

Universidad de Sonora
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

“Nuevas aportaciones geológicas y técnicas mediante el empleo de VANTs en el área de la Sierra Las Mesteñas, noreste del estado de Sonora, México.”

Tesis

Que para obtener el Título de

Geólogo

Presenta:

Luis Salvador Macias Bustillos



Hermosillo, Sonora, Marzo del 2019

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

Dedicatoria

Este trabajo de tesis lo dedico principalmente a mis padres Martha Bustillos y Salvador Macias, por darme la vida, por ser grandes pilares a lo largo de mi existencia, quienes sin interés alguno me han apoyado y se han sacrificado por mí, quienes me han dado lo poco que tienen y a la vez me lo han dado todo para que pueda cumplir todos mis sueños, por lo cual siempre han sido y serán motivo de orgullo. Los quiero mucho, gracias por siempre creer en mí.

A mis abuelos Cristina, Salvador, María y José Luis† por siempre apoyarme y estar al tanto de mi educación y ofrecerme su cariño.

A mi hermana María Cristina que, aunque somos muy diferentes siempre estaremos uno para el otro, y a mis sobrinos Axel Fernando y Sara, por formar parte de mi sangre, familia y vida.

A mis tíos, demás familiares, amigos, profesores, seres queridos y todas aquellas personas que siempre me apoyaron y creyeron en mí.

También a todas esas personas que por el contrario nunca creyeron en mí, dijeron que nunca lograría nada en la vida, y siempre dudaron de mis capacidades.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Sonora, en especial al personal docente y administrativo del Departamento de Geología por el espacio, medios proporcionados para el desarrollo de este trabajo, por su compromiso y dedicación en la formación de los futuros geólogos.

A los proyectos CONACyT No. 235970 “La Revolución del Cámbrico y la Gran Radiación del Ordovícico en el Norte de México y Oaxaca”, y ECOS-NORD México-Francia M13U01 “Evolución de los Ecosistemas y la Biodiversidad Durante el Paleozoico”, a cargo del Dr. Juan José Palafox Reyes, así como al proyecto UNISON No. USO315003632: Bioestratigrafía y paleoecología de los depósitos del Paleozoico de Sonora Central, México; bajo la responsabilidad de la M.C. Alejandra Montijo González y el Dr. Francisco Javier Cuen Romero.

Se agradece, de una manera muy especial al Dr. Juan José Palafox Reyes, Director de esta tesis, por su invaluable dedicación y experiencia transmitida en el desarrollo de este trabajo, y del cual le he aprendido basto conocimiento a lo largo de mi carrera.

Del mismo modo, se agradece de una manera muy especial a la M.C. Dulce Raquel Reyes Montoya, por su apoyo, motivación, su tiempo, su ayuda en los trabajos de campo, conocimientos transmitidos durante la realización de esta tesis, y además sin duda alguna, por brindarme su valiosa amistad.

Al Dr. Francisco Grijalva Noriega, y la M.C. Alejandra Montijo por la revisión de esta tesis y por los conocimientos transmitidos durante este trabajo y a lo largo de la carrera.

A la Dra. Verónica Moreno Rodríguez, al Dr. Mario Martínez, Dr. Francisco Cuen Romero, Dr. Vitaliano Santana Rojas, M.C. Iván Espinoza, y al M.C. Alfredo Ochoa Granillo, por la ayuda en las diferentes dudas, consejos, y por su apoyo académico.

A mis compañeros, amigos y tesistas del proyecto CONACyT “La Revolución del Cámbrico y la Gran Radiación del Ordovícico en el Norte de México y Oaxaca”, Geol. Jesús González, Miguel Morales, Sughei Grijalva, Adilene Bustillos, Isaí Castellón, André Becuar, Jesús Grijalva, por su apoyo en los trabajos de campo y en la realización de esta tesis, así como por la amistad que compartimos en grupo y que entre todos siempre logramos ayudarnos y resolver nuestros problemas.

Al Ing. Juan Palafox Duarte y al Ing. Iván Lechuga, por su ayuda y apoyo en todo lo relacionado en el aprendizaje y manejo del drone, así como los softwares que fueron utilizados en la realización de esta tesis, además de bríndame parte de su tiempo.

A las secretarias y personal administrativo que forman y formaron parte del Departamento de Geología, Aracely, Silvia, Katy, Norah, Lupita, Czarina, Sergio y Manuel, gracias por sus atenciones.

A los habitantes, dueños y encargados del Rancho La Mesa y Rancho Baltasar municipio de Fronteras, Sonora, por bríndame las facilidades y el lugar de realización de tesis.

