



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

“ESTRATIGRAFÍA DE LAS ROCAS DEL NEOPROTEROZOICO
Y SU RELACIÓN CON LAS SECUENCIAS PALEOZOICAS DE
PLATAFORMA Y DE CUENCA EN LA SIERRA MARTÍNEZ,
SONORA CENTRAL, MÉXICO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

GEÓLOGO

PRESENTAN:

JORGE ANTONIO ENCINAS VALENZUELA

LUIS ENRIQUE VEGA FIGUEROA

DIRECTOR: MC. RICARDO AMAYA MARTÍNEZ

HERMOSILLO, SON.

NOVIEMBRE, 18



Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora, 22 de Octubre de 2018

DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
Presente.-

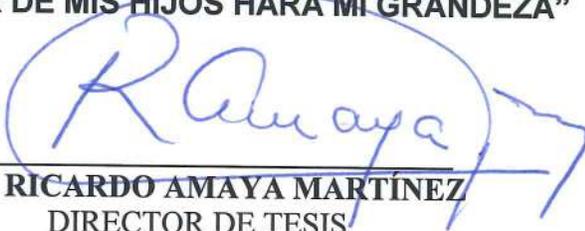
Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para el registro y aprobación, el siguiente tema de tesis, intitulado:

**“ESTRATIGRAFÍA DE LAS ROCAS DEL NEOPROTEROZOICO Y SU
RELACIÓN CON LAS SECUENCIAS PALEOZOICAS DE PLATAFORMA Y DE
CUENCA EN LA SIERRA MARTINEZ, SONORA CENTRAL, MÉXICO”**

Esto es con el fin de que los alumnos **Jorge Antonio Encinas Valenzuela**, con expediente No. **212207551** y **Luis Enrique Vega Figueroa**, con expediente No. **212202453**, puedan presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedamos de Usted.

ATENTAMENTE
“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”


M.C. RICARDO AMAYA MARTÍNEZ
DIRECTOR DE TESIS

C.c.p. Interesados.
C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora, 24 de octubre, 2018

M.C. RICARDO AMAYA MARTÍNEZ
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto, le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por usted intitulado:

**“ESTRATIGRAFÍA DE LAS ROCAS DEL NEOPROTEROZOICO Y SU
RELACIÓN CON LAS SECUENCIAS PALEOZOICAS DE PLATAFORMA Y DE
CUENCA EN LA SIERRA MARTINEZ, SONORA CENTRAL, MÉXICO”**

Esto es con el fin de que los alumnos: **Jorge Antonio Encinas Valenzuela**, con Expediente No. 212207551 y **Luis Enrique Vega Figueroa** con Expediente No. 212202453 puedan presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo les comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

Presidente	Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Secretario	Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega
Vocal	M.C. Ricardo Amaya Martínez

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”


DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO.



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**ESTRATIGRAFÍA DE LAS ROCAS DEL NEOPROTEROZOICO Y SU
RELACIÓN CON LAS SECUENCIAS PALEOZOICAS DE PLATAFORMA Y DE
CUENCA EN LA SIERRA MARTINEZ, SONORA CENTRAL, MÉXICO"**

NOMBRES DE LOS SUSTENTANTES:

**JORGE ANTONIO ENCINAS VALENZUELA
LUIS ENRIQUE VEGA FIGUEROA**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

DR. ROGELIO MONREAL SAAVEDRA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

M.C. RICARDO AMAYA MARTINEZ

**ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"**

**DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO**

C.c.p. Archivo.

Dedicatorias

Dedico esta tesis a mi familia, a mis padres Luis Antonio Encinas Rentería y Yolanda Valenzuela Munguía por el gran apoyo brindado. A mi novia Saira Alhely Pacheco Olivas por siempre haber estado conmigo y siempre poder contar contigo.

Esta tesis va dirigida a mis padres Ramona Figueroa Espinoza y Atanasio Vega González por ser los pilares de mi persona, aprecio muchísimo su apoyo y constancia; también dirijo esta tesis a mis hermanos Any, Alma, Pancho, Carmen y Checho por el gran cariño y apoyo que me han brindado todo el tiempo, todos ustedes saben que los quiero mucho y que siempre serán de mi más grande admiración.

Agradecimientos

Queremos agradecer a la Universidad de Sonora por habernos dado la oportunidad de ser parte de su gran institución, queremos agradecer a nuestro director de tesis M.C. Ricardo Amaya Martínez por su paciencia y entusiasmo reflejados en este trabajo, a los profesores Dr. Francisco Grijalva Noriega y Dr. Rogelio Monreal Saavedra por contribuir en la culminación de esta tesis, al Dr. Forest G. Poole por compartir la información radiométrica (inérita) que fue clave para la elaboración de esta tesis y al dueño del rancho Palo Blanco ing. Armando Encinas Blanco.

Finalmente queremos agradecer a nuestros compañeros y amigos que nos han acompañado durante todo este tiempo, Sebastián Jurado, René Armenta, Alejandra Figueroa, Salvador Arreola, Romario López, David Vega, Claudia Bernal, Ximena Palafox, Estephany Córdova, Paloma Piña, Mario Trinidad, Héctor Noriega, Citlaly Duarte, Raúl Montaña, Arturo Morales y Claudia Canales. Gracias a todos.

ÍNDICE

<i>Lista de figuras</i>	<i>i, ii, iii, iv</i>
<i>Lista de tablas</i>	<i>iv</i>
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción	1
1.2.- Objetivos.....	4
1.3 Metodología	5
1.4 Localización y vías de acceso	7
1.5 Fisiografía, orografía e hidrografía.....	8
1.5.1 Fisiografía.....	8
1.5.2 Orografía	9
1.5.3 Hidrografía.....	11
CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	19
2.1 Geología Regional	24
2.2 Unidades neoproterozoicas en Sonora	34
CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA	36
3.1 Geología Local.....	40
3.2 Estratigrafía	43
3.2.1 Unidades proterozoicas	45
3.2.3 Unidades de origen ígneo	54
3.3 Petrografía.....	55
Esquisto de cuarzo-biotita.....	56
Granodiorita.....	58

Granito.....	59
Pórfido-andesítico	60
CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA HISTÓRICA	62
CAPÍTULO 5. GEOCRONOLOGÍA	67
5.1 Métodos y materiales	67
5.2 Resultados.....	69
5.3 Discusión	71
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	76
REFERENCIAS	78

Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.

Figura 2. Provincias y subprovincias fisiográficas (modificado de Subprovincias Fisiográficas de INEGI 1: 1,000,000).

Figura 3. Sistemas orográficos correspondientes al área de estudio y zonas aledañas. Modificado de Sistema de topoformas INEGI 1,000,000.

Figura 4. Cuencas hidrográficas del estado y del área de estudio, así como los principales arroyos de la zona.

Figura 5. Mapa geológico regional 1:100,000 del área de estudio (recuadro amarillo), modificado de Poole et al., 2005; Amaya-Martínez, 2011; Hernández-Gracia, 2011; Morales-Morales y Corral-Gastélum, 2006; Guzmán-Espinoza y Doval-Arenas, 2001.

Figura 6. Columna estratigráfica de la geología regional del área de estudio.

Figura 7. Perfiles geológicos: sección A-A' con una orientación NW-NE y de la sección B-B' con orientación NW- SE.

Figura 8. Lutita El Mezquite. Imagen obtenida de Hernández-Gracia, 2011.

Figura 9. Afloramiento de la Formación Mina México la cual se compone principalmente de areniscas de grano fino a muy fino. Imagen obtenida de Hernández-Gracia, 2011.

Figura 10A. Estratos Neoproterozoicos más antiguos (1050-750 Ma) que el miogeoclinal cordillerano, correspondiente a la segunda y tercera subdivisión. **10B.** Estratos Neoproterozoicos en la parte inferior (750-540 Ma) del miogeoclinal cordillerano, correspondiente a la primera subdivisión (modificadas de Poole y Stewart, 2002).

Figura 11. Mapa geológico local 1:25,000, donde se puede reconocer el marco geológico regional y su relación con las unidades Neoproterozoicas al oeste de la Sierra Martínez.

Figura 12. Secciones A-A' y B-B', en la Sección A-A' se puede ver la continuidad de los afloramientos al sur de del rancho Palo Blanco, en la Sección B-B' se aprecia un truncamiento de la columna metasedimentaria a consecuencia del emplazamiento de los intrusivos. La parte del Paleozoico Temprano en la última sección es meramente interpretativa.

Figura 13. Columna estratigráfica compuesta del área de estudio, donde se muestran las unidades de origen Proterozoico y Paleozoico Inferior siendo cortadas por cuerpos de origen Intrusivos.

Figura 14. Muestra el bloque correspondiente al Pensilvánico, mismo que fue basculado de la parte superior de la Sierra Martínez, siendo el puerto posiblemente la zona de debilidad donde debería de encontrarse el plano de la estructura por la que se desplazó y que posteriormente favoreció la intrusión de la roca granodiorítica (en rosa).

Figura 15. Tomada desde la Sierra Martínez que muestra el rancho Palo Blanco aledaño al suelo de tonalidad rojiza al fondo-centro de la imagen misma que está dada por el afloramiento de esquisto de biotita, esta porción corresponde a la secuencia de edad Neoproterozoica del miogeoclinal cordillerano, donde la dirección del basculamiento preferencial se dirige hacia el observador.

Figura 16. Panorámica donde se muestra los estratos Neoproterozoicos a la izquierda, los cuales afloran con una coloración café rojiza.

Figura 17. Afloramiento de la Unidad A, caracterizado por alternancias silicificadas-dolomitizadas.

Figura 18. Afloramiento de la zona transicional de la caliza masiva de la Unidad D y la cuarzo-arenita conglomerática de la Unidad C; Se aprecia la coloración café grisácea, sin embargo, en otros sitios presenta tonalidades más rojizas.

Figura 19. Afloramiento de la zona transicional de la Unidad D, se puede apreciar la sucesión milimétrica de capas compuestas en su mayoría de material arcilloso en la base y material carbonatado en la cima.

Figura 20. Afloramiento de un yacimiento tipo Skarn de Fe, cuyo contenido de este elemento promueve la formación de minerales magnéticos principalmente dispuestos en las bandas oscuras.

Figura 21. Afloramiento de cuarcitas de la Unidad E; la cual presenta una coloración rosada-pálido en superficie fresca y una tonalidad rojiza en superficies intemperizadas.

Figura 22. Fotografía de la porción inferior del Esquisto de cuarzo-biotita de la Unidad F, esta se encuentra en la parte basal, a medida que se asciende estratigráficamente la roca tiende a tomar un aspecto sedoso y una vulnerabilidad muy evidente al intemperismo.

Figura 23. Fotografía de las rocas que corresponden al nivel más superior de las unidades Proterozoicas, **a)** muestra una delgada capa de calizas fuertemente recrystalizadas de espesor no mayor a 10 metros; **b)** se muestra que la roca no presenta ninguna evidencia de vestigios de fósiles o alguna de sus características originales debido al grado de metamorfismo al que fue sometida.

Figura 24. Cuarcita con *Scolithus* sp. Esta roca se correlaciona con la Cuarcita Proveedora reportada al norte (Sierra Agua Verde) y al noroeste (San José de Gracia); cuya edad se asigna al Cámbrico Temprano.

Figura 25. Caliza recristalizada e intensamente silicificada.

Figura 26. Fotografía panorámica donde se muestra el esquisto de la Unidad F (en tonalidad café-rojiza) al que se le yuxtapone la capa delgada de calizas recristalizadas y mismas que es coronada por la Cuarcita Proveedora y las Calizas que en otros trabajos asignan al Cámbrico Medio a Ordovícico Temprano-Medio (Hernández-Gracia, 2011).

Figura 27. 1a y 2a. Láminas delgadas en luz natural; **1b y 2b.** Láminas delgadas en luz polarizada esquisto de cuarzo-biotita.

Figura 28. Lámina delgada de la cuarcita correlacionable con la Cuarcita Proveedora del Cámbrico Inferior, en luz natural (izquierda) y en luz polarizada (derecha).

Figura 29. Lámina delgada de la granodiorita, se pueden apreciar cristales subeuhedrales de biotita en una matriz de cristales anhedrales de plagioclasa y cuarzo, en luz natural (izquierda) y en luz polarizada (derecha).

Figura 30. Lámina delgada en luz natural (izquierda) y polarizada (derecha) del granito, se pueden apreciar cristales subeuhedrales de biotita en una matriz de cristales de feldespato subeuhedral y cristales de cuarzo anhedral.

Figura 31. Lámina delgada del pórfido andesítico donde se evidencian los macrocristales de plagioclasa con evidente alteración, en luz natural (izquierda) y en luz polarizada (derecha).

Figura 32. Ouachita-Marathon –Sonora Paleozoico Tardío (representado en el borde azul), se muestran además diversos terrenos de importancia geológica para México, acrecionados a este durante y posterior de la formación del cinturón OMS. Tomado y editado de Sarmiento-Villagrana et al., 2016.

Figura 33. Contexto tectónico de la porción central de Sonora donde se muestra el área correspondiente a la Sierra Martínez, localidad donde ocurre el cabalgamiento del eugeoclinal sobre el miogeoclinal provocado por la orogenia Ouachita-Marathon-Sonora (Stevens et al., 2014).

Figura 34. Fotografía de las localizaciones de los puntos de análisis en las muestras de circones 07FP-133 utilizada durante el fechamiento de la unidad C por el método U-Pb.

Figura 35. Isócrona de los fechamientos con el método U-Pb en circones en la muestra 07FP-133.

Figura 36. Histograma de relación de edades con el número de muestras correspondientes a esa edad.

Figura 37. Mapa de localización de las diversas unidades proterozoicas en el estado de Sonora, donde se muestra la ubicación de la unidad El Águila y también la de la Unidad “C” en el área de estudio, que corresponde a la parte basal de la secuencia siliciclástica-carbonatada metamorfozada. Modificado de Gross et al., 2000.

Figura 38. Espectro de 76 granos de circones detríticos de diferentes áreas de Sonora Central. Las áreas de muestreo se destacan a la derecha. Modificado de Gross et al., 2000.

Figura 39. Correlación estratigráfica de las diferentes localidades en donde se reporta la existencia de secuencias sedimentarias, datadas radiométricamente, entre el Mesoproterozoico y Neoproterozoico, en las que se considera que existen características estratigráficas y litológicas similares a las de la unidad C. Modificado de Stewart et al., 1999 y Gross et al., 2000.

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados de mediciones para la Geocronología U-Pb en circones de las muestras estudiadas.

RESUMEN

En las cercanías de la localidad de Mazatán, al oeste de la Sierra Martínez, Sonora se reportan afloramientos del Neoproterozoico pertenecientes a una secuencia estratigráfica particular.

La estratigrafía del área de estudio consiste en una secuencia metasedimentaria en donde la unidad más vieja de edad neoproterozoica se encuentra representada por una intercalación de rocas calcáreas dolomitizadas a las que se le yuxtapone un importante paquete de rocas esquistosas y cuya sucesión estratigráfica sobrepone una unidad definida por una serie de estratos de cuarcita misma que presenta un carácter conglomerático en las porciones superiores, de donde se obtuvo un estudio geocronológico complementario y que ubica la edad de deposición de dicho cuerpo a periodos más jóvenes que los zircones de 1045 Ma que contiene. Esta litología se encuentra sobreyacida por calizas arenosas ligeramente dolomitizadas y cuarcitas de grano fino siendo ambas de espesores menos prominentes en relación a sus homólogos neoproterozoicos, a estas delgadas capas se les sobrepone una unidad conformada por esquistos de cuarzo y biotita que corresponde a la unidad que prepondera en espesor de entre esta continuidad precámbrica así como por ser la unidad más joven del Proterozoico. Esta secuencia es coronada por un horizonte de cuarcitas correlacionables con la Cuarcita Proveedora del Cámbrico Inferior, y sobre la cual se empieza a depositar la sucesión sedimentaria de la sierra Martínez la cual presenta miembros diferenciados y no diferenciados.

Las rocas que se asignan al Neoproterozoico, hasta hoy en día, no han sido datadas formalmente en esta región de Sonora; sin embargo, en investigaciones realizadas en la localidad de Agua Verde, ubicada al noreste de Sierra Martínez, se reporta la presencia de una litología que consistente en estratos siliciclásticos y carbonatados (areniscas, calizas y dolomías) que han sido metamorfizadas a facies de esquistos verdes y a los que se les asigna una probable edad del Neoproterozoico. Este nivel de rocas metamorfizadas, desde un punto de vista litológico-estratigráfico, presenta características muy similares a lo observado en el área del rancho Palo Blanco.

De acuerdo con esta información radiométrica y las relaciones litoestratigráficas de las secuencias superiores, se interpreta que este conjunto de sedimentos siliciclásticos

carbonatados, afectados por un metamorfismo regional u orogénico, constituye una variante de basamento, sedimentario-metamórfico, sobre el cual se inició la conformación de la potente secuencia miogeoclinal que constituye a la secuencia de la Sierra Martínez, misma que inicia con la deposición de estratos de una unidad de cuarcita, que se interpreta como correlativa con la Formación Proveedora del Cámbrico Inferior.

Por otra parte, para Sonora central se reportan dos paquetes de cuerpos sedimentarios del Paleozoico, el primero de ellos corresponde a secuencias de plataformas carbonatada ó miogeoclinales y el segundo equivale a secuencias asociadas al talud continental o eugeoclinales. El primer paquete se deposita sobre los estratos neoproterozoicos y representan el bloque autóctono mientras que el segundo se encuentra cabalgando a una unidad conformada por sedimentos siliciclásticos y turbidíticos con fósiles derivados de la plataforma, dicha unidad corresponde a la formación Mina México y es de suma importancia para comprender la geología del área de estudio y de la región central de estado.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

Sobre la falda oeste de la Sierra Martínez, es donde se ha definido la presencia de afloramientos del Neoproterozoico y Paleozoico depositados en distintivos y contrastantes ambientes, los primeros se relacionan a una secuencia sedimentaria formada en ambientes de mares epicontinentales, producto de la ruptura de Rodinia en el Neoproterozoico a la que se le yuxtapone estratos de plataformas marinas someras, dicha sobreposición conforma en su conjunto al miogeoclinal cordillerano. Análoga a esta sucesión se registran afloramientos formados en cuencas oceánicas de aguas profundas que componen al eugeoclinal cordillerano, la ocurrencia de esta secuencia evidencia la continuidad de la porción occidental del cratón norteamericano mismo al que pertenecen estos afloramientos de Sonora (Stewart et al., 1984; Stewart et al., 2002).

En una escala regional, se ha trabajado en afloramientos sedimentarios del Proterozoico y Paleozoico, los cuales han sido reportados en varias localidades en el estado de Sonora, México, entidad que geológicamente forma parte actual de la porción suroeste del cratón norteamericano y cuya continuidad estratigráfica corresponde a litologías pertenecientes al supercontinente Rodinia, las cuales fueron formadas anteriormente, durante y posterior al rompimiento de dicho supercontinente en el Neoproterozoico (Li et al., 1999; Meert y Torvisk, 2003; Li et al., 2008), era geológica en la cual se inicia la depositación de lo que se considera un basamento sedimentario siliciclástico y carbonatado en un ambiente de sedimentación epicontinental, mismo que actualmente se encuentra metamorfizado. Sobre dicho basamento se depositan los potentes sedimentos que conforman a la plataforma marina paleozoica, principalmente carbonatada y en menor proporción siliciclástica, constituyentes de lo que algunos autores denominan Serie Martínez (Montijo-González y Terán-Ortega, 1988), cuyo afloramiento se da en la sierra de dicho nombre, y la cual presenta características que se asemejan a la de otras localidades de Sonora central y oriental como es el caso del área del C. Cobachi, Sierra Agua Verde, Rancho San Marcos entre otras.

Sin embargo las actuales relaciones litológicas, estratigráficas y estructurales en ambas secuencias, observadas a nivel de un conjunto de afloramientos, han permitido proponer una serie de mecanismos y eventos para explicar la evolución tectónica y la geología histórica que debieron de haberse desarrollado en esta porción de Sonora central. Iniciando primeramente con la deposición de los sedimentos más antiguos, representados por una alternancia de estratos siliciclásticos y carbonatados neoproterozoicos que posteriormente fueron sometidos a un metamorfismo regional producto de la presión ejercida por la potente secuencia de la plataforma carbonatada, la cual cuenta con un registro de edades desde el Cámbrico-Ordovícico hasta el Pérmico Inferior, cuya sobreposición estratigráfica evidencia un hiato que abarca del Silúrico al Devónico Superior en dicha zona (Montijo-González y Terán-Ortega, 1988), sin embargo existe la posibilidad de que los estratos correspondientes al Silúrico-Devónico no hayan sido identificados como ha sucedido en años anteriores, en donde ha sido reportado y documentado su presencia en secuencias litológicas similares que afloran en los alrededores de la ciudad de Hermosillo, como es el caso de la localidad del rancho Placeritos (Poole y Amaya-Martínez, 2000).

La deposición epicontinental del Neoproterozoico se encuentra evidenciada en la porción central y centro-oriental del estado (Stewart et al., 1999; Hernández-Gracia, 2011); donde dicha sucesión se encuentra yuxtapuesta por los sedimentos de plataforma carbonatada que conforman el miogeoclinal cordillerano o secuencia paleozoica autóctona, a la que se le sobrepone una unidad denominada como formación Mina México, formada en cuencas de tipo *foredeep* desarrolladas por el amalgamiento de Pangea. Dicho evento se evidencia por una serie de fallas de bajo ángulo producto de la cabalgadura de los sedimentos relacionados a aguas profundas (eugeoclinal o cuenca oceánica) con rangos de edad que abarcan desde el Ordovícico Temprano hasta el Paleozoico tardío, los cuales fueron transportados sobre la formación Mina México y la secuencia miogeoclinal en el ambiente compresivo durante el choque de Laurentia y Gondwana (Stewart et al., 2002) y cuyas litologías son representadas por estratos de lutita, pedernal, areniscas de grano fino y en menor proporción delgados niveles de caliza, caracterizados por contener cuerpos de barita.

El actual modelo que expone la orogenia *OMS* se basa en una gran cantidad de relaciones estratigráficas y estructurales regionales que confirman en primer lugar, la continuidad de dicho cinturón orogénico, que inicia en Arkansas, continuando por Oklahoma y Texas USA, para posteriormente aflorar en Chihuahua y finalizar en Sonora central, mostrando similitudes en su evolución tectónica y estructurales, aunque evidencias estratigráficas muestran que dicho evento se llevó a cabo en tiempos geológicos diferentes, más antiguos en el oriente (Ouachita) y más jóvenes hacia el poniente (Sonora), (Poole et al., 2005).

El sistema orogénico *OMS*, representado por un cinturón de rocas paleozoicas deformadas, se manifiesta sobre una extensión de 3000 km de largo el cual bordea la margen sureste del cratón de Laurentia “Norteamérica” (Poole et al., 2005). Este sistema orogénico es producto de un evento de colisión-subducción en el Paleozoico Tardío, resultado del cierre del Océano Rheico y donde dicha porción de Laurentia se subdujo bajo el arco volcánico de Gondwana, dando como resultado la formación de cuencas de tipo *foredeep* sobre la plataforma carbonatada a consecuencia de las flexiones generadas por los efectos del choque entre Laurentia y Gondwana. En estas cuencas *foredeep* es en donde se efectúa la deposición de los sedimentos siliciclásticos que definen a la formación Mina México, de edad Pérmico Inferior-Medio, catalogada como una secuencia turbidítica, tipo *flysch*, constituida por una alternancia de estratos de arenisca de grano fino a muy fino, con niveles de turbiditas calcáreas y en ocasiones *grainstone* bioclásticos que se caracterizan por contener abundantes fósiles (crinoides, briozoarios, fusulínidos, etc.), todos ellos transportados desde la plataforma carbonatada.

Toda la información generada durante la realización de un conjunto de investigaciones detalladas en las últimas décadas, cuyo objetivo principal se enfocó a las rocas sedimentarias del Paleozoico, sirvió de fundamento para proponer la interpretación de que a consecuencia del empuje y choque del continente Gondwana, en contra de Laurentia, las secuencias depositadas en las cuencas marinas profundas (eugeoclinal), que conforman también parte del continente de Laurentia, sufrieran un transporte tectónico, a manera de cabalgaduras o grandes “napas”, sobre los sedimentos del Pérmico Inferior de la plataforma carbonatada (miogeoclinal). Esta estructura se considera como una falla de bajo ángulo

desarrollada en el margen continental de Laurencia y que propició el cabalgamiento de las rocas eugeoclinales sobre el miogeoclinal. (Poole y Amaya-Martínez, 2000; Stewart et al., 2002)

Sin embargo, a raíz de la obtención de nueva información, producto de estudios estratigráficos y estructurales a detalle, complementada con importantes y significativas relaciones de campo; así como también determinaciones paleontológicas de macro y microfósiles en las secuencias paleozoicas, sirvió todo esto como fundamento para proponer una reinterpretación en la cual se acepta y confirma que el transporte tectónico de las secuencias de cuenca profunda se efectúa, tal como había sido propuesto anteriormente, pero no sobre los estratos carbonatados de la plataforma, si no sobre los sedimentos siliciclásticos de la formación Mina México, una vez que previamente estos ya habían sido depositados en las cuencas foredeep, que se generaron sobre los estratos del Pérmico Inferior a causa de la orogenia *OMS* (Poole et al., 2005).

1.2. Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo, se enlistan a continuación:

1. Delimitar un área con una extensión de alrededor de 9 km² considerada como área de estudio, en esta se presentan los afloramientos que sirven para establecer una relación entre las interpretaciones realizadas a partir de la información obtenida en campo y de la información bibliográfica.
2. Definir las unidades litológicas y estratigráficas del área de estudio, detallar sus principales características petrográficas – estructurales y situarlas en su correspondiente lugar dentro del marco geológico regional.
3. Realizar la cartografía geológica del área de estudio y definir su correspondiente columna estratigráfica, estableciendo la interrelación entre las diferentes unidades litológicas aflorantes tanto a escala local (1:25,000) como regional (1:100,000).
4. Realizar un análisis estratigráfico y estructural de las unidades con el fin de determinar los procesos de depositación de los sedimentos y su posterior deformación.

5. Realizar un análisis petrográfico con el fin de determinar las facies metamórficas de las principales unidades que conforman y caracterizan a la secuencia, siliciclástica y carbonatada metamorfozada, del Neoproterozoico.
6. Estimar la edad de depositación y deformación de dichas unidades estratigráficas a partir de la integración de información geocronológica mediante la realización de estudios de circones, utilizando el método de U-Pb.

