



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA**

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.

**Seminario de Graduación
Para optar al título de Ingeniero Geólogo**

Elaborado por:

- Br. Engels Alexander López Rodríguez.
- Br. Danna Vanessa Reyes Velásquez.
- Br. Lisa Elena Ismael Dolores.

Docente:

Tutor: MSc. Gema Velásquez.

Asesor: MSc. Amilcar Cabrera.

Asesor Metodológico: MSc. Karen Acevedo.

Managua, Nicaragua Noviembre del 2020

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES
GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA
DE LA FALLA MATEARE, MARGEN
OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA,
NICARAGUA.**

Dedicatoria

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y dado salud para lograr mis objetivos, darme la sabiduría necesaria y protegerme en cada momento, además de su infinita bondad y amor.

A Mis Padres Nelson José López Jiménez Y Melania Isabel Rodríguez Benavidez Y Hermanas Hasly Janiel López Rodríguez Y María Belén López Rodríguez. Por ser lo mejor y más valioso que Dios me ha dado, por estar siempre en los buenos y malos momentos. Por enseñarme principios y valores, su apoyo incondicional, por el esfuerzo que día a día hacen para salir adelante, darme el mejor ejemplo para ser una mejor persona y sobre todo por caminar siempre a mi lado animando durante las dificultades y celebrando juntos mis logros y aciertos.

A Mis Amigos y Familiares.

Su apoyo moral que han dado para seguir adelante en mi carrera profesional, compartir sus conocimientos y sobre todo por su cariño.

Engels Alexander López Rodríguez.

Dedicatoria

Dedico este trabajo investigativo, primeramente, a Dios por haberme dado la vida y por permitirme culminar mis estudios y ser una profesional.

A mis padres Carolina Velásquez y Agustín Castro por brindarme su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años de mi vida y poder ser lo que soy ahora.

A mi tía Amalia Dolores, por haberme apoyado incondicionalmente con mis estudios.

Dannia Vanessa Reyes Velásquez

Dedicatoria

La presente tesis está dedicada a Dios, por brindarme la fortaleza y la sabiduría para llegar hasta este punto, ya que sin su gracia no hubiese logrado concluir mi carrera.

A mis padres Modesta Dolores y Neddy Ismael, por siempre estar a mi lado brindándome su amor, su apoyo y consejos para luchar por lo que quiero y hacer de mí una mejor persona.

A mi hermana Mery Ismael por sus palabras de motivación y su apoyo incondicional.

Lisa Elena Ismael Dolores.

Agradecimientos

Agradecemos primeramente a Dios fuente de Luz, Amor y Sabiduría. A nuestras familias por su apoyo moral y herramientas para lograr las metas que nos hemos propuesto hasta el día de hoy.

A nuestra Tutora Gema Velásquez y Asesora metodológica Karen Acevedo por brindarnos sus conocimientos y así poder llevar a cabo esta investigación.

A nuestros asesores Amílcar Cabrera y Teresita Olivares por habernos dedicado su tiempo incondicional, por todas sus opiniones, correcciones a lo largo y desarrollo de nuestro trabajo; por sus conocimientos valiosos que nos transmitieron y que nos enseñaron a entender y valorar nuestro trabajo. A ellos todos nuestros agradecimientos y respeto.

Al Ingeniero Norwin Acosta por darnos sus conocimientos y poder lograr culminar este trabajo.

A los profesores Francisco Espinoza, Xóchilt Zambrana, Edmundo Aguirre por brindarnos parte de su tiempo y sus conocimientos.

A todos nuestros amigos que brindaron su ayuda de una u otra forma para ser posible la realización de este trabajo.

Resumen

La falla Mateare se localiza en la parte oeste de la fosa tectónica o cuenca de Pull-apart Managua, presenta una orienta NW-SE y con una longitud de 38 km, además, representa un peligro sísmico para la ciudad capital.

La investigación tiene como objetivo caracterizar desde el punto de vista geológico afloramientos de la falla Mateare para la obtención de la columna estratigráfica generalizada, así mismo, se realizaron interpretaciones de indicadores cinemáticos de la zona de falla. Por otra parte, se analizó la amenaza sísmica mediante el método determinístico tomando en consideración los siguientes parámetros de caracterización de la fuente sísmica como: dimensiones de la falla, profundidad en km y magnitud momento que se podría generar de la falla sísmica.

Como resultados se estimó una magnitud momento (M_w) hipotética de 6.9, con el fin de presentar escenarios sísmicos que muestren valores de intensidades del movimiento de la zona de falla. Así también, se estimaron posibles escenarios de valores de aceleraciones que van de 1.66 - 1.69 (unidad de gravedad), el cual se ubican al NW, centro y SE de la falla Mateare. Los espectros de respuesta asociados a la fuente demuestran que las zonas de la ciudad de Managua, municipio El Crucero, municipio de Mateare y comarcas aleñadas serian afectadas severamente por un terremoto mayor a la magnitud y parámetros estimados en la investigación.

Palabras Claves: Peligro Sísmico, Geología, Falla Mateare, Magnitud Momento, Método Determinístico.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	2
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
4. JUSTIFICACIÓN.....	5
5. OBJETIVOS.....	6
6. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	7
7. FUNDAMENTACION TEÓRICA.....	9
8. HIPÓTESIS.....	34
9. DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
11. CONCLUSIONES.....	77
12. RECOMENDACIONES.....	79
13. BIBLIOGRAFÍA.....	80
14. ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación. A) Mapa Político de Nicaragua. B) Departamento de Managua. C) Localización del área de estudio. Fuente: (Modelo de elevación 30 metros y Base cartográfica, proporcionado por INETER).....	8
Figura 2. Mapa Tectónico de América Central, las flechas indican la dirección de subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe.....	9
Figura 3. Mapa de Provincias Geológicas de Nicaragua.....	13
Figura 4. Columna estratigráfica del área de Managua..	20
Figura 5. Mapa Geo-Estructural del Área de Managua..	22
Figura 6. Partes de una falla geológica: bloque de techo, bloque de piso y plano de falla..	25
Figura 7. Esquema de Falla Normal.	26
Figura 8. Esquema de Falla Inversa.....	26
Figura 9. Esquema de Falla Transformante.....	27
Figura 10. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo: (a) ondas P y (b) ondas S, Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love.....	28
Figura 11. Ondas de cuerpo que se propagan por el interior del planeta. Las ondas S no se propagan en medios líquidos..	29
Figura 12. Ondas superficiales generadas por sismos. Pueden dar lugar a desplazamientos de grandes masas de agua a distancias de miles de kilómetros.	30
Figura 13. Mapa de Puntos de Control... ..	40
Figura 14. Correlación Estratigráfica de la Falla Mateare.....	59
Figura 15. Columna Estratigráfica de la Falla Mateare.	60

Figura 16. Mapa de Esfuerzos de la falla Mateare, con el análisis de las rosetas de fractura que muestran una dirección preferencial N-S.	68
Figura 17. Mapa sísmico de la zona de falla Mateare, donde el Punto verde indica el sísmico de mayor magnitud.....	70
Figura 18. Mapa de escenarios sísmicos en la falla Mateare. Fuente: (Modelo de elevación 30 metros, proporcionado por INETER).	72
Figura 19. Mapa de amenaza sísmica en términos PGA sismo hipotético de 6.9 Mw al NW de la falla Mateare.	74
Figura 20. Mapa de amenaza sísmica en términos PGA, sismo hipotético de 6.9 Mw en la parte céntrica de la falla Mateare.	75
Figura 21. Mapa de Amenaza Sísmica en términos PGA, sismo hipotético de 6.9 Mw al SE de la falla Mateare.	76
Figura 22. Mapa de sismos registrados en el mes de abril 2014. Fuente: (INETER, Boletín mensual Sismos y Volcanes de Nicaragua, 2014).	87

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. A) Depósito de toba en el municipio El Crucero. B) Detalle de la meteorización que presenta el depósito de toba.....	47
Foto 2. Depósito de oleada piroclástica localizada en el municipio El Crucero	48
Foto 3. Depósito de caída de ceniza presente en el municipio El Crucero.	49
Foto 4. Contacto entre suelo fósil y depósito de ceniza en la comarca Santa Ana.....	50
Foto 5. Depósito de caída de ceniza y escoria, presente en los alrededores del municipio de Mateare.....	51

Foto 6. A) Depósito de caída de pómez asociado a Apoyeque presente en los alrededores de Chiquilistagua. B) Detalle de la gradación inversa que presenta la pómez de Apoyeque.	52
Foto 7. A) Contacto entre el depósito de caída de ceniza que suprayace al Haq y subyace a Hcp presente en los alrededores del municipio de Mateare. B) Detalle del depósito de ceniza.....	53
Foto 8. Depósito de caída piroclástico presente en los alrededores del municipio de Mateare que suprayace al depósito Hc y Haq.....	54
Foto 9. Depósito de toba presente en los alrededores de Mateare.	55
Foto 10. Depósito de caída de pómez intercalado con una capa de ceniza ubicado en el municipio de Mateare.	56
Foto 11. Depósito de caída de escoria ubicado en los alrededores del municipio de Mateare.	57
Foto 12. Suelo moderno.....	57
Foto 13. A) Afloramiento de Toba presente en el municipio El Crucero. B) Diastrofismo.	63
Foto 14. A) Fracturas localizadas en la comarca de San Andrés de la Palanca. B) Sistemas anastomosados. C) Fracturas conjugadas.	64
Foto 15. Corte de carretera localizado en el municipio de Mateare. A) Fallamiento superficial. B) comportamiento escalonado deformando los estratos desplazados... 	65
Foto 16. Fractura con terminación simple localizada en corte de carretera en el municipio de Mateare.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio	7
Tabla 2: Definición y Operacionalización de variables.....	36
Tabla 3. Coordenadas Puntos de Muestreo.	39
Tabla 4. Coeficientes de escala entre longitud de ruptura, ancho de ruptura, área de ruptura y magnitud momento.....	71
Tabla 5. Escala de Mercalli).	73
Tabla 6. Ficha de campo del municipio de Mateare.....	84
Tabla 7. Ficha de Campo de la comarca San Andrés de la Palanca.....	84
Tabla 8. Ficha descriptiva de campo de la comarca Chiquilistagua.....	85
Tabla 9. Ficha descriptiva de campo de la comarca Santa Ana.....	86
Tabla 10. Ficha descriptiva de campo del municipio El Crucero.....	86
Tabla 11. Fallas principales de Managua.).....	88
Tabla 12. Escala de Mercalli y parámetros sísmicos.	89

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio caracteriza un área de 342 km², ubicado al oeste del graben de Managua, la estratigrafía que aflora en la zona de investigación se asocia probablemente al grupo La Sierra y formaciones recientes. El objetivo principal es evaluar las condiciones geológicas y sísmicas en la zona de la falla Mateare, así mismo esta investigación permitió dar una estimación de un posible terremoto de magnitud máxima en la zona de la falla Mateare a partir del método determinístico de amenaza sísmica con la finalidad de proporcionar información geológica básica que sirva de ayuda para futuras investigaciones científicas.

La metodología empleada en el estudio se divide en las siguientes etapas: 1) Primera etapa, trabajo de gabinete: el cual consistió en la recopilación y análisis de toda la información posible del área de estudios relacionado al tema de investigación, mediante tesis, artículos científicos, entrevista, informe, libro etc, 2) Segunda etapa, fase de campo: en cada punto de control se realizó un levantamiento de los datos el cual consistió en describir la litología que presenta cada área, asimismo, se identificaron indicadores cinemáticos, 3) Tercera etapa, procesamiento y análisis de los datos: mediante la geometría que presenta la falla se procedió a realizar cálculo de ecuación de escalamiento para obtener una magnitud más acertada para este tipo de falla y se evaluó la amenaza sísmica mediante el método determinístico.

Los resultados alcanzados en la investigación son: a) Una columna estratigráfica como reconocimiento del área, b) La geometría de la falla Mateare a partir de foto interpretación, imágenes satelitales, mapas de sombras y datos obtenidos en campo, c) La magnitud máxima posible aplicando la ley de escalamiento, d) La amenaza sísmica mediante el método determinístico usando el programa CRISIS 2007.

2. ANTECEDENTES

En el área de estudio se han realizado trabajos previos de carácter regional que describe la falla Mateare los cuales se detallarán a continuación.

Havlicek, D. y Navarro, M. (1997) realizó el “Estudio para el reconocimiento de las amenazas geológicas en el área de Managua, Nicaragua”. Consistió en la correlación de puntos de documentación de campo; presenta unos conjuntos piroclásticos definidos del grupo Managua. Se describió una secuencia de rocas en corte de la carretera cerca de Mateare.

Además, Hugh, C. y Macheto, N. (2000) realizó el estudio de “Map and data base of quaternary faults in the vicinity of Managua” se basó en la recopilación de mapas digitales de fallas en el cual se muestran ubicaciones, edades y tasas de las actividades principales, la creación de este mapa y la base de datos tuvo como finalidad ayudar a extender el registro relativamente corto de la sismicidad en esta zona.

De igual manera, INETER (1997), realizó un estudio de la microzonificación sísmica de Managua, con el objetivo de encontrar parámetros del suelo que juegan un papel importante para la afectación por terremotos, el cual consistió en lograr un mayor entendimiento de las causas de los desastres por terremotos en las zonas urbanas y con este conocimiento ayudar a mitigar los posibles desastres,.

También, Cowan, N. y otros (2000) elaboraron una base de datos de las fallas del cuaternario en los alrededores de Managua, donde expusieron las principales características y parámetros geométricos de dichas fallas. Los mapas muestran las ubicaciones, edades y tasas de actividad de las principales características relacionadas con los terremotos, como fallas y pliegues.

INETER (2002) realizó la “Actualización del mapa geológico-estructural del área de Managua”. Se utilizó para la creación de datos espaciales de la geología a partir de la recopilación bibliográfica y la elaboración de mapas temáticos que permite luego definir mapas de amenazas sísmicas.

Así mismo, Espinoza, F. (2007) determinó un lineamiento de 25 estructuras volcánicas monogenéticas y un volcán compuesto, emplazados en la falla Nejapa atribuidos a la estratigrafía de Managua, estructuralmente, divide el área en tres bloques denominados Mateare, Nejapa y Managua. Demostró en base a análisis de mecanismos focales que la zona está expuesta a un régimen de extensión este-oeste y compresión norte-sur.

El proyecto, Resis II (2008) consistió en evaluar la amenaza sísmica regional que podrán ser utilizados para mejorar los códigos sísmicos existentes y faciliten la gestión del riesgo sísmico y el ordenamiento territorial.

Igualmente, Gonzáles, M. (2012) realizó un “Análisis morfo-estructural del graben de Managua y sus alrededores” en el interpretó la morfo-estructural del graben de Managua a escala 1:5:000, donde describió las fallas geológicas en el área de Managua, las cuales poseen una geometría en échelon bien definidas, también describe que la dinámica de algunas de estas fallas se encuentra en presencia de movimientos laterales.

Por otra parte, Gómez, R. y Pérez, E. (2013) llevaron a cabo una investigación denominado “Simulación de la amenaza sísmica producida por principales fallas de Managua” presentó la amenaza sísmica a una escala local por medio de simulaciones numéricas el resultado de esta fue que todas las fallas con prolongación en el lago Xolotlán tienen el potencial de crear una deformación sísmica vertical negativa (subsistencia del suelo).

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA
MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.**



De la misma forma, Bellorín, G. y Olivares, T. (2017) efectuaron el estudio denominado “Evaluación de la amenaza sísmica en Managua aplicando el método determinístico para la falla donde ocurrió el terremoto del 10 de abril 2014” demostró que para la ciudad de Managua un nuevo sismo de 6.5 en el área del volcán Momotombo y Momotombito no representa mayor peligro para la población y sus construcciones, a no ser que estas no cumplan con la norma vigente de la construcción.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La actividad sísmica no se puede evitar, sin embargo, la ciudad de Managua es una zona donde frecuentemente sucede este tipo de eventos a causa de fallas geológicas activas, por otro lado, la poca cohesión de los suelos con lleva a la amplificación del paso de las ondas sísmicas creando mayor amenaza para la población.

Los sismos provocan lamentables pérdidas humanas y materiales, ocasionando afectaciones a las infraestructuras y por ende daños directos al sector productivo en los territorios cercanos a los epicentros, es de suma importancia estar conscientes de los daños que podría causar un sismo de gran magnitud generado por una falla tan extensa como lo es la falla Mateare.

Según los antecedentes a esta investigación se identifica que el área de estudio cuenta con documentación geocientífica poco detallada; por lo tanto, se desprende la necesidad de realizar este estudio enfocado en las condiciones geológicas y sísmicas en dicha área.

El interés primordial de este trabajo se centró en ¿Un sismo de gran magnitud (mayor a 6.0 Mw) ocasionado por la falla Mateare podría provocar un déficit socio-económico para los municipios y comarcas aledañas a ella?

4. JUSTIFICACIÓN

En el margen oeste (W) del graben de Managua hay un incremento poblacional y una expansión progresiva de urbanizaciones, por lo cual es necesario un estudio sobre la amenaza sísmica que podría ocasionar la falla Mateare ya que esta cuenta con una mayor extensión, por ende, podría causar un terremoto de gran magnitud.

La finalidad de esta investigación es brindar información detallada de un posible terremoto generado por dicha falla.

Existe información geológica poco detallada del área de estudio, lo que conlleva a interpolar la información, de ahí la importancia de realizar un estudio de la zona, donde se caracterice las condiciones geológicas y la amenaza sísmica presente en la falla Mateare.

5. OBJETIVOS

❖ **Objetivo General**

- Estudiar las condiciones geológicas y sísmicas en la zona de la falla Mateare, margen oeste del graben de Managua, Nicaragua.

❖ **Objetivos Específicos**

- Caracterizar las unidades estratigráficas del escarpe de la falla Mateare mediante un levantamiento geológico para obtener la columna estratigráfica.
- Determinar la geometría de la falla Mateare a partir de foto interpretación, imágenes satelitales, mapas de sombras y datos obtenidos en campo.
- Estimar la magnitud máxima de un posible sismo que pueda desencadenar la falla Mateare en base a su geometría y su modo de desplazamiento.
- Evaluar la amenaza sísmica de la falla Mateare mediante el método determinístico en la ciudad de Managua y municipio de Mateare.

6. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio cuenta con un área de 342 km² (Ver Figura 1). Orientado al oeste del graben de Managua, abarcando las hojas topográficas de Mateare, Managua y San Rafael del Sur (Ver tabla 1).

Acceso al área de estudio

Se llega a la falla Mateare por diferentes vías de acceso las cuales son:

- a) Carretera Nueva a León en el kilómetro 25 se localiza el municipio de Mateare, a unos pocos kilómetros antes se encuentra el municipio de Ciudad Sandino teniendo acceso a la comarca de San Andrés de la Palanca.
- b) Por la carretera Vieja León en el kilómetro 17 se ubica la comarca Los Filos de Cuajachillo.
- c) En la carretera hacia el departamento de Carazo se sitúa el municipio de Crucero en el kilómetro 26.

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio, Unidades UTM Datum WGS84, zona 16.

Vértice del área	Coordenadas UTM WGS 84		Vértice del área	Coordenadas UTM WGS 84	
	Este	Norte		Este	Norte
1	561005	1358353	8	570882	1320776
2	566574	1348081	9	570548	1323872
3	567670	1344876	10	562142	1334580
4	570186	1338800	11	556239	1348280
5	574661	1333844	12	553728	1353252
6	578159	1327982	13	561005	1358353
7	579258	1324114			

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.

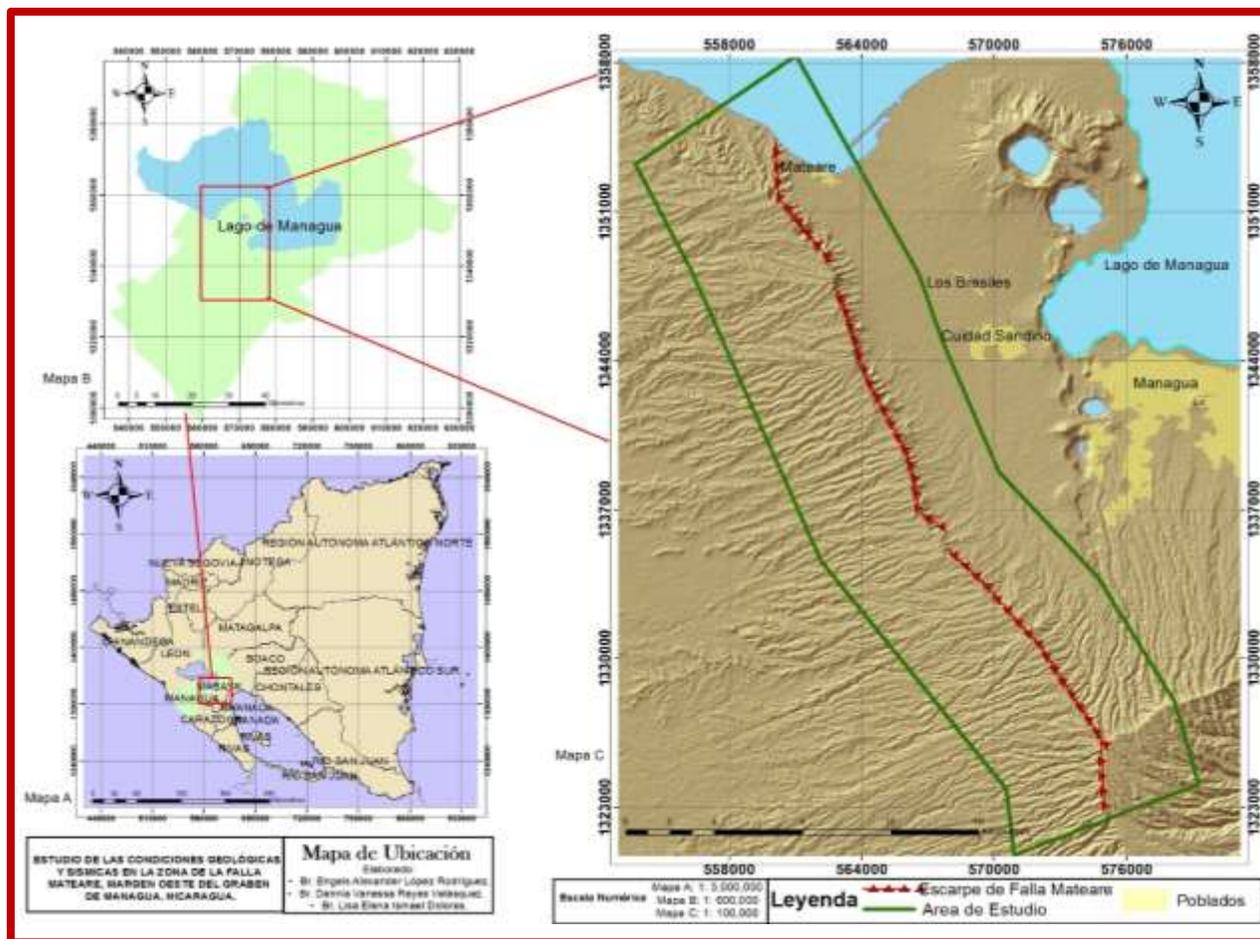


Figura 1. Mapa de Ubicación. A) Mapa Político de Nicaragua. B) Departamento de Managua. C) Localización del área de estudio. Fuente: (Modelo de elevación 30 metros y Base cartográfica, proporcionado por INETER).

