolución de 5m), Mapa de pendientes y Google Earth Pro. Esto se hizo para la elaboración del mapa geomorfológico de la zona de estudio que se definió en este trabajo de investigación (Figura 17).

Independientemente del tipo de sistema geomorfológico que se utilice como referencia, van a estar presentes los procesos de tipo endógeno y exógeno los cuales, aunque sean fuerzas contrarias, actúan de manera conjunta en el modelado del relieve. Dentro de los procesos endógenos se encuentran la actividad tectónica y el vulcanismo los cuales se manifiestan en el paisaje como estructuras masivas y con una diferenciación de alturas (montañas y volcanes) así como de las rupturas que producen los diversos esfuerzos en la superficie terrestre (lineamientos y fallas). Por otro lado, los procesos exógenos son aquellos que proceden de una fuente externa (intemperismo, erosión, transporte y acumulación) que son encargados de modelar el relieve (Lugo, 2011).

4.5. Índices geomórficos

Inicialmente, se realizó el análisis morfotectónico de la zona de estudio, identificando rasgos (como: escarpes, lineamientos, y red fluvial) que pudieran estar representando fallas. Esto se llevó a cabo utilizando ortofotos a color 1:10 000 con una resolución de 1m, MDE con una resolución de 5m, y a su vez la interpretación de la carta topográfica escala 1: 20 000 (INEGI), con apoyo en los Sistemas de Información Geográfica (ArcMap versión 10.3,) para describir las formas del relieve y las fallas interpretadas y analizadas de la zona de estudio en el mapa geomorfológico (Figura 13).

Se determinaron diferentes índices geomórficos, para identificar los cambios en el relieve asociados a la actividad tectónica en el área de estudio, ya que ésta y la erosión alteran el paisaje como por ejemplo la modificación de las elevaciones, su pendiente y la desviación de un río, así como la forma de una cuenca hidrológica. A continuación, se describen los índices geomórficos que se utilizaron en este estudio.

4.5.1 Sinuosidad del Frente de Montaña (S_{mf})

Se calcula tomando en cuenta dos longitudes: la longitud del pie de montaña o del frente de montaña y la longitud en línea recta del segmento. Si la sinuosidad del frente de montaña es baja (valores cercanos a uno) significa que hay una **mayor actividad tectónica**, y si el valor es alto (mayor a uno) significa que tenemos **menos actividad tectónica**.

Esto se debe a que cuando hay actividad tectónica los levantamientos verticales son rápidos en relación a la velocidad de erosión y no permiten que se deforme el frente de la montaña. Caso contrario ocurre cuando la actividad tectónica es menor, donde la erosión actúa de manera constante logrando transformar el frente de montaña dando como resultado una sinuosidad más visible. (Bull y McFadden, 1977, citado en Ramírez-Herrera, 1998). Este índice se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s$$

S_{mf} : Sinuosidad del frente de montaña.

L_{mf} : Longitud del frente de la montaña a lo largo de la unión montaña-piedemonte.

L_s : Longitud de línea recta del frente.

Para la realización de este Índice se utilizó el MDE (generando un modelo ráster con la simulación de un relieve iluminado por una fuente de luz, creando un efecto sombras en escala de grises) con una resolución de 5 m para identificar y medir las longitudes de la sinuosidad del Frente de montaña, apoyándonos de un mapa de pendientes para poder identificar de mejor forma el pie de monte donde fueron marcadas dichas longitudes. De acuerdo a la metodología del Índice de S_{mf} (Bull y McFadden, 1977, citado en Ramírez-Herrera, 1998), se identificó el Frente de montaña en la porción Norte de toda el área de estudio, el cual se dividió en 4 segmentos, marcando longitudes en línea recta del frente de montaña (**L_s**) en color verde, y definiendo la longitud de la sinuosidad a lo largo de cada segmento en con color rojo. El primer, segundo y tercer tramo se localizan al Noroeste del frente, y por último el cuarto segmento corresponde a la parte Sur este (Figura 14).

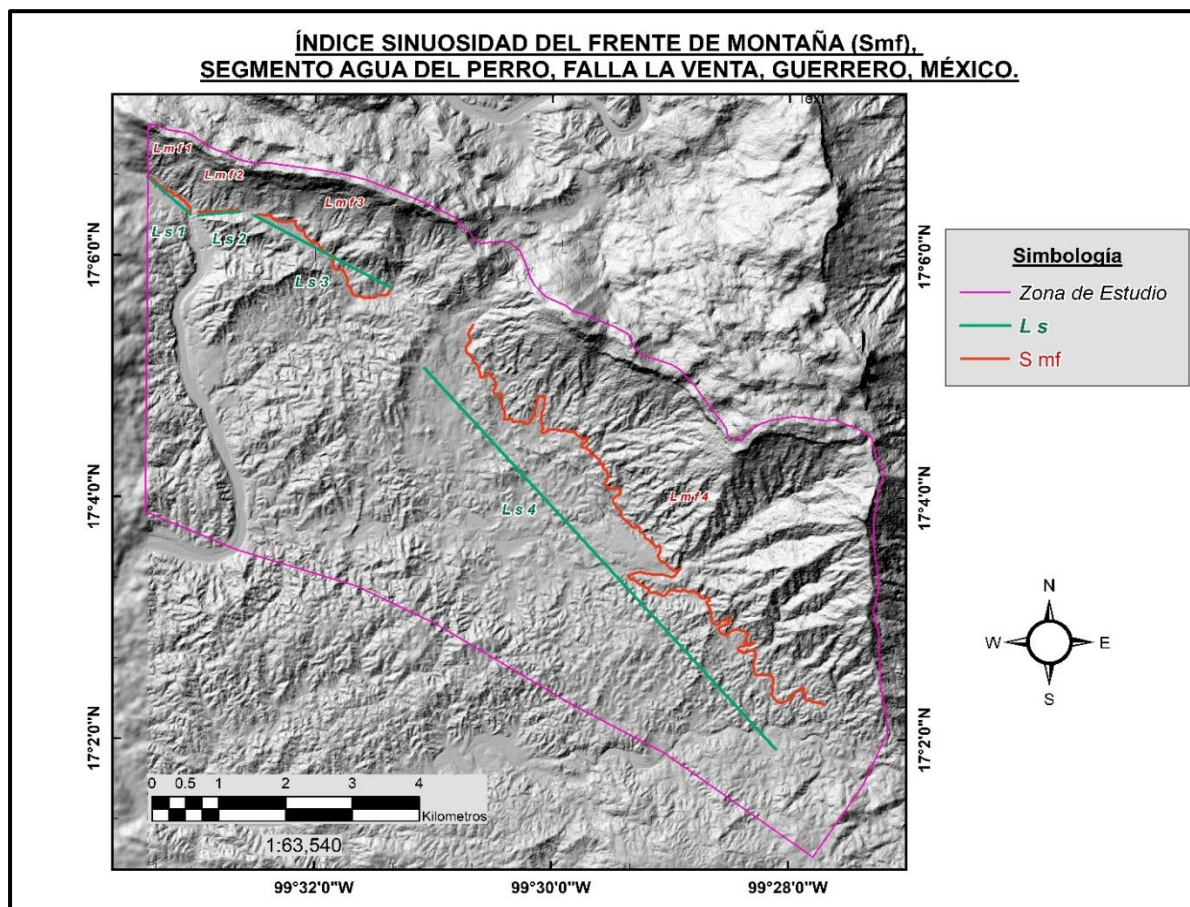


Figura 14. Mapa del Índice de Sinuosidad del Frente de Montaña (Sfm). Fuente elaboración: Benítez Martínez Dulce María.

4.5.2 Índice de Gradiente (SL)

Se construyeron 3 perfiles de manera longitudinal, donde nace la corriente fluvial hasta donde termina en una microcuenca, haciéndolo siguiendo de manera descendente el cauce del escurrimiento, siempre teniendo cuidado de tener en el perfil una litología homogénea, para que la aparición de condiciones alteradas indique la presencia de discontinuidades o fallas en el terreno (Wells et. al.1988).

Las redes de drenaje (redes fluviales) poseen propiedades geométricas regulares que pueden ser cuantitativamente descritas. En un relieve gradualmente erosionado, el perfil longitudinal de un arroyo y/o río, es una propiedad de dicha corriente que puede proporcionar pistas sobre los materiales subyacentes, así como descubrimientos relacionados a procesos geológicos y la historia geomórfica de un área (Hack, 1973).

Hack 1973, desarrolla la aplicación de un índice denominado **SL** el cual se fundamenta en el análisis de un perfil longitudinal y la determinación de un **índice de gradiente de la corriente**, el cual relaciona la pendiente de la corriente en una localidad y la longitud de donde nace, proporcionando las bases para comparar tramos de corrientes de diferentes tamaños. Este índice (**SL**) es una cantidad significativa ya que relaciona la energía de una corriente para transportar material de un determinado tamaño a las características de resistencia del canal por donde fluye la corriente. El **SL** se aplica sobre corrientes suficientemente largas para asegurar poder detectar cambios en el perfil longitudinal, sin embargo, se puede aplicar a corrientes más pequeñas en longitud (Hack, 1973). La fórmula del índice de gradiente (**SL**) es:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L$$

Donde **SL** es el índice de gradiente, **ΔH** es la diferencia de elevación (cotas) entre los puntos de análisis y **ΔL** es la longitud de los puntos de alcance. **L** es la longitud de la corriente más larga (dentro de la cueca) medida desde parteaguas hasta el punto de alcance (análisis). **ΔL** y **L** deben de ser medidas con la misma unidad con respecto a **ΔH**. El **SL** deberá de ser expresado en metros. La longitud **L** siempre de debe ser medida desde el parteaguas o cabecera de donde nace la corriente que se está analizando hasta el punto medio de **ΔL** (Figura 15). Este gradiente puede ser medido sobre mapas (cartas o planos) topográficas, fotografías aéreas o cualquier otro material fotogramétrico (Hack, 1973).