1.3 Metodología

Durante la realización de este trabajo, como primera etapa en las actividades programadas, se procedió a efectuar una recopilación bibliográfica de toda la información existente, tanto en el área de estudio, como en localidades cercanas, que ha sido generada en los últimos 30 años, correspondiente a un conjunto de investigaciones, reportes y publicaciones científicas, la gran mayoría de ellos relacionados con estudios de detalle de las rocas paleozoicas.

Posteriormente y con base a toda esta información compilada, se efectuó la elaboración de un plano geológico base, escala 1:25,000, en el cual se incluyó toda la información litológica, estratigráfica, estructural y paleontológica, que por sí mismas representan las características generales y de detalle de los diferentes afloramientos visitados, muestreados y estudiados.

De manera complementaria, se utilizaron imágenes satelitales que cubren en su totalidad a la carta topográfica 1:50,000 de INEGI, Hoja Rebeico, con clave H12-D54, a la cual se le agregó la información contenida en la carta geológico-minera, con la misma escala y clave, elaborada por parte del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

El análisis e integración de toda esta información permitió la selección de un cierto número de localidades, significativas y estratégicas, a nivel de un conjunto de afloramientos, que facilitó el trazo de líneas de sección, sobre las cuales se realizarían caminamientos y levantamiento a detalle, con el objetivo de que la información obtenida permitiera la elaboración de columnas estratigráficas y por otra parte, la delimitación de todas las estructuras geológicas y contactos entre las principales unidades litológicas que se

ubicar dentro del área de estudio. Se consideró además la alternativa de que estos recorridos permitieran localizar áreas adicionales de interés que pudieran aportar una información complementaria sobre algunos aspectos específicos relacionados con las rocas del Neoproterozoico y Paleozoico.

Se realizó un trabajo de campo con la finalidad de detallar las características particulares de cada una de las unidades litológicas aflorantes, en una escala 1:10000 y al mismo tiempo, obtener un número considerable de muestras de mano representativas de las unidades litológicas, con el objetivo de elaborar láminas delgadas. Durante cada una de las visitas programadas al área de estudio se efectuaron varios caminamientos, sobre líneas de sección previamente trazadas.

Para la elaboración de esta tesis de licenciatura, se tuvo acceso y se permitió la utilización de la información radiométrica de una muestra obtenida en el año 2008 por Poole y Amaya-Martínez, en donde los cristales de circón fueron procesados, mediante el método U-Pb, para la determinación de la edad de depositación de los sedimentos que conforman la parte inferior a la secuencia del miogeoclinal. Los cristales de circón obtenidos en este nivel muestreado corresponden principalmente a una intercalación de niveles siliciclásticos y en menor proporción carbonatados.

1.4 Localización y vías de acceso

El área de estudio se localiza en la porción central del estado de Sonora, México, a 20 km hacia el este del poblado de Mazatán. El área está comprendido por las siguientes coordenadas: 603000 E 3207000 N y 605000 E 3205000 N (Figura 1). Sin embargo el área generalizada a escala regional contempla información de la Sierra Martínez y del norte del Cerro Las Rastras. El acceso principal es utilizando la carretera federal pavimentada No. 20, partiendo de Hermosillo en el kilómetro 95, el cual se encuentra pasando el poblado de Mazatán y se ubica precisamente en la planta de beneficio La Barita de Sonora, en este punto se toma un camino de terracería en dirección norte por un total de 9 kilómetros de terracería hasta llegar al rancho Palo Blanco.

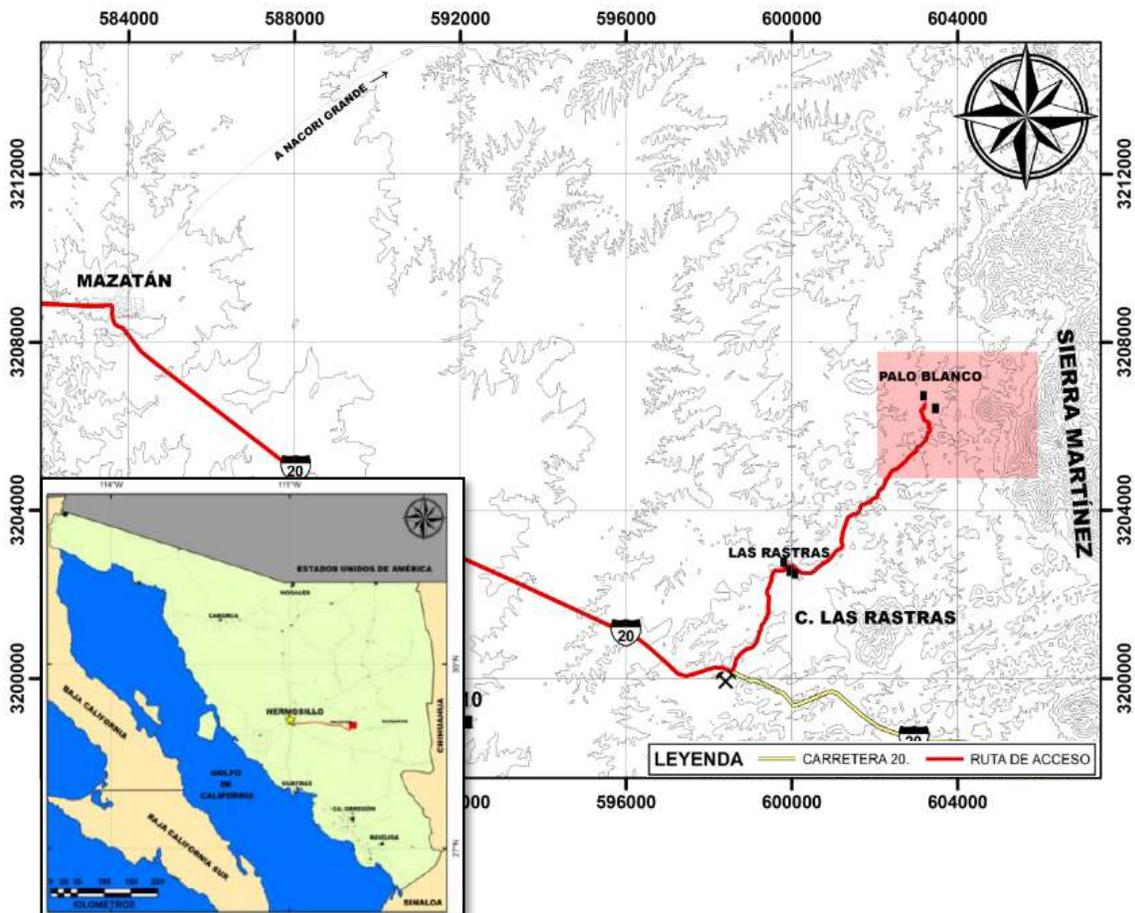


Figura 1. Localización del área de estudio

1.5 Fisiografía, orografía e hidrografía

1.5.1 Fisiografía

De acuerdo con la información obtenida en la carta fisiográfica de INEGI 1:1,000,000 el área de estudio queda comprendida dentro de la subprovincia de Sierras y Valles del Norte limitando hacia el oeste con la subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses (Figura 2), pertenecientes a la provincia Sierra Madre Occidental (SMO) y a la provincia de llanura sonorenses. La subprovincia de Sierras y Valles del Norte se caracteriza por presentar un conjunto de sierras alargadas con una dirección preferencial NW-SE y N-S con rangos de altura de 200 a 1400 msnm. Estas sierras se encuentran limitadas por una serie de lomeríos y valles angostos, los cuales se extienden hacia la costa, estos relieves fueron producidos principalmente por una elevación propiciada por la acreción del arco volcánico Cenozoico.

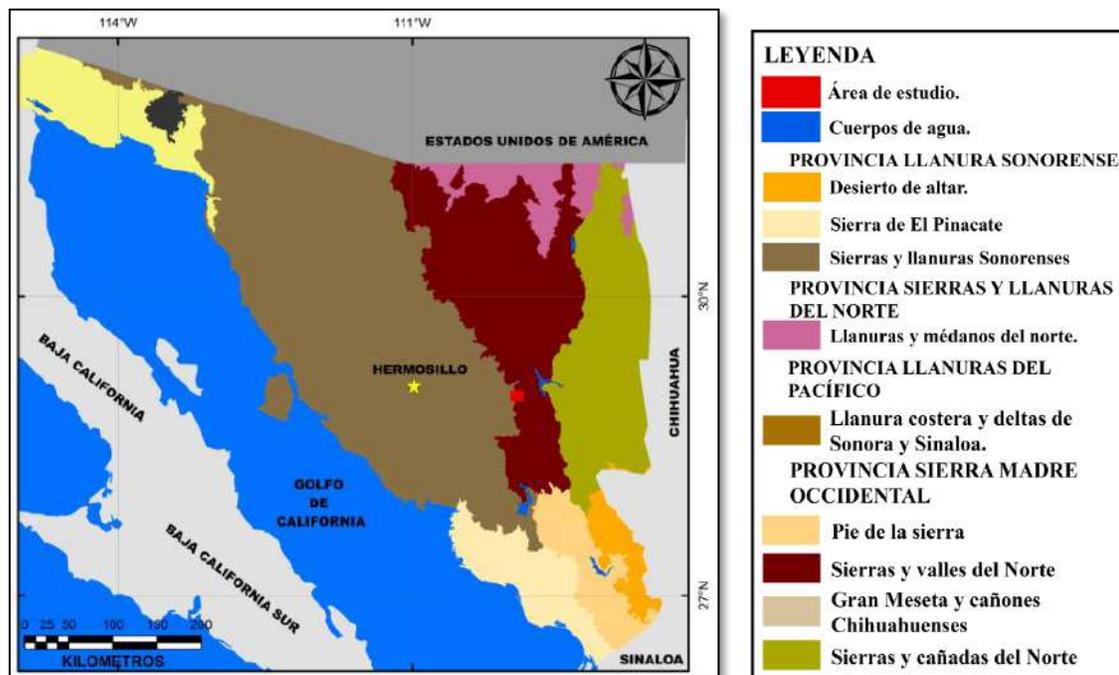


Figura 2. Provincias y subprovincias fisiográficas (modificado de Subprovincias Fisiográficas de INEGI 1: 1,000,000).

1.5.2 Orografía

La orografía del área se encuentra representada principalmente por bloques pertenecientes a la secuencia paleozoica sedimentaria de plataforma, en donde los cuerpos más representativos dentro del área de estudio son la Sierra Martínez con una elevación que llega a rebasar los 1200 msnm, esta presenta una forma alargada y una orientación norte sur, cuyas características la clasifican como sierra alta según el sistema de topoformas de INEGI 1:1,000,000; por otra parte el cerro Las Rastras corresponde a una sierra baja con una altitud de 900 msnm y finalmente el cerro El Novillo se eleva decenas de metros en relación al terreno circundante compuesto principalmente de suelos volcánicos. Los cuerpos intrusivos, de composición félsica e intermedia, afloran principalmente en las partes bajas formando lomeríos y por lo general, presentan los efectos variables de alteración, tanto hidrotermal como intemperismo. A una escala más amplia, los valles se encuentran rellenos por el material detrítico proveniente de las unidades litológicas adyacentes y de topografía elevada, formando depósitos de arenas y gravas consolidadas que constituyen a la Formación Báucarit y depósitos similares no-consolidados de gravas y arenas en planicies aluviales y sobre los lechos de los arroyos (Figura 3).

1.5.3 Hidrografía

Dentro del área de estudio existen varios arroyos efímeros e intermitentes cuyo nacimiento se inicia en las porciones de mayor altura de la Sierra Martínez, misma que forma el parteaguas que delimita a la cuenca del río Mátape, con la del río Yaqui. En esta zona el patrón de drenaje desarrolla un sistema paralelo a subparalelo y conforme descende la topografía, adquiere una tendencia generalmente dendrítica, delineando en su conjunto un carácter ligeramente indefinido y desordenado, sobre todo en zonas alejadas a los altos topográficos (Figura 4), debido en gran parte al depósito de material poco consolidado que al ser arrastrado se acumula en forma elongada produciendo nuevas escurrantías de escasos metros de altitud.

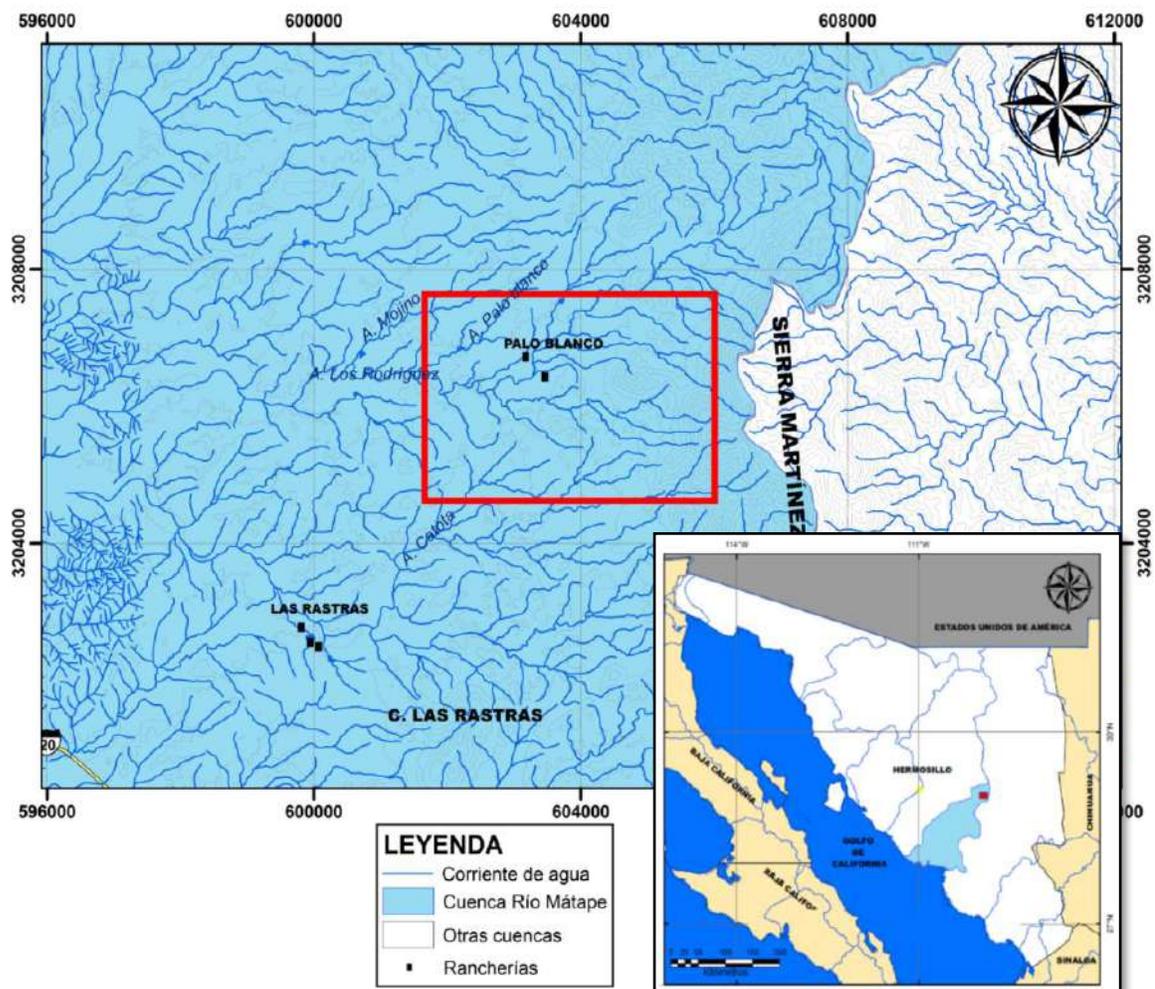


Figura 4. Cuencas hidrográficas del estado y del área de estudio, así como los principales arroyos de la zona.

Dentro del área de estudio se identifican tres arroyos principales, siendo el arroyo Los Rodríguez el de mayor capacidad y el cual presenta un drenaje principalmente dendrítico, a este se le suma el arroyo Palo Blanco desde el norte y mismo que es paralelo al arroyo Mojino. Por otra parte, el arroyo La Catota fluye de norte a sur, rumbo al rancho Las Rastras, con un patrón de drenaje desordenado y poco definido.

1.6 Antecedentes

Anderson y Silver (1981), en su artículo *An Overview of Precambrian Rocks*, reportan que en las porciones cercanas a Caborca, afloran esquistos y gneises cuarzofeldespáticos de más de 1700 Ma, mientras que para el noreste de Sonora, afloran estratos eugeoclinales que corresponden a un cinturón más joven que fue plegado y metamorfozado hace unos 1650 Ma; así como también una gran cantidad de cuerpos plutónicos de 1400 Ma los cuales son cortados por granitos micrográficos de 1100 Ma, teniendo estas un límite discordante con una secuencia miogeoclinal constituida por estratos de areniscas cuarcíticas, rocas carbonatadas con estromatolitos y lutitas, cubiertas transicionalmente por una secuencia fosilífera del Cámbrico inferior. Dicho basamento precámbrico se encuentra cortado hacia el este y hacia el sur por lo que los autores sugieren rasgos tectónicos más jóvenes.

Montijo y Terán (1988), en su tesis de licenciatura, los autores describen los afloramientos paleozoicos de la sierra Martínez y el cerro Las Rastras, para su tiempo los autores reconocen al menos dos ambientes diferentes de génesis de las secuencias sedimentarias; al primero de ellos sugieren informalmente el nombre de Serie Martínez, el cual define una potente secuencia calco-arenosa, en cuya descripción se cita bibliografía que le asigna a la base una posible edad Cámbrica, la continuidad de esta vendría a representar la secuencia de plataforma. En contraposición a lo anterior, se define otro ambiente sedimentario, por lo que los autores asignan los nombres de Serie Santa Bárbara y Serie Mazatán para definir dos paquetes rocosos representados por una secuencia clástico-carbonatada y otra calcáreo-arenosa respectivamente, las cuales representan al Paleozoico

de cuenca mismo que se sugiere fue sobre puesta por un cabalgamiento sobre la Serie Martínez en el Pérmico Inferior.

Gehrels y Stewart (1998), en el artículo titulado *Detritial zircon U-Pb geochronology of Cambrian to Triassic miogeoclinal and eugeoclinal strata in Sonora, Mexico* documentan que en la sierra Agua Verde (32 km al noreste del área de estudio), aflora un potente paquete de estratos correspondiente al miogeoclinal cordillerano, con un espesor estimado de 3,700 metros, reportando la presencia de estratos del Neoproterozoico (?) hacia la base de la secuencia, representados por estratos siliciclásticos, con intercalaciones de material carbonatado, que han sido metamorfizados a esquistos. Sobre esta unidad metamórfica se depositan, de manera gradual los sedimentos que conforman parte de la secuencia de plataforma carbonatada (miogeoclinal), con rangos de edad del Cámbrico superior y posiblemente inferior y medio, Ordovícico Superior, Devónico Superior, Misisípico y Pensilvánico inferior y medio. Aunque no se especifica ni se detallan las características de la unidad del Neoproterozoico, se considera que esta secuencia presenta rasgos litológicos y estratigráficos muy similares a lo que se observa en esta área de estudio, motivo de esta tesis, ubicada en el flanco oeste de la Sierra Martínez.

Stewart et al., (1999), en un artículo para la *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, documentan que en la sierra Agua Verde, ubicada al noreste del área de estudio, existe una secuencia de 3700 metros de espesor donde el miembro inferior corresponde a centenares de metros de una intercalación de unidad metamórfizadas, de las que destacan calizas y dolomías, rocas arenáceas conglomeráticas así como una cubierta de rocas cuarcitas laminadas con un gran contenido de micas; los autores concluyen que esta secuencia debería pertenecer a estratos neoproterozoicos debido a la cobertura del Cámbrico inferior que presentan, misma a la que se correlaciona con una cuarcita de la Formación Provedora. Sobre los espesores reales se desconoce debido a la complejidad de los afloramientos y a la escases de los mismos. Otro dato interesante que se menciona es que la secuencia proterozoica se caracteriza por tener una coloración amarilla grisácea a naranja pálido y ligeramente rojiza en ciertas zonas, esta área es la que presenta mayor similitud al área de estudio, aunque se desconocen edades absolutas de estos estratos, tanto

en la Sierra Martínez como en la Sierra Agua Verde se distinguen de otra unidad suprayacente del Cámbrico inferior cuyo contenido faunístico apoya la edad estimada.

Gross et al., (2000), en un artículo para la revista *Geofísica Internacional* hacen un estudio acerca de circones, obtenidos en estratos que varían en edad, desde el Mesoproterozoico y/o Neoproterozoico al Cámbrico medio, con el objetivo de determinar las edades de depósito y al mismo tiempo, definir las edades fuente de la Formación El Álamo, Grupo El Águila y la Cuarcita Bolsa del Cámbrico. La primera unidad aflora a 75 km hacia el noreste de Hermosillo y 4 km hacia el sureste de Cerro de Oro y es descrita como un conjunto de estratos de cuarcita, de 770 metros de espesor y edades que van de 1112 a 1218 Ma. Por su parte, la Unidad El Águila aflora aproximadamente a 50 km hacia el noreste de Hermosillo y 20 km hacia el sur de Cerro de Oro, esta corresponde a una cuarcita de 385 metros de espesor y edades que van de 1057 a 1189 Ma. Finalmente, la Cuarcita Bolsa aflora aproximadamente a 3 km hacia el suroeste de la localidad de Bacoachi y a 55 km hacia el sureste de la ciudad de Cananea, y se representa por una delgada unidad constituida por estratos siliciclásticos y cuarcita con niveles de conglomerado cerca de la base y cuarzoarenisca con pizarras en la cima, con un espesor menor a 200 metros y una edad de 525 Ma, que generalmente yace discordante sobre un basamento granítico del Precámbrico.

Poole y Amaya-Martínez (2000), en un estudio en los alrededores de la planta de beneficio “La Barita de Sonora”, realizan un detallado reconocimiento de las rocas asociadas a aguas profundas de las que destacan estratos pre-orogénicos (del Ordovícico al Misisípico inferior) y estratos sin-orogénicos (del Misisípico superior al Pérmico inferior); esta relación estratigráfica se le atribuye al desarrollo del cinturón orogénico **OMS** mismo que se extiende 3000 km desde Mississippi hasta el golfo de California finalizando su formación en el Pérmico superior en el área de Sonora. Dicho cinturón se desarrolló por la obducción de la recién mencionada sucesión eugeoclinal sobre la plataforma carbonatada (miogeoclinal), en esta área la porción eugeoclinal se encuentra discordante cabalgando al miogeoclinal cordillerano y sobre los que se depositó una entidad geológica asociada a aguas profundas denominada como formación Mina México en el Cerro Las Rastras y la Sierra Martínez.

Stewart et al., (2002), en el artículo titulado *Neoproterozoic and Cambrian strata in Sonora, Mexico: Rodinian supercontinent to Laurentian Cordilleran margin*, hacen referencia a cuatro diferentes esquemas y litologías, que se relacionan con la evolución entre los continentes de Rodinia y Laurencia, en donde las secuencias más antiguas corresponden a fragmentos del supercontinente Rodinia y se encuentra definido por los Grupos El Águila y Las Víboras, con rangos de edad de 1000 Ma, posterior a dichas unidades aflora una unidad en las inmediaciones de Sahuaripa que corresponde a depósitos glaciales, diamictitas de 760 Ma referido como Grupo Cerro Las Bolas. Otra unidad diferente a estas son las que se forman sobre Laurencia posterior a la ruptura de Rodinia cuyos afloramientos ocurren en el límite neoproterozoico – Cámbrico y finalmente la cubierta cratonal del Cámbrico medio y superior corresponden al miogeoclinal cordillerano.

Stewart y Poole (2002), en su trabajo *Inventory of Neoproterozoic and Paleozoic strata in Sonora Mexico* elaboran una completa y detallada recopilación de información relacionada con un conjunto de localidades en donde se han reportado la presencia de dichos estratos. En este documento mencionan afloramientos de una unidad neoproterozoica en la base de la sierra Agua Verde; así como también una sucesión de estratos de esquisto y cuarcita en la loma La Bellotita al norte de Mátape, mientras que, al este de dicha localidad, en la sierra El Carrizo, reportan parte de la secuencia del Paleozoico alóctono, misma que presenta miembros similares a los de la Sierra Martínez. Por otra parte, al este del poblado de San José de Gracia, afloran unidades del Cámbrico inferior y medio en el cerro El Chihuarrita, que es una secuencia muy similar a la que aflora al norte de Hermosillo, en el cerro La Caridad; mientras que, al norte de San José de Gracia, en el cerro El Sahuaral, aflora la misma cuarcita de las dos últimas localidades (sierra Agua Verde y sierra El Carrizo).

Poole et al., (2005), en un artículo publicado en *The Geological Society of America*, mencionan la presencia de un conjunto de unidades neoproterozoicas y del Cámbrico inferior depositadas en cuencas formadas por la ruptura del supercontinente Rodinia, en la porción sur de Laurencia. Interpretan que estos estratos funcionaron como un basamento sedimentario metamorfizado sobre el cual se depositaron los sedimentos de la plataforma silico-carbonatada a partir del Cámbrico medio hasta el Misisípico temprano,

período en el que se inició un proceso de subducción debajo de Gondwana (Sudamérica) y que se desplazó tectónicamente hacia el norte, en dirección a Laurencia, dando como resultado una serie de fallas de bajo ángulo, definiendo un rasgo estructural favorable que propiciaron que los estratos del paleozoico de cuenca cabalgaran sobre la plataforma. Sin embargo, proponen una reinterpretación que consiste básicamente en considerar que previo a que se efectuara este cabalgamiento, ya se habían desarrollado las cuencas de tipo *foredeep* y *foreland*, sobre las que se depositaron los sedimentos que definen y caracterizan a la formación Mina México de edad Pérmico inferior-medio, que corresponde a la unidad sobre la que produce el transporte tectónico del paleozoico de cuenca.