7. FUNDAMENTACION TEÓRICA

Marco tectónico General de Centro América

América Central se sitúa en el margen occidental de la placa Caribe en un ambiente de convergencia continental y oceánica donde la placa Cocos subduce bajo la placa caribe de suroeste a noreste y cuyos márgenes son complejos cinturones tectónicos activos, que han estado evolucionando a lo largo del cenozoico. (Dengo, 1990) (Ver Figura 2)

La dirección de subducción de estas dos placas es de N31°E, a una velocidad de 8 a 9 cm por año, con un ángulo aproximado de 80°, decreciendo hacia la parte sur de Nicaragua, hasta alcanzar los 60° en Costa Rica. (Frischbutter, 2002) Como resultado de esta subducción hace que los principales rasgos geotectónicos presentes en el país sean: la Depresión Nicaragüense de rumbo NW-SE y la Cadena Volcánica de América Central con dirección NW-SE, formada por un alineamiento de estrato-conos y escudos volcánicos.

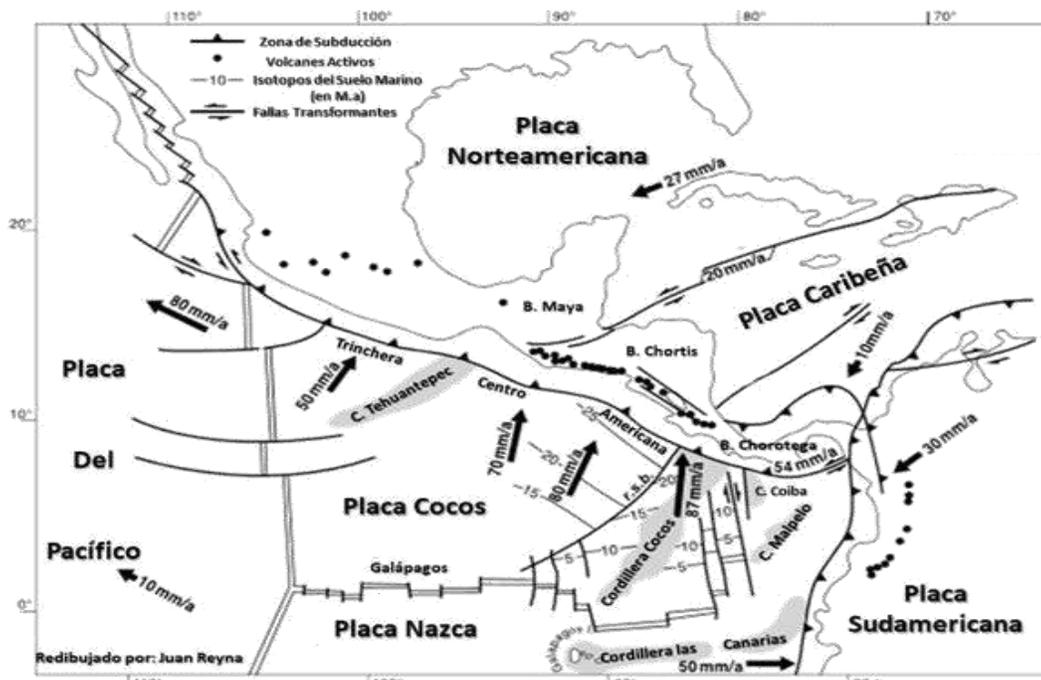


Figura 2. Mapa Tectónico de América Central, las flechas indican la dirección de subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe Fuente: (Frischbutter & Avellán, 2002).

Marco tectónico General de Nicaragua.

La depresión nicaragüense es el resultado de procesos tectónicos, los cuales se originan en el contacto activo entre las placas Cocos y Caribe. El territorio nicaragüense se compone de un complejo rígido volcano-sedimentario (corteza terrestre de edad cretácico superior hasta reciente), aunque en los países vecinos la subducción se manifiesta por metamorfismo y destrucción de la corteza mucho más potente. Estas relaciones en Nicaragua son muy complicadas y una posible solución queda como objeto de discusión. (Havlicek, 1997)

Nicaragua está limitada en sus costas por importantes unidades tectónicas en el Pacífico, por la plataforma continental, la fosa Mesoamericana, la placa de Cocos y la placa Nazca, provocando el origen de la depresión de Nicaragua y la cadena volcánica mientras que la Costa Atlántica está limitada por la placa del Caribe y el Banco de Nicaragua.

Nicaragua forma parte de la placa del Caribe y se localiza en su parte oeste, donde esta placa colisiona con la placa de Cocos esta última subduce hasta los 250 km, que es la profundidad máxima de los sismos (bajo el territorio de Nicaragua). La mayor parte de la actividad sísmica en la región ocurre bajo el océano y es resultado de la interacción entre las dos placas; esta actividad incluye los sismos de mayor magnitud (7.0 Mw). La cadena volcánica constituye la segunda fuente importante de sismos en Nicaragua, el segmento del arco tiene 380 km y coincide con el eje de la depresión nicaragüense. (Segura, 2007)

Geología Regional de Nicaragua

Las provincias geológicas de Nicaragua, sus límites y tipos de rocas (Ver Figura 3). A continuación, se caracteriza cada una de estas:

Provincia Geológica de las planicies de la Costa del Pacífico

Está situada en la depresión de la fosa mesoamericana, llegando en el SE hasta la cuenca de Limón en Costa Rica.

Representada por conglomerados, arenisca, limonita, grauvacas, lutita y caliza alternado con series volcánicas de cenizas piroclásticas y lava. La edad se extiende desde el cenomaniano hasta el plioceno. Esta provincia se divide en 6 formaciones: Las rocas más antiguas de la formación Rivas (cretácico superior) aflorando en el Sur, formación Brito del eoceno, formación Masachapa del oligoceno, formación El Salto del plioceno, Miembro Sapoá paleoceno mientras las formaciones más jóvenes afloran en el norte, tales como El Fraile y Tamarindo del Mioceno. (Zoppis, 1958)

Provincia Geológica de la Depresión o Graben nicaragüense

El graben nicaragüense constituye una estructura tectónica joven, cruzando todo el pacífico de Nicaragua desde el golfo de Fonseca en el NW. El graben se encuentra limitado por dos sistemas de fallas de rumbo NW-SE y su origen está relacionado a la actividad volcánica reciente, a la fosa Mesoamericana y al movimiento de las placas de Cocos y del Caribe. (McBirney, 1965)

“La depresión se encuentra rellena con depósitos piroclásticos y aluvionales con espesores un poco inferior a los 2000 m. Consiste principalmente de rocas volcánicas de composición basalto-andesita y depósitos piroclásticos de edad cuaternaria” (Hodgson, 2000).

Provincia Geológica Central

Está constituida principalmente de rocas volcánicas del terciario (tobas, basaltos, andesitas e ignimbritas) que pertenecen a los grupos Matagalpa y Coyol que

descansan generalmente sobre las formaciones sedimentarias terciarias.
(Corporation, 1972)

Provincia Geológica del Norte

Está compuesta por rocas metamórficas es considerada como la más antigua de Nicaragua tiene unidades de rocas del paleozoico y mesozoico en el área W y SW de la provincia, el complejo metamórfico comprende bajo grado de metamorfismo tales como mármol, cuarcita, pizarra y otras rocas meta-sedimentarias. (Hodgson, 2000)

Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica

La provincia comprende desde el río Coco en el norte hasta los municipios de Laguna de Perla y Karawala en el límite oeste, caracterizado por rocas sedimentarias del pleistoceno y litológicamente está constituido por depósitos aluviales.

“La provincia abarca la Cuenca Mosquitia y está dividida en 6 formaciones y miembros como: formación Bragman`s Bluff, formación Martínez, formación Mosquitia, miembro Kamanon, formación Punta Gorda y formación Touche” (Hodgson,2000).



Figura 3. Mapa de Provincias Geológicas de Nicaragua. Fuente: (Hodgson, 2002).

MARCO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE MANAGUA

Estratigrafía de Managua

“La estratigrafía de Managua, se caracteriza por una secuencia de depósitos volcano-sedimentarios. Litológicamente consiste en una serie de depósitos volcánicos de caídas, lavas y flujos piroclásticos, los cuales fueron denominados como grupo La Sierra, de edad terciaria”. Los depósitos más superficiales han sido denominados como grupo Managua, de edad cuaternaria, los cuales se caracterizan por ser una secuencia de rocas volcánicas intercaladas por suelos fósiles o suelos residuales.

Entre las posibles fuentes volcánicas de los depósitos de Managua corresponden a la caldera Masaya, caldera Apoyeque, los cráteres Nejapa, Asososca y Tiscapa, las estructuras de colapso como valle Ticomo; conos de escoria como Cerro Motastepe, Cerro Chiltepe y Loma Chico Pelón, que ahora son remanentes de la antigua actividad volcánica en el área de Managua. (Havlicek, 1997)

Formaciones que componen el graben de Managua

Diferentes autores han realizado estudios acerca de la geología del graben de Managua y sus alrededores entre los que destacan: (McBirney, 1965), (Williams, 1971), (Bice, 1985), (Girard, 2005), (Kutterolf, 2007), (Avellán, 2009) y el más reciente (Martínez, 2012). Todos estos autores coinciden con que la geología del área de estudio está constituida por depósitos volcano-clásticos, los cuales fueron originados en un ambiente volcánico explosivo con edades comprendidas desde el terciario tardío hasta el cuaternario.

El trabajo más actualizado sobre la estratigrafía para el área de Managua es el de (Kutterolf, 2007). En el cual propone que el área está constituida por tres formaciones que son: formación La Sierra, formación Managua y formación Chiltepe (Ver Figura 4).

A continuación, se describen las tres formaciones que conforman la geología de Managua con sus respectivas unidades.

Formación La Sierra

Está compuesta por rocas piroclásticas relativamente consolidados de gran espesor, usualmente es de color gris y a menudo presenta fracturas rellenas de carbonato de calcio, fue dividido por dos principales unidades separadas por un paleosuelo que son Tefra Unicit y Tefra Fontana. (Kutterolf, 2007)

Unidad Tefra Unicit

Esta unidad se encuentra detrás de la Universidad Iberoamericana de Ciencia y Tecnología (UNICIT); litológicamente está compuesta por un depósito de caída de pómez masivo, de composición dacítica; cuya característica más distintiva es la menor evolución en la composición del vidrio en comparación con otros depósitos de pómez y su alto contenido en hierro; estos autores mencionan que la fuente de esta unidad puede estar ubicada en la Península de Chiltepe, ubicada al sur del lago de Managua. (Kutterolf, 2007)

Unidad Tefra Fontana

Esta unidad consiste en un depósito de ceniza tamaño lapilli, color negro y sin estratificación interna; que se expone al noroeste de la caldera Masaya y en los alrededores de Managua. La fuente de esta unidad se localiza algunos kilómetros al noroeste de la caldera Masaya. (Bice, 1985). “La Tefra representa el límite superior de la formación La Sierra y la definen como una secuencia de capas de escoria muy vesicular, de color negro y composición andesita basáltica” (Kutterolf, 2007).

Su edad fue estimada por (Bice, 1985) mediante correlación estratigráfica entre 25 y 35 mil años y (Kutterolf, 2007), propone una edad entre 55 y 68 mil años, mediante dataciones obtenidas en núcleos de sedimentos, en la costa del lago de Nicaragua.

Formación Chiltepe

Se trata de un depósito de pómez de caída de composición dacítico el cual fue producido por erupciones plinianas del volcán Apoyeque. Este depósito es separado por pequeñas capas de ceniza y tienen inclusiones de líticos de composición basáltica. (Kutterolf, 2007)

Unidad Tefra Apoyeque Inferior

Esta unidad consiste en un depósito de caída de pómez de composición dacítica, tamaño lapilli, uniformemente graduada, de color blanco que en ocasiones cambia a marrón; la cual se encuentra en los alrededores de Mateare. La fuente de este depósito se atribuye al Volcán Apoyeque; el cual se localiza en la Península de Chiltepe. (Kutterolf, 2007)

Unidad Tefra Apoyeque Superior

“Esta unidad consiste en un depósito de caída de pómez con gradación inversa; los mapas de isocapas construidos para este depósito muestran un incremento de espesor hacia el norte, en el complejo volcánico Chiltepe” (Bice, 1985). Sin embargo, un estudio más detallado de “los mapas de isocapas e isopleas sugieren que la fuente de esta unidad se ubica al norte de la cuesta El Plomo, en el complejo volcánico Chiltepe, con dispersión hacia el oeste” (Kutterolf, 2007).

Unidad Tefra Mateare

“Esta unidad se sub-divide en cuatro sub-unidades (A, B, C y D) que se encuentran aflorando únicamente a lo largo de la orilla del lago de Managua, al noroeste y suroeste de Mateare” (Kutterolf, 2007).

Unidad Tefra Los Cedros

“Esta unidad consiste en un depósito de caída de pómez, con gradación inversa y composición dacítica. Su distribución espacial es limitada ya que solo se encuentran algunos afloramientos en Mateare y al occidente de Managua” (Kutterolf, 2007).

Tefra de Xiloá

“Se trata de un depósito de pómez de caída con intercalaciones de oleadas muy erosionados. Este depósito se expone hacia este de la laguna de Xiloá. De acuerdo a prueba de ^{14}C se estimó una edad de $6,105 \pm 30$ años” (Kutterolf, 2007).

Formación Managua

“Las unidades de esta formación fueron originadas por grandes erupciones explosivas de las calderas cercanas a la capital como la caldera de Apoyo y caldera de Masaya” (Kutterolf, 2007).

Unidad Pómez de Apoyo

“Esta unidad está constituida por un depósito de pómez, que puede ser subdividido en tres sub-unidades: Apoyo Inferior con edad de 20,920 años, Apoyo Medio con edad de 16,000 años y Apoyo Superior de edad desconocida” (Bice, 1985). “Sin embargo, en un estudio más detallado de esta unidad la dividen en Apoyo Inferior y Apoyo Superior, las cuales están separadas únicamente por un paleosuelo de color marrón” (Kutterolf, 2007).

Unidad Tefra San Antonio

Esta unidad consiste en secuencias de capas de caída de escoria color negro, que se encuentra al noroeste, norte y sur de la caldera Masaya. Los afloramientos de esta unidad son muy pocos y se encuentran afectados por procesos de erosión post-emplazamiento. (Kutterolf, 2007)

Unidad Triple Capa Masaya

Esta unidad fue descrita como una capa deleznable de ceniza gruesa, color negro, con espesor de 5-10 cm; la cual está limitada en la base y en la cima, por dos capas de toba gris, con espesor de 1-2 cm. (Bice, 1985). Un estudio más detallado de esta unidad la describen como un depósito compuesto por siete capas de caída de escoria, color negro (C1, C2, C3b, C4, C6, C8 y C10), las cuales tienen una buena selección en sus granos y se encuentran separadas por cuatro capas delgadas (C3a, C5, C7 y C9), de ceniza. (Freundt, 2006)

Unidad Toba Masaya

Esta unidad consiste en un depósito de oleadas piroclásticas ricas en estructuras internas de antidunas; que corresponde a una de las erupciones más jóvenes registradas en la caldera Masaya y que se extiende a más de 35 Km, en forma radial de dicha caldera. Los espesores de esta unidad se incrementan hacia la ciudad de Masaya. (Bice, 1985)

Unidad Andesita

Esta unidad está representada por flujos de lavas de composición andesítica. Su origen se atribuye a erupciones de tipo efusiva provenientes del volcán Apoyeque, las cuales se emplazaron en las laderas externas de este volcán. (Espinoza, 2007)

Unidad de Detritos

Esta unidad se encuentra representada por flujos de detritos, que se encuentran al noroeste y oeste del volcán Apoyeque. Son el resultado de la remoción en masa de los depósitos volcánicos, que se encuentran en las partes más altas del volcán Apoyeque, hacia las partes más bajas, esto como consecuencia de la saturación del suelo por lluvias muy intensas. La característica principal de estos flujos es que son mal clasificados y no presentan estructuras sedimentarias primarias. (Espinoza, 2007)

Unidad Basalto

Se localiza en la parte sur de Managua y se extiende hacia el norte hasta la localidad de Cofradía. Aflora en forma de coladas de lavas, las cuales fueron originadas por erupciones de tipo efusivas y en algunos casos de tipo fisural, provenientes de la caldera Masaya. (Martínez, 2012)

Unidad Aluvial

Esta unidad tiene una amplia distribución dentro del graben de Managua. Corresponde a depósitos volcano-sedimentarios, el espesor de esta unidad va desde centímetros en las partes cercanas a las pendientes hasta aproximadamente 5 m en las zonas más bajas; encontrándose los afloramientos con mayores espesores en las cercanías del lago de Managua. (Martínez, 2012)

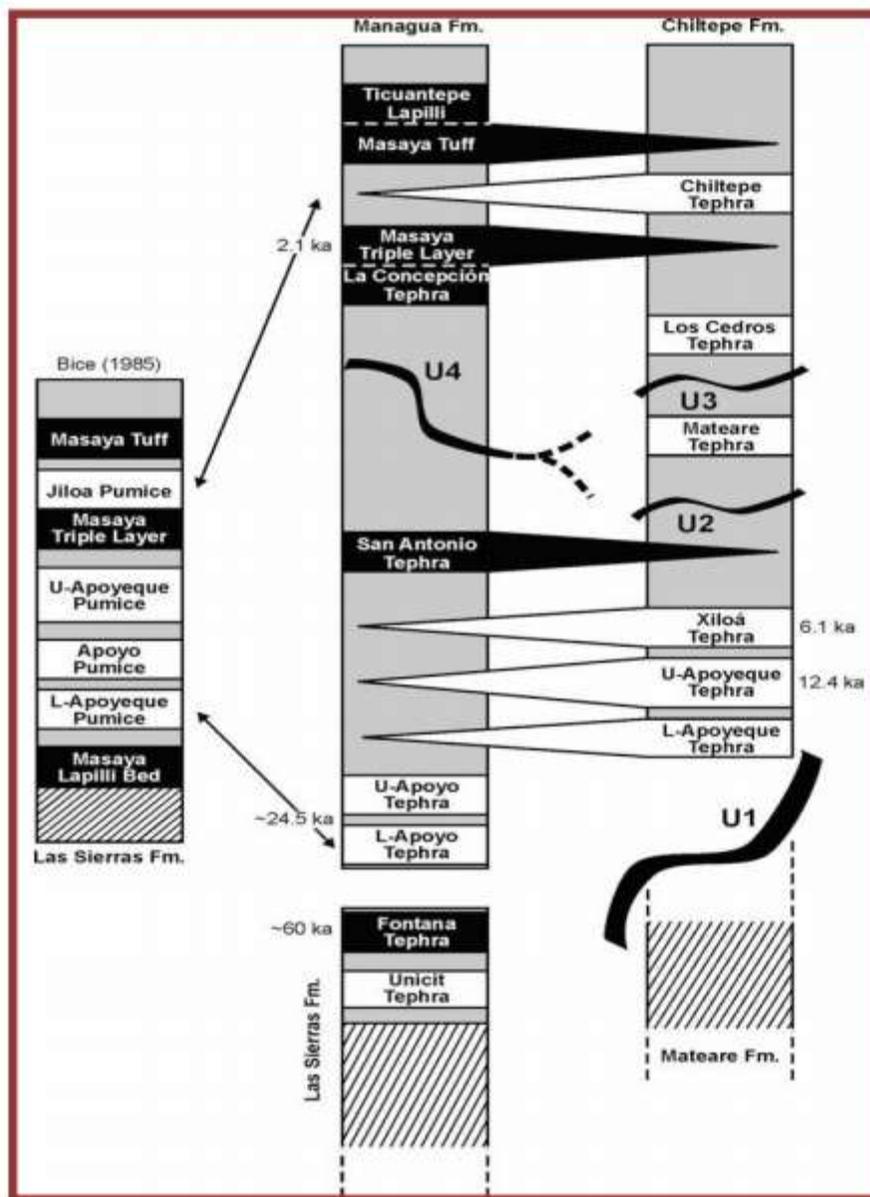


Figura 4. Columna estratigráfica del área de Managua. Fuente: (Kutterolf, 2007).

Geología Estructural del Graben Managua

El área de Managua se ubica dentro de la depresión de Managua, una estructura orientada N-S, considerada secundaria, con las mismas características y origen de la estructura principal (depresión de Nicaragua). Se trata de una estructura reciente

de tipo extensional y activa, que disloca la cordillera volcánica en sentido derecho por unos 13 km (Frischbutter, 2002)

El graben de Managua es una estructura extensional o pull apart, de aproximadamente 1,800 km², incluyendo el área del lago de Managua. Está ubicado en la parte central del oeste de Nicaragua, a 45 km del océano pacífico dentro de la depresión de Nicaragua, entre los segmentos del arco volcánico.

La depresión o graben de Managua está limitada por la falla Cofradía al este y el lineamiento Miraflores-Nejapa al oeste. Hacia el norte el graben se pierde dentro del lago y hacia el sector suroeste el graben es limitado por la falla Mateare y la falla Las Nubes, mientras hacia el sur el límite se encuentra dentro de la caldera de La Sierra (Ver Figura 5).