A los compañeros y alumnos de la materia de Geología de campo II generación 2017-2, por su ayuda en las diferentes actividades en campo en la Sierra Las Mesteñas.

A la Geol. Angélica Navarro, una gran amiga, compañera y humilde persona, que siempre me brindó su amistad, y todo su apoyo que estaba en sus manos para ayudarme a salir adelante a lo largo de mis años como estudiante universitario. Gracias.

A mis amigas Paola Portela, Dulce Adilene Ochoa y Fernanda Cons, por su incondicional, leal y fiel amistad que me han ofrecido todos estos años, por brindarme su confianza, su tiempo y consejos en innumerables buenas y largas pláticas, en las cuales compartimos y discutimos ideas, reímos y lloramos, además de hacerme reflexionar sobre mis emociones y darme todo su apoyo. Gracias.

A mis amigos Rubén Navidad, Rigoberto Puente, Jesús Palafox, Raúl Montaña, Dustin Ozua, y Noé Durazo, también por brindarme su valiosa amistad fuera y dentro de la universidad a lo largo de estos años, en los cuales me dieron su apoyo y tuvimos grandes platicas no solo de Geología, si no de la vida, con un bote o una botella de cerveza en la mano. Gracias.

A la Lic. Marlene Heredia, por bríndame su gran amistad a distancia, que, aunque nos separan miles de kilómetros siempre ha logrado apoyarme y darme todos los ánimos para salir adelante. Gracias.

A Jazmín, Oralía, Rafa, Neto y demás amigos y compañeros que siempre creyeron en mí y me dieron su apoyo. Gracias.

RESUMEN

Se presenta los resultados obtenidos de la cartografía a escala 1:25,000 de la sierra Las Mesteñas en el noreste del estado de Sonora, y del aprovechamiento del empleo de vehículos aéreos no tripulados (VANT'S) para la obtención de nuevos datos. A partir de esto, se identifican 14 unidades litológicas, de las cuales tres se reconocen por primera vez en el área. Así también se presenta la generación de dos modelos tridimensionales mediante fotogrametría digital de los cuales se obtuvo información.

En la sierra Las Mesteñas se presenta una de las áreas más antiguas de México geológicamente hablando, se identificó un basamento ígneo-metamórfico, el cual es sobreyacido por secuencias sedimentarias del Paleozoico, formaciones marinas y continentales del Cretácico, derrames riolíticos del Oligoceno y emplazamientos de cuerpos porfídicos de la misma edad, por último, se tiene el depósito de una gran cantidad de sedimentos recientes.

Se identificaron estructuras en el área de estudio relacionados con los dos últimos eventos de deformación, lo que nos aporta información sobre la tectónica y la historia geológica que se ha desarrollado tanto local como regionalmente

El empleo de las nuevas tecnologías como son los VANT's coadyuvó con la creación de dos modelos tridimensionales en las inmediaciones del cerro La Pedregosa, en las unidades Esquisto Pinal, Cuarcita Bolsa y Caliza Abrigo del Paleoproterozoico, Cámbrico inferior y Cámbrico superior respectivamente, de los cuales se obtuvieron datos estratigráficos, estructurales, morfológicos y topográficos. Ambos modelos aportaron nueva información la cual fue aprovechada para obtener resultados y comparaciones con otro estudio realizado en el lugar.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Objetivo del Trabajo	17
1.2 Justificación.....	17
2. GENERALIDADES	18
2.1 Localización	18
2.2 Vías de acceso.....	19
2.3 Trabajos Previos	20
2.4 Fisiografía	23
2.5 Geomorfología	25
2.6 Hidrología.....	28
2.7 Clima.....	28
3. GENERALIDADES DE LOS VANT´S Y LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL.....	30
3.1 Uso de los drones en el ámbito de la geología y la ingeniería.	30
3.2 Principios de la fotogrametría a baja altitud.	32
4. METODOLOGÍA	34
4.1 Trabajo de campo	34
4.1.2 Vehículo Aéreo No Tripulado y Captura de Fotografías.....	35
4.2 Trabajo de gabinete	35
4.2.1 Procesamiento de Datos	36
5. MARCO GEOLÓGICO	37
5.1 Geología Regional	37
5.1.1 Precámbrico.....	38