Molina-Garza e Iriondo (2005), en un artículo sostienen que para el terreno Caborca (compuesto de la secuencia miogeoclinal) no es necesario el aceptar haberse producido el gran desplazamiento de centenares de kilómetros para explicar la geología y estratigrafía de Sonora. Se argumenta que, en el área de La Barita de Sonora, Cerro Cobachi, Sierra el Aliso y Sierra el Encinal, aflora una sucesión de estratos de facies de aguas profundas (eugeoclinal), cuya base no aflora siendo los estratos ordovícicos los más antiguos de esas áreas. Estos estratos conforman una secuencia de unos 700 metros de espesor que cabalgan a las rocas pérmicas del miogeoclinal cordillerano, formando el “*Paleozoico alóctono de Sonora*”, mismo que es cubierto discordante por sedimentos fluviales, representados por una alternancia de estratos de arenisca, conglomerado y lutita carbonosas, que fueron depositados en ambientes deltaicos y transicional con aguas marinas y que conjuntamente definen al Grupo Barranca, que indican una edad desde el Triásico hasta el Jurásico.

Castillón-González (2009), en su trabajo de tesis cuya área de estudio se desarrolla al noreste de Hermosillo, la autora reporta una secuencia de aproximadamente 460 metros de espesor compuesta principalmente por *hornfels*, dolomías y cuarcitas de grano grueso, las cuales son atribuidas al Grupo El Águila del Neoproterozoico. Primeramente, se describe una dolomía en la porción basal de 76 metros de espesor a la que se le yuxtapone una sucesión de 385 metros conformada por una cuarcita posiblemente conglomerática, meta-caliza conglomerática y dolomía. Posteriormente se reporta una secuencia paleozoica correlacionable al Grupo San José de edad cámbrica, misma que se

encuentra en contacto por falla con la secuencia proterozoica y en cuya base aflora la Cuarcita Provedora del Cámbrico inferior.

Hernández-Gracia (2011), En su tesis de licenciatura, el autor hace un estudio de las secuencias paleozoicas en la región de la mina La Barita de Sonora, ubicada 15 km al este de Mazatán, donde menciona que afloran rocas de plataforma y de cuenca, que van del Precámbrico hasta el Holoceno. Hace referencia al dominio de rocas carbonatadas asociadas a talud continental, donde las unidades reportadas más antiguas han sido estratos delgados de esquisto y cuarcita de grano medio a grueso dispuestos en la base de la columna, es decir, representa la porción sobre la que se depositaron las secuencias miogeoclinales, misma que se encuentra dominada por calizas masivas fosilíferas, cuarcitas y areniscas de cuarzo, que van del Cámbrico al Pérmico.

Cuen-Romero (2013), En su tesis de maestría realiza un estudio bioestratigráfico en rocas del Cámbrico en las inmediaciones de San José de Gracia, Sonora, cuyo trabajo correlaciona la Formación Puerto Blanco con un espesor de 281 metros que presentan una litología de lutitas, unidad que, en la zona basal presenta abundante fauna del Cámbrico Inferior y subsecuente a esta, aflora en la parte inferior-media, una intercalación de caliza y areniscas y por último en la parte media – superior se tiene un afloramiento de lutita y caliza marmolizada presentando bioturbación que le brinda un aspecto moteado. Concordante a esta unidad se encuentra la Cuarcita Provedora, representada por un paquete de cuarcitas muy puras, de color blanco en la parte basal, con espesores de hasta 260 metros en su localidad tipo, que se ubica en el cerro La Provedora, en Caborca. Esta cuarcita se correlaciona a su vez con estratos similares reportados en la sierra Agua Verde, al noroeste de San Pedro de la Cueva.

Ochoa-Contreras (2014), en su tesis de licenciatura, reporta estratos de dolomías con espesores de tres a cinco metros, mismas que presentan un evidente contenido fosilífero del que destacan especímenes estromatolíticos cuya ocurrencia caracteriza a la unidad litológica denominada como Grupo El Águila, la cual manifiesta edades absolutas de entre 1057 y 760 Ma (Mesoproterozoico-Neoproterozoico); estos estratos proterozoicos se encuentran cabalgando formaciones atribuidas al Cámbrico del que destaca la Cuarcita

Provedora, misma que presenta un espesor de 216 metros en estratos rojizos oscurecidos en la porción basal y tonalidades rosadas blanquecidas en la cima, se aprecia además que el tamaño de grano va de fino a muy fino y el contenido paleontológico está representado por icnofósiles.

CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

En este capítulo se describirá el contexto geológico de las zonas aledañas a los afloramientos del Proterozoico en el rancho Palo Blanco, considerando las áreas de la Sierra Martínez, Cerro Las Rastras y el área de la planta de beneficio de mina La Barita de Sonora, con la finalidad de mostrar un plano geológico (Figura 5), su columna estratigráfica (Figura 6) y secciones longitudinales de las zonas mencionadas anteriormente a una escala regional (Figura 7), los cuales se encuentran conformados por el compendio de la información bibliográfica de diversos autores de la última década, así como la adición de información recopilada en el presente trabajo.

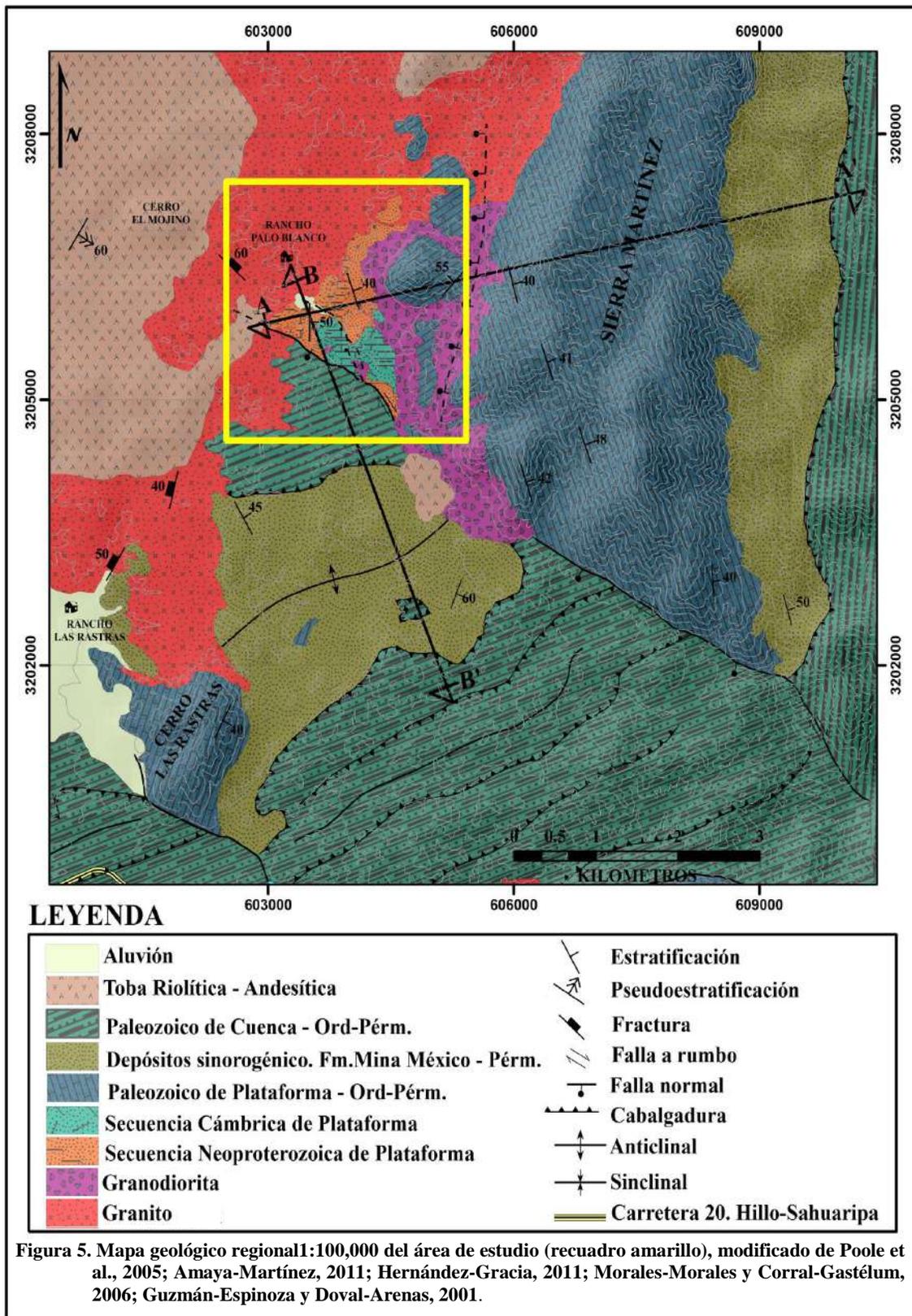
El basamento del miogeoclinal cordillerano, se encuentra aflorando al oeste de la Sierra Martínez, el cual es representado por cuerpos del Neoproterozoico descritos en el presente trabajo, donde se puntualiza una serie de unidades meta-sedimentarias mostradas en el área de estudio, las cuales son representadas por escasos afloramientos precámbricos pero que a su vez brindan características de gran importancia para la estratigrafía proterozoica reportada en Sonora; tal como se puede ver en el apartado **“2.2 Unidades neoproterozoicas en Sonora”** donde se hace una denotación del basamento en relación a los diferentes conjuntos litológicos contemplados para la geología de esta zona (Poole y Stewart, 2002).

Para Sonora Central se han identificado diversas secuencias similares a los estratos precámbricos y cámbricos tratados en el presente trabajo, sin embargo los afloramientos de área de estudio han sido mencionados de forma general en un trabajo, el cual se basa en una caracterización del área de la sierra Martínez y sus relaciones con la formación Mina México (Hernández-Gracia, 2011), no obstante al noreste de San José de Gracia y unos 20 km al sur de Cerro de Oro, se reporta una secuencia del Neoproterozoico de más de 460 metros de rocas del Grupo El Águila, las cuales corresponden a dolomías en cuyo contacto superior se presentan cuarcitas conglomeráticas y otras unidades dolomíticas de diferente espesor (Castillón-González, 2009).

Al noroeste del poblado de Mazatán se reporta otra secuencia que podría relacionarse al basamento sobre el que descansarían los estratos descritos en el presente trabajo, para esta localidad llamada Sierra de Mazatán ubicada 20 km al noroeste de la Sierra Martínez, afloran secuencias cuya distinción está dada por un conjunto de rocas meta-sedimentarias sometidas a facies de los esquistos verdes, conjunto que aparece en forma de xenolitos en un granito aluminoso porfídico de 1475 Ma (Vega-Granillo, 1996), estas rocas podrían representar unidades sobre las que posiblemente se depositó la secuencia sedimentaria epicontinental y del miogeoclinal cordillerano Neoproterozoico y a su vez los más de 6000 metros de espesor de la secuencia Paleozoica (Molina e Iriando, 2005).

Por otra parte, cabe destacar que 32 km al noreste del área de estudio aflora una secuencia en la Sierra Agua Verde, los afloramientos aquí presentes describen una sucesión generalmente de centenares de metros de calizas y dolomías con tonalidades de amarillo pálido a amarillo grisáceo así como cuarcitas de grano fino con una coloración similar a la anterior, además se reporta una unidad conglomerática con clastos de hasta 8 mm cuya coloración presenta tonalidades café amarillentas; esta sucesión se encuentra sobrepuesta por 80 metros de una cuarcita laminada con un gran contenido de minerales micáceos y fósiles del Cámbrico inferior, concluyendo que las rocas descritas son anteriores al Paleozoico (Stewart et al., 1999).

Al noreste del poblado de Mátape, en la Loma La Bellotita aflora una secuencia de más de 800 metros de espesor, de los cuales en la parte inferior de dicha sucesión, corresponden a cientos de metros de esquisto y cuarcita, los cuales son cubiertos por aproximadamente 70 metros de cuarcita de grano fino a muy grueso con clastos de hasta 1 mm. La sección superior está compuesta por mármoles y *hornfels* cuya estratificación no se encuentra bien definida la cual es interrumpida por una falla de bajo ángulo y pone en contacto la unidad con una caliza no-metamorfizada con restos de pelmatozoarios. Se sugiere que la porción inferior podría tener relación con el Grupo El Águila, mientras que los mármoles y calizas podrían equivaler al Paleozoico (Stewart et al., 2002).



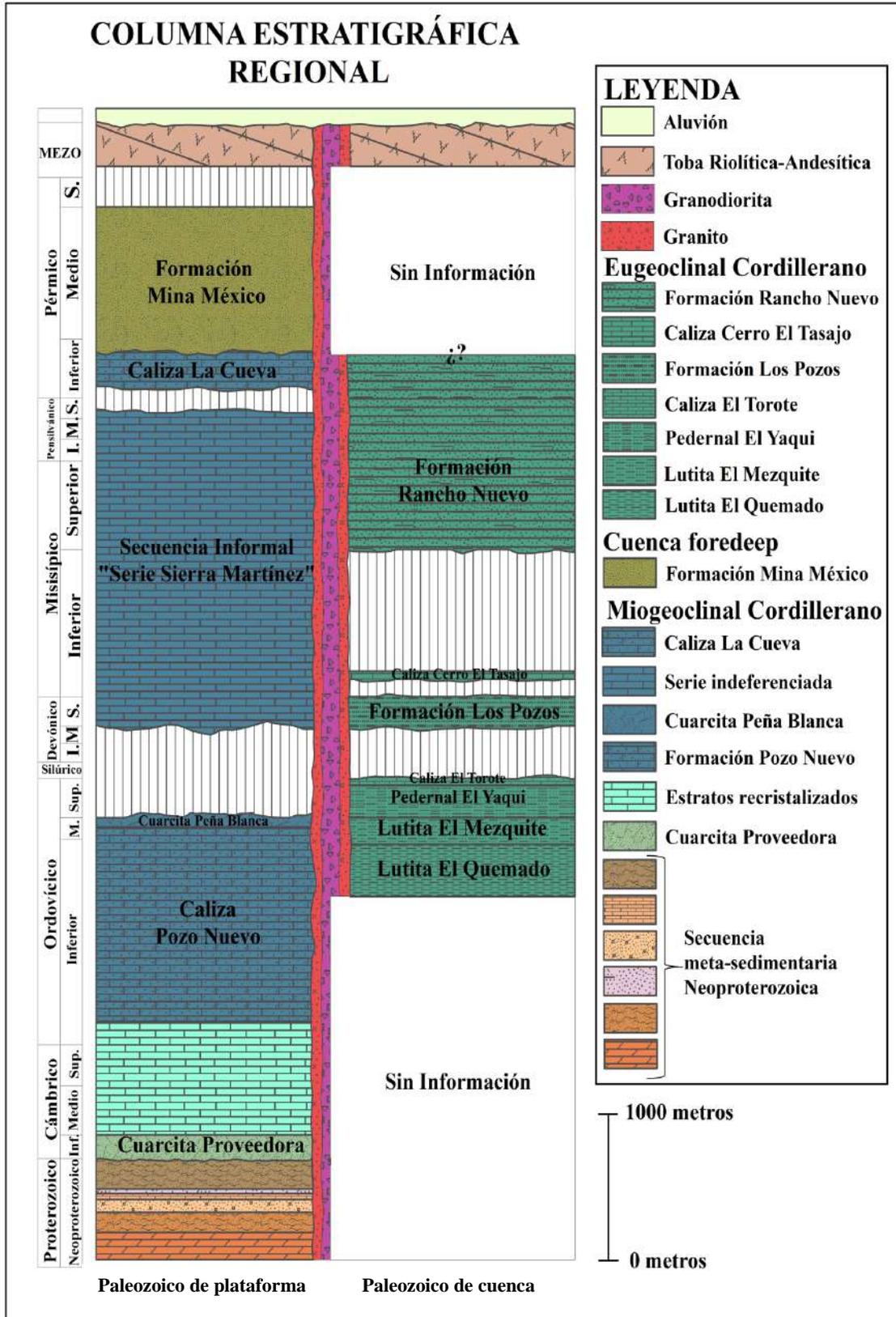


Figura 6. Columna compuesta de la geología regional que abarca al área de estudio.

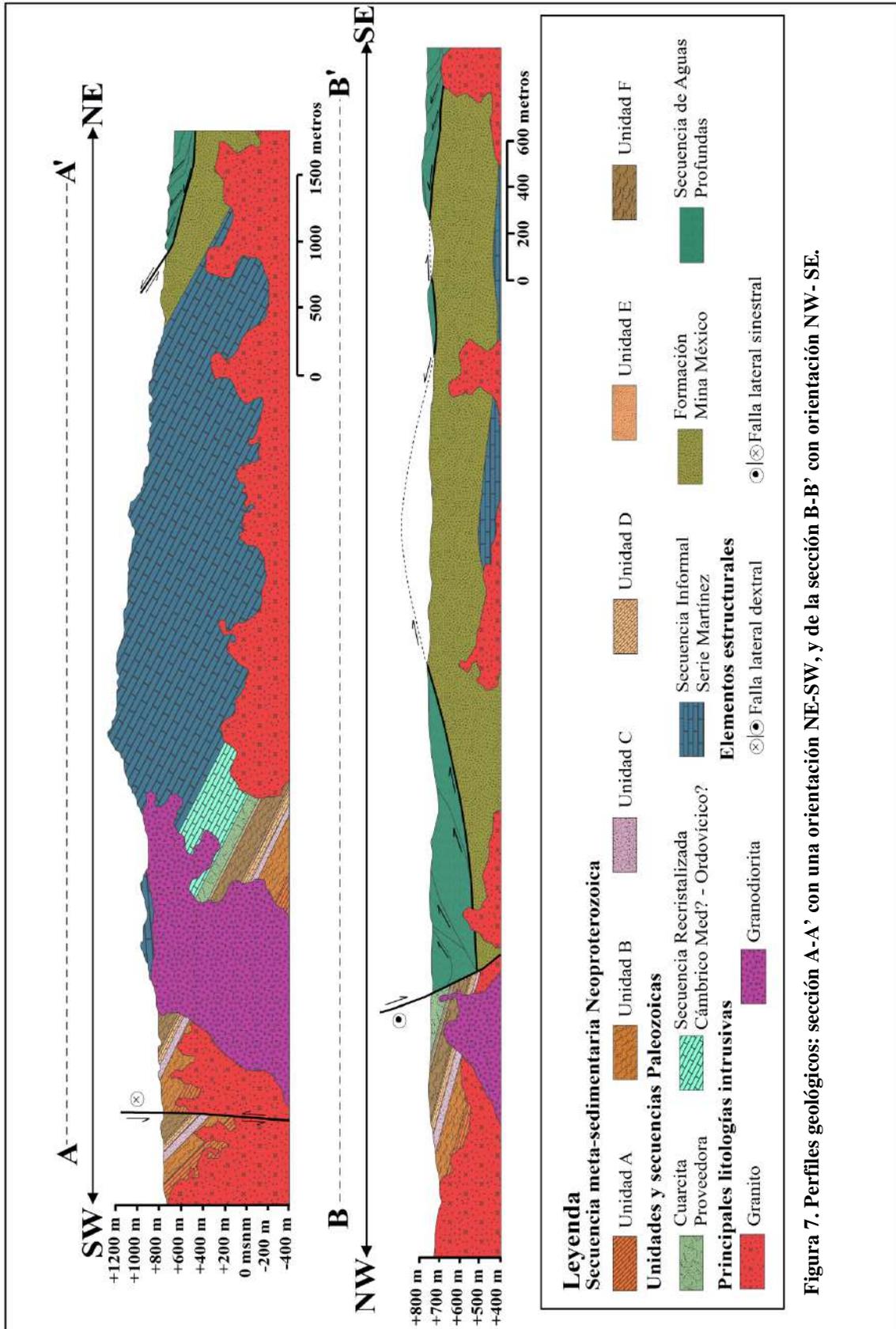


Figura 7. Perfiles geológicos: sección A-A' con una orientación NE-SW, y de la sección B-B' con orientación NW-SE.

2.1 Geología Regional

Sobre la información regional, se pueden señalar y describir una historia geológica muy compleja debido a la escala de tiempo en que dichas evidencias se han efectuado (Mesoproterozoico – Reciente); sin embargo estas descripciones se concentrarán en la secuencia meta-sedimentaria neoproterozoica y su relación con la secuencia miogeoclinal del Paleozoico, secuencia que representa uno de los cuerpos estratigráficos más completos de los registros del Paleozoico en Sonora, tanto para ambientes de plataforma como de cuencas profundas.

Primeramente, se tiene una sucesión de rocas del Proterozoico cuya proveniencia en contenido de circones se remonta a periodos más antiguos que 900 Ma, probablemente Pre-Tónico-Criogénico y del Mesoproterozoico. Formando de este modo la base sobre la que descansa la secuencia Neoproterozoica y Paleozoica del miogeoclinal cordillerano; es decir, las rocas basales del área de estudio se formaron en regiones epicontinentales a inicios del Neoproterozoico posterior a la formación de los *rifts* que terminaron fragmentando a Rodinia entre 800 y 550 Ma (Li et al., 1999; Meert y Torvisk, 2003; Li et al., 2008) y sobre estos estratos se depositaron una serie de cuerpos originalmente sedimentarios que terminaron formando más de 550 metros de rocas proterozoicas para el área de la Sierra Martínez.

Posterior a la formación de los cuerpos neoproterozoicos, se depositó una sucesión de más de 5000 metros de estratos miogeoclinales del Paleozoico, estos se encuentran dispuestos en la Sierra Martínez y el Cerro Las Rastras, ambas ubicadas en la porción meridional del cratón norteamericano. Posterior a la formación de dicha sucesión estratigráfica inició la compresión continental a finales del Paleozoico, resultando que la secuencia empezara a flexionarse formando profundas cuencas *foredeep* a consecuencia del amalgamiento de Pangea (Poole et al., 2005). Para finales del Pérmico inferior se llevó a cabo el depósito de una nueva unidad litológica relacionada a las aguas profundas de las cuencas *foredeep* mencionadas anteriormente, esta unidad es informalmente conocida como formación Mina México.

Para el Pérmico tardío en la porción cratonal correspondiente a Sonora, la compresión continental fomentó al desarrollo del cabalgamiento del eugeoclinal cordillerano sobre la formación Mina México, producto del raspamiento que se dio en el fondo de las cuencas oceánicas del océano Rheico. Esta relación estructural es evidente en Sonora Central y se manifiesta en diversas localidades de la región, sin embargo se puede apreciar al sur del área de estudio y al este de la Sierra Martínez, donde dichos cuerpos conforman el alóctono de Sonora cuyo espesor total es no menor a 700 metros de afloramientos dispersos en 140 km de largo y 50 km de ancho para el estado de Sonora (Stewart et al., 1990), al cual abarca del Ordovícico Inferior al Pensilvánico Superior y se le denomina también como Terreno Cortés por diversos autores (Coney y Campa, 1987).

Por otra parte, se reconocen rocas de carácter ígneo relacionadas a los eventos de subducción y post-subducción de la placa Farallón, además del depósito discordante de rocas vulcano-sedimentarias en gran parte de la geología regional, las primeras corresponden al denominado Batolito Larámide y las segundas son conocidas como complejo volcánico inferior (Ferrari et al., 2005).

En un ámbito menos generalista, estratos de edad Neoproterozoica no se ha reportado formalmente hasta el momento en zonas aledañas inmediatas al área de La Barita de Sonora; sin embargo en otras áreas de la porción central de Sonora se han realizado trabajos al norte de la Sierra Martínez, específicamente en la Sierra Agua Verde cuyo basamento indica edades posiblemente del Neoproterozoico (Stewart et al., 1999) donde se han reportado unidades que han sufrido cierto grado de metamorfismo que da continuidad con las unidades descritas en el área de estudio, posiblemente relacionado a un metamorfismo regional de tipo orogénico producto de la presión litostática que ejercía la potente secuencia Paleozoica así como la presión ejercida por el choque continental entre Laurentia y Gondwana y el cabalgamiento que resultó de este.

La secuencia del miogeoclinal cordillerano abarca un espesor de más de 3000 metros que se desarrolló en los márgenes pasivos de Laurentia, posterior al depósito de los estratos epicontinentales formados después del rompimiento de Rodinia en el Neoproterozoico (Molina e Iriondo, 2005), la parte superior de esta sucesión corresponde principalmente a

una secuencia detrítica con niveles carbonatados y dolomitizados que aflora de manera puntual y dispersa en Sonora Central, estos afloramientos guardan relación a una serie de unidades que afloran en el área de la Sierra Martínez, una secuencia meta-sedimentaria que ocurre a los pies de la falda oeste de dicha elevación, cuya estratificación corresponde a una serie de rocas del Neoproterozoico medio y el Cámbrico inferior, la cual presenta un origen atribuido al depósito de una alternancia de estratos carbonatados y siliciclásticos en las plataformas someras formadas en este periodo, como producto del rompimiento del supercontinente Rodinia.

Ya formada la secuencia en el sur del cratón norteamericano, se dan las condiciones para un metamorfismo regional orogénico, durante el amalgamamiento de Pangea, mismo que fue impulsado además por la serie de cabalgaduras que se dieron a finales del Pérmico y a que actualmente se distribuyen en el cinturón orogénico *OMS*, la suma de estas fuerzas, implementaron el metamorfismo del que actualmente destacan espesores considerables de rocas sub-esquistosas y cuarcitas con tendencias conglomeráticas intercaladas; además de estas, se reconocen una serie de rocas carbonatadas recristalizadas y dolomitizadas.

En base a la información recabada hasta el momento se puede decir que para Sonora las rocas más antiguas son representadas por el basamento metamórfico y cristalino del Meso y Paleoproterozoico correspondiente al cratón de Norteamérica, y discordante a este se encuentra la sucesión epicontinental de afloramientos sedimentados en los mares someros formados por la ruptura de Rodinia y sobre estos estratos descansa el miogeoclinal cordillerano, que considera rocas del Neoproterozoico y Paleozoico; tal como se puede ver en la Sierra Agua Verde, Loma la Bellotita, área El Sotol y Cerro El Guayabo entre otros (Stewart et al., 2002), mismos que comparten características con la secuencia del área de la Sierra Martínez.