Dentro del graben se encuentran fallas orientadas según dos conjuntos conjugados: N-S y NE-SW. Las fallas con orientación N-S generalmente tienen forma de arco, con dirección paralela a estructuras mayores relacionadas a colapsos volcánicos y presentan desplazamientos de tipo normal. Las fallas con dirección NE-SW, en particular N35°E y N45°E presentan desplazamientos laterales izquierdos. (Woodward-Clyde, 1975) (Ver Figura 5)

Pocas fallas presentan una orientación NW-SE, la orientación preferencial es NE-SO con desplazamiento lateral izquierdo de las fallas, como acomodación de los bloques tectónicos en la cadena volcánica. Los bloques orientados paralelamente a la fosa oceánica, corresponden a la oblicua presión del proceso de subducción en Nicaragua en forma de fallamiento denominado bookshelf. (La Fémina, 2002)

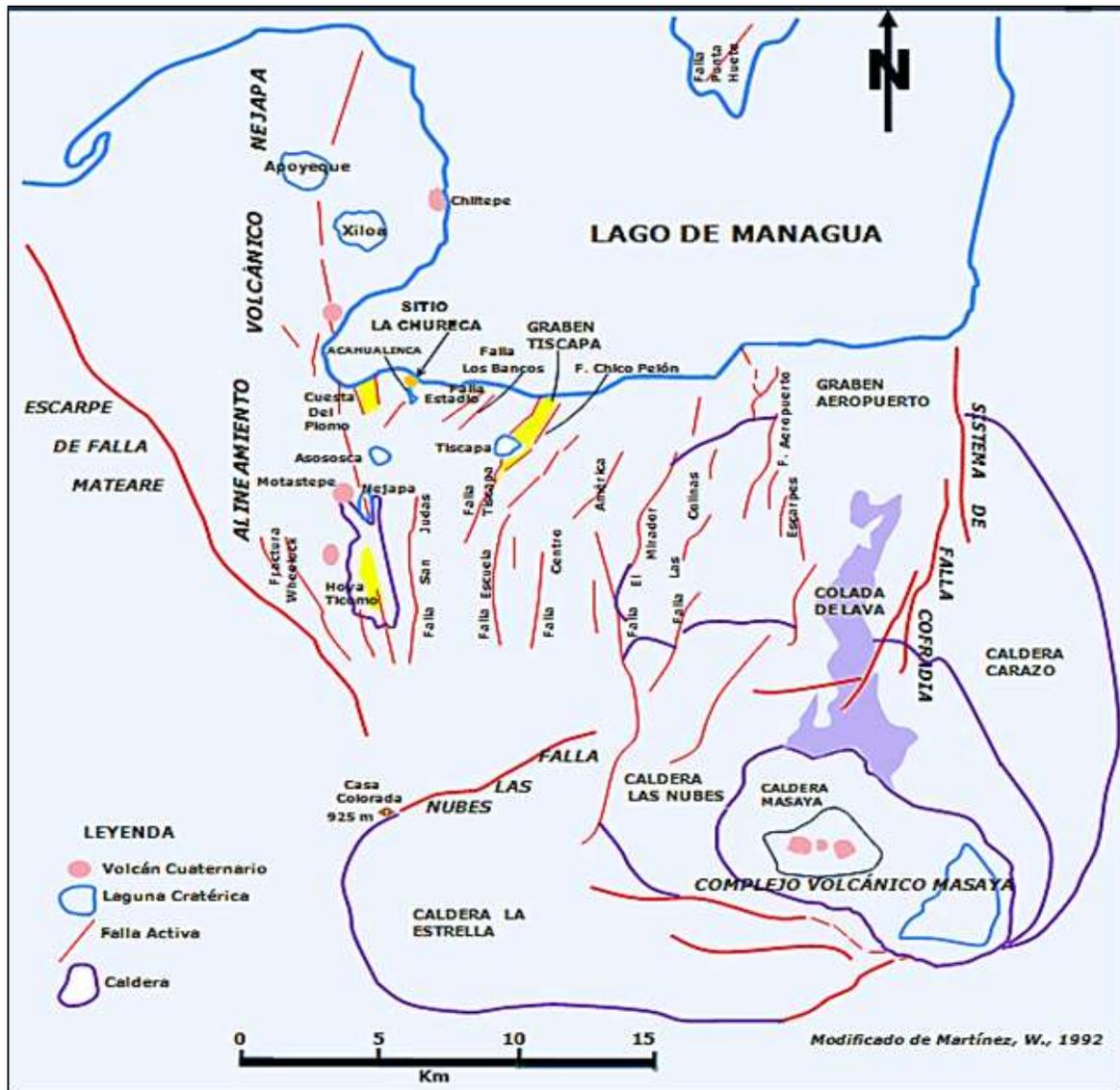


Figura 5. Mapa Geo-Estructural del Área de Managua. Fuente: (Martínez, 1992).

Las fallas geológicas en Managua se han dividido en dos grupos, acorde a los indicadores estructurales y cinemáticos. El primer grupo son fallas normales (aquellas de desplazamiento predominante vertical), entre ellas las fallas Mateare, Las Nubes y Cofradía, que delimitan la estructura del graben. Otros sistemas de este tipo se dan a lo largo de la falla Nejapa, donde se incluyen la falla San Judas, Asosoca-Acahualinca y sistema Aeropuerto que forma el límite oeste del graben Aeropuerto. (Espinoza, 2007)

El segundo grupo corresponde a desplazamiento horizontal lateral-izquierdo, entre ellas la falla Estadio, sistema de falla Tiscapa (incluyen los bancos y chico pelón), falla Escuela y sistema de falla Centro América. En esta zona se observan otras series de estructura geológicas. (Ver Figura 5)

Falla Mateare margen oeste del Graben de Managua

La falla geológica activa conocida como falla Mateare, se proyecta con una dirección NW y SE, además el área de estudio se encuentra constituida por una serie de fallas que afectan a rocas Ignimbritas que pertenecen a la formación La Sierra, de edad terciaria y depósitos piroclásticos de caída pertenecientes a la formación Managua y Chiltepe ambas de edad cuaternaria, lo que caracteriza a la zona como un área con alta amenaza sísmica por fallas geológicas activas que atraviesan la falla Mateare.

La falla Mateare no ha sido estudiada a detalle, sin embargo, varios autores han dado una longitud diferente de dicha falla los cuales son:

- El Centro de Investigaciones Geocientíficas CIGEO, UNAN-Managua, lo define como un bloque que está limitado al este con la denominada falla Mateare, con extensión de 30 km y está basculado hacia el oeste.
- (Martínez, 1994), Define el límite oeste del graben de Managua. Es un segmento de falla de alrededor de 52 km de largo con un rumbo N 20-30° W y un escarpe entre 300 a 500 m.
- (McBirney, 1965), la zona de falla de Mateare se extiende por al menos 70 km por la línea noreste de La Sierra de Carazo, alcanzando en algunos lugares un relieve de casi de 1000 metros sobre la depresión, el escarpe es bastante abrupto y poco erosionado.
- (Cowan, 2000), la definen como un segmento de falla de alrededor de 30 a 60 km de longitud y un salto de aproximadamente 900-1000m, definiendo el límite este del bloque Mateare y se forma en depósitos de ignimbritas de la formación La Sierra (finales de la edad cuaternaria).

- (Espinoza, 2007), define con alturas que varía de 300 a 700 m y un ancho de 5 km. La falla Mateare con extensión de 30 km y está basculado hacia el oeste. Estratigráficamente está constituida por ignimbritas de la formación La Sierra de edad terciario tardío.
- (Martínez, 2016), está constituido por depósitos volcánicos de edad desde el plioceno, hasta el reciente. Tratase principalmente de tobas, cenizas, lapilli, pómez, lavas y escorias. Los depósitos volcánicos más antiguos pertenecen a la formación La Sierra, su desplazamiento vertical se estima en unos 200-300 metros. Su traza puede ser seguida a lo largo de unos 37 km, siendo una de las fallas más largas de este sistema.

La falla de Mateare aparenta ser recién, de pocos miles de años, el desplazamiento aparentemente es vertical y del orden de los 900-1000m (representa aproximadamente la diferencia en elevación entre la cresta de la montaña y el lago de Managua). Se extiende a lo largo del escarpe al NE de la cordillera del Pacifico y aparentemente marca bordes SW de la depresión de Nicaragua. Hacia el norte de Mateare la falla desciende casi al nivel del lago desapareciendo. (Cowan, 2000)

La falla Mateare en su extremo NW rumba entre N 29° a 30° W cerca del cruce de la carretera vieja a la León el rumbo cambia N 45° a 50° W, en la localidad de las Uvas a lo largo de la cresta de la cordilla del pacifico aproximadamente donde el alineamiento punta Huete intercepta la zona de la falla Mateare. El sistema de Mateare es paralela a una pequeña zona de fractura N 10° a 15° W, referido como sed de Ticomo porque se extiende dentro de la depresión Ticomo, ocurre el set de Nejapa-Tiscapa intercepta la zona de falla Mateare y puede ser un set resultado de influencia por la fuerza responsable de ambos sets, el de Mateare y Nejapa. (McBirney, 1965)

MARCO TEÓRICO

Análisis cinemático

El análisis cinemático nos permite determinar la dirección del desplazamiento de los bloques y esto lo obtenemos a través de los indicadores cinemáticos.

Falla Geológica

Zona de fractura que materializa el contacto entre dos partes de una roca, o terreno en general, que han experimentado desplazamiento una respecto de la otra. (ICE, 2019) (Ver Figura 6)

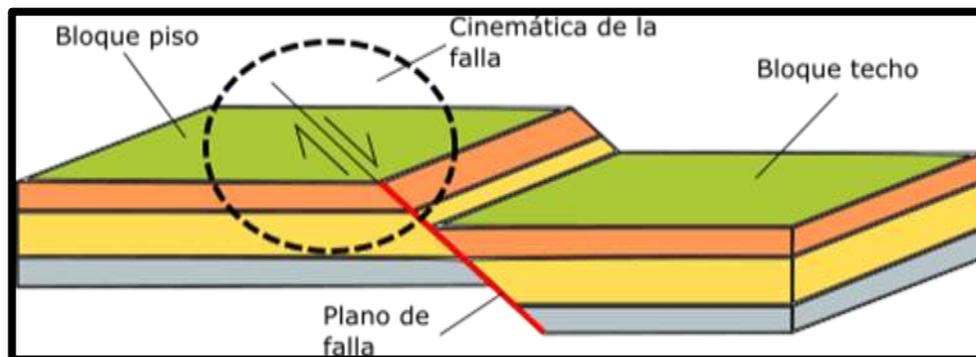


Figura 6. Partes de una falla geológica: bloque de techo, bloque de piso y plano de falla.
Fuente: (Tarbuck, 2005).

Falla normal

Las fallas normales constituyen planos a lo largo de los cuales un bloque “baja” con respecto al otro. Siempre se considera que es una falla normal si el bloque que está “encima” del plano (techo) baja con respecto al bloque que está “debajo” del plano (piso). Este tipo de fallas se originan por la separación de placas tectónicas, es decir, por distensión. (ICE, 2019) (Ver Figura 7).

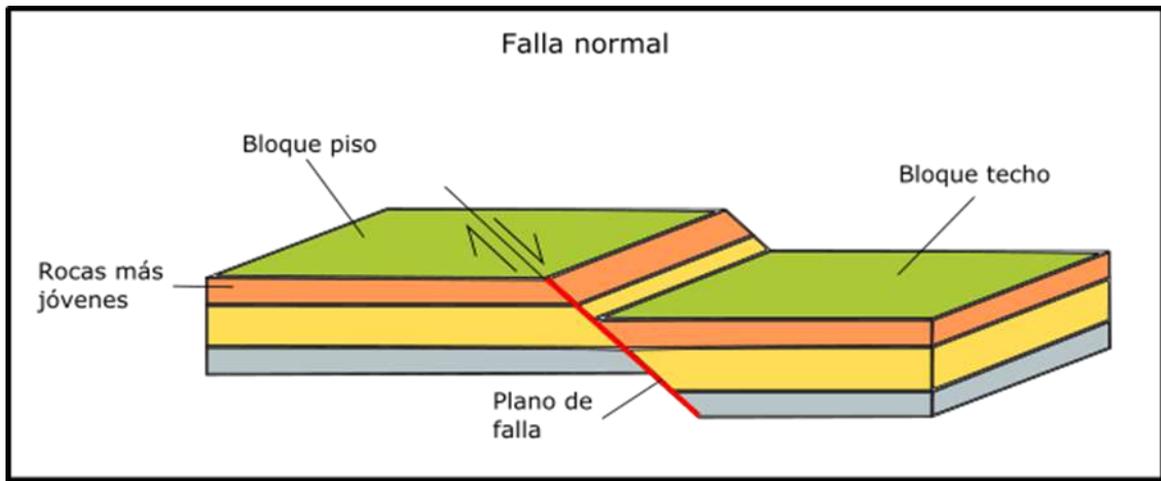


Figura 7. Esquema de Falla Normal. Fuente: (Tarbuck, 2005).

Falla inversa

Las fallas inversas provocan un levantamiento del suelo, es decir que el bloque que está encima del plano de falla (techo) “sube” con respecto al bloque que está debajo del plano (piso). Se les llama inversas porque las fuerzas que las generan son compresivas (empujan un bloque hacia el otro) y hacen subir un bloque rocoso por el plano inclinado de la fractura: es decir que este tipo de movimiento es anti-gravitacional (es contrario a la acción de la gravedad que tiende a hacernos caer). (ICE, 2019) (Ver Figura 8)

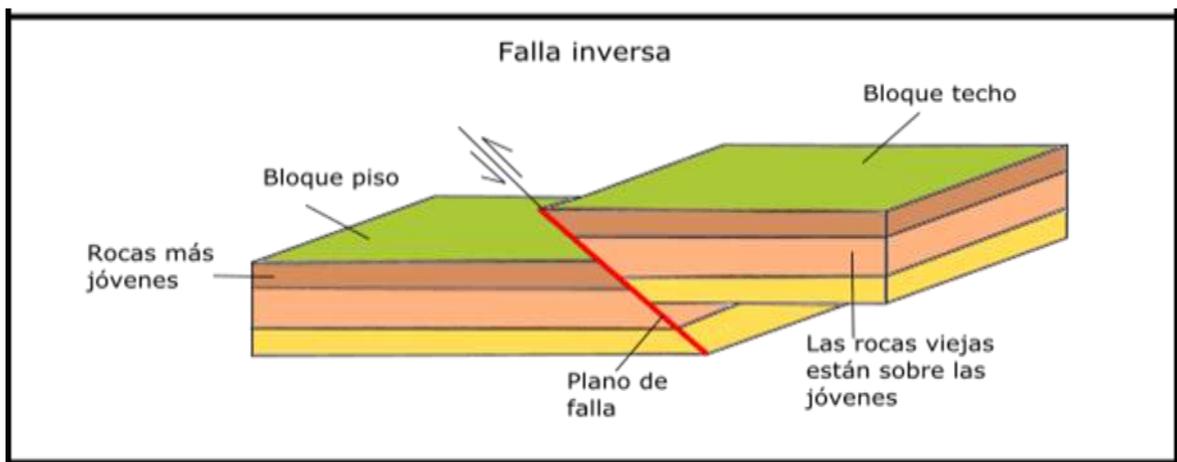


Figura 8. Esquema de Falla Inversa. Fuente: (Tarbuck, 2005).

Fallas transformantes

Son un tipo de falla en la cual el movimiento general es paralelo al rumbo de la superficie de falla y los bloques se desplazan lateralmente uno respecto al otro. Usualmente, las evidencias que se buscan en el campo para encontrar estas fallas son filas de árboles desplazados, cauces de ríos desplazados, cercas desplazadas lateralmente, entre otros. (ICE, 2019) (Ver Figura 9)

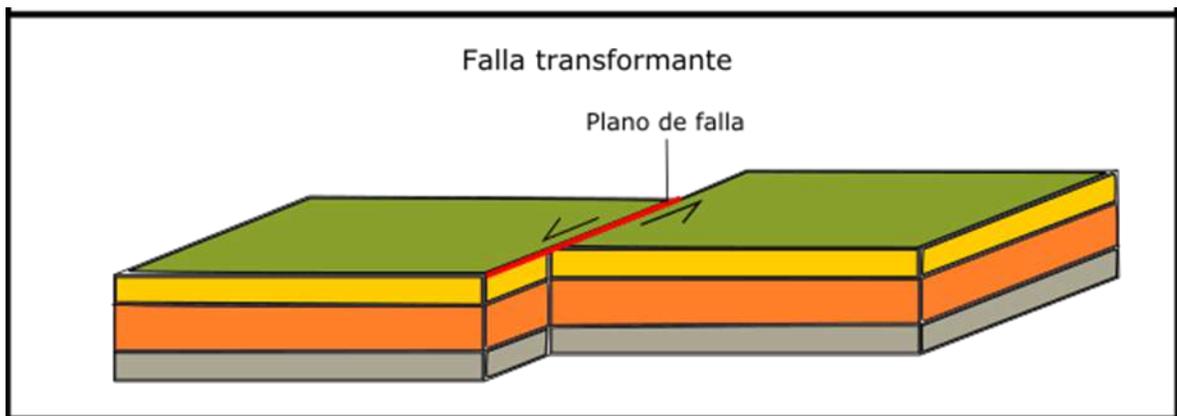


Figura 9. Esquema de Falla Transformante. Fuente: (Tarbuck, 2005).

Indicadores cinemáticos

Los indicadores cinemáticos son evidencias físicas de campo que permiten conocer la cinemática (movimiento) de una falla. En sí, corresponden a una serie de evidencias tangibles que suelen aparecer a lo largo de cualquier superficie donde haya ocurrido algún tipo de desplazamiento tectónico. La aparición de los indicadores cinemáticos es muy independiente al sentido de movimiento de una falla además de que pueden aparecer en ambientes frágiles y dúctiles. (Ayala, 2019)

Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son la propagación de perturbaciones temporales que generan pequeños movimientos en un medio, provocados por la rápida liberación de energía, esta se dispersa en forma de ondas que viajan desde el punto de origen del sismo

llamado foco o hipocentro. La mayoría de los sismos son de origen tectónico y son causados por deslizamientos rápidos de bloques rocosos a lo largo de fallas, estas son poderosas fuentes de energía que a menudo provocan devastaciones en la superficie, parte de la enorme energía que se libera produce violentos desplazamientos del suelo. (Sauter, 1989)

Clasificación de las Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas se clasifican en ondas internas y ondas superficiales. Las ondas internas son aquellas que se propagan desde su origen hasta la superficie de la tierra, que se subdividen en ondas P y ondas S. Por otra parte, las ondas superficiales son las que se propagan sobre la superficie de la tierra, que a su vez se subdividen en ondas Rayleigh y ondas Love. (Otero, 2018) (Ver Figura 10)

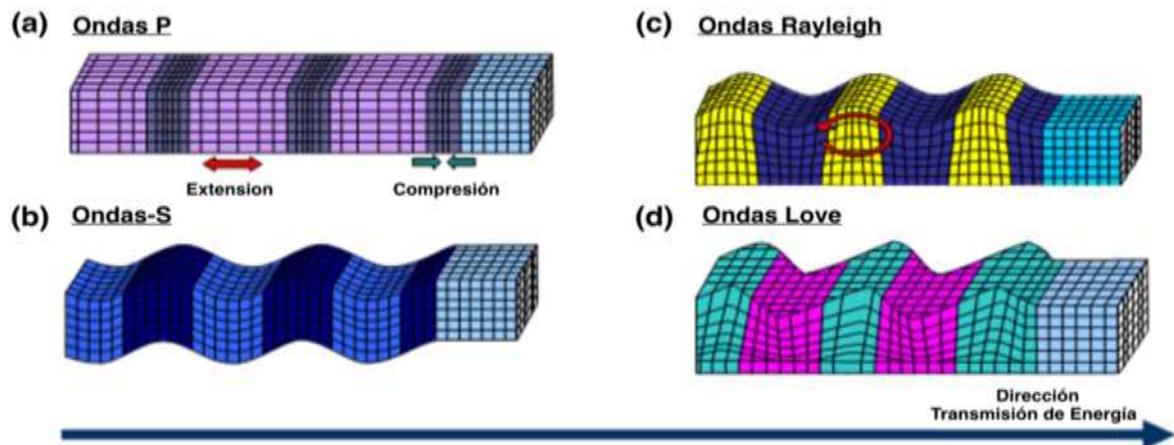


Figura 10. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo: (a) ondas P y (b) ondas S, Ondas superficiales: (c) ondas Rayleigh y (d) ondas Love. Fuente: (Saez, 2016)

Ondas de Cuerpo

Las ondas de cuerpo pueden viajar a través de las capas internas de la tierra, viajan grandes distancias por medio de las rocas y su amplitud se atenúa poco a poco conforme aumenta la distancia respecto al foco, siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición de la tierra. Dentro de las ondas internas u ondas

de cuerpo se distinguen dos clases, atendiendo al modo de desplazarse: ondas P y ondas S. (Beles, 1975) (Ver Figura 11)

Ondas P

Las ondas P (ondas primarias) se denominan así porque son las primeras en llegar a la superficie de la tierra. Su velocidad de propagación es de aproximadamente unos 7,5 kilómetros por segundo, aunque ésta puede cambiar dependiendo de la densidad del medio en el que se transmiten. Las ondas P son ondas longitudinales que se propagan produciendo oscilaciones del material con el que se encuentran en el mismo sentido en el cual se propagan (Otero, 2018) (Ver Figura 11).

Ondas S

Las ondas S (ondas secundarias) deben su nombre al hecho de que llegan a la superficie de la tierra después de las ondas P, en segundo lugar. Las ondas S tienen una velocidad de propagación de alrededor de 4,2 kilómetros por segundo, aunque al igual que las P, estas también varían de acuerdo al material en el que se propagan. Las ondas S son ondas transversales que se propagan produciendo movimientos perpendiculares a la dirección en que se propagan, a través del material en que se transmiten (Otero, 2018) (Ver Figura 11).

Ondas profundas



Figura 11. Ondas de cuerpo que se propagan por el interior del planeta. Las ondas S no se propagan en medios líquidos. Fuente: (Chan, 2015).

Ondas Superficiales

Las ondas superficiales propagan su energía en las capas más externas de la corteza terrestre. Cualquiera que sea su intensidad, las sacudidas pueden ser bruscas u ondulatorias. Las ondas superficiales se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Dentro de las ondas superficiales hay dos tipos de ondas: ondas Rayleigh y ondas Love. (Sauter, 1989) (Ver Figura 12)

Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh, también denominadas ground roll, son ondas superficiales (Barrantes, 2016) que producen un movimiento elíptico retrógrado del suelo. Son ondas más lentas que las ondas internas y su velocidad de propagación es casi un 90% de la velocidad de las ondas S (Sauter, 1989) (Ver Figura 12).

Ondas Love

Las ondas Love producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Se denominan así en honor al matemático Augustus Edward Hough Love del Reino Unido. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh (Otero, 2018) (Ver figura 12).

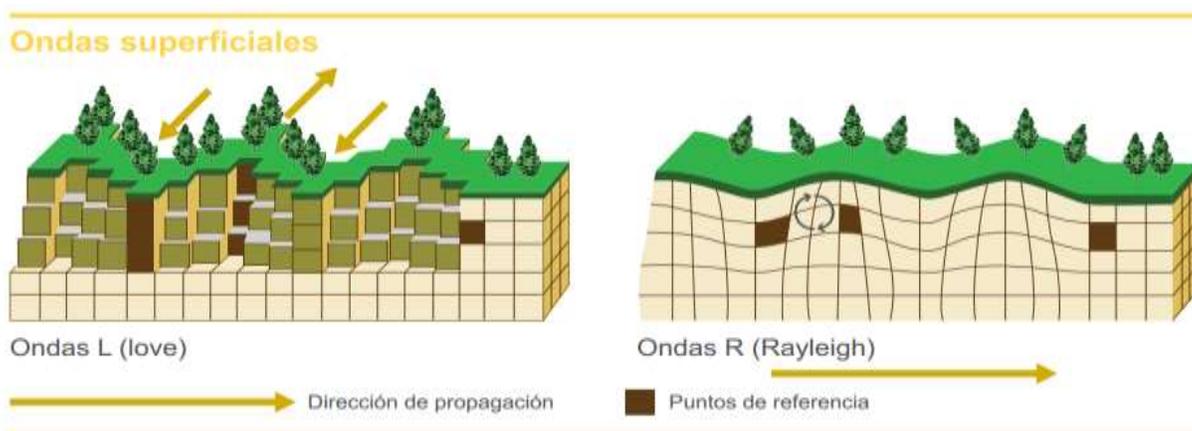


Figura 12. Ondas superficiales generadas por sismos. Pueden dar lugar a desplazamientos de grandes masas de agua a distancias de miles de kilómetros. Fuente: (Chan, 2015).

Magnitud Momento (M_w)

En los últimos años, los sismólogos han estado utilizando una medida más precisa denominada magnitud del momento (M_w), que puede calcularse mediante varias técnicas. En un método, la magnitud del momento se calcula a partir de los estudios de campo mediante una combinación de factores entre los que se cuentan el desplazamiento medio a lo largo de la falla, el área de la superficie de ruptura y la resistencia de cizalla de la roca fallada. (Tarbuck, 2005) La magnitud momento fue definida por (Kanamori, 1977) con las ecuaciones de la siguiente manera:

$$M_o = \mu \cdot D \cdot A$$

Donde μ es el módulo de rigidez, A es el área de la falla y D es el deslizamiento sobre el plano de falla.