Para la realización de este Índice se seleccionaron 3 microcuencas en el área de estudio, donde la 1 y 2 están al (NO) y la tercera se ubica en la porción (SE). Se identificaron los ríos más grandes sobre la misma litología, para reconocer rasgos tectónicos determinando a si la diferencia de elevación (cotas) (**ΔH**) entre los puntos de análisis que corresponde a cada 50m. de desnivel y a si midiendo las longitudes (**L**) de cada río desde el parteaguas hasta el punto de análisis, donde **ΔL** y **L** deben de ser medidas con la misma unidad con respecto a **ΔH** (Figura 15).

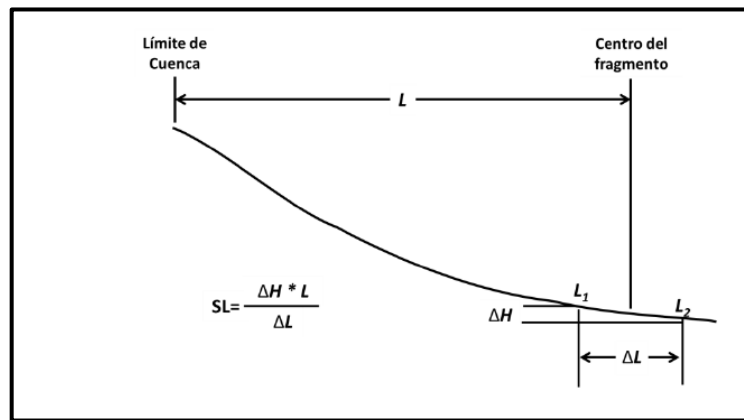


Figura 15: Variables que se utilizan en el cálculo del Índice geomórfico SL (Fuente: Hack, 1973)

4.5.3. Índice Elongación de la Cuenca

Schumm, S. (1986) Define el radio de elongación de una cuenca como la relación entre el radio de un círculo con la misma área de la cuenca y la máxima longitud de la cuenca. Este radio indica cómo la cuenca modifica su forma asemejándose a la de un círculo.

Cuando las tasas de denudación son diferenciales en las redes de drenaje adyacentes, la divisoria de aguas migra cambiando las formas y áreas de las cuencas de drenaje. La erosión de origen tectónico generada por el desplazamiento a lo largo de la montaña deformada generando el cambio de nivel base de la red de drenaje acelerando la degradación de las pendientes y divisoria de aguas (Bull, 2009).

Para el cálculo de los radios de elongación Re sobre cuencas, hay que tener en cuenta que cuanto más cercanos sean los valores a 1 más tendrá la cuenca una forma circular, por otro lado, si la cuenca es alargada tendrá valores de Re de alrededor de 0.5 (Tomado de Oviedo Reyes, 2015) (Figura 16).

Este índice se determina midiendo la longitud del río más grande desde donde inicia la corriente hasta donde termina dentro de la microcuenca, así como la superficie de la cuenca. Posteriormente se determina el valor ($r = \sqrt{A/\pi}$), determinando ahora $R_c = 2r$, para finalmente calcular $R_e = R_c / L$.

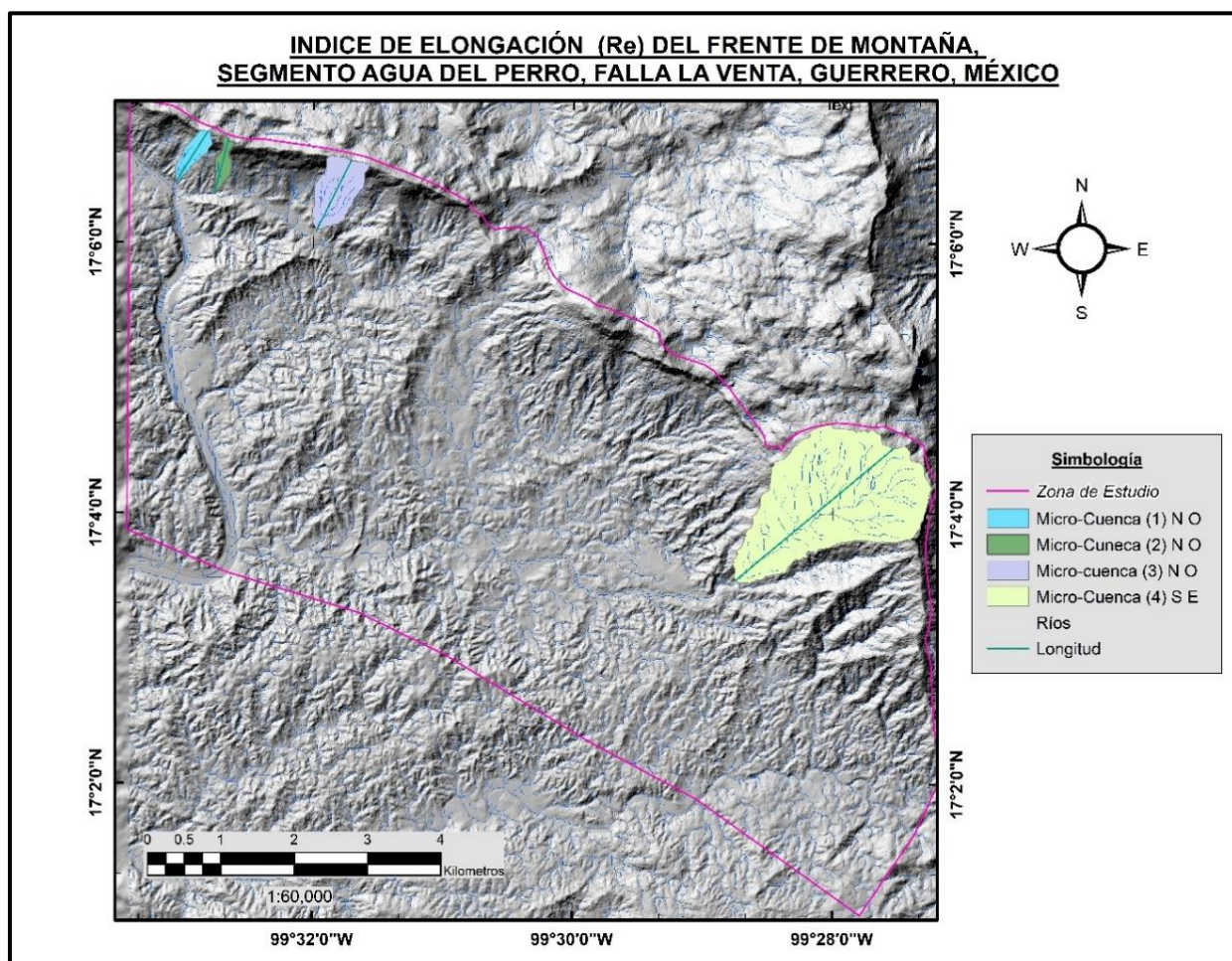


Figura 16. Mapa de Índice de Elongación (R_e) del área de estudio. Fuente: Dulce María Benítez Martínez con base a Oviedo Reyes, 2015.

5.1. Mapa Geomorfológico

Se describen los resultados de la interpretación geomorfológica, construida a partir de la observación del relieve utilizando, las Ortofotos, MDE, mapa de pendientes y carta topográfica (Figura 17). En el mapa geomorfológico se delimitaron dos áreas predominantes; en la parte norte los frentes de montaña donde se localizan las cotas más elevadas, mientras que en la parte sur se caracteriza por el desarrollo de lomeríos y en algunas zonas se pueden observar pequeñas planicies, así como escarpes, lineamientos, circo de erosión, deslizamientos y depósitos aluviales que se describen más adelante.