Aunque el Paleozoico en Sonora se encuentra aflorando de forma relativamente aislada por todo el estado, es más abundante que las unidades Proterozoicas; por ende, se ha logrado completar un registro de diversos afloramientos dispersos, que en una primera etapa facilitan su entendimiento, clasificándolos en dos grandes grupos principales según los rasgos del ambiente de formación. El primer grupo de estos cuerpos corresponde al

Paleozoico de plataforma o miogeoclinal, que constituye una potente secuencia sedimentaria, principalmente carbonatada. En contraste a estos cuerpos se presenta la otra alternativa de afloramientos paleozoicos, misma que a diferencia de la anterior, este grupo de cuerpos se relaciona principalmente a cuencas asociadas a ambientes de aguas profundas, la cual representa el Paleozoico de cuenca o eugeoclinal. Sin embargo, este periodo abarca un margen muy prolongado por lo que hay ciertos niveles que salen de las descripciones coloquiales para los estratos paleozoicos en Sonora.

Anteriormente, el Paleozoico en el área de estudio, era definido por la mayoría de los autores por una secuencia que iba del Ordovícico al Pérmico, sin embargo, la especulación de posibles unidades del Cámbrico fomentó en parte el desarrollo de este trabajo, mismo que entabla el tratamiento de dichas unidades, describiendo su basamento Precámbrico. La secuencia Paleozoica de plataforma en el área de estudio ha sido descrita a semidetalle por diferentes autores, algunos de ellos la han denominado Serie Martínez o Secuencia Sierra Martínez, ya que no hay una diferenciación bien definida de gran parte de la secuencia.

La génesis del Paleozoico en la Sierra Martínez y Cerro Las Rastras, son atribuidos a un ambiente de plataforma continental el cual contribuyó en la formación de prominentes estratos que en la actualidad se disponen en característicos afloramientos cuyo espesor disminuye del noroeste al este del estado (Roldán-Quintana, 1982), ya que estas exposiciones se encuentran distribuidas formando un cinturón de rocas relacionadas a un ambiente similar.

Para la porción central de Sonora por otra parte, los estratos muestran evidentes rasgos tectónicos que posicionan a los cuerpos del Paleozoico de plataforma debajo de una unidad depositada *in situ* durante el Pérmico pero relacionada a cuencas de tipo *foredeep*, a su vez esta unidad es cubierta por una serie de cabalgamientos que se llevaron a cabo durante el Paleozoico tardío por la compresión de Laurentia y Gondwana durante la formación de Pangea; dicha yuxtaposición se encuentra conformada por el bloque constituido por una secuencia del Paleozoico de cuenca (eugeoclinal), que cabalga al Paleozoico de plataforma por el cierre del océano Rheico durante el Pérmico tardío en la región de Sonora México (Poole et al., 2005), siendo el bloque de plataforma-miogeoclinal

(más el paquete concordante asociado a las ya mencionadas sinorogénicas cuencas *foredeep* y *foreland*) lo que vendrían a representar el bloque autóctono.

Debido a que los afloramientos neoproterozoicos se encuentran aflorando en la base de la Sierra Martínez, y aunado a que esta presenta una columna casi completa desde el Cámbrico hasta el Pérmico, se puede definir una de las columnas más completas para el estado de Sonora; describiendo una serie de estratos con conglomerados, cuarcitas, areniscas de cuarzo, caliza fosilífera y lutitas. Litología que se desarrolló en el protocontinente Laurencia después de la ruptura de Rodinia (Stewart et al., 2002) y Pannotia durante el Neoproterozoico y cuya depositación culminó en el Carbonífero – Pérmico. Sin embargo, aunque los estudios en dicha sierra han sido exhaustivos no se ha detectado una diferenciación formal en la secuencia que abarca desde el Devónico Tardío al Pensilvánico Tardío, dejando abierta la caracterización de dichos cuerpos, así como la reinterpretación de los hiatos del Ordovícico Tardío al Devónico Medio (Figura 6).

Representando el paleozoico primeramente aflora una roca del Cámbrico inferior que equivale a una cuarcita de coloración gris oscuro a gris claro-blanquecino, con cierta tonalidad rojiza por la oxidación de minerales ferrosos, que se correlaciona con la Cuarcita Proveedora, la cual se reporta tanto para la Sierra Agua Verde como para San José de Gracia y cuya localidad tipo se encuentra en el área de Caborca Sonora, donde se expone una secuencia detrítico-carbonatada que presenta un miembro inferior compuesto por una limolita arenosa muy oxidada cuya composición proviene de terrenos metamórficos, rocas ígneas plutónicas y de sedimentos del Precámbrico (Rivera-Carranco, 1988).

La continuidad sedimentaria suprayacente a la Cuarcita Proveedora está dada por una caliza meramente dolomitizada, intercalada con bandas de pedernal sin alguna correlación hasta el momento, sin embargo, en el área centro-sur de la Sierra Martínez aflora una caliza con características similares (Hernández-Gracia, 2011) y cuya formación vendría a ser parte del Cámbrico Medio? -Ordovícico? Siendo esta unidad y la anterior, la representación más antigua para el Paleozoico en el miogeoclinal cordillerano y sobre la cual se depositaron el resto de los estratos paleozoicos. Un punto muy importante para este periodo es que para Sonora actualmente se desconoce el estado de la contraparte cámbrica

de las unidades en la análoga porción del eugeoclinal cordillerano, ya que hasta la fecha no hay reportes de afloramientos de este periodo asociados a aguas profundas en toda la porción del Terreno Cortés (Campa, 1985), el cual se caracteriza por dicha secuencia.

Para los estratos más jóvenes a las unidades descritas anteriormente se tiene el afloramiento de una roca calcárea de más de 1200 metros de espesor denominada como Caliza Pozo Nuevo (Almazán-Vázquez et al., 2006) descrita en el Rancho Pozo Nuevo y Las Norias, cuyas características, definen a una caliza con pedernal y presencia de un alternancia de capas subordinadas de material arcillo-calcáreo y arenisca cuarzosa, esta presenta un riguroso registro paleontológico con fauna del Ordovícico Temprano. Además de esta unidad, aflora en la porción media-sur de la Sierra Martínez una cuarcita con un alto grado de pureza que corresponde a la cuarcita Peña Blanca (Amaya-Martínez, 2011), descrita por (Ketner, 1986); unidad que aflora además en el Cerro Cobachi al suroeste de la mina de La Barita (Molina-Garza e Iriondo, 2005), Sierra López, Rancho Placeritos y sur de Bacanora (Stewart et al., 1990; Poole et al., 2005), localidades en la que esta unidad cuarcítica se atribuye al Ordovícico Medio-Superior para la secuencia miogeoclinal de las áreas mencionadas así como para la Sierra Martínez.

Para la contraparte asociada a aguas profundas, se registran afloramientos ordovícicos para la porción del eugeoclinal cordillerano en el área de la Sierra Martínez y la mina La Barita de Sonora, en estas localidades aflora el primer miembro Paleozoico de la secuencia de cuencas profundas, dicho cuerpo pertenece específicamente al Ordovícico Temprano y está dado por la lutita El Quemado la cual presenta tendencias carbonosas con graptolites (Stewart et al., 1990), y subsecuente a esta aflora la lutita el Mezquite (Figura 8), pedernal El Yaqui y caliza El Torote del Ordovícico Medio a Superior, respectivamente (Poole y Amaya-Martínez, 2000).

Por otra parte, y al igual que el resto del Sonora, el Silúrico presenta un hiatus que evidentemente en algunos casos se extiende hasta el Devónico Inferior (Poole y Amaya-Martínez, 2000), esta ausencia de afloramientos se presenta de igual forma en la Sierra Martínez como se puede ver en la columna regional (Figura 6), sin embargo, como se

mencionó anteriormente queda la duda si los estratos existen, o hay evidencia de que alguna vez existieron.



Figura 8. Lutita El Mezquite. Imagen obtenida de Hernández-Gracia, 2011.

El Devónico, se ha reportado para el área de estudio como una sucesión de estratos de carbonatos correspondientes al miogeoclinal cordillerano los cuales presentan diversos especímenes de micro y macrofósiles del Devónico Superior discordantes sobre la Cuarcita Peña Blanca (Ketner, 1986), es importante mencionar que para la secuencia de plataforma a partir del Devónico Superior no se tiene hasta el momento una diferenciación clara de los afloramientos, estos se encuentran concordantes hasta finales del Pensilvánico, donde se tiene un contacto erosional con cuerpos más jóvenes, denominados como Caliza La Cueva y la formación Mina México.

Para otras localidades de Sonora, se ha reportado información del Devónico; específicamente al noroeste de Hermosillo en las inmediaciones de la Sierra López, en el área de la Sierra Agua Verde y posiblemente al sur de Sahuaripa, localidades que representan la continuidad a los extremos del cinturón denominado miogeoclinal

cordillerano y a lo que diversos autores denominan Terreno Caborca. (Coney, 1981; Coney y Campa, 1987). Por otra parte, en los afloramientos definidos como la secuencia del eugeoclinal cordillerano, se ha reportado el Devónico en la porción centro-este de Sonora, específicamente afloramientos en la Sierras El Aliso y El Encinal así como en el cerro Cobachi ubicado al sur del área de la mina La Barita de Sonora, donde en esta última localidad se reporta una sucesión denominada Formación Los Pozos, la cual consiste en diversas facies que incluyen rocas siliciclásticas, carbonatadas y niveles de pedernal y barita intercaladas con escasas rocas volcánicas (Stewart et al., 1990).

El Carbonífero también se evidencia en la geología regional, principalmente en la secuencia de cuenca, donde se tiene una roca calcárea que se manifiesta en la unidad Cerro El Tasajo del Misisípico Inferior (Figura 6), la cual se conforma por una delgada caliza en contacto erosional con la formación Los Pozos y sobre la que descansa la Formación Rancho Nuevo, una potente secuencia de lutitas, limolitas, calizas y conglomerados con económicos niveles de barita del Misisípico Superior – Pensilvánico Superior (Poole y Amaya-Martínez, 2000), esta unidad presenta fragmentos de fósiles transportados desde la plataforma ya que se depositó en un ambiente de turbidez, definiendo a esta unidad de otras con características similares que ocurrieron más tarde en el Pérmico Medio (Stevens et al., 2014).

Para poner en contexto al Pérmico en el área de estudio, es importante hacer un paréntesis, debido a que se tiene el registro de litologías correspondientes al miogeoclinal cordillerano acordes a este periodo en el área de la Sierra Martínez, donde la caliza La Cueva se asocia al Pérmico inferior y transicional a esta, se tienen afloramientos de otra unidad más joven (Pérmico medio) que a diferencia de la caliza La Cueva, esta se define como una secuencia de argilita y grauvaca de grano fino, la cual presenta un espesor de aproximadamente 1000 metros donde se pueden apreciar estratos decimétricos de arenisca de cuarzo de grano muy fino a medio, esta unidad es informalmente llamada como formación Mina México (Figura 9) (Hewett, 1978; Schmidt, 1978) y una característica de esta, es que al igual que la formación Rancho Nuevo del Pensilvánico, la formación Mina México compuesta principalmente por características siliciclásticas, presenta niveles de turbiditas calcáreas producto del depósito de sedimentos tipo *flysh* los cuales presentan

abundante contenido fósil derivado y transportado de la secuencia de plataforma. Otras localidades donde se presenta la Caliza La Cueva es en el Cerro Las Rastras, Sur de Bacanora, Sierra Santa Teresa y Cerro Cobachi, mientras que la formación Mina México aflora en la cima y porción este de la Sierra Martínez, noreste del Cerro Las Rastras y al sur de Bacanora (Hernández-Gracia, 2011).



Figura 9. Afloramiento de la Formación Mina México la cual se compone principalmente de areniscas de grano fino a muy fino. Imagen obtenida de Hernández-Gracia, 2011.

La formación Mina México es una unidad cuya depositación se le atribuye a las cuencas de tipo *foredeep* (Poole et al., 2005) que se abrieron por las flexuras de la plataforma continental durante la colisión de Gondwana y Laurentia llevada a cabo por la orogenia *OMS* iniciada en el Misisípico Inferior en el sureste de Estados Unidos mientras que para el área de Sonora se llevó a cabo durante el Pérmico Tardío. Este evento produjo además la cabalgadura del eugeoclinal sobre el miogeoclinal, y cuya estructura tectónica está representada por fallas inversas de bajo ángulo que fijan la relación del Paleozoico de cuenca sobre la plataforma.

El Mesozoico y Cenozoico se encuentran presentes en áreas próximas al área de estudio, sin embargo es para el Cretácico Superior cuando se tienen evidencias significativas en la geología regional del centro de Sonora, para este periodo se reportan en

la porción nor-occidental y occidental del rancho Palo Blanco, un paquete vulcano-clástico discordante a la secuencia del Paleozoico; esta unidad se podría correlacionar con la Formación Tarahumara, la cual se encuentra cortada por al menos dos cuerpos intrusivos, además se reporta que al sur del área de estudio, hay un afloramiento de estas rocas volcánicas discordante sobre los depósitos plegados correspondientes al eugeoclinal cordillerano; por otra parte dentro de las unidades proterozoicas se pudo apreciar diferentes cuerpos intrusivos de composición andesítica con importante alteración hidrotermal que de igual manera se podrían relacionar con la Formación Tarahumara.

En cuanto a la edad de las unidades definidas por cuerpos intrusivos, se presentan dos posibles alternativas, ambas sustentadas con información radiométrica:

- El Servicio Geológico Mexicano reporta en la carta geológico minera 1:50,000 de la localidad de Rebeico H12-D54, que para la unidad del intrusivo de grano grueso definido como granito la edad corresponde al Paleoceno, el método utilizado fue K/Ar y se establece es de 61.2 Ma (Damon, 1983), mientras que para el cuerpo intrusivo de grano fino definido como granodiorita, se le asignan una edad relativa que la posiciona en el Eoceno (Morales-Morales y Corral-Gastélum, 2006).
- La otra posibilidad es que al igual que en otras localidades de Sonora Central, el cuerpo intrusivo de grano fino presente edades más antiguas que la del cuerpo intrusivo de grano grueso, según la información proporcionada por Amaya-Martínez (2018), en el proyecto de tesis de Pineda-Valenzuela (2018). Este se realizó al sur de Bacanora y se obtuvieron las siguientes edades: 94.7 ± 0.6 Ma para el más antiguo y 59.99 ± 0.44 Ma para el más joven.

2.2 Unidades neoproterozoicas en Sonora

Los estratos neoproterozoicos han sido reportados para Sonora en diversas localidades, estos de acuerdo a sus características generales se pueden subdividir en tres: 1) la sucesión de afloramientos en Caborca, 2) los grupos El Águila y Las Víboras y por último 3) el Grupo Cerro las Bolas (Stewart et al., 2002; Corsetti et al., 2006). En las Figuras 10A y 10B se puede apreciar la localización de estas subdivisiones.

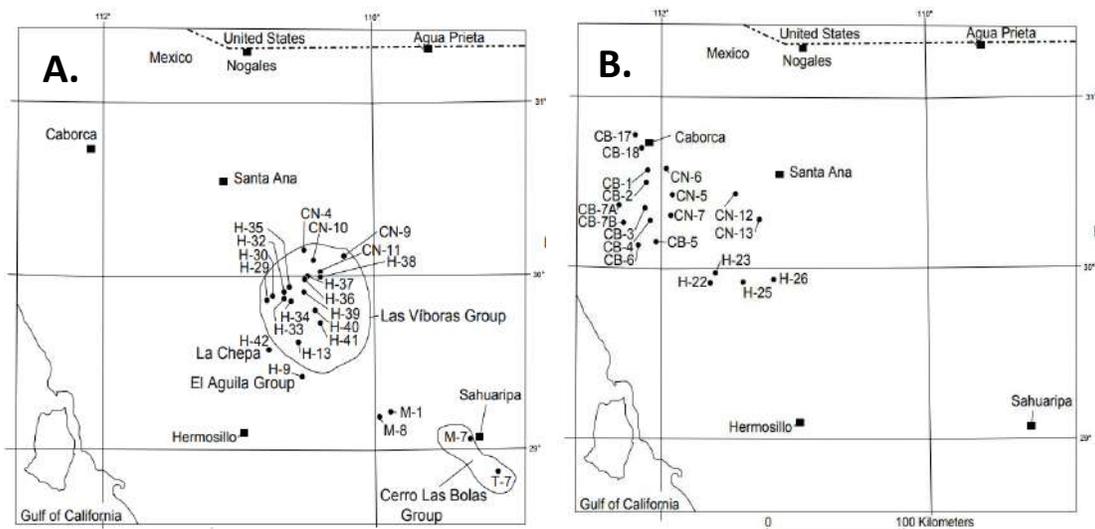


Figura 10A. Estratos neoproterozoicos más antiguos (1050-750 Ma) que el miogeoclinal cordillerano, correspondiente a la segunda y tercera subdivisión. **10B.** Estratos neoproterozoicos en la parte inferior (750-540 Ma) del miogeoclinal cordillerano, correspondiente a la primera subdivisión (modificadas de Poole y Stewart, 2002).

Las primeras se les denomina como capas Gamuza, una secuencia plegada de calizas dolomitizadas del miogeoclinal Neoproterozoico que yacen discordantes sobre el Complejo metamórfico Bámori en la región de Caborca, el cual se compone de gneises, esquistos, cuarcitas, anfibolitas y pegmatitas con edades que se del Paleozoico y Mesoproterozoico (Longoria et al., 1978).

Las segundas unidades son los grupos El Águila y Las Víboras, estos afloran a 50 y 70 km al noreste de Hermosillo, respectivamente el primer grupo está representado por dolomías y cuarcitas de grano fino a grueso y cuya génesis se remonta a 1050-750 Ma, momento en el que se efectúa la ruptura de Rodinia, mientras que el segundo grupo está

representado por cuarcitas de marea baja y dolomías estromatolíticas (Castillón-González, 2009; Stewart et al., 2002).

La tercera subdivisión es para la localidad que aflora al oeste de Sahuaripa, y consiste en 2600 metros de espesor de una sucesión conocida como grupo Cerro las Bolas, conformada de estratos siliciclásticos y carbonatados con una delgada pero significativa capa de diamictitas glaciares neoproterozoicas, asociadas a la primera evidencia de un evento de esta naturaleza para el estado (Stewart et al., 2002; Corsetti et al., 2006).

Por otra parte diversos autores han reportado afloramientos meta-volcánicos y meta-sedimentarios en los límites de Sonora y Sinaloa (Roldán-Quintana, 1982), así como en el área de la sierra de Mazatán, donde al oriente de esta y al sur de la sierra El Pajarito se menciona una secuencia de esquistos calcáreos con una cristalización bien marcada, así como también cuarcitas de grano fino a medio de color blanco con feldespatos y muscovitas subordinadas; estas rocas representan una secuencia cuyos protolitos fueron areniscas de cuarzo, areniscas cuarzofeldespáticas, limosas y arcillosas sujetas a un metamorfismo dinamotérmico durante el Precámbrico. Por otra parte, al norte del cerro Coronampio aflora una secuencia sedimentaria cuyo miembro inferior es una cuarcita blanca a rosada, concordante sobreyacida por una limolita fosilífera del Cámbrico medio y en los miembros suprayacentes aflora una intercalación de lutita y arenisca, así como una caliza con nódulos de pedernal (Vega-Granillo, 1996).

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA

En un aspecto local, la geología se vuelve más compleja y brinda información más específica, en este capítulo se realizará una síntesis de las características observadas en campo y su respectiva interpretación, todo esto con la secuencia metamórfica neoproterozoica, la secuencia sedimentaria Paleozoica del miogeoclinal cordillerano, la secuencia del eugeoclinal y rocas intrusivas que afectan a las anteriores. La Figura 11 corresponde a un mapa geológico del área de estudio. La Figura 12 corresponde a dos perfiles geológicos, uno de ellos (A-A') fue obtenido a partir de un caminamiento y fue la referencia para obtener la principal secuencia estratigráfica representada en la columna de la Figura 13.

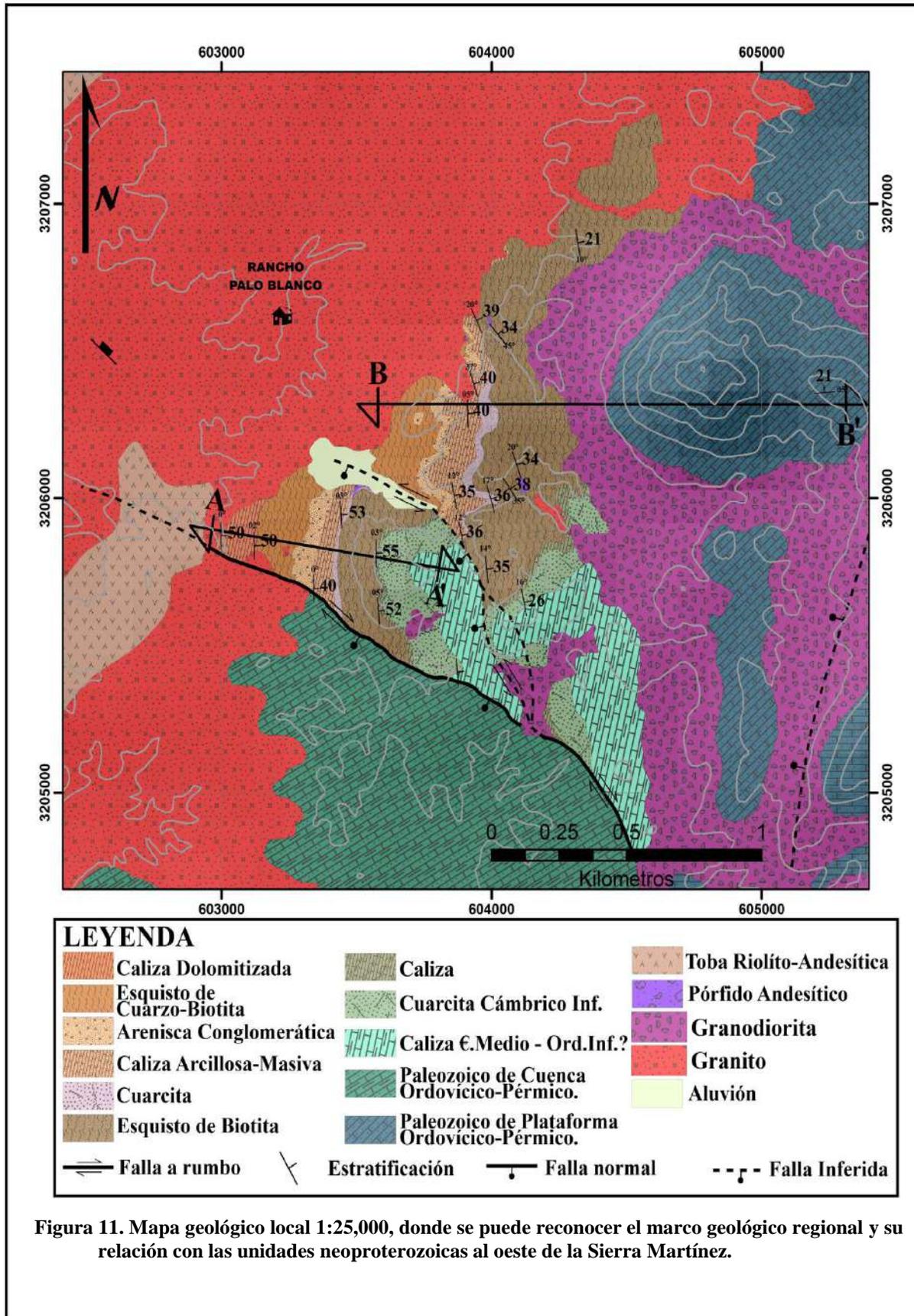


Figura 11. Mapa geológico local 1:25,000, donde se puede reconocer el marco geológico regional y su relación con las unidades neoproterozoicas al oeste de la Sierra Martínez.

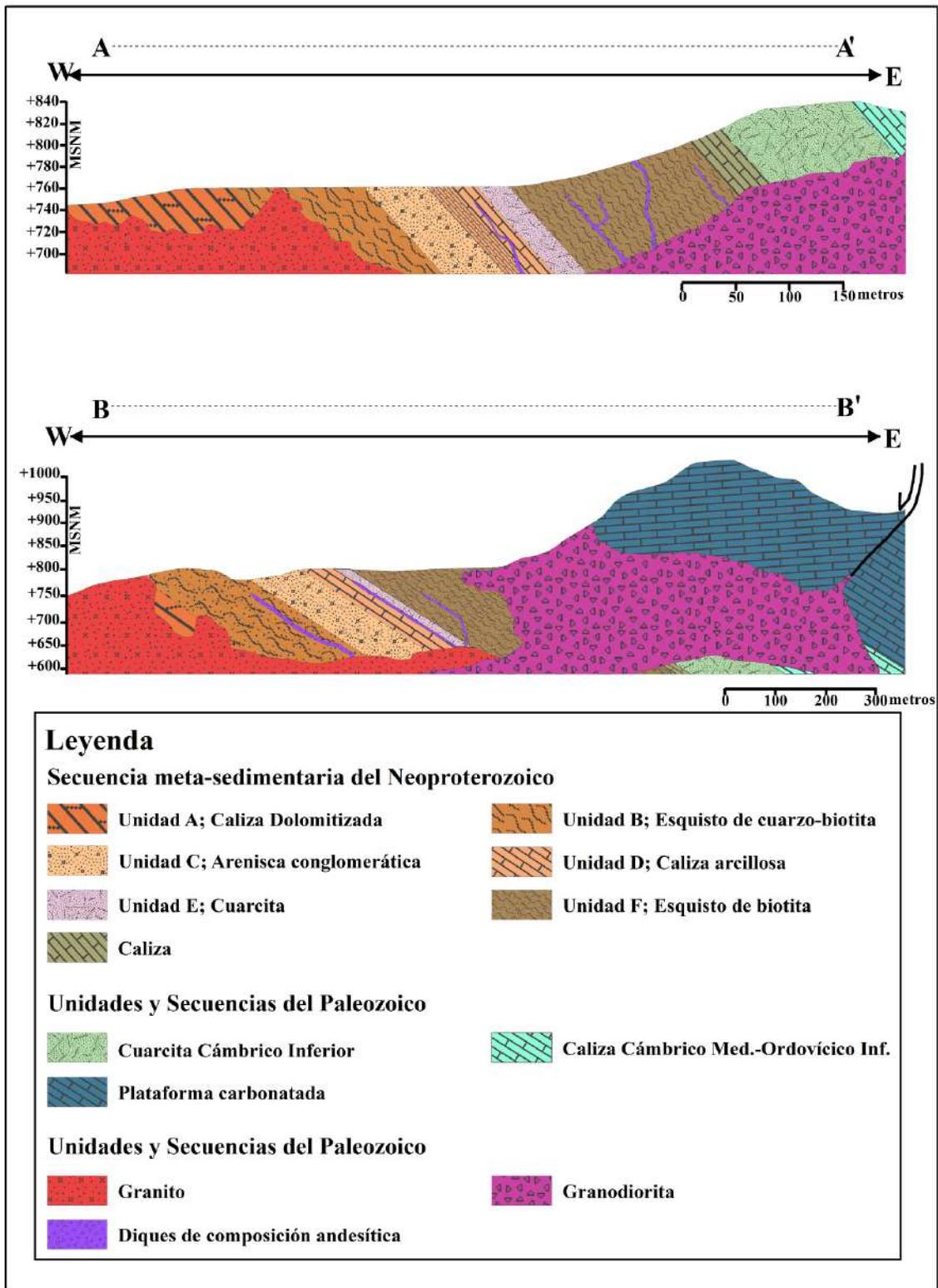


Figura 12. Secciones A-A' y B-B', en la Sección A-A' se puede ver la continuidad de los afloramientos al sur de del rancho Palo Blanco, en la Sección B-B' se aprecia un truncamiento de la columna metasedimentaria a consecuencia del emplazamiento de los intrusivos. La parte del Paleozoico temprano en la última sección es meramente interpretativa.