Amenaza sísmica

La Amenaza sísmica según la Asociación de Ingeniería Sísmica (1996) está definida como un “fenómeno físico asociado a un sismo, tal como el movimiento fuerte del terreno o falla del mismo, que tiene el potencial de producir una pérdida”.

Para evaluar la amenaza sísmica de una zona hay que conocer previamente la sismicidad de la misma y esta última está definida por parámetros que caracterizan los fenómenos sísmicos. Los parámetros más comunes son los de localización y tamaño de un sismo, tales como: magnitud, momento sísmico, intensidad, aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo.

Los métodos para evaluar la amenaza sísmica se clasifican en: determinista y probabilista. El método probabilista analiza la probabilidad de ocurrencia de terremotos de diferentes magnitudes en cada fuente, mientras que el determinista

fija una magnitud (generalmente la máxima posible) y solo evalúa la influencia de un terremoto de esa magnitud.

Amenaza sísmica por el método determinístico

Los métodos determinísticos fueron los primeros en desarrollarse se toma como referencia la magnitud de sismos conocidos en un determinado lugar, el sismo analizado se trata del peor caso probable, con este se determina la estimación del movimiento del terreno y los efectos secundarios relacionados. Según (Barrantes, 2016). Pueden describirse en los siguientes pasos:

- Determinación del área de atribución del emplazamiento e identificación de las fuentes sísmicas englobadas en ella.
- Estimación de los mayores terremotos ocurridos en el área de influencia.
- Identificación de los sismos característicos y definición del máximo sismo potencial a espera en cada zona o estructura delimitada.
- Determinación de la amenaza, tomando en cuenta el máximo valor de intensidad del parámetro generado por los escenarios y selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio.

“Respecto a la estimación de los distintos parámetros que definen la intensidad del movimiento, estos se estiman mediante ecuaciones de atenuación, las cuales dependen de la distancia de la fuente sismológica” (Camacho, 2020).

“Existen diferentes ecuaciones de atenuación, las cuales utilizan registros históricos para asociar magnitudes con distancias hipocentrales y las aceleraciones registradas” (Camacho, 2020).

La función de atenuación escogida, para realizar el cálculo de la aceleración máxima experimentada, es la utilizada por (Climent et.al, 1994):

$$\ln PGA \left(\frac{m}{s^2} \right) = -1.687 + 0.553M - 0.537 \ln R - 0.00302R + 0.327S$$

Donde M es la magnitud de momento, R es la distancia hipocentral en km, y S es un parámetro indicativo de la geología del sitio de análisis (cero en roca y uno en suelo).

Esta relación ha sido empleada en varios estudios de amenaza sísmica y vulnerabilidad de centros urbanos en Centroamérica, como es el caso del proyecto de amenaza sísmica de América Central.

8. HIPÓTESIS

El estudio de las condiciones geológicas y sísmicas permitirá dar una estimación de un posible terremoto de magnitud máxima en la zona de la falla Mateare a partir del método determinístico de amenaza sísmica.

9. DISEÑO METODOLÓGICO

Tipo de Estudio

Este estudio se basa en el análisis de evaluación de la amenaza sísmica que puede generar la falla Mateare en un área determinada. Esta investigación es de carácter cuantitativa, por lo cual se utilizó la metodología determinista para evaluar la influencia de un terremoto de máxima magnitud, ya que dicha falla no ha tenido actividad sísmica desde hace muchos años.

Área de Estudio

Este estudio cuenta con un área de 342 km² orientado al oeste del graben de Managua, se encuentra ubicada en las hojas topográficas de Mateare, Managua y San Rafael del Sur.

Universo y Muestra

El universo corresponde al departamento de Managua en los municipios de Mateare, Ciudad Sandino y Crucero. La muestra está conformada por depósitos litológicos, estructurales, geometría de la falla y un análisis sísmico mediante el método determinístico.

Definición y Operacionalización de variables (MOVI)

Tabla 2: Definición y Operacionalización de variables.

Objetivos Específicos	Variable Conceptual	Subvariables o Dimensiones	Variable Operativa o Indicador	Técnicas de Recolección de Datos e Información
Especificar las unidades estratigráficas del escarpe de la falla Mateare mediante un levantamiento geológico para obtener la columna estratigráfica.	Unidades estratigráficas del escarpe de la falla Mateare	Características de los tipos de suelos presentes en el escarpe de la falla Mateare	Descripción de los tipos de suelos mediante un levantamiento geológico para la obtención de una columna geológica	Observación: Medición y descripción visual en campo
Determinar la geometría de la Falla Mateare a partir de foto interpretación, imágenes satelitales, mapas de sombras y datos obtenidos en campo.	Geometría de la falla Mateare	Obtención de datos de la falla Mateare	Determinar la geometría que presenta la falla Mateare	Análisis descriptivo mediante foto interpretación, imágenes satelitales, mapas de sombras y datos obtenidos en campo.

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN
DE MANAGUA, NICARAGUA.**



Objetivos Específicos	Variable Conceptual	Subvariables o Dimensiones	Variable Operativa o Indicador	Técnicas de Recolección de Datos e Información
Estimar la magnitud máxima de un posible sismo que pueda desencadenar la falla Mateare en base a su geometría y su modo de desplazamiento.	Estimación de la magnitud máxima	Obtener la magnitud máxima de un posible sismo de la falla Mateare	Factores que puede desencadenar un posible sismo de magnitud máxima en la falla Mateare mediante su geometría y modo de desplazamiento	Cálculos sísmicos mediante la fórmula de magnitud máxima
Evaluar la amenaza sísmica de la falla Mateare mediante el método determinístico para la ciudad de Managua y municipio de Mateare.	Amenaza sísmica	Evaluar la amenaza sísmica de la falla Mateare	Evaluación de un posible terremoto mediante la metodología determinista	Uso de software CRISIS 2007

Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

Durante esta fase se realizó la recopilación de toda la información posible en el área de estudio relacionado al tema de investigación mediante tesis, artículos científicos, entrevistas, informes, libros, entre otros.

Las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos consistieron en fichas de descripción de campo (Ver Anexo 1) mediante observación y descripción visual en el área de interés, así mismo se realizó análisis estructural para determinar la geometría de la falla, de igual manera se obtuvo la magnitud máxima posible por medio de cálculos sísmicos y se evaluó la amenaza sísmica mediante el software CRISIS 2007.

Para la obtención de datos de campo se utilizaron las siguientes herramientas:

- GPS
- Brújula
- Piqueta
- Lupa
- Bolsa
- Mazo
- Cinta
- Libreta de campo

Procedimientos para la recolección de Datos e Información

En la zona de estudio de la falla Mateare se realizó muestreo en 30 puntos (Ver Tabla 3), los cuales fueron dividido en: municipio de Mateare, comarca San Andrés de la Palanca, comarca Filos de Cuajachillo, comarca Chiquilistagua, comarca Santa Ana y municipio El Crucero (Ver Figura13).

Tabla 3. Coordenadas Puntos de Muestreo, Unidades UTM Datum WGS84. Zona 16.

PUNTOS	X	Y	LUGAR	m.s.n.m.	ERROR (M)
1	560404	1353660	Mateare	53	3
2	560620	1351537	Mateare	199	3
3	563340	1346422	San Andrés	171	3
4	568186	1335562	Chiquilistagua	445	3
5	573437	1327762	Santa Ana	789	3
6	574950	1322993	Crucero	852	3
7	559954	1354285	Mateare	64	3
8	573415	1328122	Santa Ana	776	3
9	570346	1336828	Chiquilistagua	442	3
10	559957	1356283	Mateare	56	3
11	560502	1353646	Mateare	58	3
12	561066	1351911	Chiquilistagua	454	3
13	506802	1351748	Mateare	137	3
14	560788	1351755	Mateare	150	3
15	560713	1351747	Mateare	142	3
16	564121	1346555	San Andrés	174	3
17	564027	1346538	San Andrés	191	3
18	563295	1346442	San Andrés	295	3
19	559954	1354285	Mateare	52	3
20	563555	1346435	San Andrés	198	3
21	559458	1354776	Mateare	49	3
22	570383	1336869	Chiquilistagua	463	3
23	566756	1337044	Chiquilistagua	466	3
24	563328	1345555	San Andrés	374	3
25	563198	1345284	San Andrés	383	3
26	563295	1346442	San Andrés	289	3
27	562969	1345779	San Andrés	346	3
28	574888	1323249	Crucero	878	3
29	574902	1323110	Crucero	868	3
30	574908	1322776	Crucero	835	3

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.

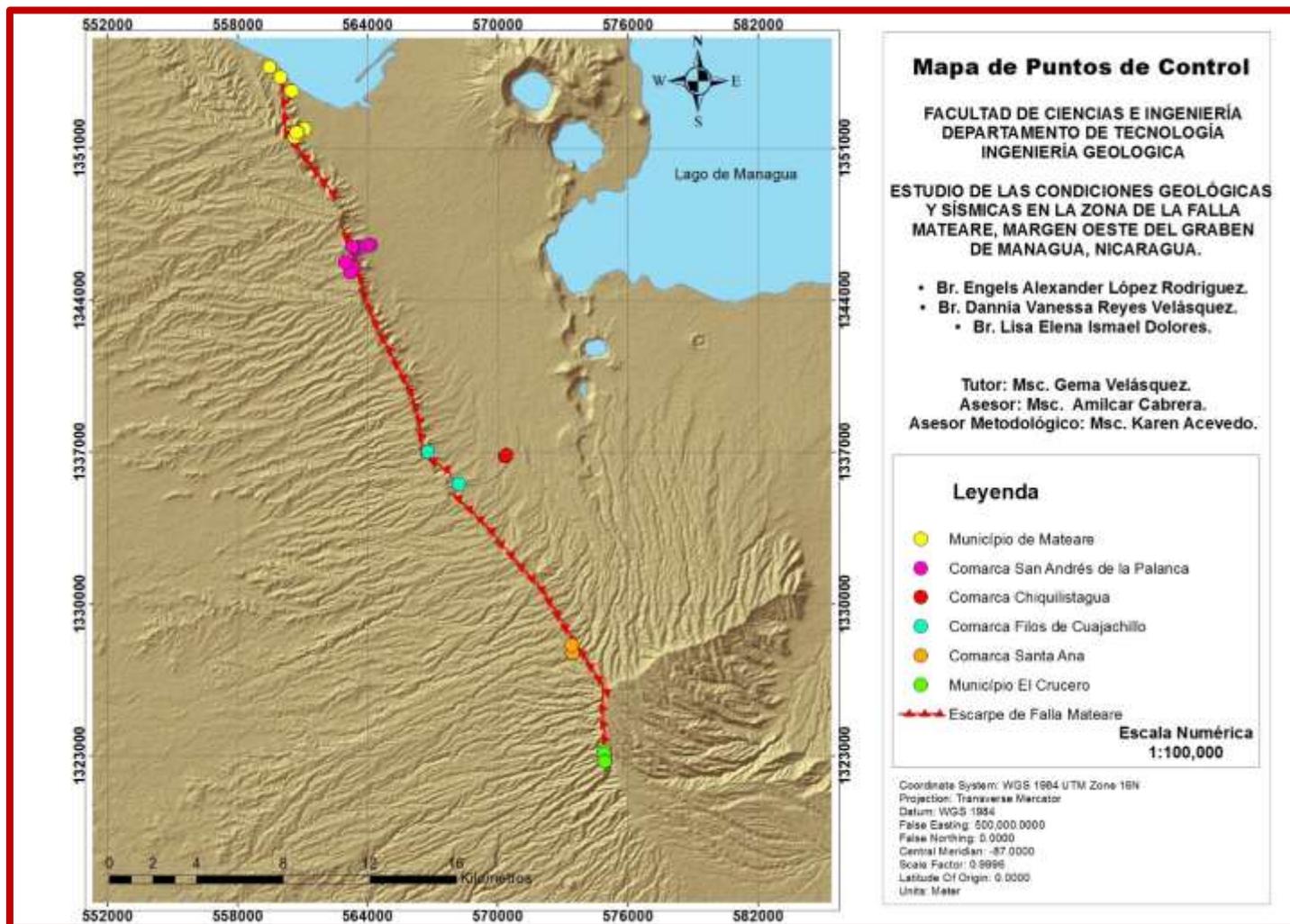


Figura 13. Mapa de Puntos de Control. Fuente: (Modelo de elevación 30 metros, proporcionado por INETER).

En la etapa de campo se efectuaron análisis geológicos, en cada punto de control se realizó un levantamiento de los datos el cual consistió en describir la litología que presenta cada área, así mismo, se identificaron indicadores cinemáticos. Los aspectos litológicos fueron definidos mediante una descripción macroscópica, de acuerdo al tipo de roca respecto a su origen, color, tipo de gradación del depósito y granulometría.

En cada punto se realizaron perfiles independientes en papel milimetrado, con las coordenadas y lugar de cada uno de ellos, se hizo un levantamiento estratigráfico para posteriormente correlacionar cada uno de ellos y obtener una columna general de todos los afloramientos.

Además, se evaluó la amenaza sísmica mediante el método determinístico de un posible sismo de magnitud máxima.

Plan de análisis y procesamiento

Obtenido las muestras de campo se procedió con el análisis geológico para determinar los depósitos estratigráficos y la obtención de la columna como reconocimiento del área.

En el trabajo de campo se tomaron la mayor cantidad de mediciones como: rumbos, buzamientos y longitud de las fracturas en los afloramientos mejores expuestos. Con los datos recolectados se procesaron rosetas de fracturas, la cual ayudó a determinar la dirección de los esfuerzos que afectan al área de estudio.

En el análisis geoestructural para esta investigación se realizó en base a foto interpretación, imágenes satelitales, mapas de sombras y datos obtenidos en campo.

En base al catálogo sísmico de INETER, se obtuvo como resultado una magnitud de 4.7Mw, el cual no proporciona mayor información ya que es de una magnitud relativamente pequeña, no se considera representativo para una falla tan grande como la de Mateare, por el cual mediante la geometría que presenta la falla se procedió a realizar cálculo de ecuación de escalamiento para obtener una magnitud más acertada para este tipo de falla.

En el cálculo de ecuaciones de escalamiento se realizó en base “New Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement” (Coppersmith, 1994), donde presentan relaciones empíricas entre la magnitud, longitud de la ruptura y superficie de ruptura de una falla. La magnitud del terremoto puede estar correlacionada con parámetros de ruptura como longitud y desplazamiento.

Para la estimación de la magnitud esperada se tomó la ecuación correspondiente a una falla normal, usando como parámetro principal la longitud (L) de esta. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$M = a + b * \text{Log}(SRL) \quad (1)$$

Donde M corresponde a la Mw, a y b son los coeficientes de correlación a (sa) y b (sb) correspondientes a ellos y SRL es Surface Rupere Lengeth (Largo de la superficie de ruptura).

El método determinístico proporciona directamente la evaluación del movimiento sísmico para las condiciones más severas y generalmente se aplica para el diseño de estructuras cuyas fallas podrían tener consecuencias catastróficas. Sin embargo, éste no provee información sobre la probabilidad de ocurrencia del terremoto dominante, ni de la probabilidad de que éste ocurra en la ubicación asumida. Cabe resaltar que el análisis de peligro sísmico determinístico involucra decisiones subjetivas, para determinar el potencial sísmico que puede requerir la opinión y experiencia de sismólogos, geólogos e ingenieros.

El escenario para este método, se define como un sismo de magnitud conocida, el cual sucede en un sitio determinado, tomando en cuenta los siguientes parámetros: Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, selección de la distancia de la fuente al sitio, se toma la menor distancia existente entre la fuente y el lugar de análisis, se debe escoger el terremoto que se espera que produzca los mayores niveles de movimiento a partir de comparación de la intensidad generados por sismos históricos de la región.

Se requirió el uso de funciones de atenuación para obtener la capacidad del terreno generado por las ondas sísmicas. La cual consiste en una ecuación semi-empírica que relaciona magnitud, distancia e intensidad sísmica, es decir, la

relación entre velocidad, aceleración y desplazamiento. Estas leyes se han venido aplicando desde años atrás partiendo del comportamiento de los sismos en donde se aprecia una disminución de amplitudes a mayores distancias de los esperados, es decir, entre mayor es la distancia hipocentral (sismos profundos) menos son sus amplitudes en la superficie.

Fórmula de Atenuación, Climent et al. (1994)

En 1994 Climent et al. realizaron una regresión bayesiana sobre una base de 218 registros acelerográficos provenientes de estaciones en Centroamérica, 155 de Costa Rica y el resto de Nicaragua y El Salvador. Adicionalmente, se emplearon 62 registros de magnitud elevada provenientes de la red acelerográfica de Guerrero, en México, con los que se obtuvo la siguiente relación:

$$\ln PGA \left(\frac{m}{s^2} \right) = -1.687 + 0.553M - 0.537 \ln R - 0.00302R + 0.327S \quad (2)$$

Donde M es la magnitud de momento, R es la distancia hipocentral en km, y S es un parámetro indicativo de la geología del sitio de análisis (cero en roca y uno en suelo).

Esta relación ha sido empleada en varios estudios de amenaza sísmica y vulnerabilidad de centros urbanos en Centroamérica, como es el caso del proyecto de amenaza sísmica de América Central.

El programa CRISIS 2007 emplea un método probabilístico y determinístico para calcular la amenaza sísmica. Los principales datos requeridos por CRISIS 2007 son: geometría de fuentes sísmicas y relaciones de atenuación de las intensidades sísmicas. El CRISIS estima el tamaño de futuros movimientos sísmicos. Para ello, calcula tasas de excedencia de intensidades sísmicas. La tasa de excedencia es

el número de veces que en determinado sitio representan intensidades mayores o iguales a una dada.

Para el procesamiento de los datos, se utilizó el software Arcgiss10.5 para la elaboración de mapas: de ubicación, puntos de control, sísmicos, edición de las fotografías tomadas en campo, para la elaboración de la correlación y columna estratigráfica a Esc 1:100. La obtención del diagrama de rosetas de fracturas se realizó mediante el software STERONET, se usaron las herramientas de Microsoft 2016, como Word, Excel y Power Point para la redacción y presentación de la investigación.

10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta fase consistió en el análisis y discusión de los resultados de campo, la información recopilada se examinó en gabinete definiendo el programa general del trabajo para el desempeño de los objetivos propuesto.

Análisis estratigráficos de la zona

Las rocas que afloran en el área de estudio son de origen volcánico que probablemente se asocian a los centros volcánicos: Masaya y Apoyeque, con edades comprendidas del pleistoceno hasta el holoceno, esta falla está presente en la provincia geológica de la depresión de Nicaragua.

Los datos geológicos fueron tomados en los afloramientos que se representan en el margen oeste del graben de Managua, específicamente en la zona de falla Mateare, donde se realizó un reconocimiento del área.

Se procedió a visitar los puntos ya establecidos para la toma de datos (Ver Anexo 1), permitiendo así de forma directa la obtención de estos. Los depósitos se asocian al grupo La Sierra y formaciones recientes que aún se desconoce su fuente de origen.

A continuación, se describe cada depósito encontrados en la fase de campo desde la capa basal hasta la superior.

Depósito de Toba (Pt)

Espesos bancos de Toba de hasta 1 a 3 metros, meteorizada a color amarillenta, con alternancias pequeñas capas de arena escoracea laminadas y muy plegadas estas pequeñas capas varían en su espesor de 40 a 60 centímetros (Hodgson, 2000).

Afloramiento localizado en el municipio El Crucero, donde se logró observar un depósito de toba consolidada color amarillo claro a marrón, probablemente asociado al grupo La Sierra, la cual se encuentra erosionada y meteorizada con líticos de composición basáltica y andesítica, con espesor de aproximadamente 1.20 metros, a este depósito subyace al depósito de oleada piroclástica (Po) (Ver Foto 1).



Foto 1. A) Depósito de toba en el municipio El Crucero. B) Detalle de la meteorización que presenta el depósito de toba. En las coordenadas Norte: 0574902 Este: 1323110.

Depósito de Oleada Piroclástica (Po)

Este depósito se localiza en el municipio El Crucero, de origen volcánico de tipo oleada piroclástica se encuentra estratificada, se observó intercalaciones de ceniza y escoria esta se encuentra suelta debido al intemperismo, con un espesor aproximado de 1 metro y tonalidades de gris claro a oscuro, suprayace al depósito de toba (Pt) (Ver Foto 2).

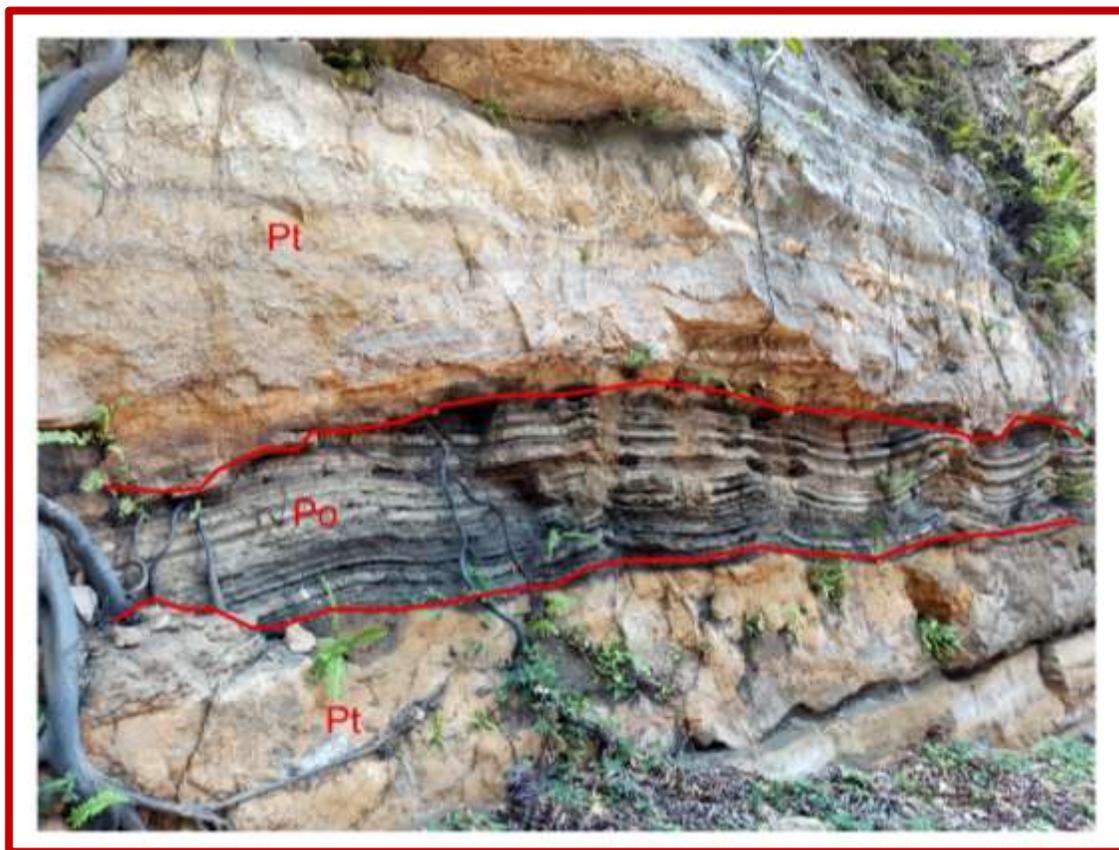


Foto 2. Depósito de oleada piroclástica localizada en el municipio El Crucero. En las coordenadas: N: 0574908- E: 1322776.