**MAPA GEOMORFOLÓGICO. SEGMENTO AGUA DEL PERRO,
FALLA LA VENTA, GUERRERO, MÉXICO**

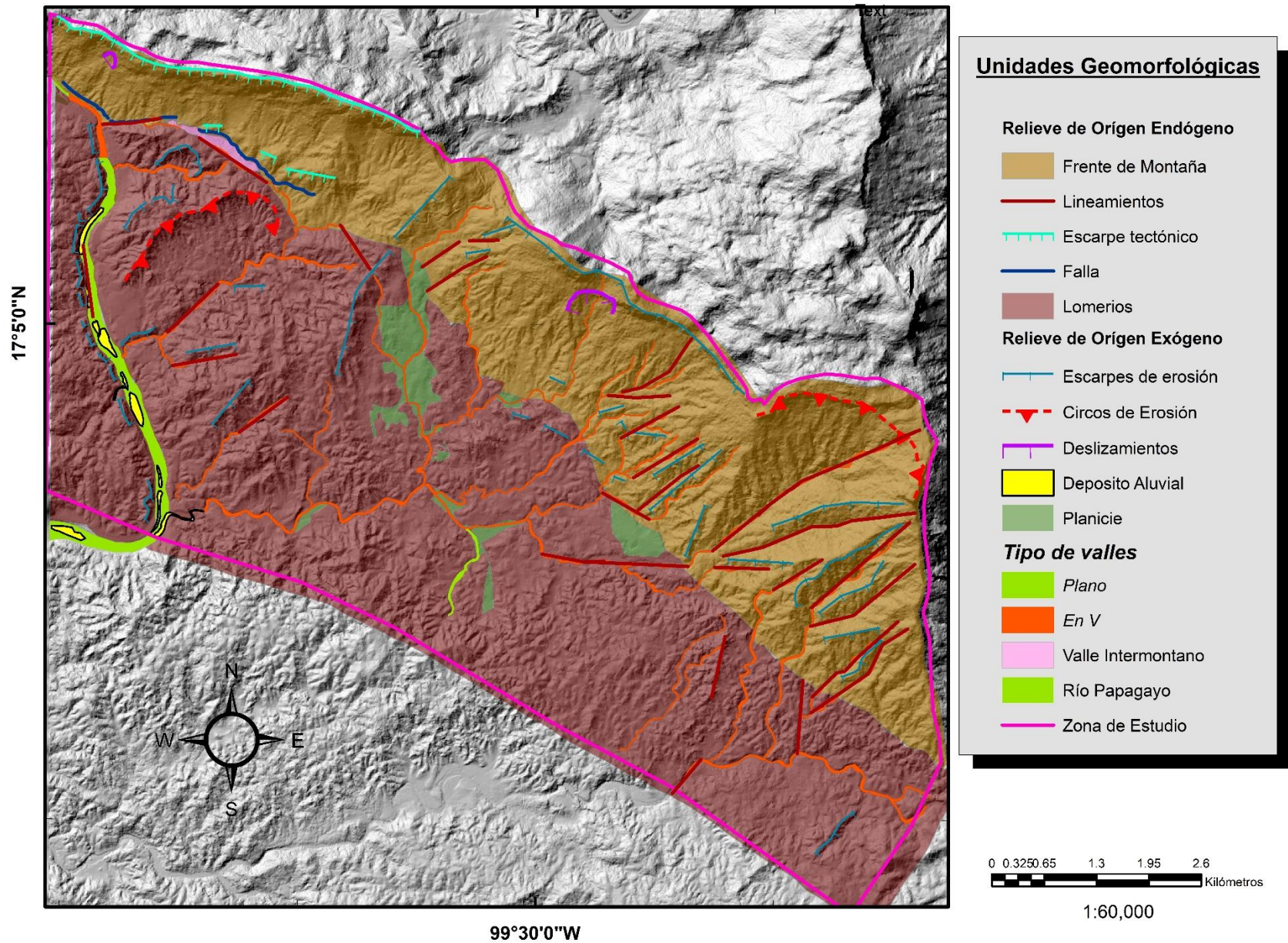


Figura 17: Mapa geomorfológico del área de estudio. Fuente: Dulce María Benítez Martínez.

Todos los rasgos identificados en el relieve (figura 17) pueden ser clasificados de acuerdo con su origen, tomando en cuenta sus características más relevantes agrupándolas en unidades geomorfológicas.

A continuación, se describen cada una de las unidades geomorfológicas identificadas en esta investigación plasmadas en el mapa geomorfológico, destacando las características más relevantes.

5.1.1 Formas de Relieve de origen endógeno

Lineamientos

Rasgos lineales o ligeramente curvos (Lugo, 2011) que se identificaron y trazaron en la zona de estudio a partir de la interpretación del MDE (resolución, 5 m) y la red hídrica, delineando rasgos sobre formas lineales representadas en el relieve (crestas y ríos), donde el más predominante se localiza en la parte noroeste cuya orientación es W-E, conectando con otro lineamiento muy próximo a él que se orienta de NW-SE. Otra zona donde convergen lineamientos de gran extensión se ubica en la parte sureste, arregladas de manera paralela una con otra con orientación general SW-NE, con excepción de una que se prolonga en dirección WE. Las longitudes de los lineamientos varían desde los 360m hasta los 3 km, estos lineamientos afectan tanto a rocas del complejo metamórfico como los metaconglomerado volcánico. Presentan un patrón de ocurrencia en la parte superior de la zona, una franja que corre de Oeste a este de manera diagonal con orientación general NW-SE, coincidiendo con la localización de una probable falla (figura 18).

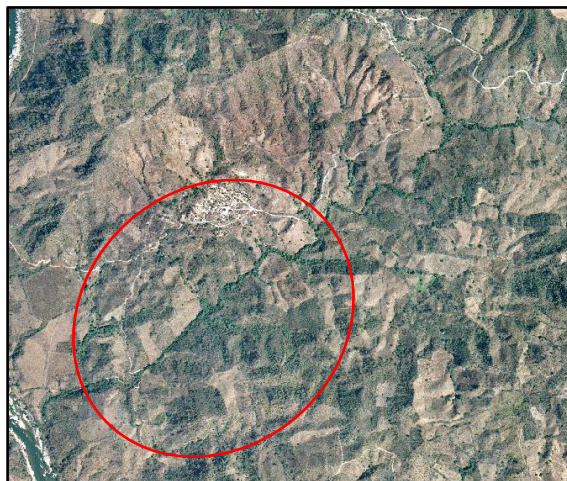


Figura 18. Fuente: Ortofoto escala, 1: 10,000. Encerrado en color rojo se observa uno de los lineamientos al NW del área de estudio con dirección NE-SW.

Escarpe de Falla

El escarpe se considera una pendiente abrupta cuando el plano de inclinación es mayor a 45° (Lugo, 2011), en este caso es de origen tectónico ya que coincide con el plano **SFAP**.

El escarpe de la porción NW (Figura 19) y centro N del área de estudio tiene una orientación NW 80° SE observándose ligeros cambios en la dirección, la pendiente de este rasgo es de 55°, su longitud es de 7 km, sin embargo, este valor puede ser mayor debido a que existen tramos erosionados por las corrientes fluviales. Estos rasgos se observan predominantemente en rocas calizas.

En la parte centro del área de estudio se delineó un escarpe con dirección NS-NE, asociado a un lineamiento curvo el cual puede estar relacionado a una falla. Este escarpe se localiza en rocas del complejo metamórfico.

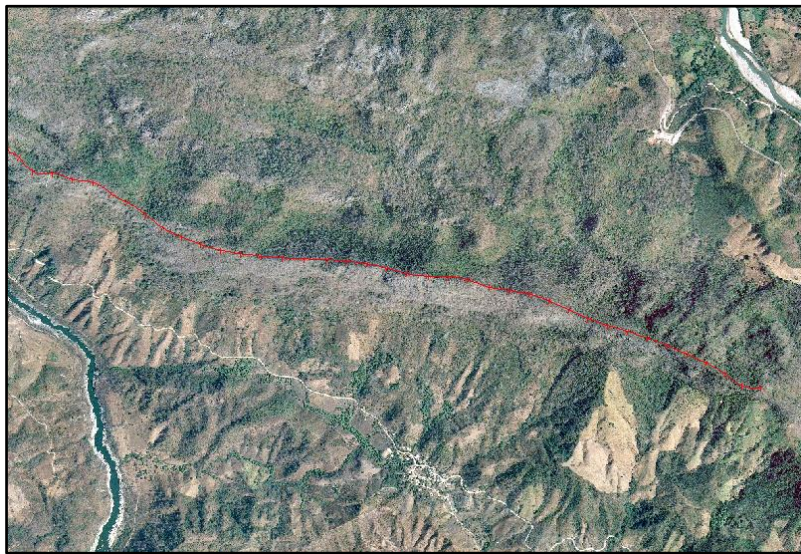


Figura 19. Fuente: Ortofoto escala, 1: 10,000. En rojo se muestra el escarpe tectónico porción NW del área de estudio.

Lomeríos

Relieve que tiene diferencias de elevación y laderas con pendientes suaves. Esta forma de relieve abarca más de la mitad en extensión de la zona de estudio conformando una gran franja con orientación NW, teniendo una diferencia de altitud de 300m, en rocas del complejo metamórfico, se caracteriza por estar afectado por la erosión fluvial permanente (Figura 17).

Frente de Montaña

Región representada por el escarpe tectónico asociado a la falla Agua de Perro. Lo conforma una franja amplia con orientación NW, con una longitud aproximada de 12.500km, desarrollado en rocas del complejo metamórfico, meta-conglomerado y calizas, caracterizada por laderas con pendientes que varían entre los 50° y 55° (Figura 17).

5.3 Formas de Relieve de origen exógeno

Escarpes de erosión

Este rasgo se caracteriza por ser de origen fluvial y tener un relieve con pendientes mayores a 45° (Lugo, 2011), estos rasgos no están asociados a lineamientos por lo que no representan fallas. En la porción NW del área de estudio se observa un escarpe y circo de erosión predominante, (podría considerarse un lineamiento). Esta unidad geomorfológica se desarrolla en rocas del complejo metamórfico. En la parte más Noroccidental se observan rasgos de este tipo de dimensiones más pequeñas asociados al río Papagayo. En el SE, se identificó un escarpe y un circo de erosión en rocas calizas y meta-conglomerado, así como varios escarpes de erosión que se desarrollaron en rocas del meta-conglomerado y complejo metamórfico. Tienen extensiones desde 160 m a 2.6 km.



Figura 20. Fuente: Ortofoto escala, el rectángulo rojo muestra los escarpes por erosión fluvial al SE del área de estudio. (2023)

Circo de erosión

Estos rasgos son escarpes con forma de relieve cóncavo que están asociados principalmente a la erosión fluvial. En la porción SE se delineó un circo de erosión bien desarrollado de aproximadamente 3km de perímetro y se observa en el contacto litológico entre las calizas y el meta-conglomerado, presentando una red de drenaje paralela (Figura 21 a). El segundo circo de erosión se encuentra al NW aproximadamente de 2.5km de perímetro, el cual no ha desarrollado su forma de circo al 100% (Figura 21 b), se observa en rocas del complejo metamórfico; presenta una red de drenaje paralela donde el arroyo principal muestra un rasgo lineal.

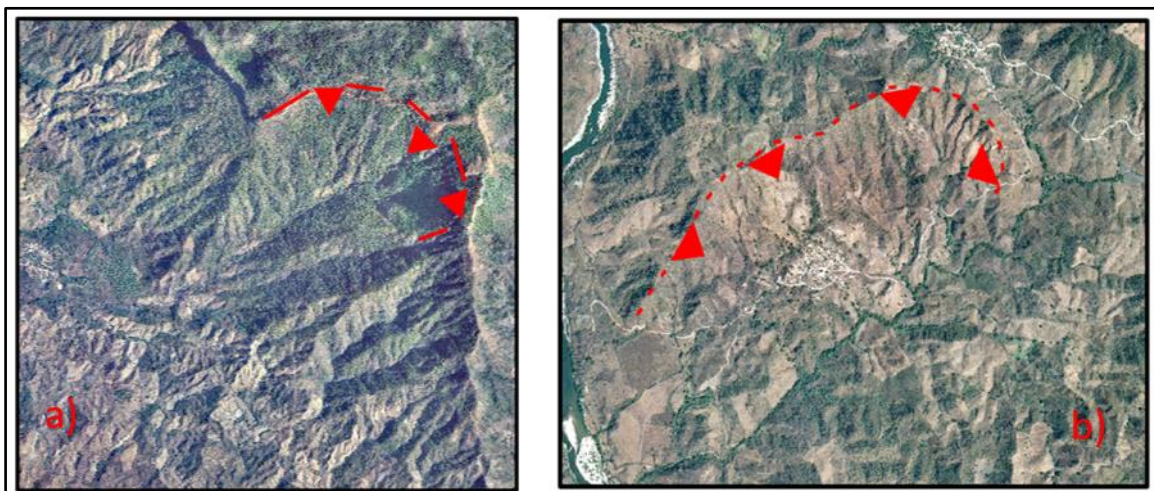


Figura 21: Fuente: Ortofotos escalas, 1:10,000. a) Circo de erosión (rojo) porción NW y b) Circo de erosión (rojo) porción SE, del área de estudio.