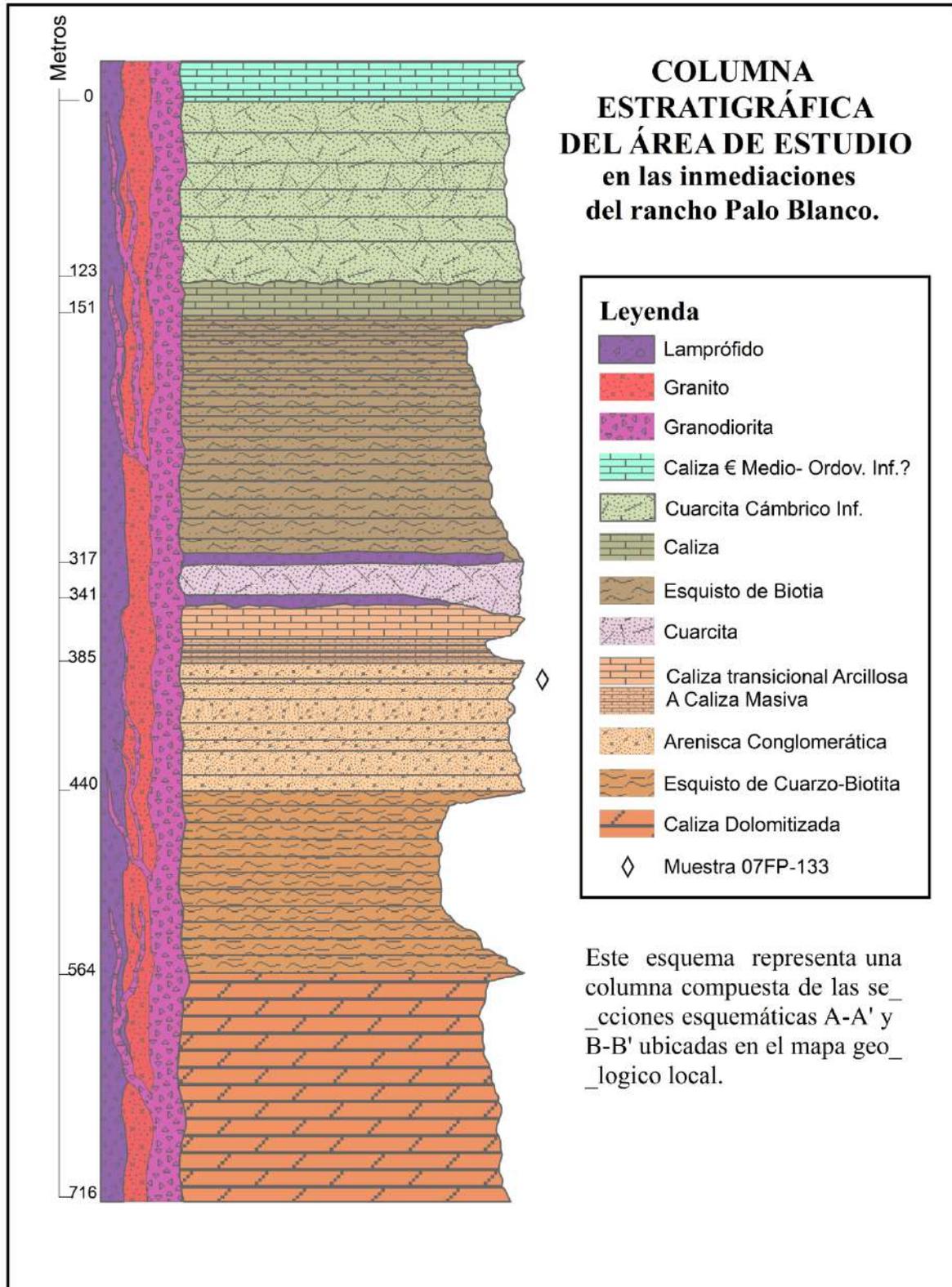


Figura 13. Columna estratigráfica compuesta del área de estudio, donde se muestran las unidades de origen Proterozoico y Paleozoico inferior siendo cortadas por cuerpos de origen intrusivo.

3.1 Geología Local

Las rocas asociadas a la porción más antigua del miogeoclinal cordillerano, se encuentran afectadas por un metamorfismo regional que se desarrolló durante el Paleozoico tardío (Pérmico tardío) para el estado de Sonora, dichas condiciones se efectuaron en el hoy conocido cinturón *OMS* por el cierre del océano Rheico y la formación de Pangea.

Considerando las rocas esquistosas, calizas y cuarcitas intercaladas, se tiene a las unidades más longevas para el paquete sedimentario de plataforma del área de la Sierra Martínez, siendo estas del Neoproterozoico mismas que básicamente se describen como un serie de unidades meta-sedimentarias en cuya porción basal aflora una roca carbonatada silicificada y dolomitizada, la cual no presenta un basamento debido a la intrusión de una granodiorita que interrumpe la base de dicha roca calcárea, esta presenta una marcada estratificación y un posterior y evidente basculamiento preferencial hacia el este, dirección en la que aflora respectivamente la sucesión de estratos de esquistos de biotita, una roca compuesta principalmente de cuarzo y biotita a la cual le sobreyace una cuarcita conglomerática de la que se tiene una edad absoluta expuesta en el presente trabajo. Esta última unidad esta sobreyacida por una caliza masiva en contacto con una cuarcita por un posible contacto erosional, la unidad superior a la cuarcita es representada por un esquistos de cuarzo - biotita cuyo contenido de micas es mayor respecto a la segunda unidad más antigua. Finalmente aflora una caliza muy recristalizada que marca el límite de la secuencia Neoproterozoica y Paleozoica, cuya primer litología de esta última Era es el de una cuarcita correlacionable con la Cuarcita Proveedora del Cámbrico inferior y sobre la que se deposita la secuencia informal denominada grupo sierra Martínez o serie Martínez.

En cuanto al desarrollo estructural, al este del rancho Palo Blanco, afloran una serie de bloques alineados en dirección norte-sur y desplazados de la parte superior de la Sierra Martínez, estos bloques se encuentran representados por una sucesión de estratos calcáreos y siliciclásticos con un gran contenido de crinoides que atribuye una edad del Pensilvánico para estos bloques desplazados (Figuras 14 y 15), mismos que originalmente se debieron encontrar en la porción más alta de la Sierra Martínez (Amaya-Martínez, comunicación personal), estos cuerpos sedimentarios se encuentran afectados por el emplazamiento de

una roca de composición granodiorítica (Figura 14) cuya intrusión se dio posterior al ya mencionado desplazamiento que sufrieron estos bloques paleozoicos, mismos que presentan una dirección preferencial de NE-SW con un basculamiento hacia el noroeste que varía de entre 20 y 50 grados.



Figura 14. Muestra el bloque correspondiente al Pensilvánico, mismo que fue basculado de la parte superior de la Sierra Martínez, siendo el puerto posiblemente la zona de debilidad donde debería de encontrarse el plano de la estructura por la que se desplazó y que posteriormente favoreció la intrusión de la roca granodiorítica (en rosa).



Figura 15. Tomada desde la Sierra Martínez que muestra el rancho Palo Blanco aledaño al suelo de tonalidad rojiza al fondo-centro de la imagen misma que está dada por el afloramiento de esquistos de biotita, esta porción corresponde a la secuencia de edad Neoproterozoica del miogeoclinal cordillerano, donde la dirección del basculamiento preferencial se dirige hacia el observador.

Las rocas intrusivas en el área de estudio se encuentran relacionadas a la subducción de la placa Farallón en el Cretácico Tardío-Paleoceno. En una primera instancia se tiene una roca intrusiva con una composición mineralógica que la clasifica como granito, esta aflora en la porción occidental de las unidades neoproterozoicas con pequeños afloramientos entre los estratos de estas unidades, creando efectos de apófisis de la secuencia de edad Precámbrica y Cámbrica, así como la presencia de una gran cantidad de diques por toda el área de estudio, por otra parte, en la porción oriental de las rocas proterozoicas aflora una roca intrusiva de composición granodiorítica cuya edad vendría a representar una litología dada por una cristalización posiblemente posterior? a la del granito y al igual que esta última, la roca granodiorítica aflora masivamente bordeando el extremo oriental de la última unidad Neoproterozoica, la cuarcita cámbrica y la roca calcárea del Cámbrico medio-Ordovícico?.

Finalmente se tiene una roca de origen ígneo y su composición es posiblemente intermedia; presenta textura porfídica y se encuentra en cuerpos subordinados expuestos en forma de diques y *sills* cortando las rocas proterozoicas e ígneas con espesores no muy prominentes, en este trabajo se contempló a dicha litología como cuerpos asociados a la Formación Tarahumara por su evidente alteración, sin embargo diversos autores se refieren a rocas similares como cuerpos lamprofídicos relacionados a los procesos post-subducción cuya génesis se justifica en el análisis de la migración del arco volcánico, a la distensión regional y a la apertura del Golfo de California (Orozco-Garza, 2003), sin embargo habría que hacer una descripción más específica y detallada, para caracterizar y correlacionar estas rocas, a un evento en específico.

3.2 Estratigrafía

En este apartado se realizará una síntesis de las diferentes litologías mostradas en el mapa geológico local (Figura 11), mismo que se desarrolló haciendo una serie de caminamientos por toda el área de estudio, así como el levantamiento de más de tres secciones que brindaron información para finalizar con una columna compuesta donde se exponen las principales litologías del Proterozoico y base del Paleozoico. Los afloramientos más representativos se pueden apreciar en la sección A-A' del área de estudio (Figura 15), donde afloran tanto las rocas más antiguas como las más jóvenes. De donde se puede describir una secuencia estratigráfica que consiste en al menos 716 metros de espesor de rocas meta-sedimentarias del Neoproterozoico y base del Cámbrico cuyas principales características están dadas como producto del metamorfismo regional orogénico que sufrieron las unidades proterozoicas durante la formación del cinturón *OMS* orogénico, producto de la colisión de Gondwana y Laurentia.

El área representativa de donde se obtuvo la información se encuentra al oeste de la Sierra Martínez, esta corresponde a la parte más antigua de los sedimentos de plataforma, los cuales se presentan en afloramientos de una sucesión metasedimentaria de edad Neoproterozoica cuya principal característica es que representa el basamento del miogeoclinal cordillerano; dicho basamento, está conformado por una secuencia en cuya base afloran una serie de rocas calcáreas dolomitizadas, seguidas por un esquisto de cuarzo con minerales micáceos del que destacan biotitas; unidad a la que se le yuxtaponen estratos de cuarzo-arenisca conglomerática recrystalizada de una decena de metros. Posteriormente se registra una intercalación de calizas arenosas ligeramente dolomitizadas y cuarcitas de grano fino, para finalizar con otra unidad de carácter esquistoso definida como un esquisto de cuarzo-biotita que a diferencia del esquisto anterior, este presenta una mayor cantidad de micas y otras impurezas que le dan un aspecto sedoso al tacto y terroso al intemperismo, las cuales aumentan en proporción a medida que se asciende estratigráficamente hasta alcanzar un espesor de unos 600 metros. Todo este paquete meta-sedimentario del Neoproterozoico se encuentra coronado por la secuencia paleozoica de plataforma que conforma el miogeoclinal cordillerano, del que destaca una cuarcita que se correlaciona con la Cuarcita

Provedora del Cámbrico inferior y sobre la cual se empieza a depositar la sucesión de estratos diferenciados y no diferenciados del denominado grupo Sierra Martínez o serie Martínez.

La sucesión resumida en los párrafos anteriores se encuentra en afloramientos casi completamente expuestos, cuya principal característica a nivel de afloramiento es la evidente coloración café rojiza que presenta, esta tonalidad se debe a la oxidación de abundantes minerales ferrosos presentes en la mineralogía de las unidades esquistosas, siendo la más joven de ellas, la que presenta una mayor ocurrencia dentro de la sucesión neoproterozoica. La secuencia proterozoica aflora al sur de “La Sierrita” (Figura 16) y al este del Cerro El Mojino (ubicado a 2 kilómetros al oeste del rancho Palo Blanco) Figura 13; así como en la porción noreste, este, sureste y sur del rancho mencionado, encontrándose dichos afloramientos principalmente en lomeríos bajos, los cuales presentan una forma elongada formados por escorrentías del arroyo Los Rodríguez, el cual nace al oeste de la Sierra Martínez.



Figura 16. Panorámica donde se muestra los estratos neoproterozoicos a la izquierda, los cuales afloran con una coloración café rojiza.

3.2.1 Unidades proterozoicas

Unidad A

La Unidad A (Figura 17), es la unidad más antigua de la que se tiene registro en el área de estudio, se encuentra conformada principalmente por una caliza dolomitizada cuyos afloramientos se reducen a una porción muy local de la zona centro occidental del área de estudio (Figura 11), a 750 metros al sur del rancho Palo Blanco. Los afloramientos se encuentran descubiertos en cañadas situadas en las partes bajas de la porción oeste de la sierra Martínez, estos presentan un bajo grado de erosión y un espesor de 152 metros con estratos dispuestos a una actitud N-S, con un buzamiento de 45 a 50° al este.

La unidad se encuentra intrusionada (?) por una roca granítica en su límite occidental, mientras que en la porción oriental se tiene en contacto discordante con la Unidad B, así como estructuralmente con toda la sucesión neoproterozoica y cámbrica, la cual se encuentra dispuesta en un bloque posiblemente desplazado por eventos distensivos posteriores.



Figura 17. Afloramiento de la Unidad A, caracterizado por alternancias silicificadas-dolomitizadas.

Unidad B

La Unidad B está constituida por un esquisto de cuarzo-biotita que aflora en la porción central y centro occidental del del área de estudio, al este y sur-sureste del rancho Palo Blanco (Figura 11). Aflora principalmente en niveles descubiertos de cañadas en la zona baja al oeste de la Sierra Martínez y formando parte de la base de lomeríos al sureste del rancho Palo Blanco. Los afloramientos de esta unidad forman un cordón con dirección NE-SW dividido y separado por una estructura de corrimiento lateral con dirección NW-SE. Estas rocas presentan un espesor de 124 metros y una actitud similar a la unidad A, con una ligera disminución en cuanto al grado del buzamiento. Al oeste su contacto inferior es discordante la unidad A, y al este el contacto superior es posiblemente erosional o bien una paraconformidad con una unidad metasedimentaria definida aquí como Unidad C.

La roca que define a la Unidad B se trata de un esquisto de cuarzo biotita de color gris oscuro, y al intemperismo presenta una coloración rojo oscura. La mineralogía principal consiste en cristales de cuarzo, biotita y laminaciones delgadas de material micáceo que le da una textura sedosa, la estratificación original se evidencia por las alineaciones de los granos de cuarzo y los planos de erosión; así mismo se le puede apreciar una foliación subparalela en el sentido de la estratificación.

Unidad C

La unidad C consiste en una cuarzoarenita ligeramente conglomerática con un bajo grado de metamorfismo. Esta unidad aflora en la zona central y centro occidental del área de estudio, al sureste del rancho Palo Blanco (Figura 11), los afloramientos se localizan principalmente en zonas intermedias de lomeríos ubicados al oeste de la Sierra Martínez, donde forma un cuerpo con orientación NE-SW segmentado y desplazado por una estructura de corrimiento lateral. Presenta un espesor de 55 metros y una actitud similar a la de la unidad B.

Como se mencionó anteriormente, la Unidad C presenta un contacto discontinuo con la Unidad B al oeste, mientras que su contacto superior se encuentra bien definido, sobreyaciéndola transicionalmente una caliza masiva, cuya transición será explicada más adelante. La Unidad C incluye una cuarzo-arenita conglomerática en niveles superiores de la estratificación, que incluye gránulos y guijarros de cuarzo de hasta 6 mm de diámetro, además, bajo el microscopio se identifica intercrecimiento entre los granos de cuarzo, mostrando un cementante sintaxial.

Unidad D

La Unidad D aflora en la porción intermedia de los estratos proterozoicos, razón por la que se puede encontrar en la parte central y centro occidental de dichos afloramientos dentro del área de estudio, estos cuerpos se encuentran aflorando de forma paralela y sobreyaciendo a la unidad C, cuyo contacto se define por una transición no lineal de hasta 17 metros de espesor, de una cuarcita conglomerática a una caliza masiva de 27 metros de espesor, cuya orientación y buzamiento son muy similares a esta última unidad detrítica.

El contacto de esta unidad está dado por una intercalación de láminas de areniscas finas con areniscas de grano grueso, cuyas capas van de 0.5-2 cm de espesor (Figuras 18 y 19), estas intercalaciones presentan una coloración café grisácea a rojiza clara en algunas zonas. Finalmente, esta intercalación termina con una caliza masiva levemente recristalizada con una coloración gris oscuro, la cual aflora dispuesto norte a sur en la parte central de la litología proterozoica con una inclinación muy similar a sus homologas más antiguas; por otra parte, en la porción norte, esta roca se encuentra intrusionada por un granito, lo que por ende favoreció la formación de un *Skarn* con un gran contenido de minerales ferrosos (Figura 20).

Sobre el contacto con la unidad superior, la Unidad D presenta un contacto erosional con la roca suprayacente, aunque se desconoce la edad tanto de la Unidad D como de la Unidad E, el contacto de esta última es evidentemente erosional, por lo que se puede inferir un posible hiato entre estas dos unidades.



Figura 18. Afloramiento de la zona transicional de la caliza masiva de la Unidad D y la cuarzo-arenita conglomerática de la Unidad C; Se aprecia la coloración café grisácea, sin embargo en otros sitios presenta tonalidades más rojizas.



Figura 19. Afloramiento de la zona transicional de la Unidad D, se puede apreciar la sucesión milimétrica de capas compuestas en su mayoría de material arcilloso en la base y material carbonatado en la cima.



Figura 20. Afloramiento de un yacimiento tipo Skarn de Fe, cuyo contenido de este elemento promueve la formación de minerales magnéticos principalmente dispuestos en las bandas oscuras.

Unidad E

La unidad E (Figura 21) consiste en una secuencia de cuarcitas las cuales se encuentran localizadas en un nivel superior a la unidad D, los afloramientos se presentan en forma de horizontes con una dirección preferencial NE-SW en lomeríos localizados al oeste de la Sierra Martínez estos presentan buzamientos similares a las unidades anteriores.



Figura 21. Afloramiento de cuarcitas de la Unidad E; la cual presenta una coloración rosada-pálido en superficie fresca y una tonalidad rojiza en superficies intemperizadas.

Los estratos presentan un carácter masivo y un espesor de 24 metros. Se compone de una cuarcita de grano fino de color rosa claro, con coloraciones rojizas en zonas con un mayor grado de intemperismo. Su contacto inferior es erosional con la Unidad D, lo que podría indicar un hiato durante la depositación de ésta; mientras que el contacto superior, también es erosional con la Unidad F, la cual aflora al oriente de los afloramientos de la unidad descrita en este apartado.

Unidad F

La unidad F (Figuras 22) consiste en una secuencia de esquistos cuyos afloramientos representan una importa zona del área de estudio estos se ubican en la porción central y norte del mapa geológico del área de estudio en forma de un horizonte con dirección N-S y dos estructuras aisladas, situadas al noreste y al sureste, los afloramientos se presentan descubiertos en cañadas en las partes intermedias y en las partes altas de lomeríos en la porción oeste de la Sierra Martínez, estos se encuentran segmentados y trasladados por dos estructuras de corrimiento lateral una de estas la falla “El pescadero”. Las rocas de esta unidad están compuestas por una sucesión meta-sedimentaria de la que destaca un esquisto de cuarzo-biotita de una coloración café rojiza en superficies intemperizadas mientras que en la roca fresca presenta una coloración de gris claro a gris oscuro, esta roca presenta una ligera alineación de cristales principalmente de cuarzo y feldespatos. El espesor de esta unidad es de 166 metros, el esquisto de esta unidad a diferencia de la Unidad B, gradacionalmente pasa a ser más terrígeno a medida que se sube estratigráficamente, producto del aumento de minerales terrígenos y micáceos. La Figura 23 muestra un nivel de rocas calcáreas, las cuales representan el nivel más superior de las unidades proterozoicas.



Figura 22. Fotografía de la porción inferior del Esquisto de cuarzo-biotita de la Unidad F, esta se encuentra en la parte basal, a medida que se asciende estratigráficamente la roca tiende a tomar un aspecto sedoso y una vulnerabilidad muy evidente al intemperismo.

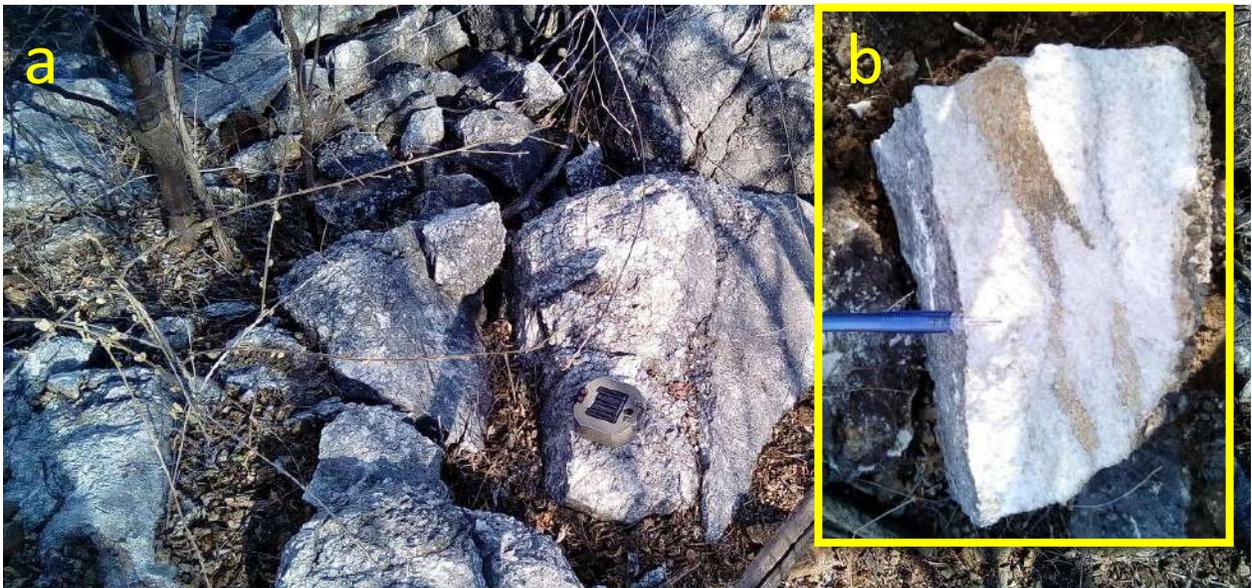


Figura 23. Fotografía de las rocas que corresponden al nivel más superior de las unidades proterozoicas, a) muestra una delgada capa de calizas fuertemente recrystalizadas de espesor no mayor a 10 metros; b) se muestra que la roca no presenta ninguna evidencia de vestigios de fósiles o alguna de sus características originales debido a su grado de metamorfismo.

3.2.2 Unidades cámbricas

Cuarcita cámbrico inferior

Esta roca se encuentra dispuesta en afloramientos con espesores de aproximadamente 123 metros, presenta una coloración gris claro con tonalidades rojizas-guindas y su composición es principalmente de cuarzos de grano fino a medio, con la presencia icnofósiles representados por tubos verticales de *Scolithus sp* (Figura 24). Se correlaciona con la Cuarcita Proveedora que fue descrita en el área de Caborca por Cooper y Arellano (1952), e identificada en el área de San José de Gracia por Cirret y Aguilar (1989), así como en el cerro El Sahuaral (3 km al norte de San José de Gracia), y en la Sierra Agua Verde. La roca suprayacente es una roca carbonatada que aflora en contacto abrupto con esta unidad, cuyo espesor se desconoce, sin embargo, en el trabajo de Hernández-Gracia (2011) se especifica que la posible edad de esta roca podría corresponder al Cámbrico medio-Ordovícico temprano.



Figura 24. Cuarcita con *Scolithus sp.* Esta roca se correlaciona con la Cuarcita Proveedora reportada al norte (en la Sierra Agua Verde) y al noroeste (en San José de Gracia); cuya edad de formación se atribuye al Cámbrico inferior.

Caliza recristalizada

La roca sedimentaria más joven de la secuencia descrita corresponde a una roca calcárea silicificada y recristalizada, con características físicas similares a la de la Unidad A, sin embargo, esta roca es mucho más joven, y se ubica del Cámbrico medio al Ordovícico Inferior-Medio (Hernández-Gracia, 2011), debido a la presencia de fauna fósil difícil de identificar por la recristalización como trilobites, gasterópodos y bivalvos. Esta roca presenta bandas lenticulares de pedernal; así como la dirección de basculamiento hacia el NE, correspondiente al de la Sierra Martínez, Figura 25 y su relación con las unidades inferiores en la figura 26.



Figura 25. Caliza recristalizada e intensamente silicificada.



Figura 26. Fotografía panorámica donde se muestra el esquisto de la Unidad F (en tonalidad café-rojiza) al que se le yuxtapone la capa delgada del calizas recristalizadas y mismas que es coronada por la Cuarcita Proveedorora y las calizas que en otros trabajos asignan al Cámbrico medio a Ordovícico Temprano-Medio (Hernández-Gracia, 2011).