Depósito de Caída de Ceniza (Pc)

Afloramiento localizado en el municipio El Crucero, este depósito de ceniza masiva (Toba) presenta alteración en los materiales ya que están expuesto al aire y a la humedad con tonalidades grises oscuro a claro, se encuentra bien consolidada con granulometría de fina a muy fina, con un espesor de 2.10 metros, pero puede alcanzar hasta los 3 metros, subyace al depósito de toba (Pt) (Ver Foto 3).

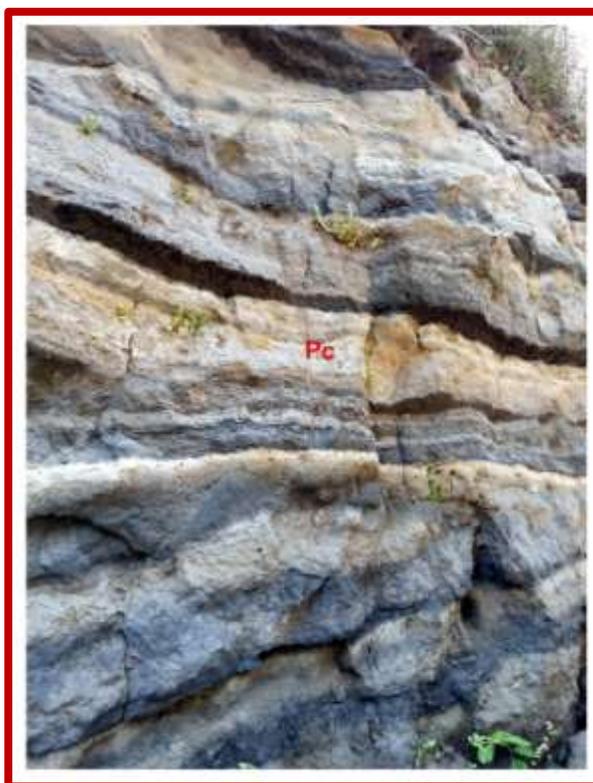


Foto 3. Depósito de caída de ceniza presente en el municipio El Crucero. En las coordenadas Norte: 0574950 Este: 1322993.

Suelo Fósil (Psf)

Se encuentra localizada en la comarca Santa Ana con un espesor de aproximadamente de 4.30 metros, se trata de un suelo fósil arenoso, arcilloso de color café oscuro que en ocasiones cambia a marrón, el depósito esta

intercalado por unas capas pequeñas de ceniza consolidadas de 5 hasta 75 centímetros, el suelo es muy compactado y contienen fragmentos de pómez de tamaño lapilli y contiene líticos de composición basáltico y andesítico. El depósito alcanza una potencia de 5 metros incluyendo las capas de ceniza, en ocasiones llega hasta los 6 metros (Ver Foto 4).

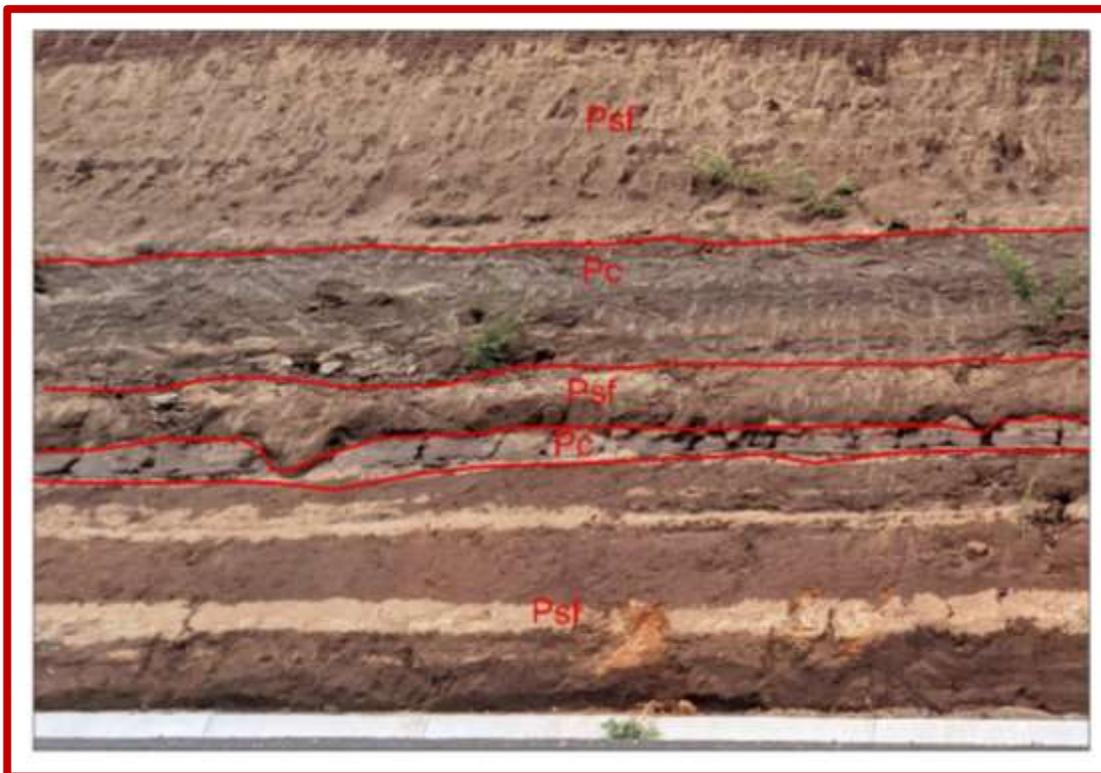


Foto 4. Contacto entre suelo fósil y depósito de ceniza en la comarca Santa Ana. En las coordenadas Norte: 0561066 Este: 1351911.

Depósito de caída de Ceniza y Escoria (Hce)

Este depósito se localiza en los alrededores del municipio de Mateare, está compuesto por varias secuencias estratificadas e intercaladas por capas de ceniza y escoria, están erosionadas, presenta tonalidades de gris oscuro a gris claro, sus granos son de tamaño lapilli a ceniza, las capas de ceniza contienen fragmentos de pómez y líticos de composición andesítica sub redondeado donde no supera los 5

milímetros de diámetro. Este depósito alcanza un espesor de aproximadamente 2.50 metros, aunque en cierto punto puede llegar hasta los 3 metros (Ver Foto 5).

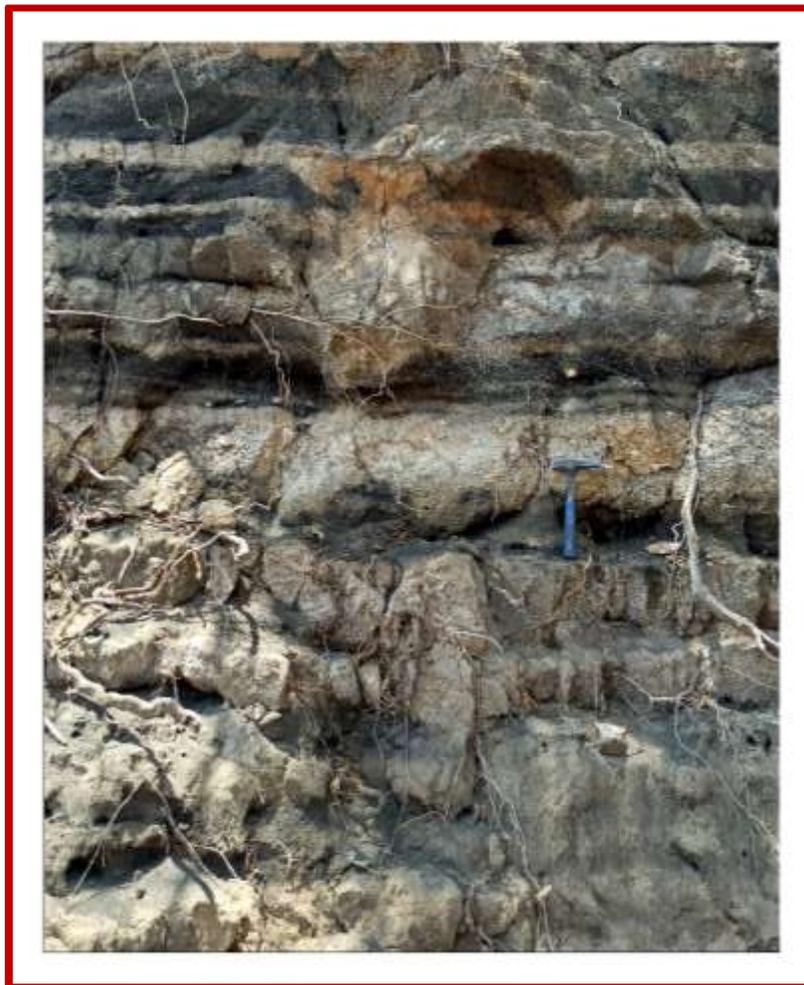


Foto 5. Depósito de caída de ceniza y escoria, presente en los alrededores del municipio de Mateare. En las coordenadas Norte: 0560713 Este: 1351747.

Depósito de caída de Pómez asociado a Apoyeque (Haq)

El depósito consiste en caída de pómez de composición dacítica, tamaño lapilli uniformemente graduada, es de color blanco ocasionalmente marrón, la cual se encuentra en los alrededores de Mateare la fuente de este depósito se atribuye al volcán Apoyeque que se encuentra en la península de Chiltepe (Bice, 1985) (Havlicek, 1997) (Kutterolf, 2007).

Se encontró aflorando en la comarca de los Filos de Cuajachillo, comarca Chiquilistagua, en los alrededores de municipio de Mateare y comarca de San Andrés de la Palanca, la fotografía de referencia es en la comarca de Chiquilistagua se encontró con 1.60 metros de espesor, aunque en la comarca de San Andrés de la Palanca llega al cansar hasta los 4 metros, presenta gradación inversa respetivamente. Esta pómez de caída es de color blanca y en ocasiones cambia a marrón muy vesicular, presenta líticos y con clastos sub-angulosos y sub-redondeados tamaño lapilli fino a grueso. Los clastos más grandes del depósito se encuentran en la parte superior de unos 5 centímetros (Ver Foto 6).

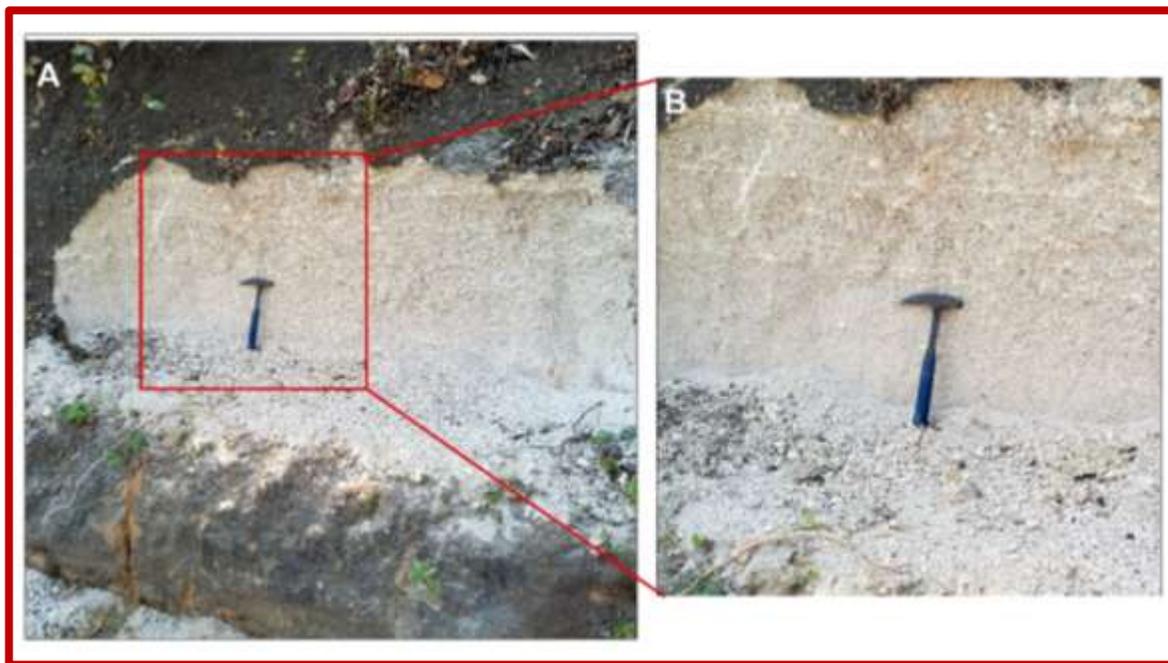


Foto 6. A) Depósito de caída de pómez asociado a Apoyeque presente en los alrededores de Chiquilistagua. B) Detalle de la gradación inversa que presenta la pómez de Apoyeque. En las coordenadas Norte: 0570346 Este: 1336828.

Depósito de caída de ceniza (Hc)

Este depósito se localiza en los alrededores del municipio de Mateare, presenta tonalidades amarillento a marrón bien consolidada y de grano muy fino, tiene un

espesor aproximadamente 0.30 metros, subyace a la unidad de caída Piroclástico y suprayace al depósito de caída de pómez asociado a Apoyeque (Ver Foto 7).

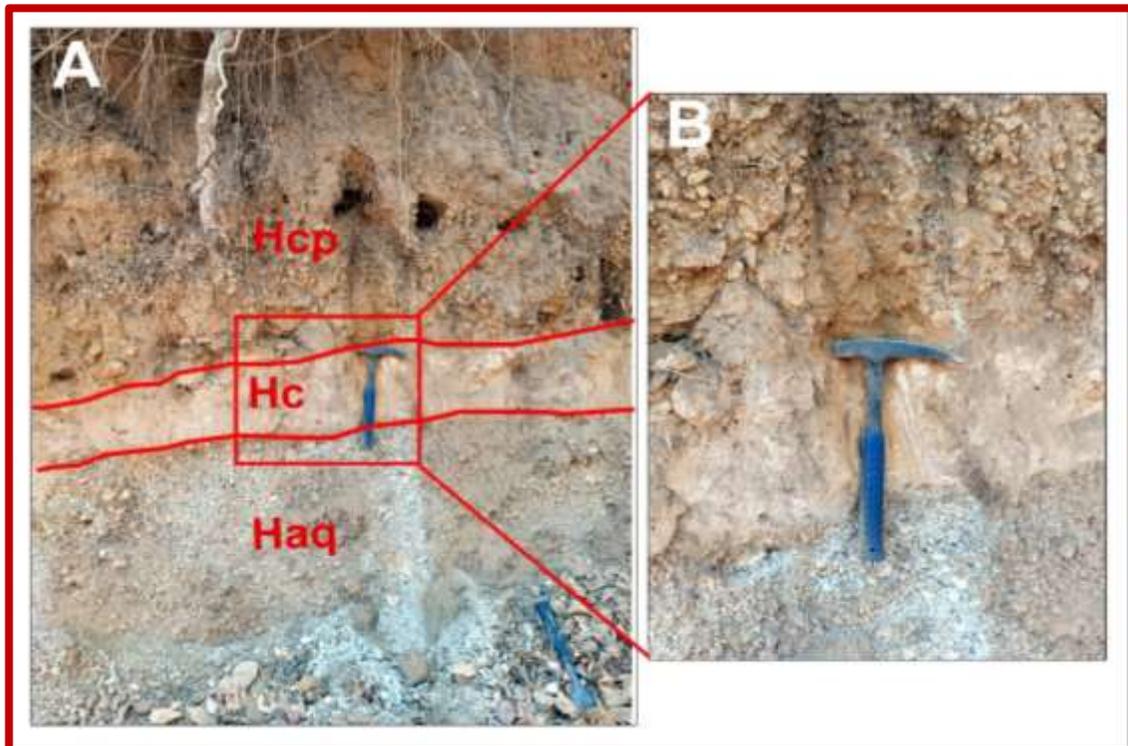


Foto 7. A) Contacto entre el depósito de caída de ceniza que suprayace al Haq y subyace a Hcp presente en los alrededores del municipio de Mateare. B) Detalle del depósito de ceniza. En las coordenadas Norte: 0561066 Este: 1351911.

Depósito de caída piroclástico (Hcp)

Este depósito se localiza en los alrededores del municipio de Mateare, Presenta un espesor de 0.80 metros, con fragmentos anguloso y subredondeados de pómez de hasta 5 centímetros de diámetro y líticos de composición andesítica de tamaño lapilli, se encuentra bastante suelto y erosionado con tonalidades amarillenta a marrón en la parte superior, suprayace al depósito de caída de ceniza (ver Foto 8).

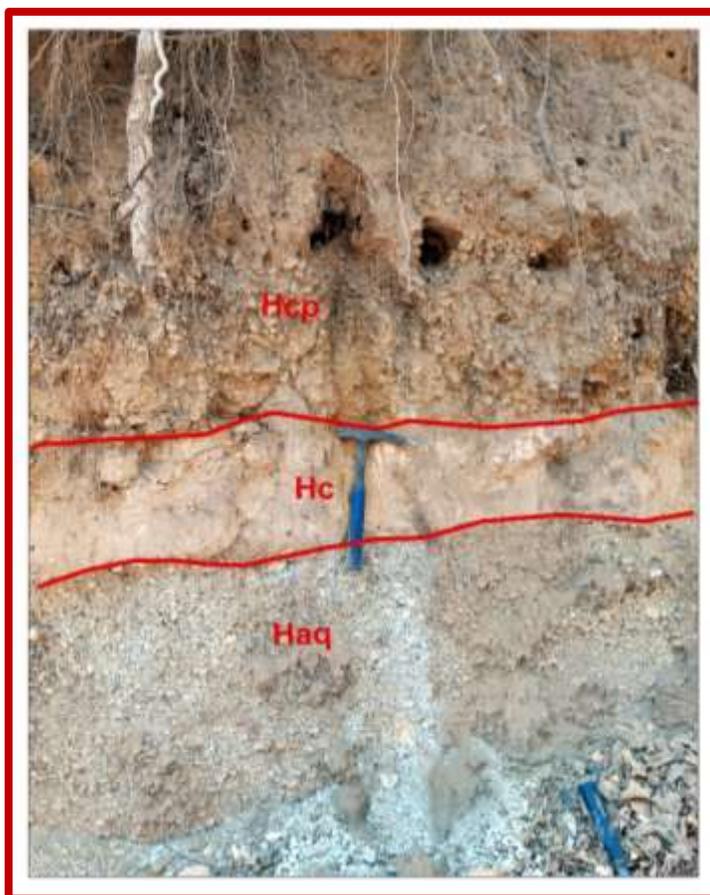


Foto 8. Depósito de caída piroclástica presente en los alrededores del municipio de Mateare que suprayace al depósito Hc y Haq. En las coordenadas Norte: 0561066 Este: 1351911.

Depósito de Toba (Ht)

Afloramiento localizado en los alrededores del municipio de Mateare, toba masiva con tonalidades de color café oscuro a claro que presenta intemperismo y erosión el cual está afectado por sistemas radiculares que fracturan a este depósito de toba, tiene un espesor aproximadamente de unos 1.80 metros, presenta líticos de composición basáltica y andesita de aproximadamente 2 milímetros, suprayace al depósito de caída piroclástica (Hfp) (Ver Foto 9).



Foto 9. Depósito de toba presente en los alrededores de Mateare. En las coordenadas Norte: 0560788 Este: 1351755.

Depósito caída Pómez (Hp)

Se trata de un depósito de caída de pómez de composición dacítico el cual fue producido por erupciones plinianas del volcán Apoyeque. Este depósito es separado por pequeñas capas de ceniza y tiene inclusiones de líticos de composición basáltico. (Kutterolf, 2007)

Afloramiento localizado en el corte de carretera del municipio de Mateare, esta pómez de caída se encuentra intercalada por una capa de ceniza con un espesor de 72 centímetros, presenta una gradación inversa, con tonalidades blanco a marrón, sus clastos varían de 4 centímetros a 6 centímetros y hay presencia de líticos en todo el depósito, alcanzando un espesor de 2 metros (Ver Foto 10).

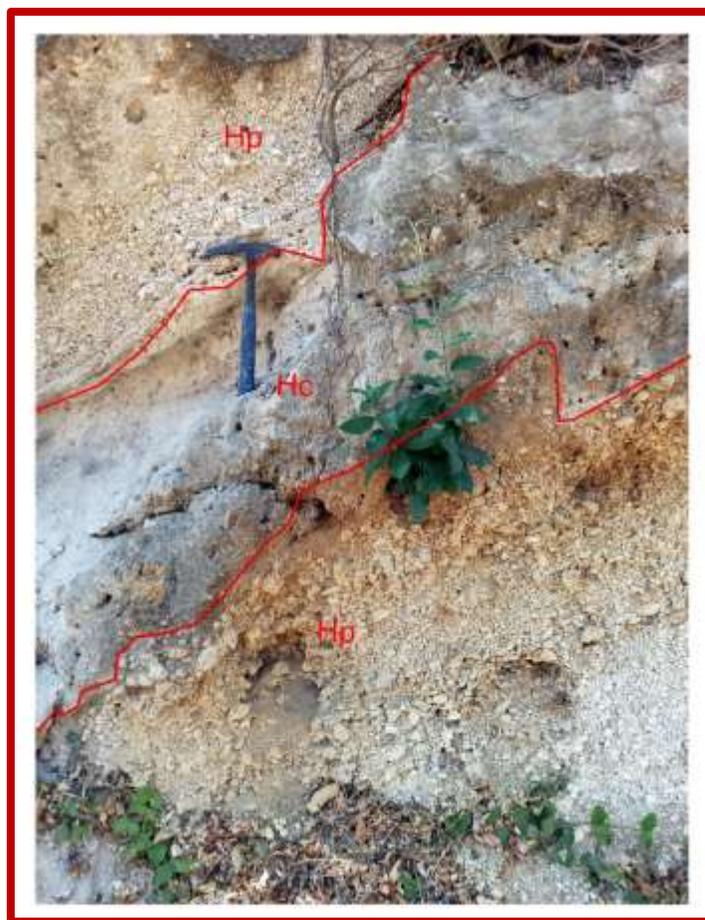


Foto 10. Depósito de caída de pómez intercalado con una capa de ceniza ubicado en el municipio de Mateare. En las coordenadas Norte: 0560502 Este: 1353646.

Depósito de caída de Escoria (He)

Este depósito se localiza en el corte de carretera del municipio de Mateare, presenta tonalidades de gris oscuro a claro, tiene un espesor de aproximadamente 0.50 metros, con clastos tamaño lapilli (Ver Foto 11).