Deslizamientos

Este fenómeno es producido por el movimiento lento de un determinado volumen de material que puede ser desencadenado por diferentes factores como, laderas muy pronunciadas con inclinaciones mayores a 45° , la infiltración de agua por lluvias fuertes, tipo de suelo y roca, movimientos sísmicos, fracturas o fallas (Lugo, 2011; Varnes, 1978) entre otros. En el área de estudio se identificaron dos deslizamientos en la parte NW y centro norte del frente de montaña, el primero se le observa una cabecera semi circular con una longitud aproximada de 260 m, un escarpe principal poco erosionado que indican que hubo un movimiento de desprendimiento en rocas del meta-conglomerado volcánico, debido a la resolución de la imagen no se pudo observar bien los depósitos de sedimentos de este. El segundo deslizamiento localizado en la porción centro norte tiene una cabecera semicircular con longitud de 900m. donde se puede observar su escarpe principal con erosión en su porción NW, en rocas calizas (Figura 22).

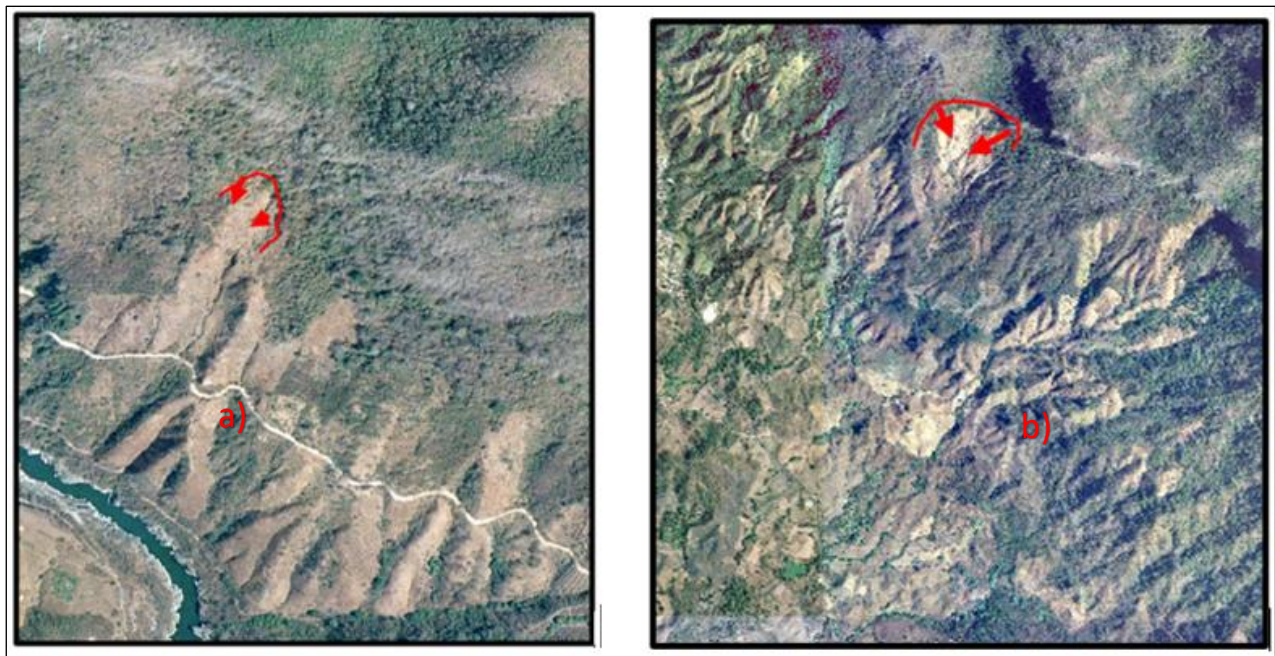


Figura 22: Fuente: Ortofotos escala, 1:10,000. a) Corona en color rojo de un deslizamiento en la porción NW del área de estudio y b) Corona en color rojo de un deslizamiento en la porción centro.

Depósitos aluviales

Formados por la deposición de sedimentos en los causes de los ríos, identificadas en algunas porciones del río Papagayo con formas alargadas paralelas al río, en esta zona donde hay depósitos aluviales la forma del valle. (Figura 23).

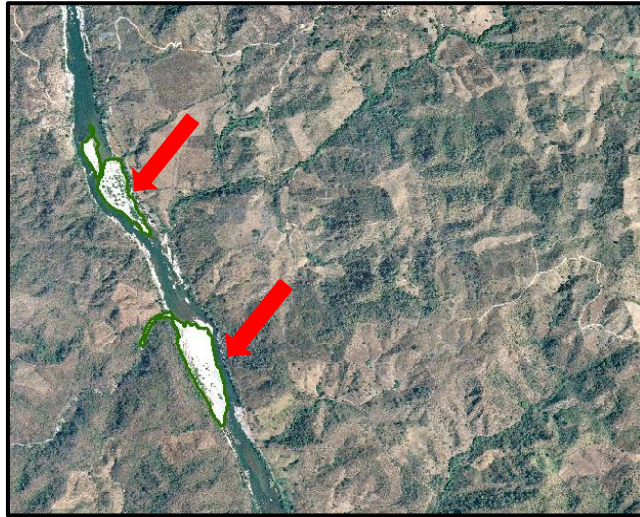


Figura 23. Fuente: Ortofoto escala, 1:10,000. Depósitos aluviales sobre el Río Papagayo del área de estudio.

Planicie

Este relieve se caracteriza por tener pendientes con inclinaciones muy bajas. Se identificaron algunas planicies con pendientes suaves (0° a 10°), en la parte central se localiza la planicie con mayor extensión las rocas del complejo metamórfico, las de menor dimensión se encuentran al SE, colindando con el frente de montaña en rocas del complejo metamórfico (Figura 17).

Valle Intermontano

Depresión que se forma entre dos crestas, con superficie ancha y generalmente se debe a procesos geotectónicos y se forma por presencia de fallas y por la relación de la estructura geológica con los procesos exógenos (Lugo, 2011) en la zona NW, colindando con el frente de montaña en rocas del complejo metamórfico y meta conglomerado (Figura 24).



Figura 24. Fuente: Ortofoto escala, 1:10,000. Rectángulo en rojo que muestra el valle Intermontano localizado al NW del área de estudio.

Valles planos y en V

Los sistemas fluviales se encargan del modelado del relieve, lo cual es muy importante para la geomorfología, en la zona de estudio se encuentran valles en V “El que presenta en sección transversal un perfil de fondo estrecho, con laderas de fuerte inclinación y ancho en la porción superior, es característico del relieve montañoso”. (Lugo, 2011). Algunos cauces pueden estar asociados a fallas (Paulopoulos, et. al. 2009). También se han encontrado valles planos “Valle de fondo llano que forma una llanura aluvial entre las dos vertientes. El ancho del cauce varía desde pocos a decenas de metros”. (Paulopoulos, et. al. 2009).

Para la identificación de los tipos de valles en la región de estudio se realizaron 60 perfiles transversales sobre el río Papagayo y arroyos tributarios, donde el 85% de los valles descritos en la zona de estudio corresponden a valles en V. En la porción del NW cercano al escarpe de **SFAP** de la zona de estudio, en la parte N del río Papagayos se observan valles en V, y en la porción sur las secciones son planas en rocas del complejo metamórfico. (Figura 25 y 26)