3.2.3 Unidades de origen ígneo

Granito

Esta roca de edad laramídica aflora hacia la porción oeste, norte y noreste de las unidades proterozoicas. Regionalmente este intrusivo se extiende desde el sur del área de estudio, hasta el límite noroeste con el cerro Las Rastras (que también son parte de la plataforma carbonatada). En el área de estudio, este intrusivo se encuentra cortando toda la secuencia paleozoica, por otra parte, el granito bordea toda la porción oeste y sur del resto de unidades Precámbricas, así como la intrusión de diversos diques y sills de composición félsica y andesítica que podrían ser producto de una de las últimas etapas de enfriamiento de estos cuerpos ígneos.

Granodiorita

Esta roca aflora en la porción este y centro de las unidades neoproterozoicas, es una unidad correspondiente al Eoceno que corta a todo el resto de las rocas previamente depositadas, incluyendo a la roca granítica. Este intrusivo a escala regional, aflora en un cuerpo alargado orientado norte-sur en el costado oeste de la Sierra Martínez. En este sitio, dicho cuerpo ha interactuado con toda la secuencia detrítico-carbonatada del Neoproterozoico y Paleozoico. La característica principal de esta roca es la gran cantidad de fenocristales de anfíbol que presenta, inclusive localmente (con una distribución de escasos metros cuadrados) se pudo apreciar una concentración anómala de anfíboles, así como una distribución de estos en el hábito *turkey track* en el contacto con las rocas cuarcíticas.

Diques pórfido-andesíticos

Esta unidad aflora principalmente en la porción central del área de estudio. La roca se define como un cuerpo ígneo de composición intermedia con una textura porfídica, y la presencia abundante de fenocristales de hornblenda en una matriz de cristales de plagioclasa y otros minerales de alteración como calcita, epidota y clorita. Los escasos afloramientos de campo no permiten determinar la relación entre esta unidad y los otros cuerpos intrusivos, por lo que se deja abierta la posibilidad de una relación con los cuerpos definidos en otros trabajos como lamprófidos, similares a los estudiados en los alrededores de Hermosillo y a los que se les asigna una edad del Oligoceno (Orozco-Garza, 2003). Sin embargo, en este trabajo el estudio de estas rocas fue de carácter general, por lo que para poder relacionar estos cuerpos volcánicos a una clasificación habría que hacer un estudio más específico y riguroso.

3.3 Petrografía

En este apartado se realiza una descripción petrográfica de las rocas de las diferentes unidades litoestratigráficas basadas en el estudio al microscopio de láminas delgadas.

Para caracterizar las unidades litológicas del presente estudio se llevó a cabo un estudio petrográfico en cinco muestras representativas de las unidades descritas en el apartado de estratigrafía, dos de estas muestras se analizaron con el fin de determinar las condiciones de metamorfismo de dichas unidades.

La determinación y clasificación de las rocas ígneas, se basa en la composición mineralógica, textural y grado de cristalización.

Esquisto de cuarzo-biotita

Esta muestra representativa de la unidad F muestra un evidente clivaje continuo, indicado por una marcada orientación preferencial de la mayoría de los granos minerales. Abundantes poikiloblastos de plagioclasa de hasta 2.5 mm de largo, de forma irregular-alargada, semi-elíptica o semi-rectangular. Contiene numerosas inclusiones muy finas de cuarzo, biotita y minerales opacos. Matriz con un tamaño de grano $<0.6\text{mm}$. Compuesta por feldespato, cuarzo, biotita y minerales opacos. El cuarzo se presenta en granos anhedrales a semi-poligonales. El feldespato como granos anhedrales a granos con secciones semi-cuadradas o semi-rectangulares. Biotita concentrada en bandas muy delgadas paralelas, como cristales con secciones semi-rectangulares, de un tamaño de $<0.5\text{mm}$. Minerales opacos en granos irregulares principalmente. También algunos minerales opacos con secciones semi-cuadradas, semi-rectangulares o semi-poligonales, presentan un tamaño $<0.25\text{mm}$. (Figura 27).

La roca de esta unidad fue transformada por metamorfismo regional orogénico de muy bajo grado, dentro de la facies de sub-esquistos verdes (prehnita-pumpellita) a esquistos verdes inferior. El protolito fue una arenisca fina-muy fina cuarzo-feldespática arcillosa.

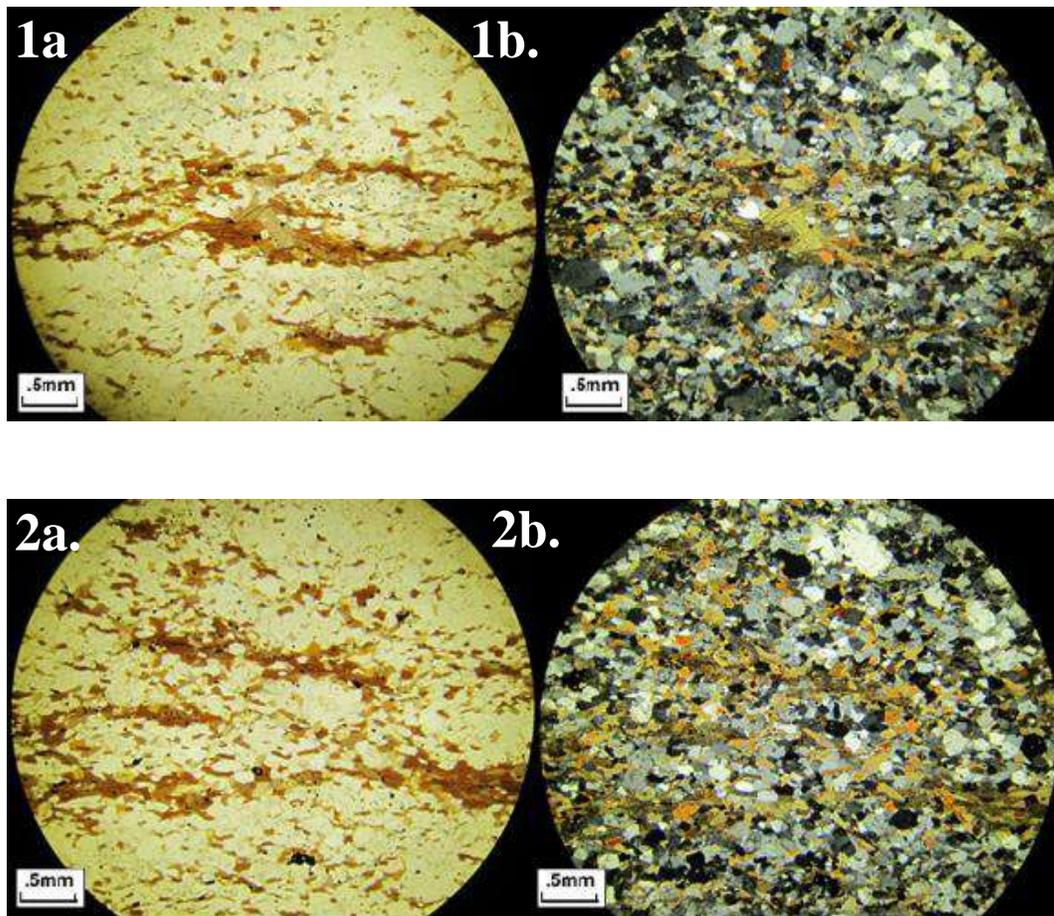


Figura 27. 1a y 2a. Láminas delgadas en luz natural; 1b y 2b. Láminas delgadas en luz polarizada esquistos de cuarzo-biotita.

Cuarcita Cámbrico Inferior

La muestra presenta una textura granoblástica representada por un acomodo preferencial de la mayoría de los granos minerales, los cuales en un 98% son granos de cuarzo con una forma angulosos a sub-angulosos con contactos suturados (Figura 28).

Algunos granos de cuarzo presentan bordes de intercrecimiento y puntos triples en secciones muy localizadas, en adición a esto la muestra presenta material micáceo entre los cristales de cuarzo de manera muy escasa, los granos de cuarzo presentan un tamaño que va de 1.5 mm a 2mm. La roca de esta unidad fue transformada por metamorfismo regional orogénico de muy bajo grado, dentro de la facies de sub-esquistos verdes (prehnita-pumpellita) a esquistos verdes inferior. El protolito fue una arenisca de cuarzo.

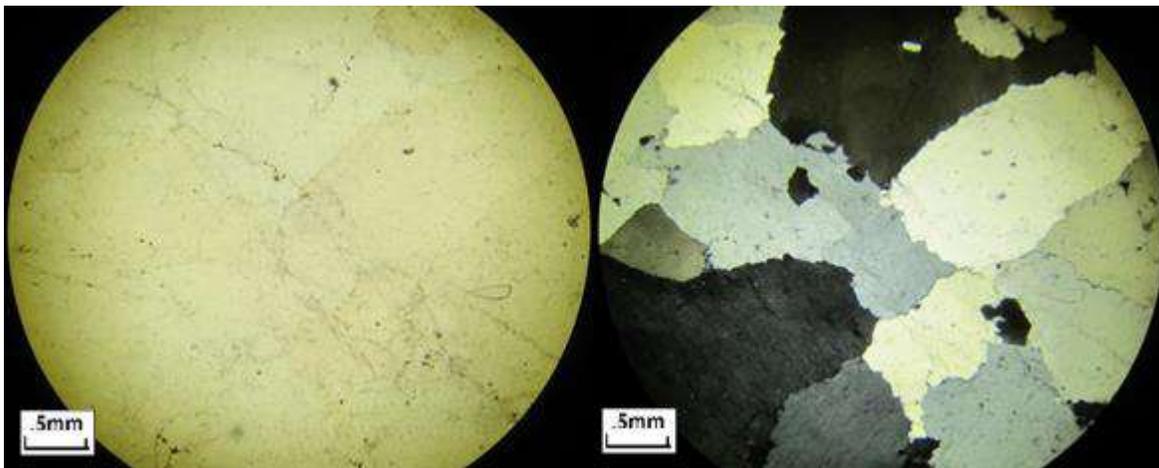


Figura 28. Lámina delgada de la cuarcita correlacionable con la Cuarcita Provedora del Cámbrico inferior, en luz natural (izquierda) y en luz polarizada (derecha).

Granodiorita

Esta roca presenta una textura holocristalina fanerítica, está compuesta principalmente por cristales de cuarzo, biotita y plagioclasa, con alteración sericítica y con algunos espacios rellenos por sílice. Los cristales de plagioclasa presentan una forma prismática subeuhedral con un tamaño de 1 mm. Los cristales de cuarzo se presentan de manera principalmente anhedral y relleno de fisuras o espacios vacíos, con un tamaño menor de 1mm.

Los cristales de biotita presentan una forma que va de subeuhedral a anhedral con una clara alteración a clorita en algunos segmentos, tienen un tamaño de 1 a 1.5 mm, definiendo así esta roca como una granodiorita (Figura 29).

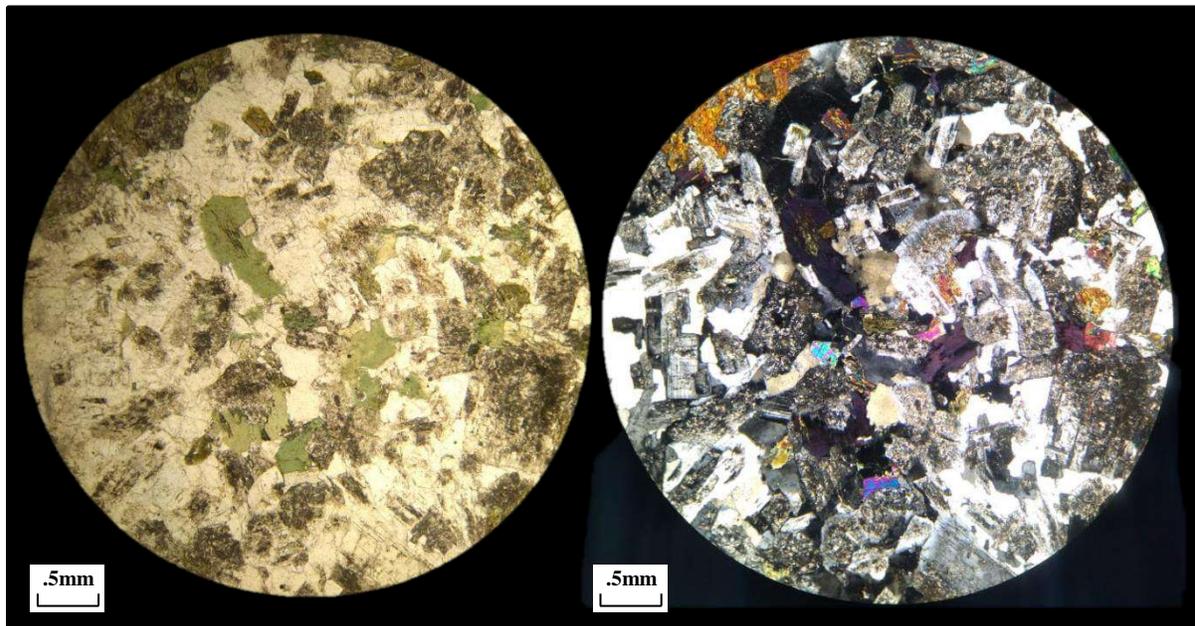


Figura 29. Lámina delgada de la granodiorita, se pueden apreciar cristales subeuhedrales de biotita en una matriz de cristales anhedrales de plagioclasa y cuarzo, en luz natural (izquierda) y polarizada (derecha).

Granito

La muestra presenta una textura de carácter holocristalino fanerítica compuesta principalmente por cristales de cuarzo, feldespato potásico, biotita y plagioclasa de un tamaño de 1 a 2.5mm, con algunos espacios rellenos por minerales arcillosos en forma de alteración sericitica, cristales de biotita con un tamaño de 1 a 1.5mm con una forma tabular en secciones muy localizadas y con una forma anhedral en la mayoría de los segmentos, esta se presenta de manera menos abundante y con una leve alteración a clorita, los cristales de cuarzo se presentan de manera subeuhedral y relleno de espacios entre los cristales de plagioclasa con un tamaño de 0.5 mm. y con una abundancia moderada.

La roca presenta un grado de alteración moderado afectando específicamente los cristales de plagioclasa, la composición es de carácter félsico y se define como granito (Figura 30).

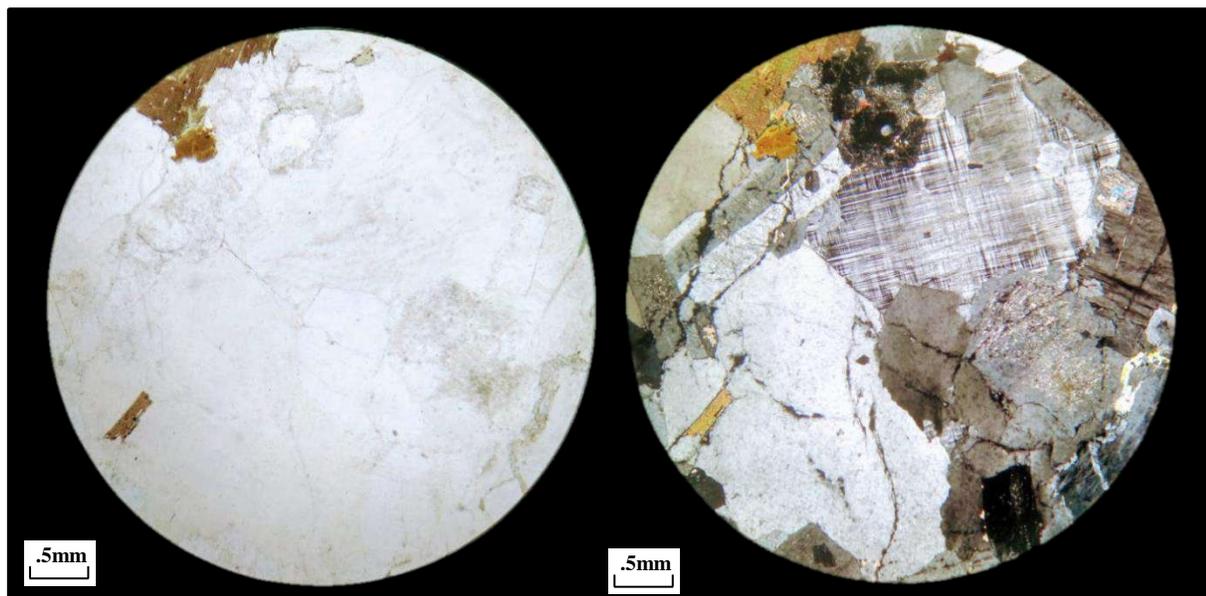


Figura 30. Lámina delgada en luz natural (izquierda) y polarizada (derecha) del granito, se pueden apreciar cristales subhedrales de biotita en una matriz de cristales de feldespato subehedral y cristales de cuarzo anhedral.

Pórfido-andesítico

Presenta una definida y clara textura porfídica, representada por fenocristales prismáticos de plagioclasa, en un porcentaje de 10 a 15% y tamaños desde 1 hasta 2 y 3 mm, mostrando un reemplazamiento a causa del evento hidrotermal, que afecta a las plagioclasas, así como también a los microfenocristales de ferromagnesianos, que corresponden a biotita y hornblenda (3 a 5%), con tamaños entre 0.5 a un máximo de 1 mm. La circulación de los fluidos hidrotermales provoca la alteración y reemplazamientos de las anteriores fases minerales y en casos extremos, la intensidad ha sido tal, que prácticamente borra las características minerales y ópticas de las plagioclasas y ferromagnesianos. Los minerales secundarios o de origen hidrotermal corresponden a epidota + clorita + calcita + sulfuros-óxidos de hierro, que, en lo general, define una alteración propilítica; sin embargo, en algunas porciones de la lámina se reconoce la presencia de microcristales de biotita + cuarzo y posible feldespato potásico (todos ellos también de origen hidrotermal) como

reemplazo de algunos ferromagnesianos y en menor proporción sobre plagioclasas. La presencia de estos, indicaría la combinación de alteración propilítica y potásica (Figura 31).

La matriz presenta una textura microcristalina y microlítica, constituida por abundantes microcristales (microlitos) de plagioclasa y ferromagnesianos. En algunas partes de la lámina, aparentemente se aprecian posibles fragmentos de rocas, aunque es más probable que sea consecuencia de los efectos alteración y reemplazamiento.

De acuerdo con los porcentajes, características mineralógicas y texturales de la roca, esta se clasifica como: andesita porfídica de biotita y hornblenda y que de acuerdo con las claras evidencias de alteración hidrotermal; Se le considera como un componente de la Formación Tarahumara, que corresponde a una secuencia volcanosedimentaria de edad Cretácico Superior – Terciario Inferior (Paleógeno).

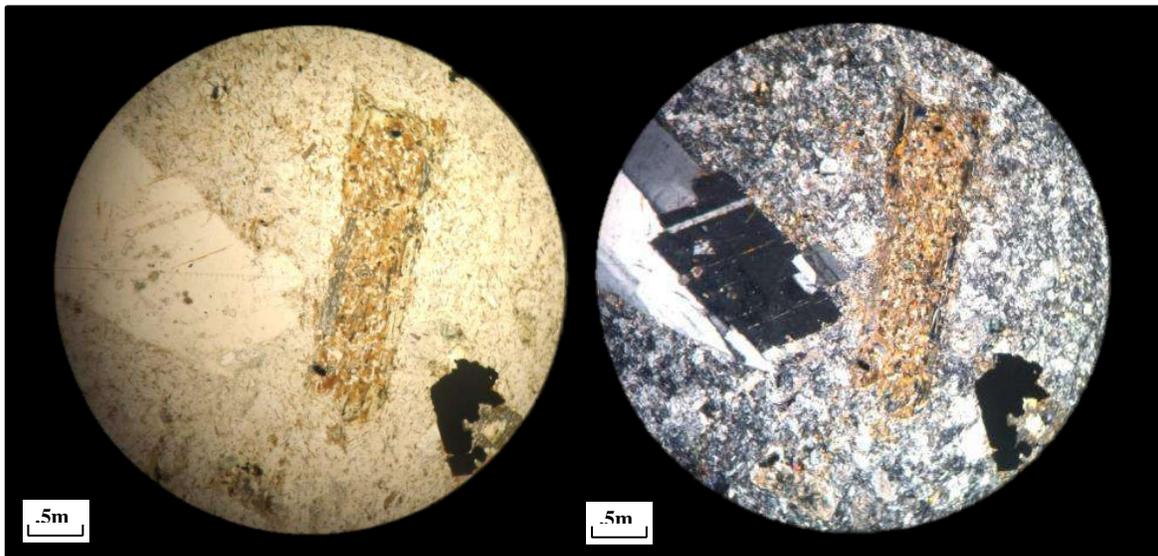


Figura 31. Lámina delgada del pórfido andesítico donde se evidencian los macrocristales de plagioclasa con evidente alteración, en luz natural (izquierda) y en luz polarizada (derecha).

CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA HISTÓRICA

Los rasgos geológicos actuales observables en el área de estudio y áreas vecinas, indican una complejidad estructural en parte debido a los efectos del rompimiento de Rodinia-Pannotia; así como también al desarrollo y evolución del evento de deformación asociado con la orogenia **OMS** que afectó al miogeoclinal y eugeoclinal cordillerano compuesto por rocas del Neoproterozoico y Paleozoico. Posterior a dichos eventos, la región se somete a los efectos relacionados a la subducción de la placa Farallón, cuyo arco magmático está representado por el emplazamiento de varios cuerpos intrusivos que crearon condiciones de interacción hidrotermal-metasomática, metamorfismo térmico, que se sobreponen al metamorfismo regional que previamente causaron los cambios mineralógicos y texturales de las rocas del Neoproterozoico y Paleozoico.

Diversas investigaciones señalan que el rompimiento del supercontinente Rodinia se llevó a cabo durante el Neoproterozoico, sin embargo hay discrepancias en los modelos desarrollados para explicar este proceso, a pesar de ello y de una forma general, se considera que al menos la porción meridional de Laurentia se encontraba separada del resto de masas cratonales para inicios del Neoproterozoico, en cuyos bordes inició la depositación de una secuencia sedimentaria detrítico-carbonatada a la que posteriormente se le sumaría la plataforma carbonatada Paleozoica. En un contexto regional, existe aceptación en lo propuesto por diversos autores en atribuir los evidentes rasgos estratigráficos, estructurales y tectónicos de la porción central de Sonora, a la deformación que bordea el actual margen meridional del cratón de Norteamérica (Laurentia) con la colisión oblicua y diacrónica de la parte septentrional de Gondwana durante el Paleozoico Tardío.

La orogenia **OMS** (Figura 32) inició en el Misissípico Medio en la localidad de Ouachita, en el Pérmico temprano en Marathon y en el Pérmico tardío en Sonora, para esta última localidad hay evidencia estratigráfica y estructural que sugiere que la plataforma sufrió considerables flexuras durante dicho evento el cual motivó la formación de cuencas de tipo *foredeep* que posteriormente fueron llenadas por sedimentos de un ambiente marino profundo, formando así una secuencia de más de 1000 metros de espesor sobre la

plataforma carbonatada a la que se le llamó formación Mina México. Posterior al depósito de ésta, la colisión con Gondwana impulsaba a formación de un prisma acrecional compuesto de la secuencia eugeoclinal, la cual fue transportada 50-200 km hacia el continente cabalgando de esta manera a la formación Mina México y cerrando el Océano Rheico (Poole et al., 2005) (Figura 33).

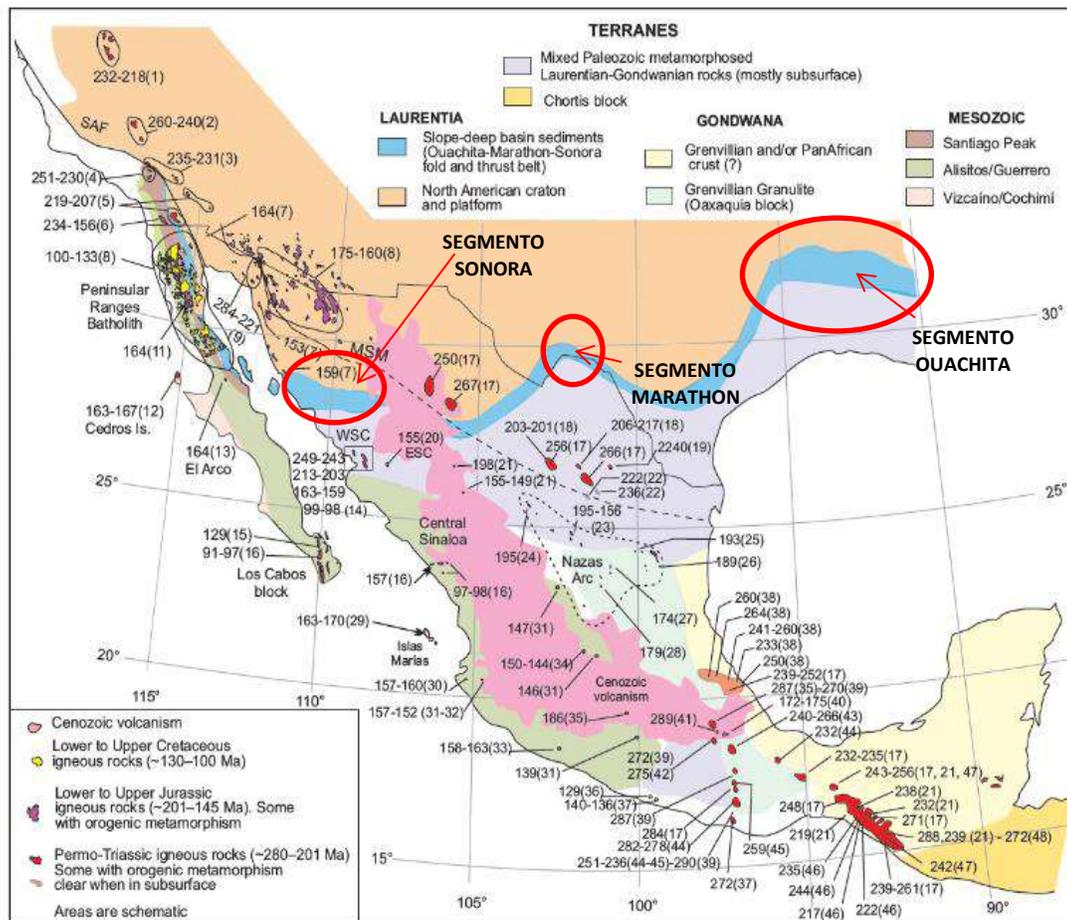


Figura 32. Ouachita-Marathon –Sonora Paleozoico tardío (representado en el borde azul), se muestran además diversos terrenos de importancia geológica para México, acrecionados a este durante y posterior de la formación del cinturón OMS. Tomado y editado de Sarmiento-Villagrana et al., 2016.