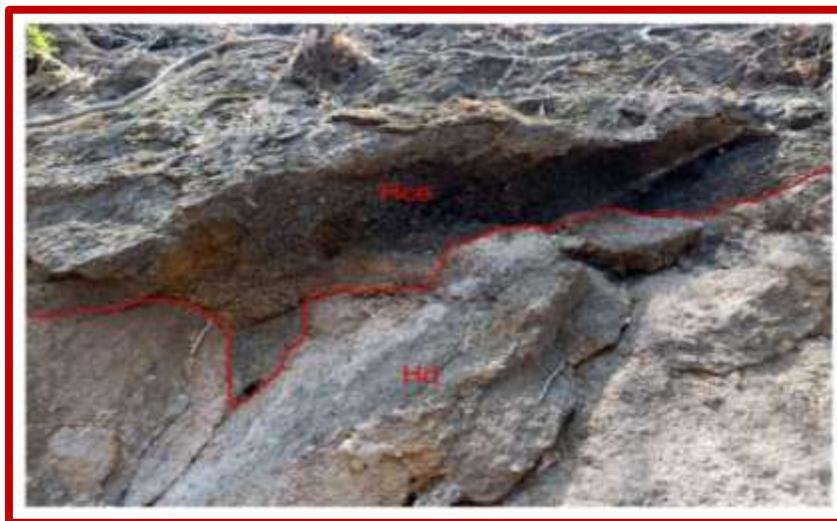


Foto 11. Depósito de caída de escoria ubicado en los alrededores del municipio de Mateare.
En las coordenadas Norte: 0559957 Este: 1356283.

Suelo moderno (Hsm)

Es un suelo moderno de color café oscuro, arenoso, gravoso contiene abundante materia orgánica, su espesor varia de 0.40 a 0.50 metros a más (Ver Foto 13).



Foto 12. Suelo moderno. En las coordenadas N: 0574888-E: 132324

Columna estratigráfica de la falla Mateare

Uno de los principales objetivos de esta investigación fue representar esquemáticamente la estratigrafía encontrada mediante levantamiento de campo para posteriormente resumir esta información del comportamiento secuencial de los materiales geológicos.

Para caracterizar la estratigrafía, se seleccionaron afloramientos en los cuales se observó el mayor número de secuencias litológicas, determinando así 5 estaciones claves para la toma de datos, en donde se dibujaron perfiles independientes, con las coordenadas de cada estación del lugar donde se hizo el levantamiento.

Mediante la unificación de los diferentes levantamientos estratigráficos se realizó una correlación en el cual el material más representativo en los sitios visitado fue el depósito de pómez (Ver Figura 14), que probablemente esté relacionado al volcán Apoyeque; posterior a eso, se procedió a la unificación de los diferentes levantamientos estratigráficos, el cual se obtuvo una columna general de la falla Mateare (Ver Figura 15)

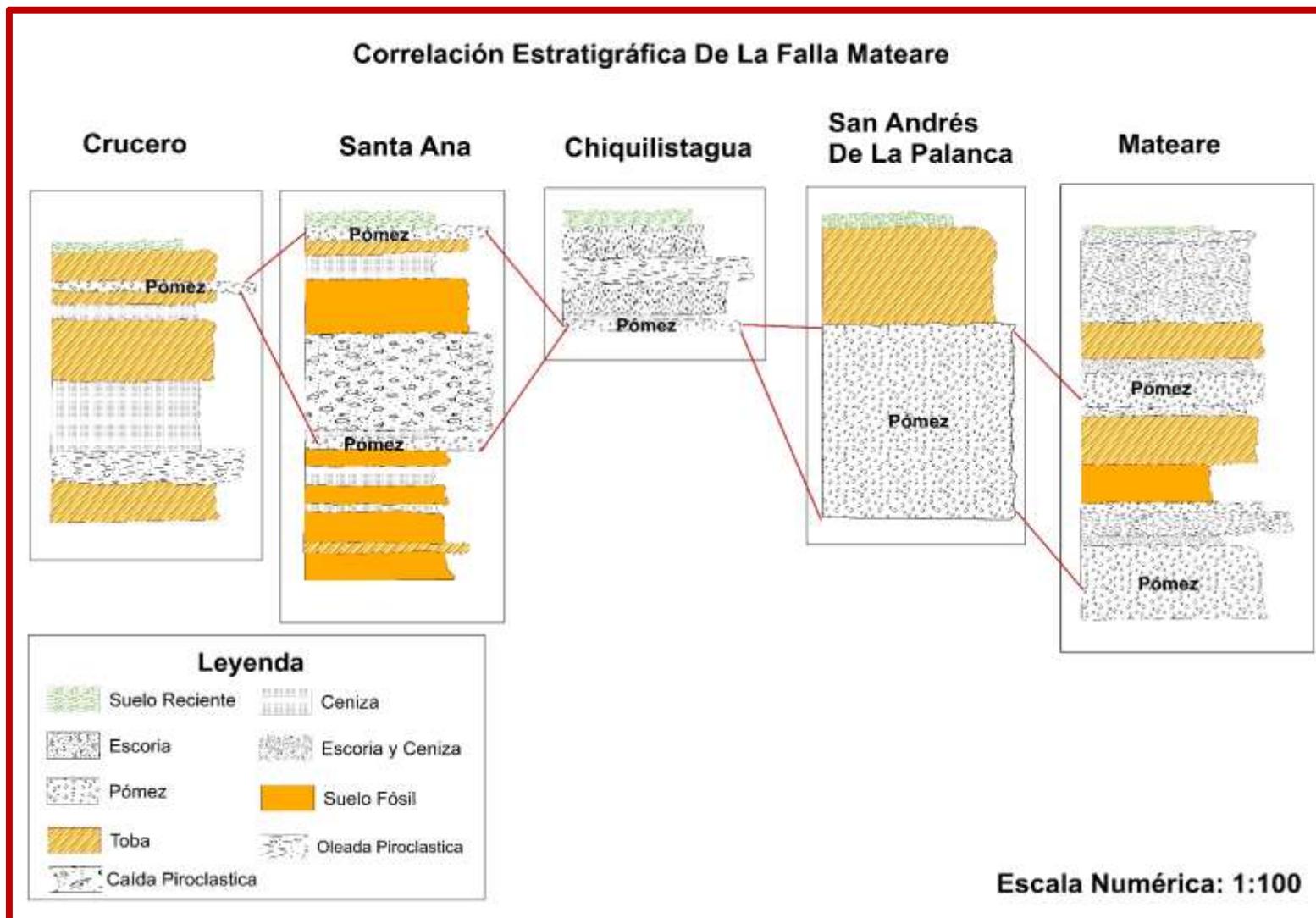


Figura 14. Correlación Estratigráfica de la Falla Mateare. Fuente: Propia.

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.

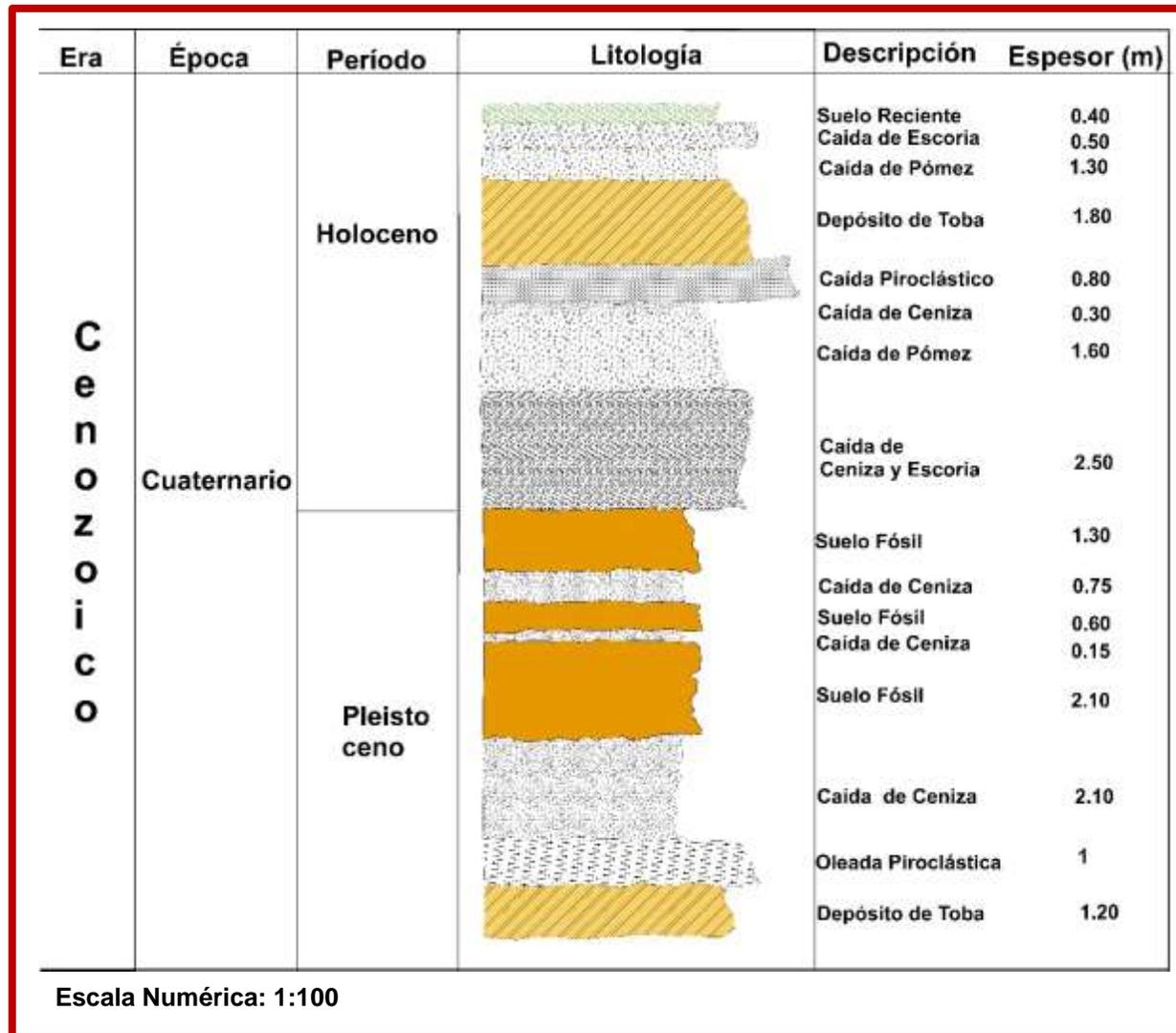


Figura 15. Columna Estratigráfica de la Falla Mateare. Fuente: Propia.

Análisis Estructural de la zona

Estructuralmente el área de estudio ha sido motivo de controversia conforme a su origen, ya que algunos autores identifican que se dio por diferentes eventos volcánico-tectónico que producían materiales explosivos donde surgieron calderas como Masaya y Estrella. Posteriormente al primer evento surgió una nueva actividad volcánica, donde hubo un hundimiento de la caldera la Estrella, en este mismo periodo surgió el Lineamiento Mira Flores- Nejapa, en el cual aparecen los primeros volcanes como Santa Ana, provocando la deformación a lo largo de la falla Mateare, donde estos procesos fueron afectados por el intemperismo (tomado de INETER 1997).

La tectónica local se localiza en la zona de revalo de la cadena volcánica nicaragüense, entre el lineamiento volcánico Madera hasta el volcán Masaya en el SE y lineamiento del volcán Mombacho hasta el Cosiguina al NW. Esta zona de relevo se ha considerado como pull-apart (Frischbutter A. , 2000) y como una fosa tectónica (McBirney, 1965). Muestra una sismicidad activa con fallas semi regionales como son la falla Cofradía que limita al este y la falla Mateare al oeste del Graben de Managua, además en la parte central de Graben se han identificado una serie de fallas que han provocado la principal actividad sísmica las cuales son: falla Las Nubes, Tiscapa, Estadio y Nejapa.

Algunos autores han dado una longitud para la falla Mateare en los que destacan (Cowan, 2000), (McBirney, 1965), (Espinoza, 2007), que va de los 30 a 72 km respectivamente, ninguno de ellos da una información exacta que indiquen su extensión.

Geometría de la falla Mateare

Tomando como referencia los análisis de mapas bases, fotografías aéreas y análisis de campo, se comprueba que lo antes mencionado en el estudio realizado por (Espinoza, 2007), que la falla Mateare se segmenta en tres bloques y se extiende al NW del municipio de Mateare desapareciendo en el lago de Managua, al oeste del graben de Managua. Esta falla se orienta hacia el SE-NW, con buzamiento al NE y una longitud aproximada de 38 kilómetros dentro del área de estudio, geoméricamente se observa un fallamiento de tipo transtensional con movimiento normal y componente lateral derecho. Esta estructura geológica se comporta de forma segmentada formando dos zonas de relevo, la cual en la parte superior del escarpe de la falla Mateare varía de 100 a 880 m.s.n.m.

Esta zona ha sido desplazada producto de sistemas de deformación posteriores a la formación principal, que dio origen a fracturamiento secundarios que a su vez son parte de indicadores cinemático que determina el movimiento principal de la falla.

En el área de estudio se identificaron pocos indicadores cinemáticos por la alta vegetación y erosión que existe en la zona, donde se observaron afloramientos principales que van del SE al NW como son: municipio El Crucero, comarca San Andrés de la Palanca y municipio de Mateare, dentro de los cuales se hicieron levantamientos de estructuras asociadas a la falla principal (fallas secundarias), que nos ayudó a determinar los eje de deformación y sistemas de esfuerzo de compresión y extensión de la falla principal.

El municipio El Crucero se encuentra ubicado en el extremo SE de la falla Mateare, en el cual se hicieron levantamientos estructurales donde se pudo observar que la zona esta deformada por diastrofismo.

Se localizó un afloramiento volcánico de caída que tiene una dirección rumbo N 14° E y buzamiento S 84°E, geoméricamente presenta un leve diastrofismo o fuerzas verticales y tangenciales provocados por esfuerzos de compresión, afectando por intemperismo con tonalidades marrón a café claro, este depósito probablemente se asocia al grupo La Sierra (Ver Foto 13).



Foto 13. A) Afloramiento de Toba presente en el municipio El Crucero. B) Diastrofismo. En las coordenadas N: 0574888 E: 1323249.

La comarca de San Andrés de la Palanca se ubica en el extremo al NW de la falla Mateare donde se identificó una serie de indicadores cinemáticos dentro de los que prevalecen sistemas anastomosados, sistemas conjugados y fracturas R. (Ver Foto 15)

En este sitio geoméricamente se evidencian sistemas anastomosados, con estructuras delimitadas por un sistema de fracturamiento conjugados, el cual se tomaron datos estructurales a las fracturas correspondientes: 1) rumbo de N 0° W y buzamiento de S 84° E, 2) rumbo de N 32° E y buzamiento S 26° W, 3) rumbo de N 0° W y buzamiento S 88° E, afectando al depósito de toba esta presenta una tonalidad de gris oscuro a claro esta toba se encuentra muy

meteorizada y suprayace a este depósito un material vegetal el cual puede indicar a sistemas activos (Ver Foto 14).



Foto 14. A) Fracturas localizadas en la comarca de San Andrés de la Palanca. B) Sistemas anastomosados. C) Fracturas conjugadas. En las coordenadas Norte: 0563555 Este: 1346435.

El municipio de Mateare se ubica en el extremo NW de la falla Mateare se hizo un levantamiento de 8 datos estructurales donde se pudo observar zonas de deformación que nos muestran diferentes indicadores cinemáticos dentro de los que destacan desplazamiento de estratos, sistemas escalonados y zona de relevo (Ver Foto 15 y 16).

Se observó un desplazamiento normal correspondientes a fallas secundarias con dirección de Rumbo $N 14^{\circ} W$ y Buzamiento de $S 76^{\circ} W$, geoméricamente

se comporta de una forma escalonada por esfuerzos de extensión sus desplazamientos varían de 30 a 20 centímetros respectivamente, afectando al depósito de flujo de pómez que está empotrada por una matriz de ceniza consolidada que sobreyace al depósito de toba color gris bastante meteorizada. Los materiales encontrados se desconocen su fuente de origen (ver Foto 15).

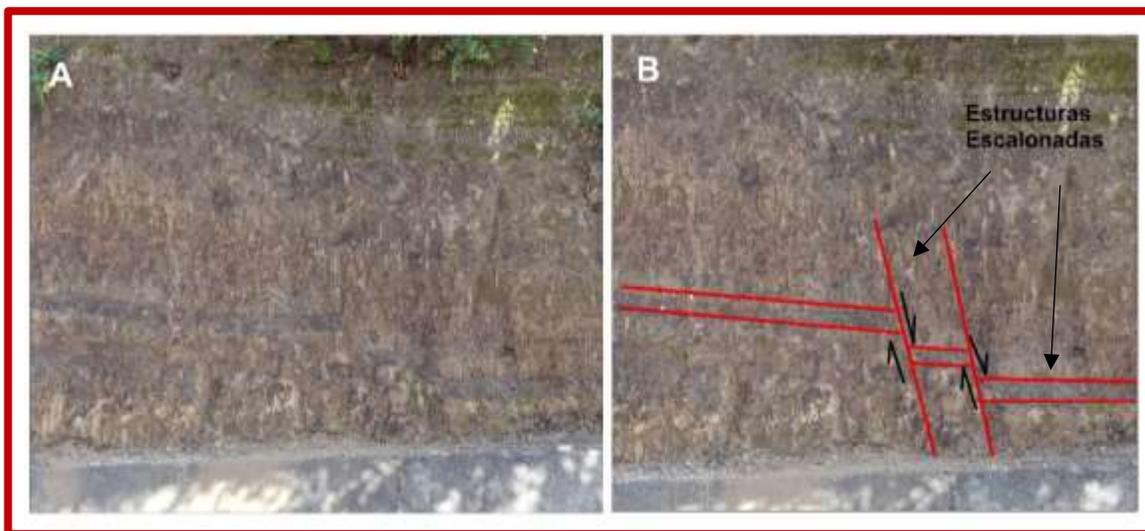


Foto 15. Corte de carretera localizado en el municipio de Mateare. A) Fallamiento superficial. B) comportamiento escalonado deformando los estratos desplazados. En las coordenadas Norte: 0559954 Este: 1354285.

Se encontraron fracturamiento asociados a fallas secundarias (Ver Foto 16), que afectan a la falla Mateare con rumbo N 76° W y buzamiento N 8° E, geoméricamente hay fracturamiento formando pequeñas zonas de relevo de 50 centímetros provocados por esfuerzos de extensión, afectando al depósito toba de tonalidad gris bastante meteorizada que subyace a la capa de material de vegetación (Ver Foto 16).



Foto 16. Fractura con terminación simple localizada en corte de carretera en el municipio de Mateare. En las coordenadas Norte: 0559954 Este: 1354285.

Roseta de Fracturas

Una roseta de diaclasas es un diagrama sencillo para visualizar las direcciones de los rumbos generales de estructuras tabulares (diques, vetas) y de planos tectónicos (diaclasas, fallas). En este tipo de diagrama no hay información sobre el manto o la dirección de inclinación. En conclusión, se puede describir este diagrama como un histograma de forma redonda. Significa los rangos de rumbo se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte o 0°) hacia abajo (Sur o 180°) en sentido de reloj. La cantidad de los datos a respecto de un rango se encuentra en el eje desde el centro (como 0%) hacia al margen (como 100%). Solamente es necesario calcular la mitad de los rangos (el medio círculo) porque el rumbo es un elemento bidireccional y automáticamente cubre el rango opuesto es decir el rango de diferencia de 180° (lado opuesto) se marca igualmente. (Griem, 2020).

Se tomaron datos en diferentes puntos de deformación, que demuestra los diferentes indicadores cinemáticos como fracturas, sistemas anastomosados, estructura en echelon, zonas de relevo todo esto con el fin de determinar una falla principal.

En el área de estudio se logró detectar que en el diagrama de rosa muestra que el esfuerzo máximo va de N-S, Paralela a la falla principal se exponen una serie de fracturas secundarias de extensión y se encuentran orientada al NW entre 5° a 10° y en el eje NE entre 5° a 10°. Todas estas fracturas tienen una rotación conforme a las manecillas del reloj (Ver Figura 16).

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.

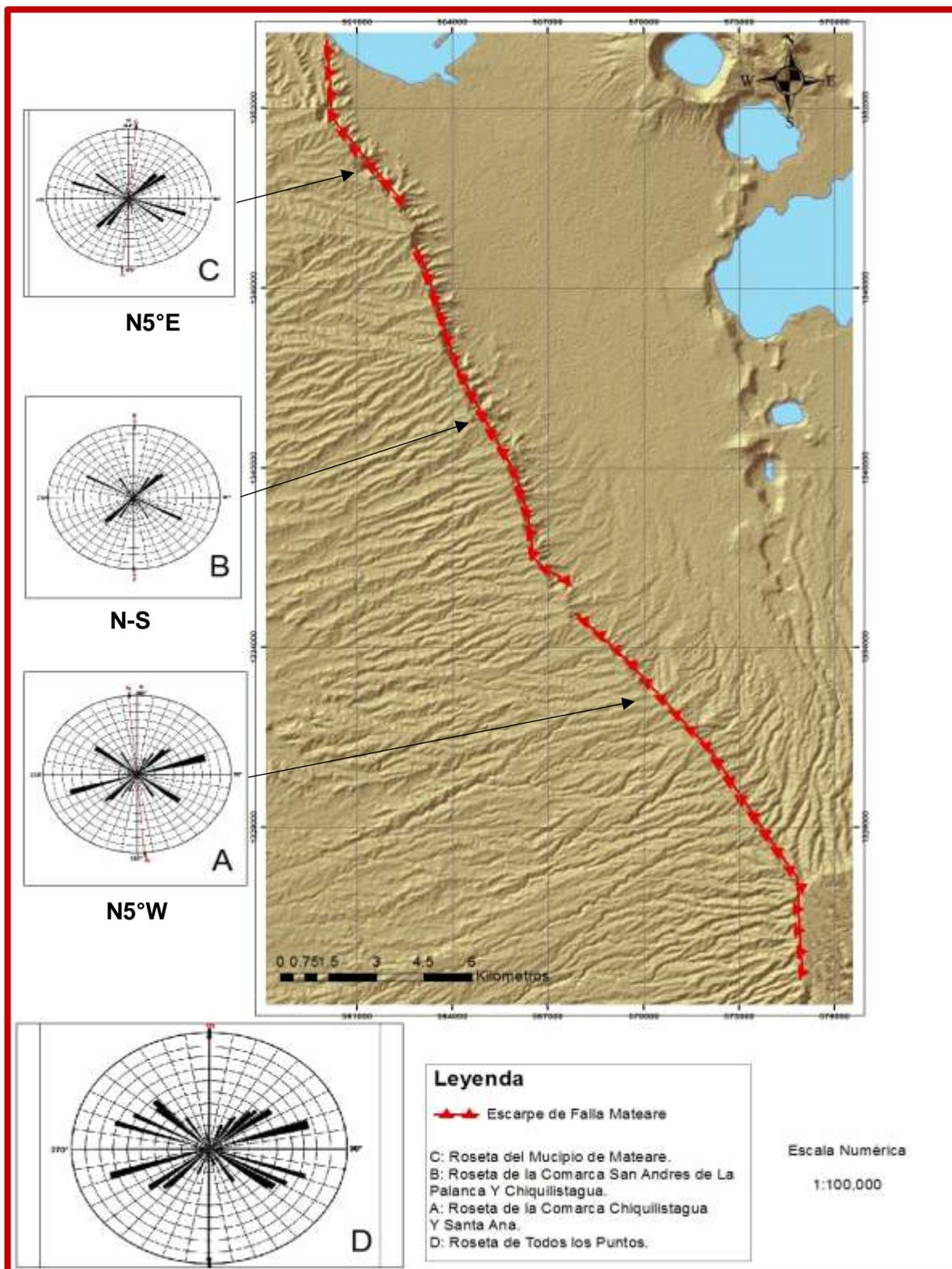


Figura 16. Mapa de Esfuerzos de la falla Mateare, con el análisis de las rosetas de fractura que muestran una dirección preferencial N-S.