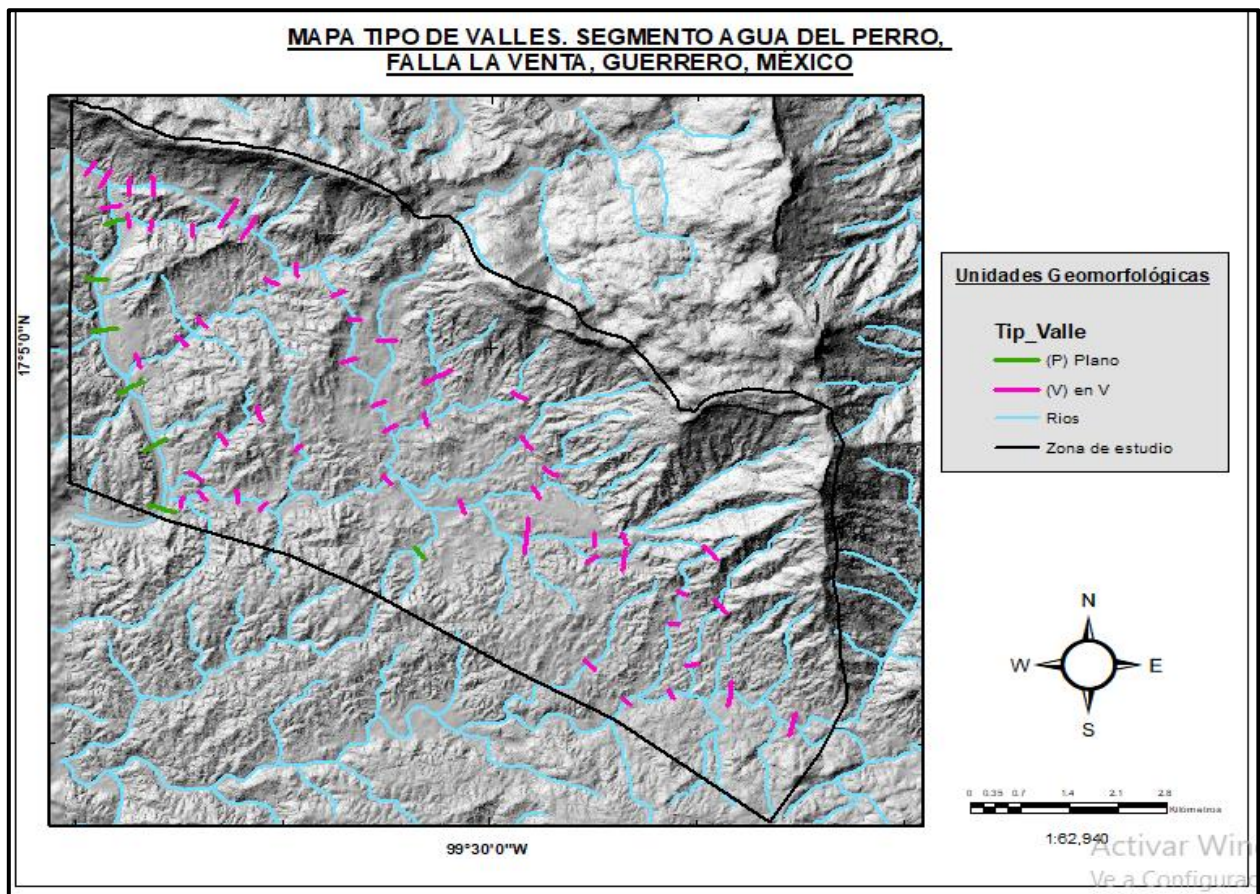


Figura 25. Mapa Tipo de Valles, se muestran los diferentes perfiles transversales (60) sobre el río Papagayo y arroyos tributarios, esto con la finalidad de identificar el tipo de valle y entender el grado de actividad tectónica, de color verde corresponde a los valles planos y el rosa a los valles en V, los cuales fueron predominantes en el área de estudio.

Se seleccionaron 6 perfiles transversales sobre las corrientes fluviales del área de estudio. En las figuras a, c, d, e y f, se observan valles en V, estrechos y con gran pendiente, los cuales nos indican que el relieve es tectónicamente activo y por ello tenemos mayor incisión en el río. En el perfil transversal b sobre el río Papagayo, observamos el valle en forma plana donde su cauce es ancho y con baja pendiente lo cual permite la erosión del piso haciéndolo más ancho y plano (Figura 26).

Perfiles transversales sobre las corrientes fluviales

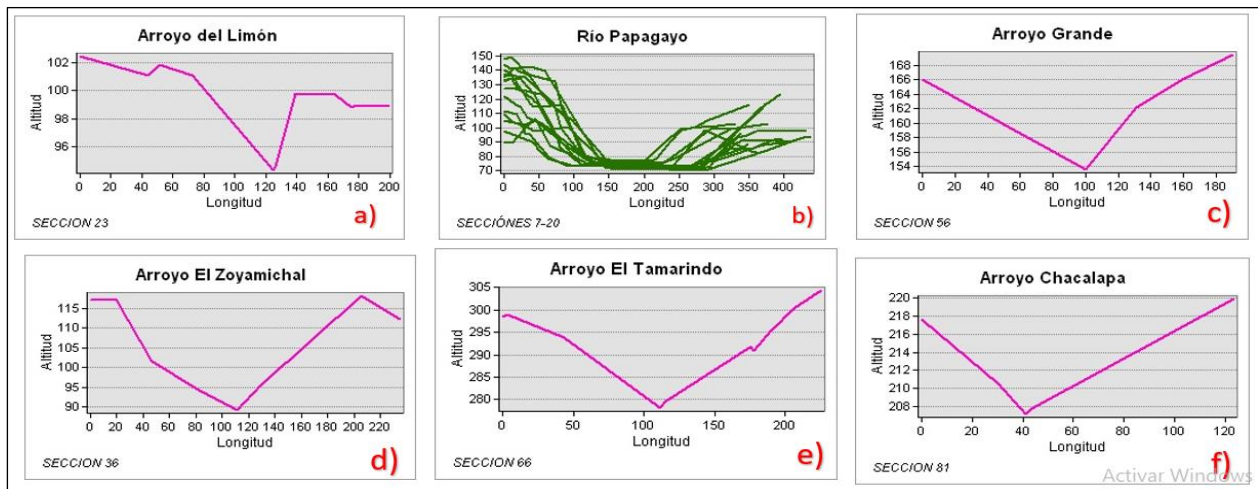


Figura 26. Se muestran algunos de los perfiles transversales sobre las corrientes fluviales. Representados en color rosa los valles en V (a, c, d, e y f), y en color verde el conjunto de perfiles trazados sobre el río Papagayo (b) los cuales representan valles planos.

5.2 Índices Geomórficos

5.2.1 Sinuosidad del Frente de Montaña

Se evaluaron 4 segmentos, de los cuales el 1,2 (NW), muestran valores que nos indican que existe una mayor actividad tectónica (**S_{mf}**=1.1 y 1.0 respectivamente) lo que concuerda con lo observado en el mapa geomorfológico (Figura 17). A partir del segmento 3 y hacia el sureste (segmento 4) son mayores a 1 (**S_{mf}**=1.3 y 1.8 respectivamente) los cuales nos indican que predomina la erosión fluvial sobre la actividad tectónica (tabla 4).

Índice de Sinuosidad del Frente de Montaña

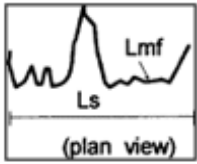
<p>Índice de sinuosidad del frente de montaña.</p>  <p>(plan view)</p> <p>S_{mf} = 1.0 Mayor actividad tectónica. S_{mf} > 1.0 Menor actividad tectónica.</p> <p>Bull y McFadden, 1977.</p>	<p><i>Localización del segmento</i></p>	<p>Lmf</p>	<p>Ls</p>	<p>S_{mf} = L_{mf} / L_s</p>
	1-Noroeste	1011 m	865 m	1.1
	2-Noroeste	666 m	631 m	1.0
	3-Noroeste	2989 m	2341 m	1.3
	4-Sureste	14462 m	7842 m	1.8

Tabla 4. de los valores calculados de (**S_{mf}**) del área de estudio. Longitud del frente de montaña (**Lmf**) Longitud de la sinuosidad del frente de montaña (**Ls**).

5.2.2 Índice de Gradiente (SL)

El índice (SL) se realizó en tres microcuencas del área de estudio, primeramente, se generó el perfil longitudinal tomando para este el río más largo y la diferencia de altitudes entre los puntos de análisis (diferencia de cotas 50m), midiendo la longitud entre estos dos puntos; finalmente se mide la longitud total y acumulada desde donde inicia la corriente hasta el punto medio de los que se están analizando

Perfil Longitudinal 1-Noroeste

Se encontró una variación en la pendiente del cauce ($SL=134$), entre el intervalo de cotas 150-100 msnm. Este perfil se localiza en rocas del complejo metamórfico, representando un proceso tectónico en dicho sitio (Tabla 5 y figura 28).

Tabla 5. Valores obtenidos del índice SL , en el perfil longitudinal 1-Noroeste.

Perfil Longitudinal	ΔH (m)	ΔL	L	SL
1- Noroeste	50	78.17	36.82	24
	50	82.63	129.46	78
	50	114.38	212.79	93
	50	128.71	344.54	134
	50	148.77	486.94	164

Fuente: Elaboración propia en base al trabajo de campo. Índice de gradiente (ΔH), Longitud de la corriente más larga (L), Índice de gradiente (SL).

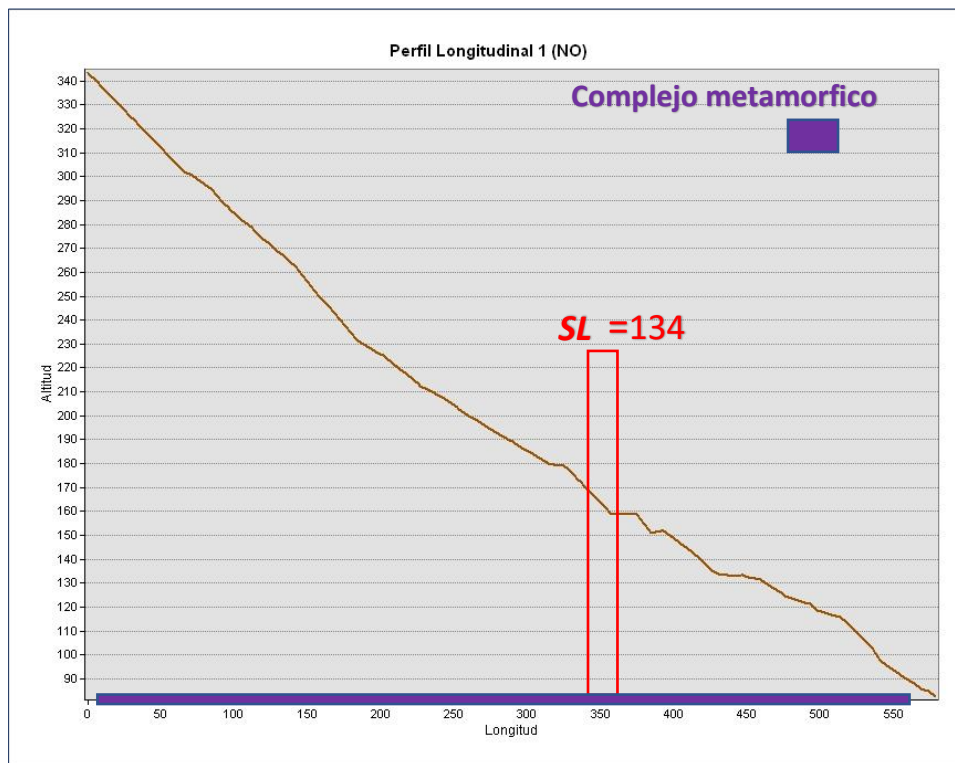


Figura 28. Perfil longitudinal 1 (NW) que representa el valor de (SL) en roca del complejo metamórfico.