Una vez finalizado el proceso de subducción con el cinturón orogénico *OMS* (al que se le atribuye el metamorfismo regional orogénico), inició el rompimiento de Pangea durante el Triásico, dejando el margen occidental de la placa Norteamericana bajo el régimen de subducción de la placa Farallón, proceso que había iniciado desde el

desprendimiento de Laurencia a finales del Devónico e inicios del Carbonífero, este evento es ahora desarrollado en el periodo Cretácico-Paleoceno y se le atribuye la formación del batolito de Sonora, mismo que provocó levantamientos en las rocas encajonantes y provocó un metamorfismo de contacto muy evidente en diversas áreas en Sonora, donde se registra la existencia de importantes cuerpos económicos relacionados a los yacimientos tipo Skarn. El “batolito de Sonora” también se registra en el área, cuya ocurrencia se define por los dos cuerpos intrusivos que afectan a escala regional las secuencias del miogeoclinal y eugeoclinal cordillerano.

La etapa distensiva toma lugar en el Paleoceno, provocada por un cambio en cuanto a la geometría de la placa Farallón durante su subducción, al comenzar dicho evento algunas de las fallas que antiguamente presentaban una componente inversa por la tensión de Gondwana contra Laurencia, se reactivaron como fallas normales, formando parte de la provincia *Basin and Range*, que consiste en un sistema de sierras y valles paralelos provocados por estructuras con una dirección NW-SE.

Según la carta geológico-minera de Rebeico (H12-D54) 1:50000 realizada por SGM (2006), el área de estudio experimentó los efectos de dos regímenes de deformación causantes de la disposición actual de la estratigrafía en la Sierra Martínez:

- La deformación dúctil-frágil representada de mejor manera en la *cabalgadura Martínez*, la cual evidencia la imbricación de las rocas paleozoicas de cuenca sobre la formación Mina México y diversos pliegues isoclinales, de extensión regional, de rumbo NE-SW con vergencias al NW y SE. Estos pueden observarse en las rocas carbonatadas paleozoicas de ambiente de plataforma, y esta deformación se atribuye a dos eventos tectónicos, uno de ellos el cinturón orogénico *OMS* el cual estuvo activo a escala continental desde el Misissípico Medio al Pérmico tardío, y al arco del Cretácico Tardío provocado por la subducción de la placa Farallón.
- La deformación frágil, producto de cambio de régimen tectónico a uno distensivo durante la subducción de la placa Farallón, se presenta en forma de fallas normales y de corrimiento lateral, así como en su fracturamiento. Las fallas normales más importantes son las de rumbo NW-SE con echados el NE y SW.

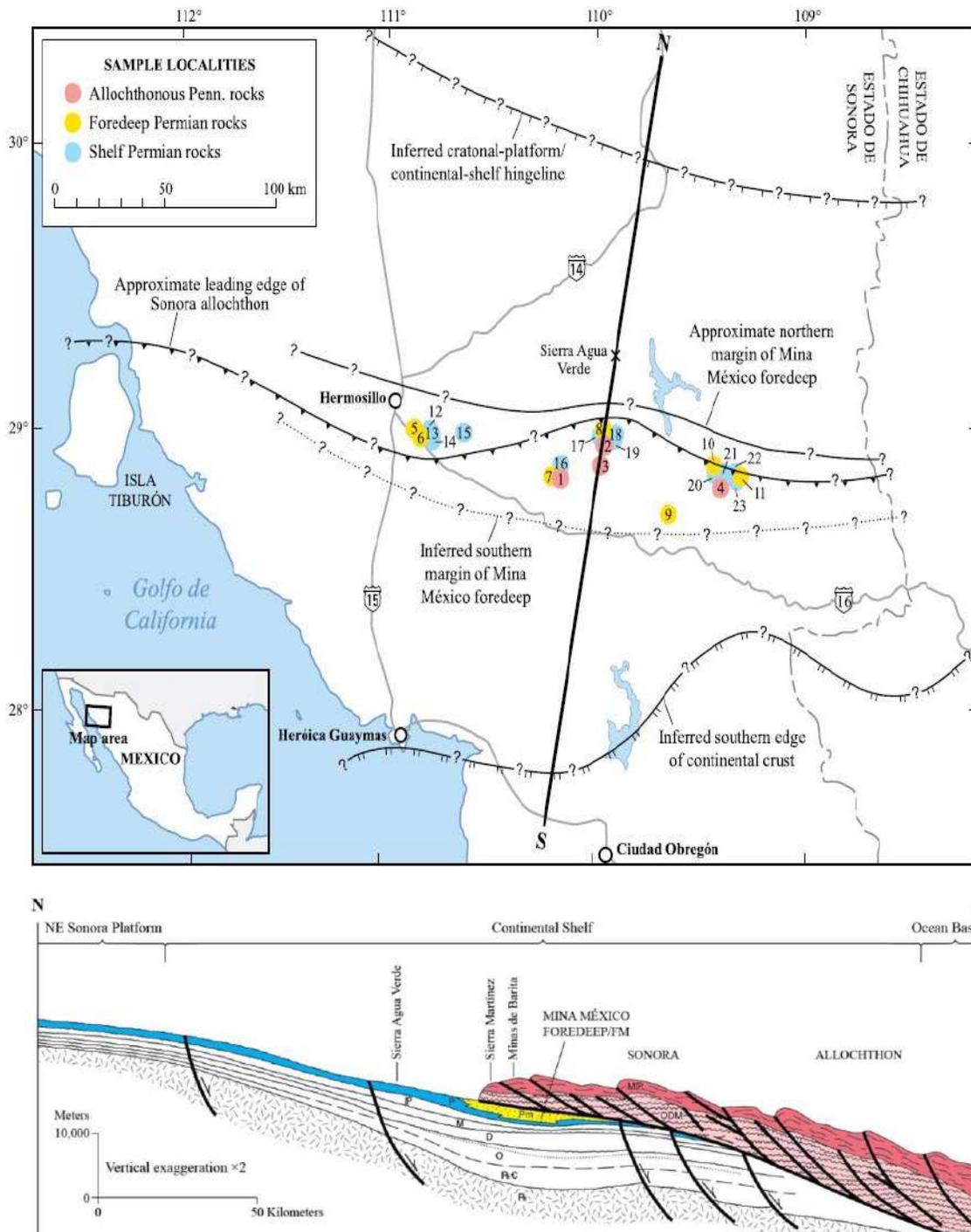


Figura 33. Contexto tectónico de la porción central de Sonora donde se muestra el área correspondiente a la Sierra Martínez, localidad donde ocurre el cabalgamiento del eugeoclinal sobre el miogeoclinal provocado por la orogenia Ouachita-Marathon-Sonora (Stevens et al., 2014).

En la porción sur del área de estudio, los estratos neoproterozoicos y cámbricos se encuentran truncados por un contacto estructural denominado falla El Pescadero, la cual originalmente pudo haber funcionado como una falla inversa producto del arco continental del Cretácico Tardío, sin embargo, al pasar de un régimen tectónico compresivo a uno extensivo, la falla funciona como plano de debilidad en el que al iniciar este régimen se reactiva como falla normal con corrimiento lateral (transtensional); esta estructura geológica presenta una dirección NW-SE y actúa como contacto entre las unidades del Paleozoico de plataforma y de cuenca.

A un kilómetro en dirección Este del rancho Palo Blanco, aflora una secuencia cuyo espesor se desconoce y representa un bloque de rocas carbonatadas y siliciclásticas que fue desplazado desde la Sierra Martínez, este bloque se tiene en contacto con una roca intrusiva granodiorítica tanto en su base como en sus costados meridionales. Dentro de estas rocas carbonatadas se pudo apreciar una fauna fosilífera consisten principalmente de crinoides y corales rugosas correspondientes al Paleozoico, probablemente del Misisípico (?). Además de este bloque, sobre la unidad proterozoica afloran bloques de menores proporciones cuyo contenido fosilífero es equivalente a otros periodos que afloran en la Sierra Martínez y que fueron desplazados de ésta.

En este contexto se puede establecer que la secuencia sedimentaria de plataforma en la Sierra Martínez aflora basculada preferencialmente hacia el noroeste debido a distintos eventos tectónicos a escala regional más recientes, cuya ocurrencia se atribuye al arco continental en el Cretácico Tardío-Paleoceno durante la subducción de la placa Farallón bajo el cratón de Norteamérica, así como a un régimen tectónico distensivo post-subducción del Paleoceno-Mioceno asociado al desarrollo de la provincia denominada *Basin and Range* que generó el adelgazamiento de la corteza continental y la exhumación de los cuerpos ígneos, como se puede apreciar en el *Metamorphic Core Complex* que aflora al oeste del área de estudio (Vega Granillo, 1996).

CAPÍTULO 5. GEOCRONOLOGÍA

5.1 Métodos y materiales

Para el desarrollo de este trabajo se contó con la información relacionada con el fechamiento de circones detríticos por el método U-Pb en una muestra de una cuarzoarenita de la Unidad C. Esta muestra identificada con las siglas 07FP-133, fue colectada por Poole y Amaya-Martínez en 2008, sobre afloramientos ubicados a lo largo del acceso al rancho Palo Blanco y posteriormente enviada y procesada en las instalaciones del U.S. Geological Survey en Denver, CO. Se analizaron un total de 35 cristales de circón, los cuales fueron sometidos a los métodos tradicionales de preparación, con la finalidad de determinar la edad máxima de depósito de dicha unidad. Esta muestra finalmente se analizó en el laboratorio de la Universidad de San José, en California, utilizando para tal efecto la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS), la cual permite un análisis efectivo, confiable y de alta precisión.

La metodología y procesamiento de los cristales de circón para el estudio radiométrico correspondiente fue realizada de manera metodológica y sistemática. Estas actividades se inician con una etapa de preparación y limpieza de los cristales de circón, utilizando una solución de HNO_3 1M para minimizar o evitar la contaminación por la presencia de Pb en la superficie de los granos. La ablación láser se realiza en una celda de nueva generación de doble volumen que puede alojar hasta 20 probetas, una de las cuales tiene montados los estándares a utilizarse, y las otras las muestras a trabajar. Los cristales de circón se ablacionan dentro de esta celda en una atmósfera de He. El haz del láser incide sobre la superficie del cristal en el punto previamente seleccionado, con una densidad de energía de $\sim 6 \text{ J/cm}^2$ y a una tasa de repetición de 5 Hz, creando una oquedad provocada por el impacto del rayo láser (en la Figura 34 se pueden observar los puntos seleccionados en las muestras de circones), generando la volatilización de un área del circón (spot o punto de análisis) de $23 \mu\text{m}$ de diámetro y de $\sim 10 \mu\text{m}$ de profundidad para obtener un total de $\sim 30\text{-}35$ ng de masa ablacionada durante cada análisis. La ablación se lleva a cabo por 30 segundos

con el fin de minimizar la profundidad del hoyo de ablación y el fraccionamiento elemental.

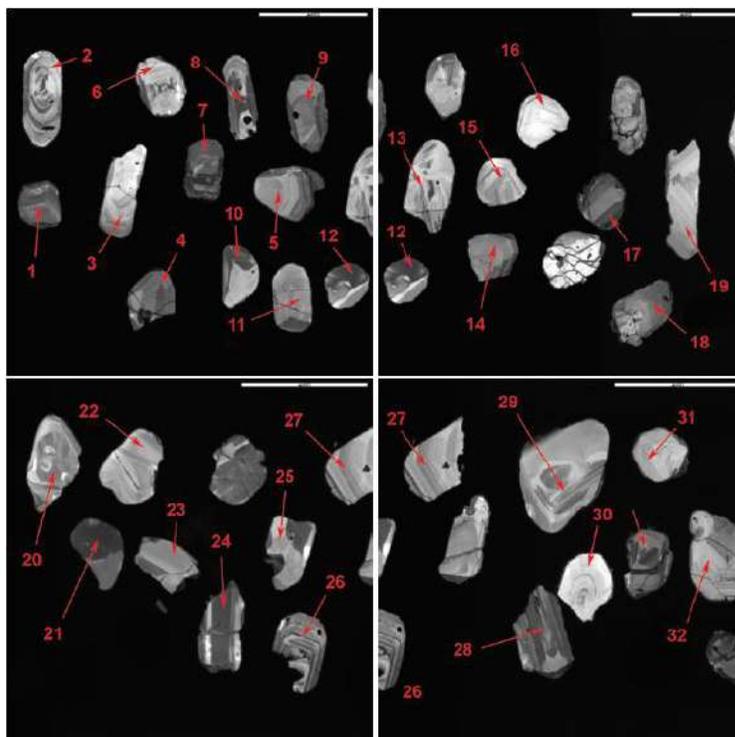


Figura 34. Fotografía de las localizaciones de los puntos de análisis en las muestras de circones 07FP-133 utilizada durante el fechamiento de la unidad C por el método U-Pb.

El material vaporizado es evacuado de la celda de ablación y transportado al espectrómetro de masas en un flujo de He (350 ml/min) que se mezcla con N-22 (ca. 4.5 ml/min) y con Ar (ca. 0.9 l/min) para después ser analizado.

La secuencia para el análisis en circones inicia con la medición por ablación láser de dos muestras de referencia certificada (vidrios estándar NIST SRM 610), seguido por cinco análisis del estándar de circón primario, 3 del secundario, y finalmente diez de edad desconocida. Posteriormente, se hace una medición doble de todos los estándares cada diez mediciones en circones desconocidos. El experimento finaliza con dos circones estándar y un vidrio NIST. Esta secuencia es de gran importancia y conocida como un método estándar para poder realizar la corrección por fraccionamiento de masa y deriva. Los

análisis del vidrio NIST son utilizados para calcular las concentraciones correctas de U y Th, además de las otras concentraciones de elementos traza y tierras raras medidas durante cada análisis, mientras que los análisis del estándar de circón 91500 son usados para recalculer las relaciones isotópicas. La calibración de los datos y correcciones por deriva instrumental se basan en los estándares del circón 91500 que tiene una edad conocida de 1062 + 1 Ma.

5.2 Resultados

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos del análisis efectuado para el análisis geocronológico U-Pb en los circones detríticos de este trabajo.

Tabla 1. Resultados de mediciones para la Geocronología U-Pb en circones de las muestras estudiadas.

Name	% comm 206	ppm U	ppm Th	232Th /238U	207corr 206Pb /238U Age	1σ err	204corr 207Pb /206Pb Age	1σ err	Total 238 /206	% err	Total 207 /206	% err	207r /206r	% err	207r /235	% err	206r /238	% err	err corr
<i>07 FP-133</i>																			
FP-133-1.1	0.65	209	145	0.72	1359	9	1468	19	4.2327	0.67	0.0925	0.95	0.092	0.99	2.9964	1.2	0.236	0.7	0.6
FP-133-2.1	0.17	114	59	0.53	1412	13	1433	24	4.0758	0.92	0.0909	1.27	0.0904	1.28	3.0554	1.58	0.245	0.9	0.6
FP-133-3.1	0.1	137	56	0.43	1045	9	1020	43	5.6767	0.92	0.075	1.57	0.0732	2.11	1.7747	2.3	0.176	0.9	0.4
FP-133-4.1	1.87	263	351	1.38	2510	17	2589	24	2.0612	0.56	0.1819	0.8	0.1732	1.44	11.4733	1.56	0.48	0.6	0.4
FP-133-5.1	0.14	119	62	0.54	1024	10	1039	36	5.8	0.99	0.0745	1.7	0.0739	1.77	1.7554	2.03	0.172	1	0.5
FP-133-6.1	0.38	51	31	0.62	1067	14	1123	48	5.5327	1.34	0.0781	2.25	0.0771	2.4	1.9178	2.75	0.181	1.4	0.5
FP-133-7.1	0.46	140	60	0.44	1169	9	1255	25	5.0072	0.8	0.0828	1.26	0.0824	1.29	2.2674	1.52	0.2	0.8	0.5
FP-133-8.1	0.28	159	108	0.7	1214	9	1247	25	4.8117	0.77	0.083	1.19	0.0821	1.27	2.3489	1.49	0.208	0.8	0.5
FP-133-9.1	0.73	219	132	0.62	1811	11	1906	13	3.0612	0.61	0.1171	0.71	0.1167	0.73	5.2546	0.96	0.327	0.6	0.6
FP-133-10.1	0.27	61	34	0.58	1147	18	1167	56	5.121	1.62	0.0803	2.58	0.0788	2.83	2.1175	3.26	0.195	1.6	0.5
FP-133-11.1	0.24	85	79	0.96	1770	16	1786	22	3.1582	0.93	0.1103	1.09	0.1092	1.23	4.7604	1.54	0.316	0.9	0.6
FP-133-12.1	0.36	42	27	0.65	1359	19	1364	57	4.2467	1.43	0.09	2.05	0.0871	2.95	2.82	3.28	0.235	1.4	0.4
FP-133-13.1	2.61	59	70	1.23	877	11	1359	45	6.6813	1.29	0.09	2.08	0.0869	2.31	1.7875	2.65	0.149	1.3	0.5
FP-133-14.1	0.69	215	51	0.25	1354	8	1472	17	4.248	0.63	0.0926	0.89	0.0922	0.9	2.9918	1.1	0.235	0.6	0.6
FP-133-15.1	-0.15	112	48	0.44	1065	10	1031	33	5.5734	0.94	0.0736	1.63	0.0736	1.63	1.8215	1.88	0.179	0.9	0.5
F133-16	0.26	82	41	0.51	1651	17	1675	25	3.4162	1.03	0.1037	1.29	0.1028	1.33	4.1449	1.68	0.292	1	0.6
F133-17	0.17	195	165	0.87	1131	8	1159	23	5.2064	0.7	0.0788	1.14	0.0785	1.16	2.078	1.36	0.192	0.7	0.5
F133-18	0.37	363	91	0.26	1621	8	1679	11	3.4844	0.49	0.103	0.62	0.103	0.62	4.0759	0.79	0.287	0.5	0.6
F133-19	0.42	30	16	0.55	1039	23	1132	62	5.6952	2.32	0.0774	3.11	0.0774	3.11	1.874	3.88	0.176	2.3	0.6
F133-20	0	103	76	0.76	1400	13	1390	26	4.1223	0.95	0.0888	1.34	0.0883	1.38	2.9535	1.68	0.243	1	0.6
F133-21	0.34	123	75	0.63	1084	10	1120	37	5.4404	0.91	0.0785	1.49	0.077	1.85	1.9468	2.06	0.184	0.9	0.4
F133-22	2.57	176	70	0.41	1575	13	1949	35	3.5215	0.72	0.1195	1.97	0.1195	1.97	4.6792	2.1	0.284	0.7	0.3
F133-23	0.43	157	59	0.39	1642	12	1696	18	3.4325	0.76	0.1047	0.94	0.104	0.97	4.1726	1.24	0.291	0.8	0.6
F133-24	0.27	203	80	0.41	1654	13	1683	16	3.4099	0.81	0.1039	0.83	0.1032	0.87	4.1701	1.18	0.293	0.8	0.7
F133-25	0.24	103	48	0.48	1403	13	1427	28	4.104	0.98	0.091	1.37	0.0901	1.49	3.0226	1.78	0.243	1	0.6
F133-26	1.17	202	52	0.27	1479	10	1673	21	3.8315	0.67	0.1026	1.14	0.1026	1.14	3.6938	1.32	0.261	0.7	0.5
F133-27	-0.21	208	124	0.61	1384	9	1345	19	4.1832	0.69	0.0863	1	0.0863	1	2.8451	1.22	0.239	0.7	0.6
F133-28	0.39	95	41	0.45	1363	16	1415	27	4.2314	1.21	0.0904	1.37	0.0895	1.41	2.9139	1.86	0.236	1.2	0.7
F133-29	-0.61	27	12	0.47	1115	21	974	69	5.33	1.98	0.0716	3.4	0.0716	3.4	1.8519	3.93	0.188	2	0.5
F133-30	-0.08	131	60	0.47	1709	14	1696	19	3.2979	0.85	0.1039	1.03	0.1039	1.03	4.3457	1.33	0.303	0.9	0.6
F133-31	0.28	112	52	0.48	1432	13	1482	24	4.0096	0.94	0.0927	1.28	0.0927	1.28	3.1878	1.58	0.249	0.9	0.6
F133-32	0.36	95	69	0.75	1418	14	1471	28	4.0506	1.03	0.0927	1.41	0.0922	1.45	3.1362	1.78	0.247	1	0.6
F133-33	-0.08	23	20	0.87	1454	31	1439	58	3.9558	2.16	0.0907	3.02	0.0907	3.02	3.16	3.71	0.253	2.2	0.6
F133-34	0.16	221	131	0.61	1099	8	1134	25	5.3708	0.76	0.0775	1.25	0.0775	1.25	1.9896	1.47	0.186	0.8	0.5
F133-35	0.42	249	102	0.42	1693	11	1757	15	3.3152	0.69	0.1075	0.82	0.1075	0.82	4.4701	1.07	0.302	0.7	0.6

Por su parte, este estudio de circones en la unidad C (muestra 07FP-133) a una población de 35 circones detríticos arrojó los siguientes resultados:

- Los granos de circones como se puede observar en la figura 36 indican una falta de madurez textural en el sedimento original, es decir este se presentan principalmente con un grado de redondez sub-anguloso.
- Algunos granos de circones presentaron un delgado sobrecrecimiento, esto indica una precipitación de circones secundarios, la cual probablemente se presentó después del depósito y durante o antes del metamorfismo.
- Los valores de Th/U indican que los circones no son de naturaleza metamórfica.

La proveniencia de los circones coincide con el ciclo orogénico Greenvilliano pues como se observa en las Figuras 35 y 36 estos obtuvieron las siguientes edades: La mayoría de las muestras se posicionan en el Mesoproterozoico con un rango de 1.4 a 1.7 Ga, la edad de una muestra la ubica al final de los 1700 Ma, hay dos con fuentes de 1900 Ma y la edad más reciente es de 1040 Ma.

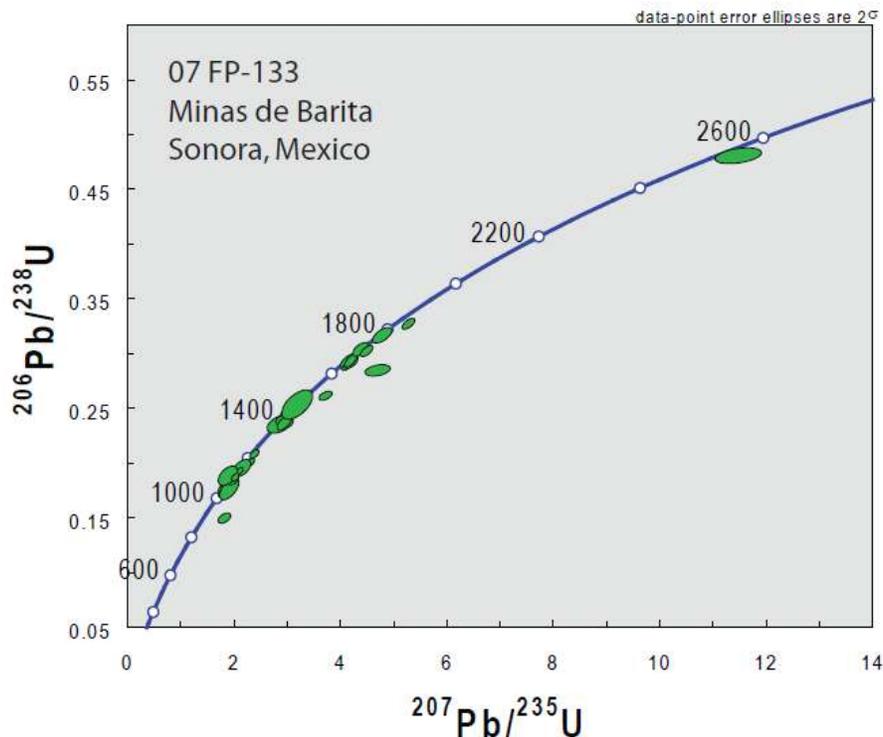


Figura 35. Isócrona de los fechamientos con el método U-Pb en circones en la muestra 07FP-133.

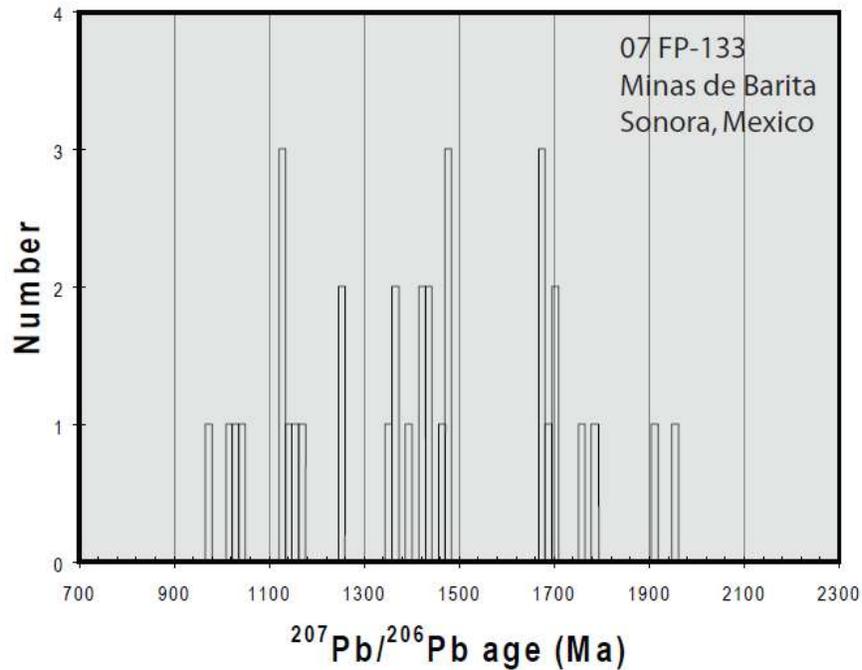


Figura 36. Histograma de relación de edades con el número de muestras correspondientes a esa edad

5.3 Discusión

La unidad C, de donde proviene la muestra estudiada en este trabajo, presenta características petrográficas y geocronológicas similares a la secuencia nombrada de manera informal como grupo El Águila (Stewart y Amaya-Martínez, 1998), por lo tanto, en esta tesis se sugiere que ambas litologías comparten una misma fuente de procedencia. Para sustentar esta consideración, se incluye y utilizan de manera comparativa y correlativa la siguiente información estratigráfica y radiométrica obtenida por Gross et al. (2000) en la región del noroeste de Sonora, localidad ubicada a 75 km al noreste de la ciudad de Hermosillo (Figura 37).