Análisis sísmico

Las fallas locales en el área de Managua pueden generar sismos de hasta 6.5 Mw, como el terremoto de 1972 que fue de 6.2 Mw, uno de los más desastrosos en la historia de nuestro país originado por la falla Tiscapa con una longitud de 5.8 km, el terremoto de 1931 de 6.0 Mw provocado por la falla del Estadio con una longitud 3.2 km y el más reciente enjambre sísmico provocado por la falla Nejapa en el año 2014 de 6.2 Mw (Ver Anexo 2) esta falla tiene una longitud de 24 km, que produjo grandes daños para el municipio de Mateare y Nagarote.

El catálogo sísmico proporcionado por INETER de los años (1975 a 2018), muestra que la mayor actividad sísmica se concentra en la parte NW de la zona de estudio (Ver Figura 17). El sismo de mayor magnitud que se obtuvo del catálogo es de 4.7 Mw (ver Figura 17) localizado al SW del municipio de Ciudad Sandino en los alrededores de la Comarca los Filos de Cuajachillo. Sin embargo, dada la poca historia sísmica de nuestro país y más aún la poca información sísmica de la zona de estudio, no podemos inferir por catálogo la magnitud máxima esperada.

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS Y SÍSMICAS EN LA ZONA DE LA FALLA MATEARE, MARGEN OESTE DEL GRABEN DE MANAGUA, NICARAGUA.

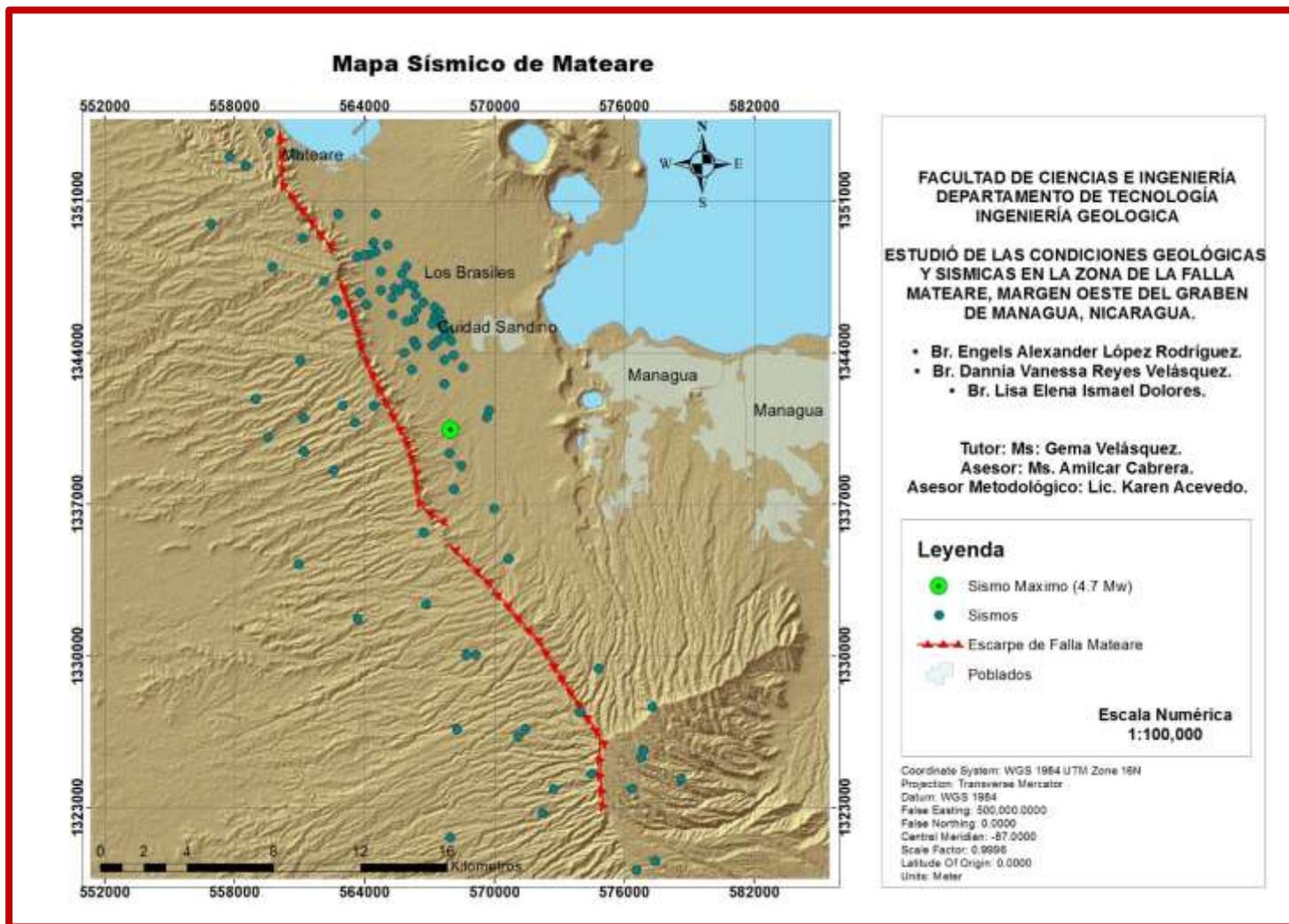


Figura 17. Mapa sísmico de la zona de falla Mateare, donde el Punto verde indica el sísmico de mayor magnitud. Fuente: (Modelo de elevación 30 metros, proporcionado por INETER).

Cálculo de la magnitud máxima

Para llevar a cabo este resultado, se utilizaron parámetros geométricos y características geológicas de la falla. Estos parámetros corresponden a la longitud, ancho, área y deslizamiento promedio total de la falla, donde se utilizó la ecuación de escalamiento para un tipo de falla normal en base a su longitud de ruptura (Ver Tabla 4).

Ecuación de ley de escalamiento

$$M = a + b * \text{Log}(SRL) \quad (3)$$

$$M = 4.86 + 1.32 * \text{Log}(38) = 6.9Mw$$

Se obtuvo una magnitud máxima de 6.9 Mw, en el cual se evaluó la amenaza sísmica mediante el método determinístico con el objetivo de presentar escenarios que podrían provocar la falla Mateare tanto en la ciudad de Managua, municipio de Mateare, municipio El Crucero y comarcas Aledañas.

Tabla 4. Coeficientes de escala entre longitud de ruptura, ancho de ruptura, área de ruptura y magnitud momento (Coppersmith, 1994).

Regresiones de longitud de ruptura, ancho de ruptura, área de ruptura y magnitud del momento (M)								
			Coeficientes y error estándar					
Ecuación*	Tipo de deslizamiento	N° de eventos	a(sa)	b(sb)	Desviación estándar s	Coefficiente de correlación r	Rango de magnitud	Rango de longitud/ancho (km)
M= a + b*log (SRL)	SS	43	5.16(0.13)	1.12(0.08)	0.28	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	5.00(0.22)	1.22(0.16)	0.28	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	4.86(0.34)	1.32(0.26)	0.38	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	ALL	77	5.08(0.10)	1.16(0.07)	0.28	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432

*SRL-Longitud de ruptura superficial (km); RLD- Longitud de ruptura por debajo de la superficie (km); RW- Ancho de ruptura de caída (km); RA- Ruptura del área (Km2). tSS- Falla dedeslizamiento; R- Inversa; N- normal.

Mapas de Amenaza Sísmica en términos de PGA

La simulación se llevó a cabo aplicando el método determinístico de amenaza sísmica para una magnitud de 6.9 Mw, donde se eligieron tres escenarios diferentes en toda la longitud de ruptura la falla (Ver Figura 18) para evaluar la intensidad sísmica en unidades de “g” (unidades de gravedad), mediante el programa CRISIS 2007.

CRISIS ha sido utilizada para el desarrollo de evaluación probabilista y determinista del peligro sísmico a nivel local y regional. Desde el inicio del proyecto CRISIS 2007 fue considerada como un elemento base para calcular amenazas sísmicas, también es una herramienta que puede generar información para calcular los riesgos de un tsunami junto con otras herramientas CAPRA (Armando Aguilar, 2017).

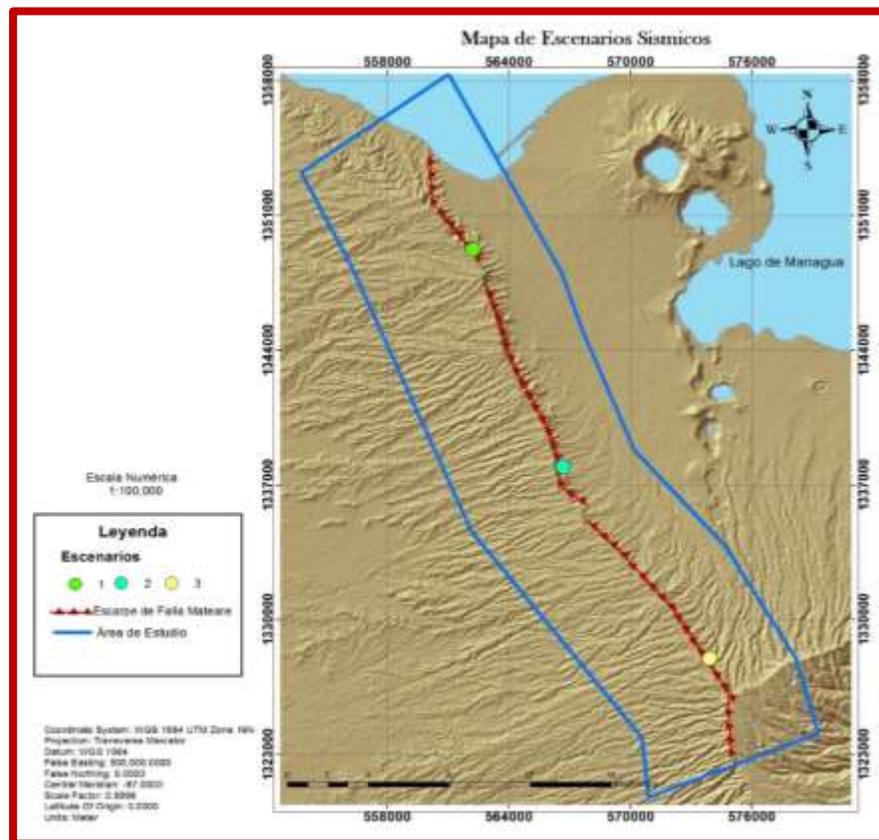


Figura 18. Mapa de escenarios sísmicos en la falla Mateare. Fuente: (Modelo de elevación 30 metros, proporcionado por INETER).

Los escenarios se llevaron a cabo para un sismo hipotético de 6.9 Mw, para evaluar las diferencias de los posibles efectos que causaría este evento sísmico. En base a la escala de Mercalli en niveles de intensidad, se hicieron énfasis los escenarios con respecto a los colores que presenta la escala (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Escala de Mercalli (Espíndola, 1990).

Grado	Tabla de Intensidad de Mercalli Modificada (IMM)
	Descripción
Imperceptible por humano	Imperceptible por las personas solo puede ser detectado por los sismógrafos.
Muy Leve y Leve	Sentido por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicada en los pisos superiores de los edificios u otras situaciones favorable.
Moderado	Sentido por la mayoría de las personas dentro de los edificios y por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche, algunas personas pueden despertarse.
Un poco Fuerte	Sacudida sentida casi todas las personas. Los objetos pequeños e inestables son desplazados o volcados, unos pocos pueden llegar a romperse.
Fuerte	Sacudida sentida por toda la persona. La gente camina inestablemente. Algunas piezas de vajillas o vidrios de ventana se rompen. Los cuadros se caen de las paredes. Se observa las sacudidas en los árboles, postes y otros objetos altos.
Muy Fuerte	Difícil mantenerse de pie. Muebles dañados daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables estructuras pobremente construidas.
Destruyivo	Conducción de autos afectados. Daños ligeros en las estructuras de diseño especialmente buenos; considerable en la estructura ordinarias con colapso parcial. Las estructuras de las casas se mueven sobre el cemento si no están sujetas.
Ruinoso	Pánico generalizado. Los edificios bien construidos sufren un daño considerable. Daños generales en los cimientos. Las estructuras de armazón que no estan bien cimentadas se desplazan. Armazones arruinados. Amplias grietas en el suelo.
Desastroso	Alguna estructura de madera bien construida queda destruida. La mayoría de las construcciones estructura de armazón destruida con sus cimientos. Puentes destruidos. Daños serios en presas, diques y terraplenes. Agrietamiento considerable en el terreno; ocurren grandes deslizamientos de taludes.

Escenario 1

Está ubicado al NW de la falla Mateare, las aceleraciones máximas alcanzadas en el municipio de Mateare es de 1.66 (g), en la ciudad capital es de 1.28 (g), en el municipio El Crucero es de 1.27 (g) y en las comarcas aledañas varían de 1.24 – 1.44 (g), siendo el municipio de Mateare con las aceleraciones máximas alcanzadas (Ver Figura 19).

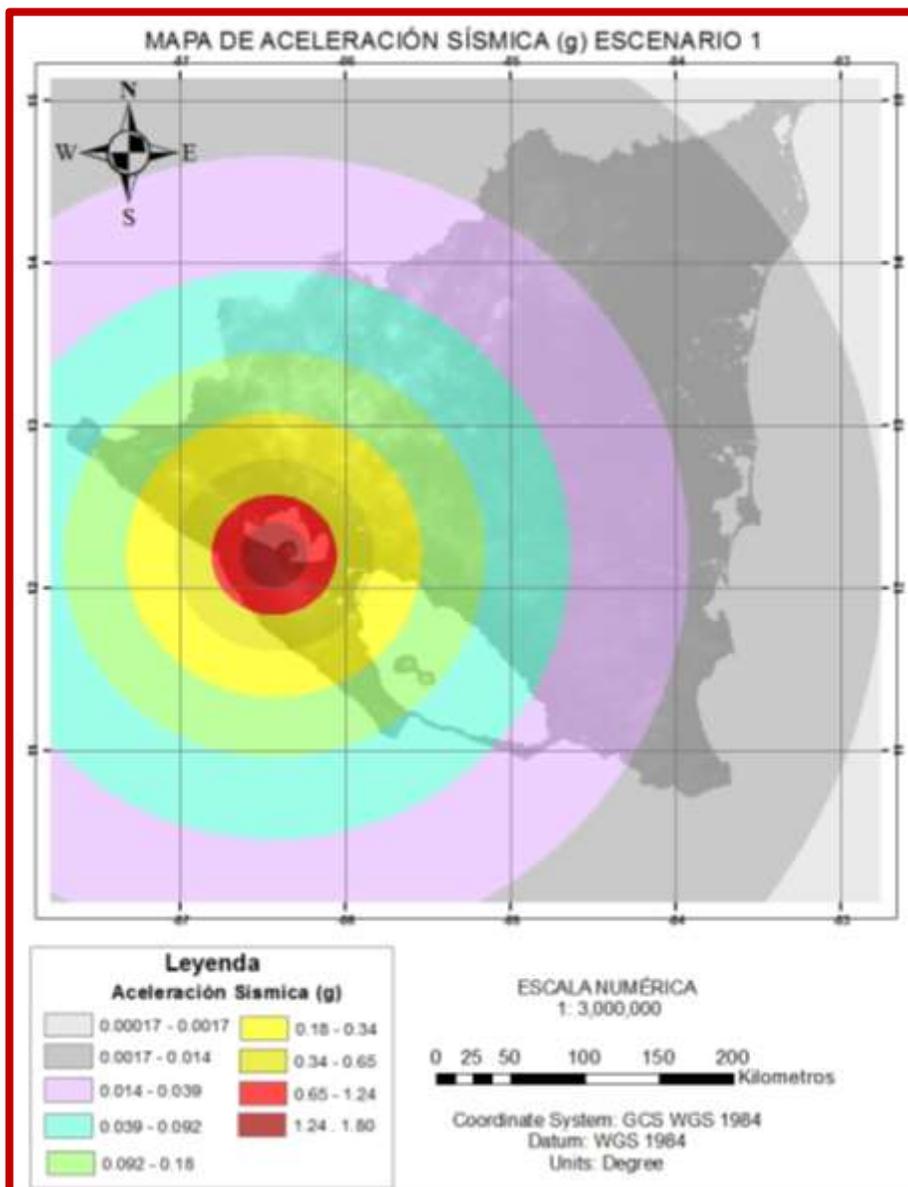


Figura 19. Mapa de amenaza sísmica en términos PGA sismo hipotético de 6.9 Mw al NW de la falla Mateare.

Escenario 2

Está ubicado en el centro de la Falla Mateare, las aceleraciones máximas alcanzadas en el municipio de Mateare es de 1.40 (g), en la ciudad capital es de 1.37 (g), en el municipio El Crucero es de 1.32 (g) y en las comarcas aledañas varían de 1.56 – 1.68 (g), siendo las comarcas aledañas con las aceleraciones máximas alcanzadas (Ver Figura 20).

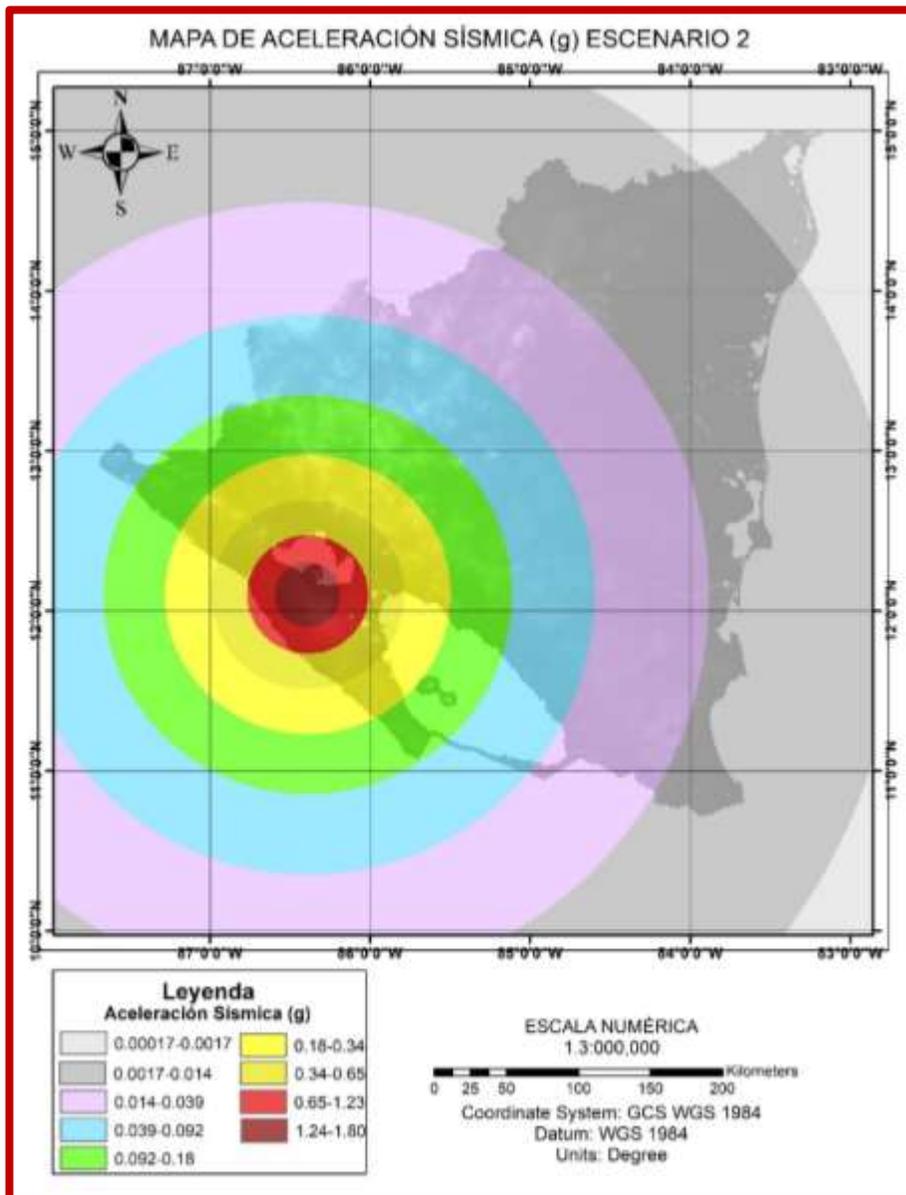


Figura 20. Mapa de amenaza sísmica en términos PGA, sismo hipotético de 6.9 Mw en la parte céntrica de la falla Mateare.

Escenario 3

Está ubicado al SE de la Falla Mateare, las aceleraciones máximas alcanzadas en el municipio de Mateare es de 1.10(g), en la ciudad capital es de 1.36 (g), en el municipio El Crucero es de 1.66 (g) y en las comarcas aledañas varían de 1.38 – 1.64 (g), siendo el municipio El Crucero con las aceleraciones máximas alcanzadas (Ver Figura 21).

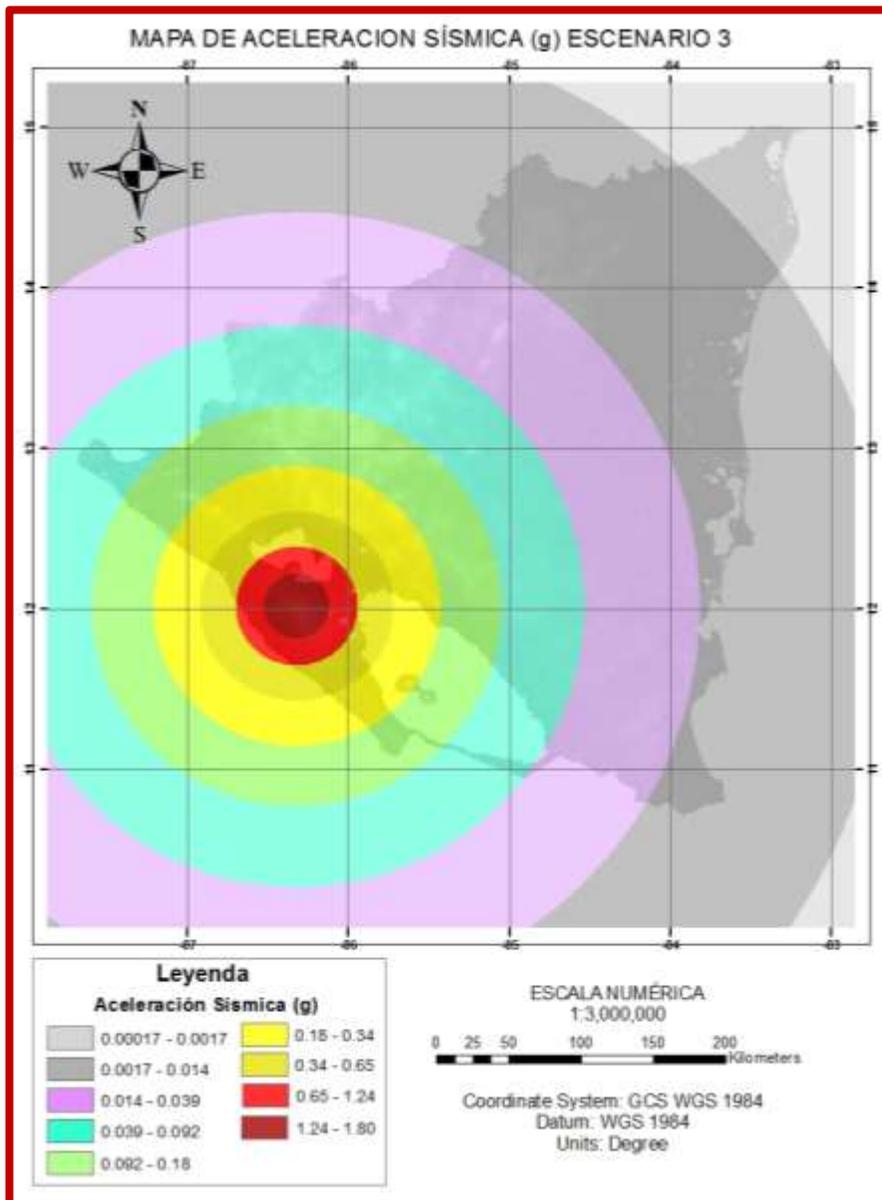


Figura 21. Mapa de Amenaza Sísmica en términos PGA, sismo hipotético de 6.9 Mw al SE de la falla Mateare.

11. CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio aportan información que pueden ser de interés en el conocimiento de la peligrosidad y de las características de los movimientos esperados en cualquier punto de la zona de falla Mateare.

En base a los resultados obtenidos se concluye que en el área está caracterizada por una secuencia de depósitos piroclásticos de edad pleistoceno de 2,9 millones de años y holoceno de los 10,000 años, que probablemente provienen de los centros volcánicos Masaya y Apoyeque, los depósitos predominantes pertenecen al grupo La Sierra del pleistoceno y formaciones recientes del holoceno.

- ❖ Se identificaron doce depósitos estratigráficos de edad pleistocénica y holocénica las cuales se mencionan a continuación desde la capa basal hasta la superior: depósito de toba (Pt), depósito de oleada piroclástica (Pop), depósito de caída de ceniza (Pc), suelo fósil (Psf), depósito de caída de ceniza y escoria (Hce), depósito de caída de pómez de apoyeque (Haq), depósito de flujo de ceniza (Hfc), depósito de caída piroclástico (Hp), depósito de toba (Ht), depósito de caída de escoria (He), depósito de caída de pómez (Hp), suelo moderno (Hsm).
- ❖ Estructuralmente el área de estudio está afectada por una serie de fallas y lineamientos geológicos por esfuerzos de extensión, se reconoció un fallamiento de tipo transtensional con movimiento normal y componente lateral derecho, su dirección preferencial es de SE-NW, la falla Mateare tiene una longitud de ruptura de aproximadamente 38 kilómetros en el área de estudio y un ancho de 9 Kilómetros, se comporta de forma segmentada formando dos zonas de relevo en la parte sur como en la parte norte, en el extremo NW presenta una terminación bifurcada, desapareciendo en el lago de Managua

Se tomaron datos estructurales tanto de diaclasas y fallas geológicas, el depósito más afectado es la toba ubicado en la Comarca de San Andrés de La

Palanca, los indicadores cinemáticos determinados en el área de estudio son: sistemas conjugados, sistemas escalonados, fracturamiento R, sistemas anastomosados y desplazamiento de estratos. Los datos estructurales fueron de utilidad para elaboración de rosetas de fracturas teniendo como resultado el esfuerzo principal máximo con dirección N-S.

- ❖ Mediante la ley de escalamiento New Empirical relationships among magnitude, rupture length, ruptura width, reupture área, and surfase displacement se determinó la magnitud máxima, mediante la geometría de la falla Mateare el cual se obtuvo una magnitud máxima de 6.9 Mw.

- ❖ El análisis de amenaza sísmica se realizó mediante el método determinístico que muestra valores de aceleración en (g), la cual se evaluaron los niveles de intensidad en base a la escala de Mercalli, las aceleraciones más altas van de 1.66 a 1.69 (g), los escenarios están ubicados al NW, Centro y SE de la falla, los espectros de respuesta asociados a la fuente demuestra que la ciudad de Managua, municipio El Crucero, municipio de Mateare y comarcas aleñadas serian afectadas seriamente, por lo cual la falla Mateare representa uno de las mayores amenazas sísmicas.

12. RECOMENDACIONES

Al realizar este estudio se logró obtener mucha información de carácter geológico y sísmico, permitiendo ver la necesidad de ejecutar más estudios orientados a otras temáticas por lo que se hacen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda construir en base al reglamento de construcción (MTI), sobre todo en zonas de estructuras geológicas para evitar pérdidas humanas y materiales.
- Es necesario realizar métodos sísmicos más detallados para analizar la amenaza sísmica del sitio como: método de Nakamura, MASW y SPAC con el objetivo de identificar propiedades físicas del subsuelo (periodo, frecuencia aceleración) para estimar modelos de velocidad del sitio de la zona de falla Mateare.
- Para futuros estudios (con mayores datos de intensidad) se recomienda que empleen el método probabilístico para hacer énfasis en la ocurrencia de un sismo en un sitio específico
- Realizar un estudio sobre inestabilidad de talud en la zona de falla, debido a que el área se encuentra afectada por estructuras geológicas como fallas y fracturas, así también, por depósitos volcánicos poco consolidados, siendo factores condicionantes y desencadenantes para los movimientos de talud.
- Tomar en cuenta los resultados geológicos y sísmico de este estudio para investigaciones futuras, pues la investigación aporta información valiosa de parámetros (longitud, ancho y desplazamiento de falla) y magnitud máxima de la falla Mateare. De igual manera elaborar estudios geofísicos gravimétricos para evaluar el comportamiento de la falla.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A. et al. (2017). Desarrollo y validación del software CRISIS para realizar una evaluación probabilística de riesgo sísmico con énfasis en el reciente CRISIS2015. México. *Revista Científica*.
- Avellán, D. R. (2009). Tefroestratigrafía de la parte occidental de Managua, Nicaragua: Evolución de las estructuras volcánicas de Ticomo, Nejapa y Asososca. Managua, Nicaragua: *Revista Científica*.
- Ayala, L. (2019). Obtenido de. <https://www.explorrock.com/indicadores-cinematicos-en-geologia-estructural/>.
- Barrantes, G. (2016). Consideración de la amenaza sísmica en el ordenamiento Territorial del canton de Poas. Costa Rica. *Boletín de Geología*.
- Beles, A. I. (1975). Elementos de Ingeniería Sísmica. Barcelona. *Revista Científica*.
- Bice, D. C. (1985). Quaternary volcanic stratigraphy of Managua, Nicaragua: correlation and source assignment for multiple overlapping plinian deposits. Geological Society of America. *Revista Científica*.
- Camacho, A. (2020). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica mediante el método determinístico en la ciudad de Golfito. Costa Rica*. [Proyecto de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
- Castillo, E. J. (1972). Geología de la Región Pacífica de Nicaragua. *Revista Científica*.
- Chan, C. (2015). Investigación Geológica, ondas sísmicas. Obtenido de. http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html.
- Coppersmith, D. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. America. *Revista Científica*.
- Corporation, P. (1972). The geology of western Nicaragua. Tax Improvement and Natural Resources Inventory Project. *Revista Científica*.
- Cowan, C. (2000). "Map and Database of Quaternary Faults in the Vicinity of Managua, Nicaragua". U.S A. Geologic Survey. *Revista Científica*.

- Dengo, G. y. (1990). The geology of North América. The Caribbean Region. *Revista Científica*.
- Denyer. (2000). Historia Geológica, En Denyer, P. (2000). Geología de Costa Rica. *Revista Científica*.
- Enrique, M. G. (2008). *Proyecto RESIS II, Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamerica. Centroamérica*. [Audio Libro].
- Espíndola, J. Y. (1990). Terremotos y ondas sísmicas. México. *Revista Científica*.
- Espinoza, F. (2007). *Neotectónica de la Falla Nejapa, porción Oeste del Graben de Managua Nicaragua*. [Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México].
- Ferrari, L. (2017). Información básica sobre el sismo del día 19 de Septiembre 2017. Mexico. *Revista Científica*.
- Freundt, A. a. (2006). The youngest highly explosive basaltic eruptions from Masaya Caldera (Nicaragua): Stratigraphy and hazard assessment. *Revista Científica*.
- Frischbutter. (2002). tectonica regional de america central. *Revista Científica*.
- Frischbutter, A. (2000). Structure of the Managua graben, Nicaragua. International Geophysics. *Revista Científica*.
- Girard, G. a. (2005). The Managua Graben and Las Sierras Masaya volcanic complex (Nicaragua); pull-apart localization by an intrisive complex: results from analogue modeling. *Revista Científica*.
- González, M. (2012). *Analisis morfoestructural del Gabren de Managua y sus alrededores. Managua*. [Tesis para optar al titulo de Ingeniera Geóloga].
- Griem, W. (2020). Obtenido de. <http://www.geovirtual2.cl/Geoestructural/prak03.htm>
- Havlicek, P. H. (1997). Estudio para el reconocimiento de la amenaza geológica en el area de Managua, Nicaragua. *Revista Científica*.
- Hodgson. (2002). Geología Histórica e Historia Geológica Estructural, Tectónica simplificada de Nicaragua y América Central. Nicaragua. *Revista Científica*.
- Hodgson, G. (2000). *Introduccion al Lexico Estratigrafico de Nicaragua. Managua, Nicaragua*. [Audio Libro].

- ICE, I. C. (2019). Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica. Obtenido de. <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia/244-que-es-una-falla>.
- INETER. (1997). Estudio para el reconocimiento de la Amenaza Geológica en el Área de Managua, Nicaragua. *Revista Científica*.
- INETER. (1997). Microzonificación sísmica de Managua. Managua. *Revista Científica*.
- INETER. (2006). Hojas topográficas de Managua, Masaya, Mateare, Tipitapa, Nindirí y San Rafael del sur. Escala: 1:50,000. *Revista Científica*.
- INETER. (2008). Evaluación de Amenazas sísmicas en Centroamérica. *Revista Científica*.
- INETER. (2014). Boletín mensual Sismos y Volcanes de Nicaragua.
- INETER. (2019). Amenaza Sísmica en Managua, Nicaragua. *Revista Científica*.
- Kanamori, H. (1977). A moment magnitude scale. California. *Revista Científica*.
- Kuang, J. (1971). Estudio Geológico del Pacífico de Nicaragua. Catastro e Inventarios de Recursos Naturales. *Revista Científica*.
- Kutterolf, S. (2007). Late Pleistocene to Holocene temporal succession and magnitudes of highly-explosive volcanic eruptions in west-central Nicaragua, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. *Revista Científica*.
- La Fémina, P. (2002). Bookshelf faulting in Nicaragua Geology. *Revista Científica*.
- Martínez, A. (2016). *Espectro de diseño y zonificación sísmica basada en periodos fundamentales de vibración de los suelos, en el área urbana de la ciudad de Mateare. Managua, Nicaragua*. [Tesis para optar al título de Ingeniero Geólogo]. Repositorio UNAN-Managua. <https://repositorio.unan.edu.ni/>.
- McBirney, A. y. (1965). Volcanic History of Nicaragua University of . *Revista Científica*.
- Olivares, G. (2017). *Evaluación de la amenaza sísmica en Managua aplicando el método determinístico para la falla donde ocurrió el terremoto del 10 de abril 2014*. [Tesis de Postgrado, UNAN-Managua].
- Otero, D. (2018). ONDAS SISMICA y su importancia con la geofísica y la humanidad. *Revista Científica*.

- Peredo, J. (2012). Sismicidad en el Estado de Hidalgo durante 1997-2010. Mexico. *Revista Científica*.
- Rocha, et al. (2015). *Estimación de espectros de respuesta a partir del método Determinístico, considerando el potencial sísmico de la Falla Tiscapa y el efecto local de los suelos del área. Managua*. [Tesis para optar al título de Ingeniero Geólogo, UNAN-Managua].
- Saez, M. (2016). Obtenido de. https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Efectos-mecanicos-de-las-ondas-sismicas-Ondas-de-cuerpo-a-ondas-P-y-b_fig3_301779521.
- Sauter, F. (1989). Fundamentos de ingeniería sísmica: Introducción a la sismología. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica. *Revista Científica*.
- Segura, F. (2007). *Reseña de la Sismicidad en Nicaragua con énfasis en la Depresión Nicaraguense. Managua, Nicaragua*. [Audio Libro].
- Tarbuck, E. (2005). Ciencias de la Tierra. Obtenido de. https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Ciencias_de_la_Tierra_-_Edward_Tarbuck.pdf.
- Williams, K. (1971). Mapa geológico de Managua, Nicaragua. Sheet 2962 III, 1:50,000. Managua. *Revista Científica*.
- Woodward-Clyde, C. (1975). Investigation of active faulting in Managua, Nicaragua & Vicinity. Managua, Nicaragua. *Revista Científica*.
- Zambrana, X. (2019). Peligro Sísmico de la falla geológica Aeropuerto, Margen este de la ciudad de Managua, Nicaragua. *Revista Científica*.
- Zoppis, B. y. (1958). Geología de la Costa del Pacífico de Nicaragua. *Revista Científica*.

14. ANEXOS

ANEXOS 1. FICHAS DE CAMPO.

Tabla 6. Ficha de campo del municipio de Mateare.

Ficha descriptiva de campo.	
Ubicación: municipio de Mateare.	
Coordenadas UTM: Norte: 0560713 Este: 1351747	
Grupo: La Sierra.	
Unidad: Ceniza y Escoria.	
Descripción Litológica.	
Se lograron identificar las diferentes unidades que afloraban tanto en el municipio de Mateare y el escarpe, donde se pudo encontrar depósitos de ceniza, escoria, pómez y toba, las unidades más representativas en la zona de estudio eran la ceniza y escoria, las intercalaciones del depósito de las mismas variaban de 10 cm a 80cm, donde sus espesores máximos variaban de 1m a 3m.	

Tabla 7. Ficha de Campo de la comarca San Andrés de la Palanca.

Ficha descriptiva de campo	
Ubicación: comarca San Andrés de la Palanca	
Coordenadas UTM: Norte: 0564121 Este: 1346555	
Grupo : La Sierra	
Unidad: Pómez	

Descripción Litológica
Se identificaron unidades como pómez y toba, el cual lo que más afloraba en la zona de estudio eran los depósitos de pómez, con tonalidades amarillentas a blanca, sus espesores variaban entre 2m a 6m.

Tabla 8. Ficha descriptiva de campo de la comarca Chiquilistagua.

Ficha descriptiva de campo	
Ubicación: Comarca Chiquilistagua	
Coordenadas UTM: Norte: 0568186 Este: 1335562	
Grupo : La Sierra	
Unidad: Toba	
<p>Descripción Litológica</p> <p>Se lograron encontrar diferentes unidades como pómez, oleadas piroclásticas y toba, donde los depósitos más representativos en esta comarca fue la toba, sus tonalidades variaban de café marrón a claro, presentaba líticos de pómez y sus espesores variaban de 1 m a 3 m.</p>	

Tabla 9. Ficha descriptiva de campo de la comarca Santa Ana.

Ficha descriptiva de campo	
Ubicación: comarca Santa Ana	
Coordenadas UTM: Norte: 05733437 Este: 1327762	
Grupo: La Sierra	
Unidad: Ceniza	
Descripción Litológica	
Se pudieron definir depósitos de suelo fósil masivo con intercalaciones de ceniza, el cual estas intercalaciones era lo que más representaba en el depósito, su tonalidad variaba de gris oscuro a claro y sus espesores máximos iban de 5 cm a 75 cm.	

Tabla 10. Ficha descriptiva de campo del municipio El Crucero.

Ficha descriptiva de campo	
Ubicación: municipio El Crucero	
Coordenadas UTM: Norte: 0574908 Este: 1322776	
Grupo: La Sierra	
Unidad: Oleadas Piroclásticas	
Descripción Litológica	
Las unidades encontradas en este Municipio consistían en depósitos de toba, ceniza y oleadas piroclásticas, el depósito que más afloraba eran oleadas piroclásticas, estaban constituidas por arenas, escoria y ceniza, sus espesores alcanzan de hasta 80 cm a 1 m.	

ANEXO 2. Mapa de sismos registrados en el mes de abril, 2014.

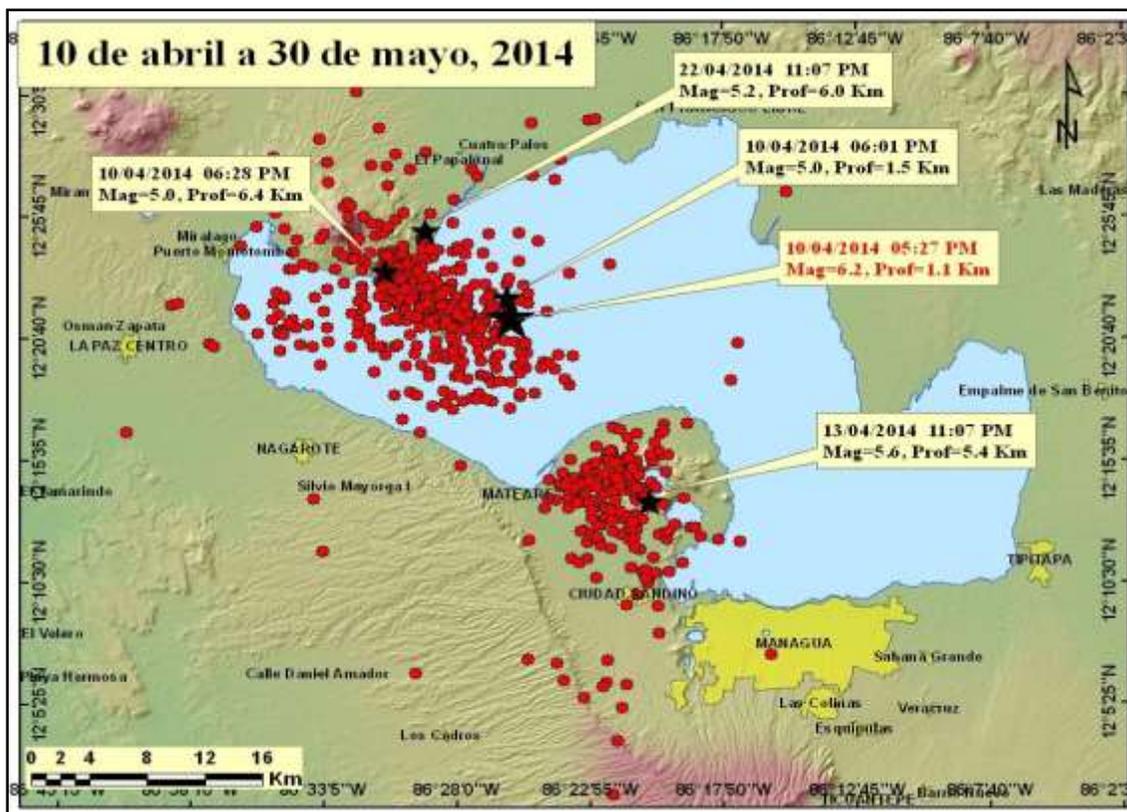


Figura 22. Mapa de sismos registrados en el mes de abril 2014. Fuente: (INETER, Boletín mensual Sismos y Volcanes de Nicaragua, 2014).

ANEXO 3. Descripción de las Fallas principales de Managua.

Tabla 11. Fallas principales de Managua. (Bice, 1985), (Cowan, 2000), (Espinoza, 2007) y (Woodward-Clyde, 1975).

Zona de Falla	Rumbo y Longitud Proyectada	Máximo Individual	Máximo del Escarpe	Tipo de Falla y sentido del movimiento	Tasa de movimiento	Edad del último movimiento	Comentarios
Cofradía	N4°E, ± 13°, - 40 Km	0.5-1m	-15 m	Falla Normal oblicua con componente lateral izquierda. Bloque hundido hacia el W.	Probablemente 0-5	< 5 Kyr	Prominente escarpe que se extiende hacia el sur en la caldera Masaya y es asociado con numerosos manantiales de aguas termales.
Mateare	N50°W, 35 a 70 Km		-200 m	Falla Normal oblicua, con componente lateral derecha, bloque hundido hacia el NE.		Probablemente < 20 Kyr	El escarpe de Mateare esta conformado por depositos de ignimbritas del Pleistoceno. No reporta actividad sísmica desde 1975.
Nejapa	N-S, 24 Km	1 m	-80 m	Falla Normal con componente lateral derecha.		Probablemente < 10 Kyr	Estructuras monogenéticas y un volcan compuesto se emplazan sobre esta falla y definen el margen oeste del graben de Managua.
San Judas	N-S ± 5°, 10 Km	1 m	15 m	Falla Normal bloque hundido hacia el E, se desconoce si tiene sentido de movimiento lateral.		Probablemente < 5 Kyr	Esta falla forma un pequeño escarpe y desplaza suelos del Holoceno. Fracturas menores se originaron en el terremoto de 1972.
Estadio	N30E, ± 5°, 2 km y se extiende a 10 km en el lago de Managua	0.5 m	-1 m	Lateral izquierda.		31 de Marzo de 1931	Superficie de ruptura a lo largo de 2 Km en el terremoto de 1931. Fracturas menores se originaron en el terremoto de 1972.
Tiscapa	N24°E, ± 7°, 10 km y se extiende a 20 Km en el Lago de Managua	3.5 m	20 m	Lateral izquierda.	Probablemente 0-5	23 de Diciembre 1972	Pequeño escarpe geomorfológico hacia el centro de la antigua ciudad de Managua. El desplazamiento lateral izquierdo se observa en la pared Norte de la laguna de Tiscapa.
Aeropuerto	N3°E, ± 6°, 15 Km	0.5-1m	10-12 m	Falla Normal oblicua con componente lateral derecha, bloque hundido hacia el E.	Probablemente 0-5	A.. 1650-1810	Falla subvertical con un escarpe cuya altura máxima es de 10 a 12 metros.

ANEXO 4. Intensidades de eventos sísmicos

Tabla 12. Escala de Mercalli y parámetros sísmicos (Ferrari, 2017).

Escala de Mercalli	Aceleración sísmica (g)	Velocidad sísmica (cm/s)	Percepción del temblor	Potencial de daño
I	<0.0017	<0.1	No apreciable	Ninguno
II-III	0.0017 - 0.014	0.1 - 1.1	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 - 0.039	1.1 - 3.4	Leve	Ninguno
V	0.039 - 0.092	3.4 - 8.1	Moderado	Muy leve
VI	0.092 - 0.18	8.1 - 16	Fuerte	Leve
VII	0.18 - 0.34	16 - 31	Muy Fuerte	Moderado
VIII	0.34 - 0.65	31 - 60	Severo	Moderado a Fuerte
IX	0.65 - 1.24	60 - 116	Violento	Fuerte
X+	>1.24	>116	Extremo	Muy fuerte