Perfil Longitudinal 2 -Noroeste

De igual forma se encontró una variación en la pendiente (SL=51) entre el intervalo de cotas 300-250 msnm. Este perfil se localiza en rocas del complejo metamórfico, representando un proceso tectónico en dicho sitio (Tabla 6 y Figura 29).

Perfil Longitudinal	ΔH (m)	ΔL	L	SL
2- Noroeste	50	119.33	70.78	30
	50	87.89	111.13	63
	50	142.37	183.84	65
	50	323.91	331.38	51

Tabla 6. Valores obtenidos del índice SL en el perfil longitudinal 2-Noroeste. Índice de gradiente (ΔH), Longitud de la corriente más larga (L), Índice de gradiente (SL).

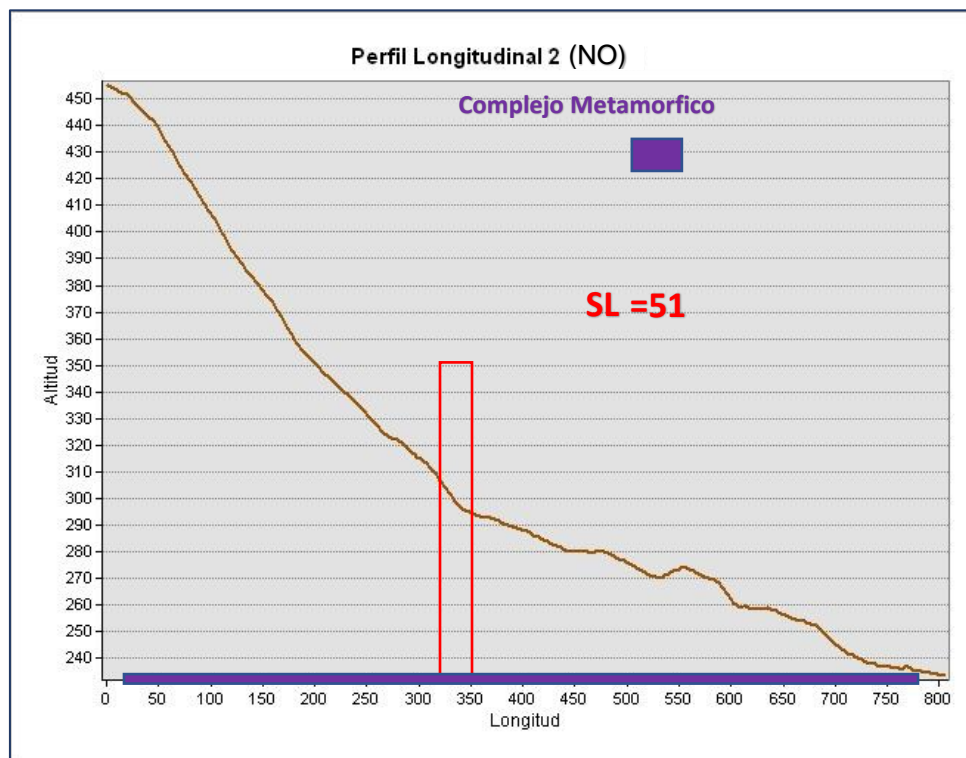


Figura 29. Perfil Longitudinal 2 (NW), que representa el valor de (SL) en roca del complejo metamórfico.

Perfil Longitudinal 3-Sureste

Se identificaron 3 sitios donde se observa un cambio en la pendiente que corresponde a un valor de (SL= 55,150 Y 130), en los intervalos 700-650, 650-600 y 600-550 msnm. Este perfil se localiza en rocas del complejo metamórfico, observándose que existen varios tramos donde la pendiente del cauce tiene un cambio que corresponde a un proceso tectónico en dicho sitio (Tabla 7 y Figura 30).

Perfil Longitudinal	ΔH (m)	ΔL	L	SL
3- Sureste	50	114.45	56.07	25
	50	168.45	184.47	55
	50	115.95	347.13	150
	50	190.76	495.16	130
	50	223.39	677.27	152
	50	312.68	957.34	153

Tabla 7. Valores obtenidos del índice SL en el perfil longitudinal 3-Sureste. Índice de gradiente (ΔH), Longitud de la corriente más larga (L), Índice de gradiente (SL).

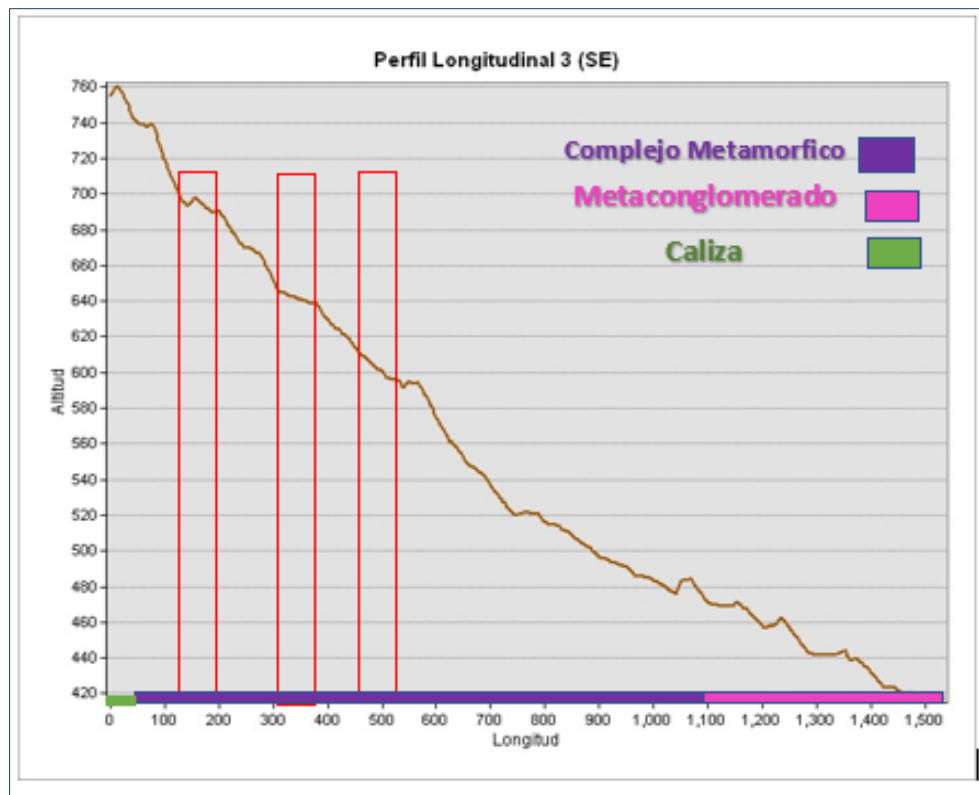


Figura 30. Perfil Longitudinal 3 (SE), que representa el valor de (SL) en roca del complejo metamórfico.

5.2.3 Índice de Elongación de la Cuenca

Se calcularon los valores de elongación de la cuenca (Re) en 4 microcuencas, observándose que las primeras 3 son altamente elongadas ya que los valores van de 0.4 a 0.5 los cuales nos indican que existe actividad tectónica. Mientras que en la subcuenca 4 el valor de Re 0.7 indica menos actividad tectónica (Tabla 8 y Figura 31)

Tabla 8. Cálculos de Elongación de la cuenca en el área de estudio.

Subcuenca	Área	Longitud	valor Re
Microcuenca 1 (NO)	0.16 km ²	0.80 Km	0.5 altamente elongada
Microcuenca 2 (NO)	0.11 km ²	0.75 km	0.4 altamente elongada
Microcuenca 3 (NO)	0.5 km ²	1.06 km	0.6 altamente elongada
Microcuenca 4 (SE)	3 km ²	2.8 km	0.7 elongado

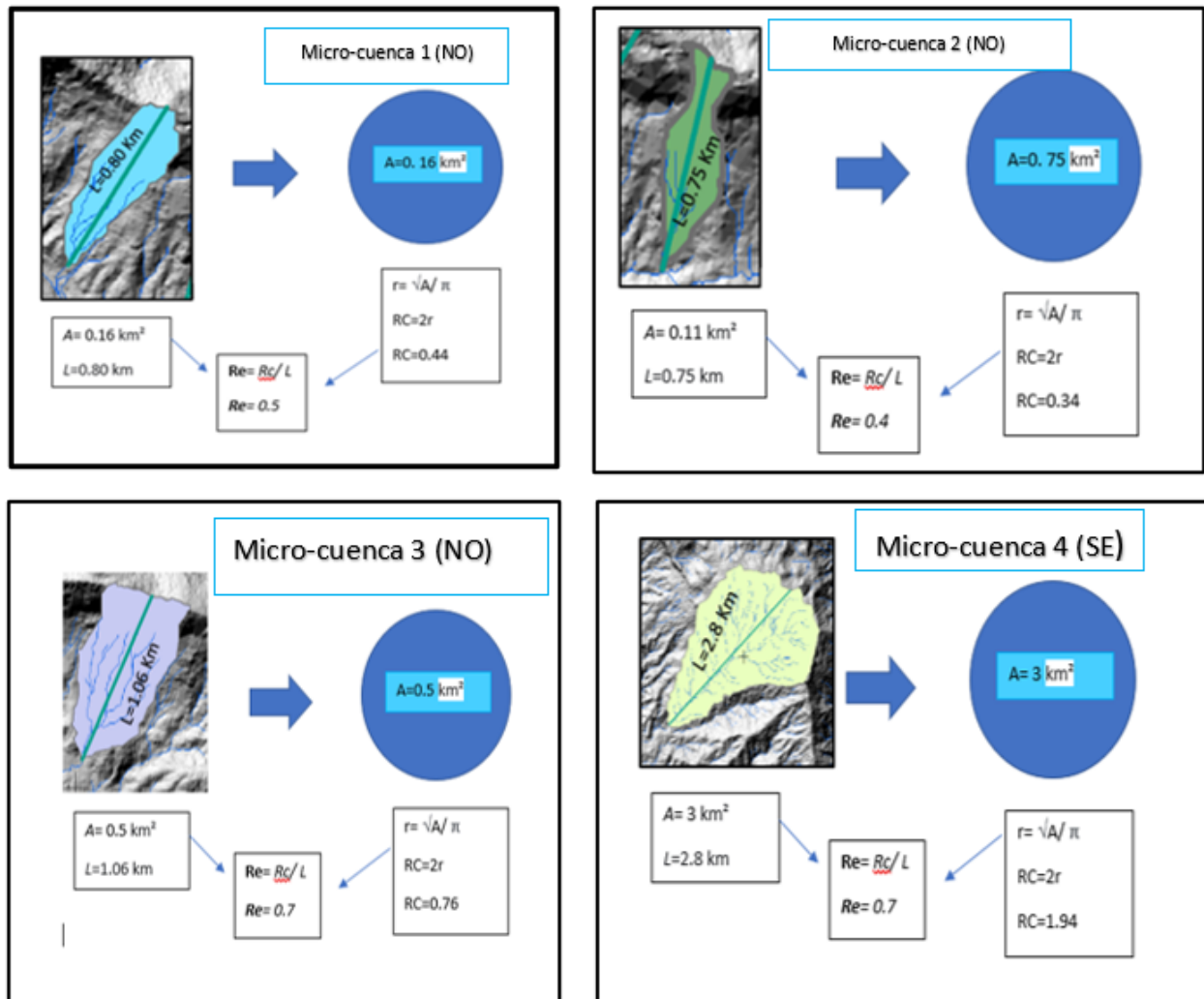


Figura 31. Microcuencas analizadas en el área de estudio.