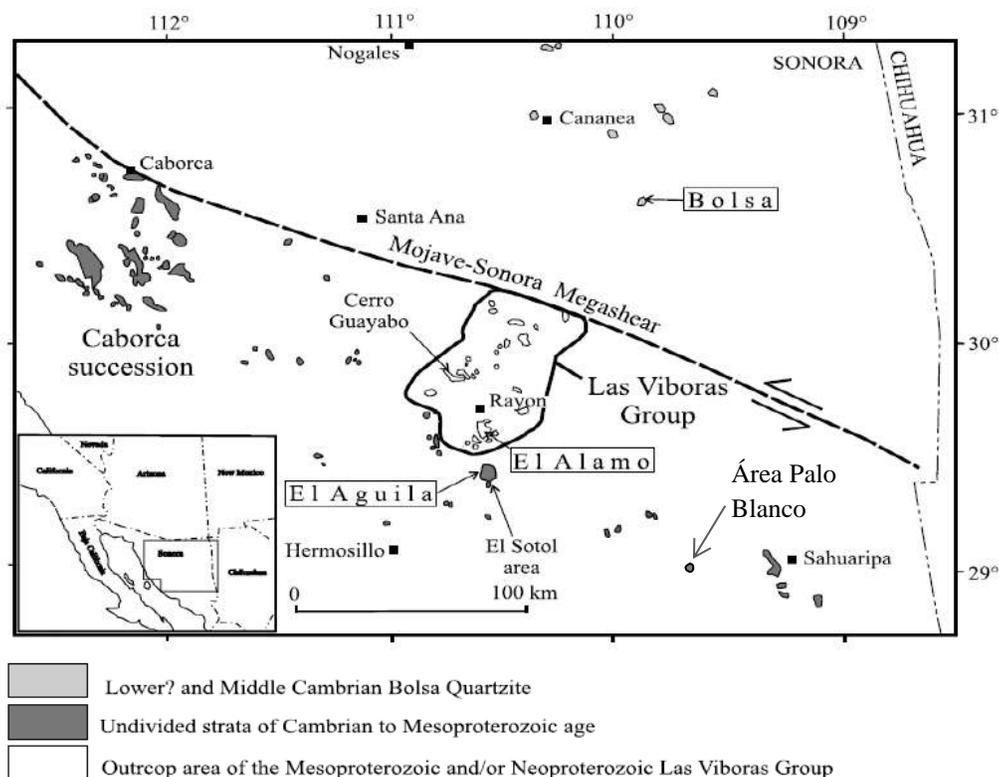


Figura 37. Mapa de localización de las diversas unidades proterozoicas en el estado de Sonora, donde se muestra la ubicación de la unidad El Águila y también la de la Unidad “C” en el área de estudio, que corresponde a la parte basal de la secuencia siliciclástica-carbonatada metamorfizada. Modificado de Gross et al., 2000.

El conjunto de estratos que definen y conforman al grupo El Águila corresponde a una unidad de cuarcita de grano fino a muy fino, existiendo intercalaciones de pizarra y dolomía, teniendo un espesor estimado de 385 m, observado sobre una sección incompleta expuesta por una zona de falla. Estas rocas indican edades en el rango entre el Mesoproterozoico y Neoproterozoico, es decir más antiguas que la edad determinada para las rocas del miogeoclinal cordillerano. Los resultados obtenidos a partir del análisis de circones se pueden resumir en tres rangos de edades: 8 muestras tienen una edad que fluctúan entre 1057 a 1189 Ma, 7 indican una edad de entre 1325 a 1433 Ma y 4 de entre 1657 a 1710 Ma.

A partir del estudio de circones en las unidades mostradas en la Figura 38 fue posible reconstruir las paleocorrientes que proporcionan información general sobre la dirección de transporte del material detrítico y las áreas fuentes probables. De esta manera,

en el grupo Las Víboras y la formación El Álamo, la dirección de paleocorrientes indica una tendencia general hacia el norte, lo cual sugiere que en los estratos del Mesoproterozoico y Neoproterozoico el material detrítico podría provenir de un área ubicada hacia el sur de su posición actual. En contraste, las direcciones de paleocorrientes en la Cuarcita Bolsa indican un movimiento hacia el oeste o suroeste de la región sureste de Arizona, sugiriendo que la fuente proviene hacia el este o noreste de dicha región.

La Figura 38 muestra una comparación de las edades del grupo el Águila, la unidad C y la formación el Álamo. El área fuente de circones con una edad de 1.1 a 1.2 Ga probablemente se encontró hacia el sur, al menos la información en cuanto a direcciones de paleocorrientes transportadas hacia el norte en el grupo Las Víboras sugiere esta fuente. Esta opción también resulta particularmente atractiva para circones detríticos con una edad de 1.1 a 1.2 Ga en la formación el Álamo y en el grupo El Águila; en este caso, ambos son más antiguos que el miogeoclinal cordillerano. Anterior al *rifting* que generó el margen continental de Laurentia y el miogeoclinal cordillerano, el grupo Las Víboras y el grupo El Águila, debieron haber constituido parte del interior del supercontinente Rodinia. En caso de que esto fuera válido, los circones con una edad de 1.1 a 1.2 Ga podrían derivarse de rocas de edad Greenvillianas en el sur de Rodinia cuya posición actual se ubica en Sonora central, y podrían pertenecer al suroeste de una prolongación del Cinturón Greenvilliano de Norteamérica el cual sufrió un proceso de separación durante la fragmentación de Rodinia.

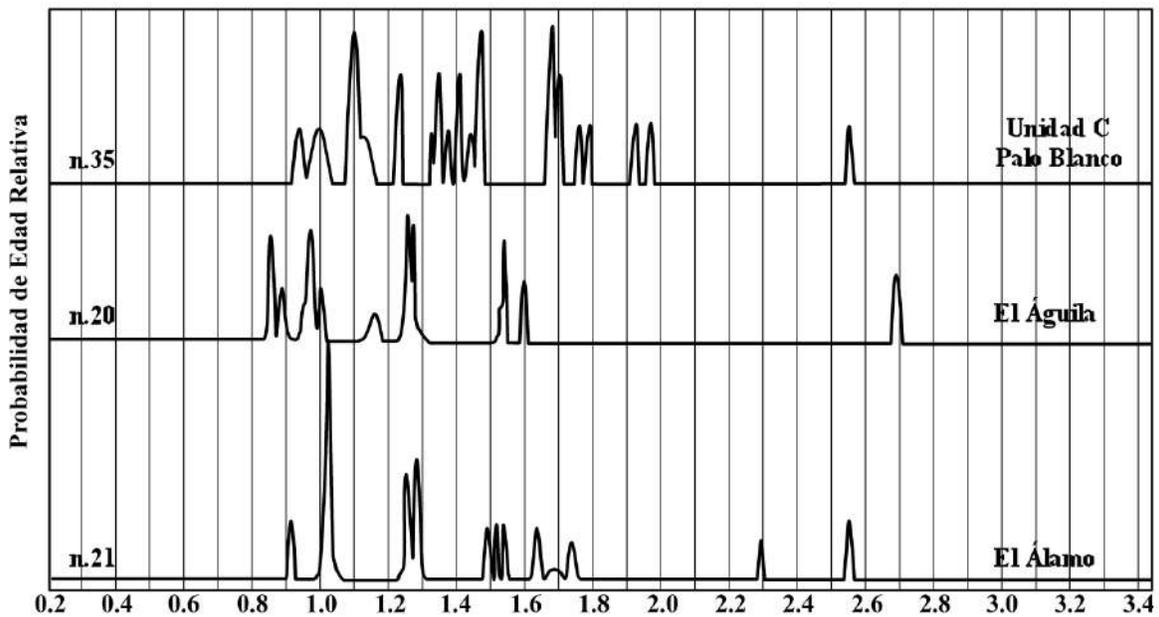


Figura 38. Espectro de 76 granos de circones detríticos de diferentes áreas de Sonora Central. Las áreas de muestreo se destacan a la derecha. Modificado de Gross et al., 2000.

Las muestras con una edad mayor a 1.4 Ga no sirven como referencia en estos escenarios ya que estos podrían aparecer en todas las opciones anteriores. Las muestras con una edad de 1.4 Ga podrían provenir de cuerpos graníticos al sur de Estados Unidos y norte de México.

Las muestras con una edad de 1.6 a 1.8 Ga podrían indistintamente derivar de cualquiera de los basamentos al suroeste de Estados Unidos: Mojave (1.63 a 2.3 Ga), Yavapai (1.67 a 1.76 Ga) o Mazatzal (1.62 a 1.72 Ga).

La Figura 39 muestra la correlación estratigráfica de las diferentes localidades en donde se reporta la existencia de secuencias sedimentarias, datadas radiométricamente, entre el Mesoproterozoico y Neoproterozoico, en las que se considera que existen características estratigráficas y litológicas similares con la unidad C.

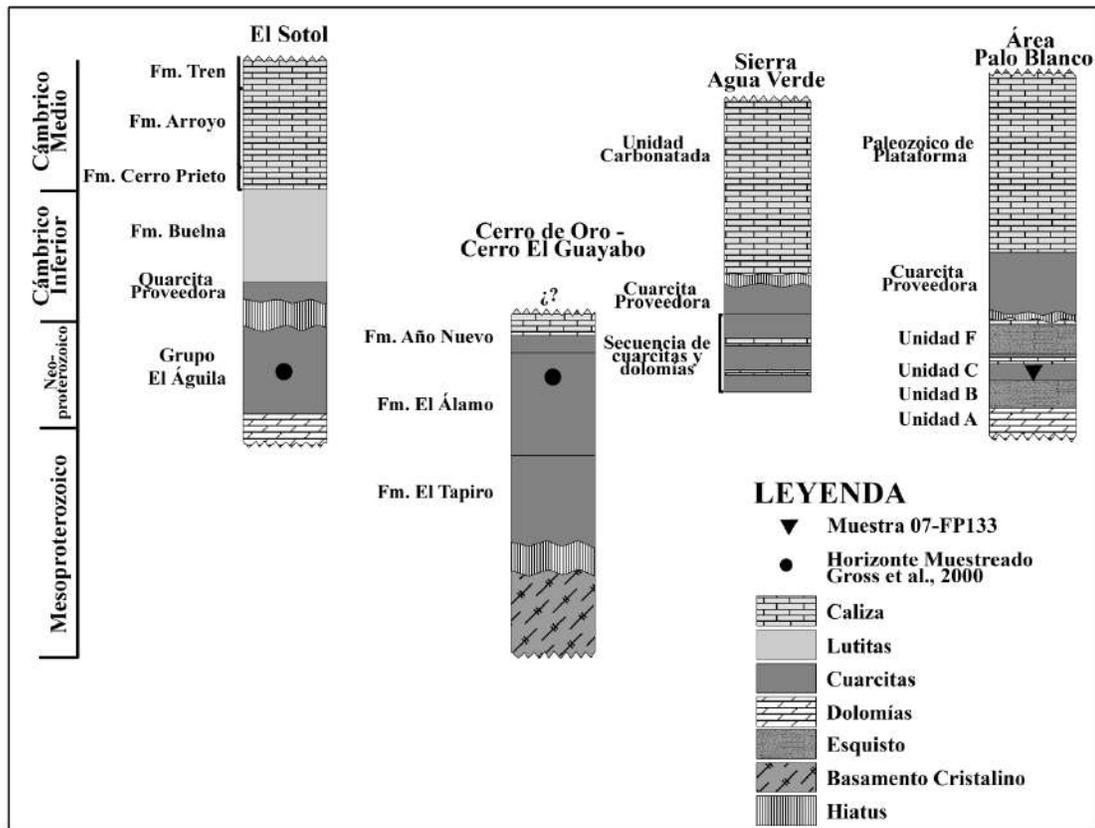


Figura 39. Correlación estratigráfica de las diferentes localidades en donde se reporta la existencia de secuencias sedimentarias, datadas radiométricamente, entre el Mesoproterozoico y Neoproterozoico, en las que se considera que existen características estratigráficas y litológicas similares a las de la unidad C. Modificado de Stewart et al., 1999 y Gross et al., 2000.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Por medio de este trabajo se pudo obtener información para complementar el marco geológico del área de estudio; sin embargo, durante el proceso de realización de este, no fue posible establecer y definir completamente algunos datos específicos, por lo que permanecerán hasta el momento como hipótesis formuladas en base a la interpretación de la información obtenida en campo, agregando los análisis de fechamientos de muestras de circones.

Se determinó como basamento del área de estudio a la unidad “A”, ésta corresponde a una caliza dolomitizada de probable edad Proterozoico Medio a Neoproterozoico. Estudios anteriores en el área determinaron la edad de la unidad C mediante el método de fechamiento U-Pb en circones, esta indica una edad de depósito de 1040 Ma (Poole y Amaya-Martínez, 2008). Dicha unidad se encuentra sobreyaciendo a la unidad B, un horizonte de rocas metamórfizadas a esquistos de biotita bajo condiciones de facies de esquistos verdes, y representa una superficie de afloramiento considerable del área de estudio. Según la sucesión estratigráfica obtenida a partir de secciones en campo esta unidad se posiciona en un nivel inferior de la unidad C.

La unidad D, presenta una continuidad con la arenisca conglomerática de la unidad C y corresponde a estratos carbonatados con evidencias de metamorfismo, sobreyaciendo a ésta se tiene una delgada capa de cuarcitas denominada unidad E, la cual no aflora en toda el área de estudio y se puede inferir un hiato entre esta unidad y la superior, definido por un contacto erosional entre estas dos litologías. La unidad F, la cual presenta características petrográficas similares a las de la unidad B, también representa una superficie importante y estratigráficamente esta se encuentra en un nivel inferior a la unidad correlacionable con la Cuarcita Proveedora.

Después del depósito de la unidad cámbrica correlacionable con la Cuarcita Proveedora se inicia un continuo proceso de sedimentación, con predominio de estratos carbonatados y en menor proporción siliciclásticos, desde el Cámbrico hasta el Pérmico

temprano, estos conforman y definen en su mayoría las secuencias estratigráficas de la Sierra Martínez.

Las unidades B y F, litológicamente corresponden a niveles de rocas metamórficas que se derivan de un protolito sedimentario, el cual, por sus características petrográficas, debió tratarse de una arenisca cuarzofeldespática de grano fino a muy fino con componentes arcillosos; ésta fue transformada a un esquistos de cuarzo-biotita bajo condiciones de metamorfismo de grado bajo, correspondiente a la facies de Esquistos Verdes. Se interpreta que estos niveles metamórficos llegan a tener un espesor máximo hasta de 290 m.

Probablemente el evento orogénico *OMS* es el posible responsable de que las secuencias paleozoicas de cuenca oceánica experimentaran un transporte tectónico, provocando el cabalgamiento de éstas sobre los sedimentos de la formación Mina México. Estas relaciones tectónicas son evidencias del régimen tectónico posterior al depósito de los grandes paquetes carbonatados de ambiente de plataforma; es el mismo evento orogénico que generó la gran cabalgadura Martínez, al este de la cual se encuentra la localidad en donde es posible observar la interrelación entre las secuencias del Paleozoico, con los sedimentos siliciclásticos de la formación Mina México.

Tanto la secuencia neoproterozoica como la carbonatada del Paleozoico de plataforma que conforma a la Sierra Martínez, presentan un basculamiento preferencial hacia el noreste producto del evento orogénico Larámide, a este también se le atribuye la intrusión de los cuerpos graníticos, granodioríticos, y de los diques y sills de composición de intermedia a félsica que cortan toda la secuencia estratigráfica.

El fechamiento de la “unidad C”, la sección realizada en campo donde la secuencia representativa del área permanece continua, así como el mapeo de unidades claves (unidad B, la F y la unidad correlacionable con la cuarcita Proveedora), permitieron proponer la historia geológica del área estudiada, así como también los sucesos que afectaron a esta secuencia estratigráfica, identificando la interpretación de todo el proceso desde su depósito, su desarrollo metamórfico y su nueva disposición producto de estructuras generadas por eventos orogénicos de gran escala.

REFERENCIAS

- Almazán-Vázquez, E., Buitrón-Sánchez, B., Franco-Vega, O., 2006. *Formación Pozo Nuevo: Una nueva secuencia litoestratigráfica de plataforma del Ordovícico Temprano en la Región central de Sonora, México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. (23), 1.
- Amaya-Martínez R., Premo R., Poole F., 2011. Depositional setting and source of detritical zircons in the permian Mina Mexico Foredeep in Sonora, Mexico. Reunion annual de la USG Poster session. U.S. Geological Survey, Denver, Co.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1981. An Overview of Precambrian Rocks in Sonora, Universidad Nacional Autónoma de México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, (5), 2, 131-139.
- Campa, M. F. 1985, The mexican thrust belt, in Howell, D.G., ed., Tectonostratigraphic terranes of Circum-Pacific region: CircumPacific Concil for Energy Mineral Resources, Earth Science Series, v.1, p. 299-313.
- Castillón-González, J., 2009. Recopilación y actualización de la estratigrafía de rocas del Neoproterozoico y Cámbrico en la región de Hermosillo, Sonora. Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. p.58.
- Coney, P.J., 1981. *Accretionary tectonics in western North America*, in Dickinson, W.R., y Payne. W.D., eds. *Relations of tectonics to ore deposits in the southern Cordillera*: Arizona Geological Society Digest, 14, 23-37.
- Coney, P.J., Campa, M.F., 1987. *Lithotectonic terrane map of Mexico (west of 91st Meridian)*; U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-1874-D, scale 1:2,500,000.
- Cooper, G.A., Arellano, A.R.V., Johnson, J.H., Okulitch, V.J., Stoyanow, A., Lochman, C., 1952, Cambrian Stratigraphy and Paleontology near Caborca, northwestern Sonora, Mexico: Smithsonian Miscellaneous Collections, 119, 1-184.

- Corsetti, F.A., Stewart, J.H., Haggard, J.W., 2006. *Neoproterozoic diamictite-cap carbonate succession and $\delta^{13}C$ chemostratigraphy from eastern Sonora, Mexico*, Chemical Geology, 237, 129-142.
- Cuen-Romero, F., 2013. Bioestratigrafía del Cámbrico de San José de Gracia, Sonora. Consideraciones Paleogeográficas. Tesis de Maestría en Ciencias-Geología. (Universidad de Sonora). Hermosillo Sonora.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983, El batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora: XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Guadalajara, Jalisco, México, 63-95.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57(3), 343-378.
- Gehrels, G.E., Stewart, J.H., 1998. *Detrital zircon U-Pb geochronology of Cambrian to Triassic miogeoclinal and eugeoclinal strata in Sonora, Mexico*. Journal of Geophysical Research, (103), B2, 2471-2487.
- Gross, E.L., Stewart, J.H., Gehrels, G.E., 2000. *Detrital zircon geochronology of Neoproterozoic to Middle Cambrian miogeoclinal and platformal strata: Northwest Sonora, Mexico*. Geofísica Internacional, (39), 4, 295-308.
- Hernández-Gracia, E., 2011. Generalidades Estratigráficas de las Secuencias Paleozoicas de Plataforma y de Cuenca: Con Énfasis en la formación Mina México en Sonora Central. Tesis Profesional, Universidad de Sonora, p.90.
- Hewett, R.L., 1978. *Geology of the cerro La Zacatera area, Sonora, Mexico*. Tesis de Maestría en Ciencias: Flagstaff, Arizona, Northern Arizona University, p.99.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2004. Carta topográfica Rebeico H12-D54 1:50000.

- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., Davidson, A., Waele, B.D., Ernst, R.E., Fitzsimons, I.C.W., Fuck, R.A., Gladkochub, D.P., Jacobs, J., Karlstrom, K.E., Lu, S., Natapov, L.M., Pease, V., Pisarevsky, S.A., Thrane, K., Vernikovsky, V., 2008. *Assembly, configuration and break-up history of Rodinia: A synthesis*. Precambrian Research, (160), 179-210.
- Li, Z.X., Li, X.H., Kinny, P.D., Wang, J., 1999. *The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China?* Earth and Planetary Science Letters, (173), 171-181.
- Longoria, J.F., González, M.A., Mendoza, J.J. y Pérez, V.A., 1978, Consideraciones estructurales en el cuadrángulo Pitiquito-La Primavera, NW de Sonora: Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Vol. 1, No. 1.
- Meert, J.G., Torsvik, T.H., 2004a. Paleomagnetic constraints on Neoproterozoic “Snowball Earth” continental reconstructions. In: McMenamin, G.S., McKay, M.A.S., Sohl, C.P. eds. *The Extreme Proterozoic, Geology, Geochemistry and Climate*. Geophysical Monograph Series, vol. 146. American Geophysical Union, Washington, DC, p. 5
- Molina-Garza, R.S., Iriondo, A., 2005. *La Megacizalla Mojave-Sonora: la hipótesis, la controversia y el estado actual de conocimiento*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: Volumen Conmemorativo del Centenario. Grandes Fronteras Tectónicas de México, (57) 1, p.1-26.
- Montijo-González, A., Terán-Ortega, L.A., 1988. *Geología del área de Rebeico con énfasis en el Paleozoico*. Tesis Profesional, Universidad de Sonora, p.94.
- Morales-Morales, H., Corral-Gastélum, R., 2006. Carta Geológico-Minera Rebeico H12-D54. Escala 1:50,000. Pachuca, Hidalgo. Servicio Geológico Mexicano.
- Ochoa-Contreras, R., 2014. Consideraciones Estratigráficas del Cámbrico al norte del poblado de San José de Gracia, Municipio de Hermosillo, Sonora, México. Tesis de Licenciatura (Universidad de Sonora). Hermosillo Sonora: pp. 23-29.

- Orozco-Garza, A., 2003. Petrología de los diques de lamprófido en el área de Hermosillo, Sonora. Tesis de Maestría (Universidad de Sonora). Hermosillo Sonora.
- Poole, F.G., Amaya-Martínez, R., 2000. *The Sonora Orogen in the Barita de Sonora Mine Area East of Mazatán, Central Sonora*. Field guide for Field Trip 3 (March 5, 2000), Fourth symposium on the geology of northwest Mexico and adjacent areas (March 6-8, 2000), Center for the Arts, University of Sonora, Hermosillo, México, p.27.
- Poole, F.G., Perry, W.J., Madrid, R.J., Amaya-Martínez, R., 2005. *Tectonics synthesis of the Ouchita-Marathon-Sonora orogenic margin of southern Laurentia: Stratigraphic and structural implication for timing of deformation events and plate-tectonic model*. En Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B., *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment and Alternatives*: Geological Society of America Special Paper (393), 543-595.
- Rivera-Carranco, E., 1988. *Condiciones paleoambientales de depósito de las formaciones cámbricas del área de Caborca, Sonora*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, (7) 1, 22-27.
- Roldán-Quintana, J., 1982. Evolución tectónica del estado de Sonora. Revista del Instituto de Geología. UNAM, (5), 178-185.
- Sarmiento-Villagrana, A., Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Vidal-Solano, J.R., 2016. *Nuevas restricciones de edad para el magmatismo y metamorfismo del Complejo Sonobari occidental y sus implicaciones para una orogenia temprana del Cretácico Tardío en el noroeste de México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, (33), 2, 170-182.
- Schmidt, G.T., 1978. *Geology of the northern Sierra El Encinal, Sonora, Mexico*. Tesis de Maestría en Ciencias: Flagstaff, Arizona, Northern Arizona University, p.80.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006. Carta geológico-Minera de Rebeico escala 1:50000: Pachuca, Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.

- Stevens, C.H., Poole, F.G., Amaya-Martínez, R., 2014, *Late Paleozoic fusulinids from Sonora, México: Importance for interpretation of depositional settings, biogeography, and paleotectonics*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, (31), 2, 14-27.
- Stewart, J.H., McMenamin, M.A.S., and Morales-Ramírez, J.M., 1984, *Upper Proterozoic and Cambrian rocks in the Caborca region, Sonora, Mexico: Physical stratigraphy, biostratigraphy, paleocurrent studies, and regional relations*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1309, p.36.
- Stewart, J.H., Poole F.G., Ketner, K.B., Madrid, R.J., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., 1990, *Tectonic and stratigraphy of the paleozoic and Triassic southern margin of the North America, Sonora, Mexico*, in Gehrels, G.E., and Spencer, J.E., eds., *Geologic excursions through the Sonoran Desert region, Arizona and Sonora*: Tucson, Arizona Geological Survey Special Paper 7, p.183-202.
- Stewart, J.H., y Amaya-Martínez, R., 1998, *Neoproterozoic and Lower Cambrian strata in Sonora, Mexico*: Geological Society of America Abstracts with Programs, v.30, n.5, p.66.
- Stewart, J.H., Amaya-Martínez, R., Palmer, A.R., 2002. *Neoproterozoic and Cambrian strata in Sonora, Mexico: Rodinian supercontinent to Laurentian Cordilleran margin en Barth, A., Contributions to Crustal Evolution of the Southwestern United States*: Special paper 365, 05-48.
- Stewart, J.H., Poole F.G., 2002, *Inventory of Neoproterozoic and Paleozoic strata in Sonora, Mexico*: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-97, p.50.
- Stewart, J.H., Poole, F.G., Harris, A.G., Repetski, J.E., Warldlaw, B.R., Mamet, B.L., Morales-Ramírez, J.M., 1999, *Neoproterozoic(?) to Pennsylvanian Inner shelf, Miogeoclinal strata in Sierra Agua Verde, Sonora, Mexico*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y Sociedad Geológica Mexicana, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.16, núm. 1, p.35-62.

Vega-Granillo, R., 1996. *La Sierra de Mazatán, Sonora, México: Geología y análisis estructural de un complejo metamórfico en la parte sur de la provincia de "Basin & Range"*. Tesis de Maestro en Ciencias - Geología, (Universidad de Sonora). Hermosillo Sonora: pp. 22-28, 33-35.