5.3 Reconocimiento de Campo

El mapa geomorfológico que se elaboró en este estudio es importante para identificar la actividad tectónica de la **SFAP**, siendo el objetivo principal observar y corroborar en campo los rasgos geomorfológicos interpretados en gabinete, para hacer más preciso, el dicho mapa. Los puntos visitados están plasmados en el mapa geomorfológico y fueron a nivel de reconocimiento (Fotografía 1).

Las actividades en campo se realizaron a partir de los rasgos físicos identificados en interpretación geomorfológica, realizada en gabinete, para llevar a cabo el recorrido de la mejor forma.

Punto de verificación 1 (441240, 1891837)

El dónde se pudo observar, lomeríos, el río Papagayo, los depósitos aluviales y afloramientos de rocas; verificando que no existen terrazas aluviales (fotografía 1).



Fotografía 1. Fuente: Elaboración propia. Donde se observaron diferentes formas del relieve.

Punto de verificación 2 (442212, 1891275)

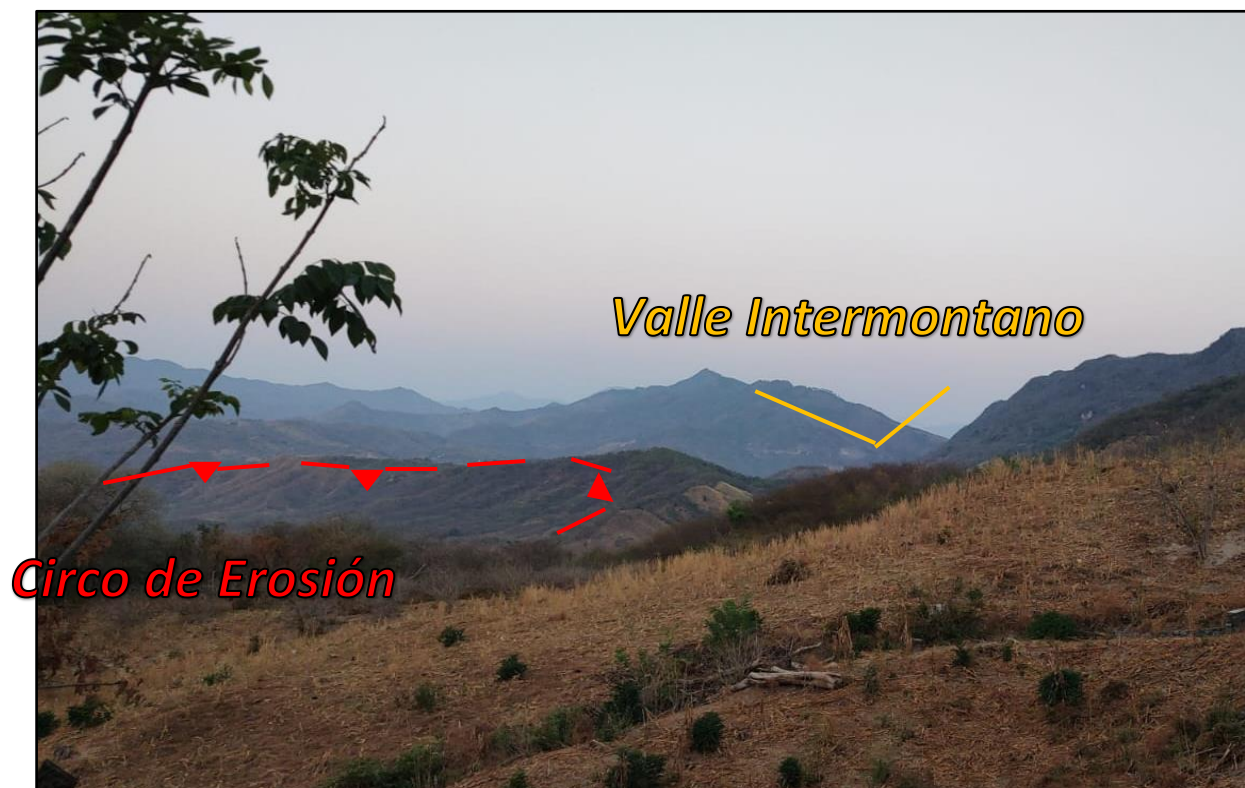
En este sitio subimos a una loma para poder observar y fotografiar el frente de montaña teniendo como características, pendientes elevadas y peñascos en la parte superior de este (fotografía 2).



Fotografía 2. Fuente: Elaboración propia. Frente de montaña al NW del área de estudio.

Punto de verificación 3 (444910, 1889866)

En las cercanías del poblado las Palmas se pudo observar muy bien el circo de erosión y el valle inter-montano (fotografía 3).



Fotografía 3. Fuente: Elaboración propia. Circo de erosión y valle Intermontano al noroeste de la Zona de estudio.

Punto de verificación 4 (443974, 1890428)

Este sitio de observación fue adecuado para observar claramente la región de lomeríos, vista desde el frente de montaña (fotografía 4).



Fotografía 4: Fuente: Elaboración propia. Observación de región de lomeríos desde el frente de montaña.

CONCLUSIONES.

A través de esta investigación se obtuvo el mapa geomorfológico para determinar la actividad tectónica del **SFAP**. El desarrollo del mapa geomorfológico que describe la región donde se presenta el SFAP comprende una cantidad de características de índole geológica, geomorfológica y espacial, en las que se incluyen distintas formas del relieve de origen exógeno y endógeno.

Se identificaron lineamientos, escarpe de falla, escarpes de erosión, circos de erosión, deslizamientos, lomeríos, valles en v, valles planos e Intermontano y depósitos aluviales.

Se delimitó el escarpe de falla del **SFAP** con una dirección noroeste el cual tiene una longitud aproximada de 7km, siendo muy clara su expresión en la porción noroeste.

Se observó un escarpe de erosión en la porción centro del área de estudio la cual puede corresponder a una falla que divide al frente de montaña, teniendo una orientación aproximada norte-sur.

En la parte noroeste existe evidencia puntual de actividad tectónica, a diferencia de la porción sureste en donde predominan los procesos de erosión fluvial.

A partir de los resultados del índice (**Smf**) en la porción NW del área de estudio se observó **valores cercanos a 1**, lo cual denota una **actividad tectónica importante** (relevante), correspondiendo directamente con la geomorfología del sitio, donde se aprecia claramente un frente de montaña escarpado con pendientes que superan los 45° de inclinación, desarrollados sobre roca del complejo metamórfico. En la zona sureste el índice arroja **valores que se alejan de 1 indicando menor actividad tectónica**.

Los resultados del Índice de Gradiente (**SL**) de los tres perfiles longitudinales que se construyeron **existen porciones donde se observan variaciones en la pendiente que indican la presencia de procesos tectónicos, correspondientes a saltos en la pendiente, que sugieren (1) probable presencia de fallas y/o, (2) levantamiento tectónico**

De los cálculos realizados del índice de elongación de la cuenca **los valores indican la presencia de actividad tectónica en la porción noroeste, mostrando una alta elongación**, mientras que, en la zona sureste predomina la erosión fluvial.

En este trabajo se denota la importancia de los índices geomorfológicos y su relación a los rasgos del relieve, para identificar actividad tectónica relativa en una región o zona.

En este estudio se comprobó la relación que existe entre la actividad tectónica del **SFAP** y la sismicidad de baja magnitud.

Si se llegara a romper la falla la zona existe la posibilidad de tener un sismo de magnitud importante que afectaría a algunos poblados cercanos al SFAP, por eso es relevante hacer consciente a la gente del lugar en donde vive y los riesgos que podrían presentarse; de aquí es significativo seguir analizando y generando información para evaluar el riesgo por estos fenómenos.

REFERENCIAS.

- A.V. Lukhnev, V.A. San'kov, A.I. Miroshnichenko, S.V. Ashurkov, L.M. Byzov, A.V. San'kov, Yu.B. Bashkuev, M.G. Dembelov, E. Calais; GPS-measurements of recent crustal deformation in the junction zone of the rift segments in the central Baikal rift system. *Russ. Geol. Geophys.* 2013; 54 (11): 1417–1426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.010>
- ALLABY, M. (Ed.), (2008). *A Dictionary of Earth Sciences*. Oxford University Press.
- Britannica, E. (2009). *Volcanoes and Earthquakes-Britannica Illustrated Science Library*.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., (2001). *Tectonic Geomorphology*, 1ra ed. Wiley Blackwell USA. 454 p.
- Campa, M.F. and Caney. PJ, 1983. Tectonostratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Can J. Earth Sci.* 20, pp. 1 040~ 1051.
- Comisión Nacional del Agua (2023). Proyecto de bases de datos climatológicos. Tierra Colorada, Juan R. Escudero (00012261). Recuperado el 10 de mayo de 2023, en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Mensuales/gro/00012261.TXT>
- CONABIO, (1998). *Climas*. García, E.; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Condi, Kent C, (2011). *Earth as an Evolving Planetary System Second Edition* Academic Press 574 p USA
- Díaz-Torres, J.J., Fletcher, J.M., Spelz-Madero, R.M., Martín-Barajas, A., Suárez-Vidal, F., (2012), Geomorfometría del Escarpe Principal del Golfo de California. Análisis comparativo entre dos segmentos del Rift: Sierra San Pedro Mártir y Sierra Juárez, Baja California, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 29, núm. 3, p. 590-610.
- Elias, S., & Alderton, D. (2020). *Encyclopedia of Geology*. Academic Press. <https://www-sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/referencework/9780081029091/encyclopedia-of-geology>
- Frisch, W., Meschede, M., & Blakey, R. C. (2010). *Plate tectonics: continental drift and mountain building*. Springer Science & Business Media.

- Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M. T., y Kostoglodov, V. (2016). Active crustal faults in the forearc region, Guerrero sector of the Mexican subduction zone. *Pure and Applied Geophysics*, 173 (10-11), 3419–3443.
- Gaidzik, K., y Ramírez Herrera, M. T. (2017). Geomorphic indices and relative tectonic uplift in the Guerrero sector of the Mexican forearc. *Geoscience Frontiers*, 8 (4), 885–902.
- García, E. (2004), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Serie Libros, núm. 6, 5a. ed., Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gutiérrez, C. et. al. (2014). *Sismos*. Centro Nacional de Prevención de desastres. 2ª. Reimpresión quinta ed. México. 45 p.
- Hack, J.T. (1973) Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. *Journal Research of United States Geological Survey*, 1, 421-429.
- INEGI (1991). *Geología: Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I*. Chilpancingo.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825675691>
- INEGI (2010). *Hidrología: Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición 2.0*.
https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- INEGI (2017). *Uso del Suelo y Vegetación: Conjuntos de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250.000, (Serie VI), 2014-2017*.
<https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Ausosueveg16>
- INEGI (s.f.). *Modelos Digitales de Elevación (MDE)*. Recuperado el 16 de abril de 2021, en:
<https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). *Anuario estadístico y geográfico de Guerrero 2017 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. -- México: INEGI, c2017.
- Kazachkina, Ekaterina & Kostoglodov, Vladimir & Cotte, Nathalie & Walpersdorf, Andrea & Ramírez-Herrera, María & Gaidzik, Krzysztof & Husker, Allen & Santiago, Juan. (2020). Active 650-km Long Fault System and Xolapa Sliver in Southern Mexico. *Frontiers in Earth Science*. 8. 155. 10.3389/feart.2020.00155.
- Kearey, P., Klepeis, K. A., & Vine, F. J. (2009). *Global tectonics*. John Wiley & Sons.

- Keller, E.A., Pinter, N., (2002). Active tectonics. Earthquakes, Uplift, and Landscape, Second. ed. Prentice Hall, USA, New Jersey. 362 p.
- Khorram, Siamak (2012). Remote Sensing. Springer, International Space University, New York. 134 p.
- Kostoglodov, V., Singh, S. K., Santiago, J. A., Franco, S. I., Larson, K. M., Lowry, A. R., & Bilham, R. (2003). A large silent earthquake in the guerrero seismic gap, Mexico. Geophysical Research Letters, 30(15), SDE 9-1 - 9-4.
- Lira, J., (2011) La Percepción Remota. Segunda edición, Instituto de Geofísica UNAM. México. 113 p.
- Liu, J. G., y Mason, P. J. (2009). Essential image processing and GIS for remote sensing. 443 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1999). Normas Técnicas para la Elaboración de Ortofotos Digitales. Recuperado el de, en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223274/702825223274.pdf
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic information science and systems. John Wiley & Sons. 504 P.
- Lowman Jr, P. D., & Lowman, P. D. (2002). *Exploring space, exploring Earth: New understanding of the Earth from space research*. Cambridge University Press.
- Lugo, J., (2011). Diccionario Geomorfológico. Geografía para el siglo XXI., Primera. Ed, Textos universitarios. Ciudad de México. 480 p.
- McCann, W. R., Nishenko, S. P., Sykes, L. R., & Krause, J. (n.d.). (1979) Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries. Pure and Applied Geophysics PAGEOPH, 117(6), 1082–1147.
- Moreno, Antonio (2008). Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS. Alfaomega Grupo Editorial, México. 911 p.
- NASA (s.f.). Landsat 8 Overview. Recuperado el 19 de abril de 2021, en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8>
- National Council of Educational, Research and Training (2022). Practical Work in Geography. Chapter 6. Introduction To Remote Sensing. Recuperado el en: <https://ncert.nic.in/textbook/pdf/kegy306.pdf>

- Onderdonk, N., McGill, S., & Rockwell, T. (2018). A 3700 yr paleoseismic record from the northern San Jacinto fault and implications for joint rupture of the San Jacinto and San Andreas faults. *GEOSPHERE*, 14(6), 2447–2468. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1130/GES01687.1>
- Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., & Vassilopoulos, A. (2009). Mapping geomorphological environments. Springer Science & Business Media. 236 p.
- Ramírez-Herrera, M.T., (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican Volcanic Belt. *Earth Surf. Process. Landf.* 23, 317–332.
- Ramírez-Herrera, M.T., Gaidzik, K., & Forman, S. L. (2021). Spatial Variations of Tectonic Uplift-Subducting Plate Effects on the Guerrero Forearc, Mexico. *FRONTIERS IN EARTH SCIENCE*, 8, 573081. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.3389/feart.2020.573081>
- Ray, Richard Godfrey (1960). Aerial Photographs in geologic interpretation and mapping. Washington, U.S. Govt. Print off. <https://pubs.usgs.gov/pp/0373/report.pdf>
- Romero, D. (2019). Índices geomorficos y tectónica activa de la cuenca del río Marquelia, Guerrero, México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sahadevan, D.K., Pandey, A.K., Malik, K. *et al.* Chasm at East African Suswa Rift: Possible Explanations. *J Indian Soc Remote Sens* 47, 1773–1780 (2019). <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s12524-019-01016-3>
- Servicio Sismológico Nacional (2023). Catálogo de Sismos. Recuperado el 10 de mayo de 2023, en: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/#>
- Shchetnikov Alexander A., Dustin White, Ivan A. Filinov, Nat Rutter, Late Quaternary geology of the Tunka rift basin (Lake Baikal region), Russia, *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 46, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.12.010>.
- SIGLA (2014). Modelo Digital de Elevación. Recuperado el 16 de abril de 2021, en: <http://sigla-sas.com/modelos-digitales-de-elevacion.html>
- Singh, S. K., & Mortera, F. (1991). Source time functions of large Mexican subduction earthquakes, morphology of the Benioff zone, age of the plate, and their tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B13), 21487-21502.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., y Científicas, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación Madrid. 773 p.

- Turcotte, D.L., Schubert, G., (2002). Geodynamics. UK. Cambridge. Second Edition, 848 p.
- U.S. Geological Survey (s.f.). Orthophotography. Its tecnicos and applications. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1958journal/jun/1958_jun_443-451.pdf
- UNIATMOS (2021). Precipitación: Bases de datos y metadatos. Atlas Climático. Precipitación Anual Promedio (mm). 1961-2000. <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>
- USGS (s.f.). What is a digital orthophoto quadrangle (DOQ) or orthoimage? Recuperado el en: https://www.usgs.gov/faqs/what-a-digital-orthophoto-quadrangle-dq-or-orthoimage?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.
- Wallace, R. E. (1990). The San Andreas fault system, California. Department of the Interior, US Geological Survey.
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B. and Wesling, J. R. (1988). Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica', *Geomorphology*, 1,239–265.

Bibliografía de las imágenes de la tabla indicadores topográficos

- Benavente Escobar, C., Delgado Madera, F., Taípe Maquerhua, E., Audín, L., & Pari Pinto, W. (2016). Neotectónica y peligro sísmico en la Región Cusco. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Benito, G., Sopeña, A., Sánchez-Moya, Y., Machado, M. J., & Pérez-González, A. (2003). Palaeoflood record of the Tagus River (central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22(15-17), 1737-1756.
- Everything Is Electric, Horst and Graben faults in Iran, March 20, 2016, Recuperado el 23 de agosto 2021, en: <https://www.everythingselectric.com/geology-1/>
- Ghassemi, M. R. (2016). Surface ruptures of the Iranian earthquakes 1900–2014: Insights for earthquake fault rupture hazards and empirical relationships. *Earth-Science Reviews*, 156, 1-13.

- Mahmood, S. A., & Gloaguen, R. (2012). Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geoscience Frontiers*, 3(4), 407-428.
- Oliveros, L. M., (S.F). Apuntes geológicos sobre los lignitos de Teruel Geological notes on the lignites of Teruel.
- Onorato, M. R., Perucca, L. P. A., Coronato, A. M. J., Lopez, R., & Blanc, P. A. (2019). Evidencias morfotectónicas en el sistema de fallas Magallanes-Fagnano, borde transformante entre las placas Sudamericana y Scotia, Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina.
- Pucci, S. (2006). The Düzce segment of the North Anatolian Fault Zone (Turkey): Understanding its seismogenic behavior through earthquake geology (Doctoral dissertation).
- Russell, I. C. (1903). Notes on the geology of southwestern Idaho and southeastern Oregon (No. 217). US Government Printing Office.
- Schumm, S. (1986). Alluvial river response to active tectonics. *Active tectonics*, 80-94.
- Silva, P. G., & Rodríguez-Pascua, M. Á. (2018). Terremotos y montañas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26(1), 47-56.
- Volcano Discovery, Colima volcano (Mexico) July 2015: glowing rockfalls and lava Flow, recuperado el 23 de agosto 2021, en: <https://www.volcanodiscovery.com/colima/photos/july2015/lavaflow.html>