5.1.2 Paleozoico.....	39
5.1.3 Mesozoico	41
5.1.4 Cenozoico	43
5.2 Geología local (Sierra Las Mesteñas).....	44
5.2.1 Precámbrico.....	46
5.2.1.1 Esquisto Pinal.....	46
5.2.1.2 Granito Mesteñas	51
5.2.2 Paleozoico.....	53
5.2.2.1 Formación Cuarcita Bolsa	54
5.2.2.2 Formación Caliza Abrigo.....	59
5.2.2.3 Formación Caliza Martín	64
5.2.2.4 Formación Caliza Escabrosa	66
5.2.2.5 Formación Caliza Naco	70
5.2.3 Mesozoico	73
5.2.3.1 Grupo Bisbee	73
5.2.3.1.1 Conglomerado Glance	73
5.2.3.1.2 Formación Morita	77
5.2.3.2 Grupo Cabullona	78
5.2.4 Cenozoico	79
5.2.4.1 Riolita-Toba riolítica.....	80
5.2.4.2 Pórfido Andesítico	81
5.2.4.3 Pórfido Riolítico	81
5.2.4.3 Depósitos no consolidados	82
5.3 Geología estructural.....	83
5.3.1 Deformación Dúctil.....	83

5.3.2 Deformación Dúctil-Frágil	85
5.3.3 Deformación Frágil	86
5.3.3.1 Fallas Normales	86
5.3.3.2 Fallas a rumbo.....	89
5.3.3.3 Lineamientos	92
5.3.3.4 Fosas	94
5.4 Tectónica e historia geológica.....	95
5.4.1 Precámbrico	95
5.4.2 Paleozoico.....	100
5.4.3 Mesozoico	101
5.4.4 Cenozoico	102
5.5 Yacimientos minerales	105
6. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO	109
7. RESULTADOS	120
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
9. BIBLIOGRAFÍA	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	18
Figura 2. Mapa de las provincias y subprovincias fisiográficas del estado de Sonora (tomado de CONABIO, 2012).....	24
Figura 3. Mapa geomorfológico del estado de Sonora (tomado de Lugo-Hubp 1990).	27
Figura 4. Mapa de la distribución de climas del estado de Sonora (tomado de CONABIO, 2016).	29
Figura 5. Vehículo Aéreo no Tripulado Phantom 4 Pro Plus.	35
Figura 6. Mapa geológico regional tomado de la carta Cuauhtémoc H12B44 emitida por el SGM.....	37
Figura 7. Columna geológica de la Sierra Las Mesteñas.	45
Figura 8. Afloramiento aproximadamente 1.5 km al N-NE del rancho La Mesa, en el flanco poniente de la sierra Las Mesteñas, donde se observan rocas metamórficas que se identifican como gneis correspondiente a la unidad Esquisto Pinal.	47
Figura 9. Afloramiento del Esquisto Pinal, al NW del cerro Las Pintas y al S del cerro La Pedregosa, cerca del camino entre rancho La Mesa y Mesa La Pedregosa. En la imagen resalta los grandes y abundantes cristales de estaurolita que se pueden apreciar fácilmente.	48
Figura 10. Fotografía del cerro La Pedregosa con rumbo NW-SE, viendo hacia el NE. Se aprecia contacto entre el Esquisto Pinal del Paleoproterozoico (base) y la Formación Cuarcita Bolsa de edad Cámbrico inferior (cima), la cual se encuentra discordantemente sobre una superficie de erosión (línea roja dibujada). ..	50
Figura 11. Afloramiento del Granito Mesteñas sobre el arroyo La Cieneguita, al lado oriente del camino que va del rancho La Mesa al rancho Baltazar. En la fotografía	

se puede ver al Granito Mesteñas con textura pegmatítica donde se observan grandes cristales, principalmente de feldespato potásico.	52
Figura 12. Fotografía mirando al SE, donde se muestra el contacto discordante (línea roja) entre el Granito Mesteñas del Precámbrico (base) y la Cuarcita Bolsa (cima).....	53
Figura 13. Afloramiento de la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior sobre el arroyo La Cieneguita al W del Rancho Baltasar, muy cerca del contacto con el Granito Mesteñas, donde se puede observar estratificación cruzada o también llamada estratificación cola de pescado, la cual corresponde a una estructura sedimentaria primaria.	55
Figura 14. Afloramiento de la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior sobre el arroyo La Cieneguita al W del rancho Baltasar, muy cerca del contacto con el Granito Mesteñas, donde se puede observar icnofosiles hechas por organismos al momento de la sedimentación.	56
Figura 15. Fotografía panorámica viendo al este donde se observa e infiera el posible contacto estructural de falla normal entre la Cuarcita Bolsa y la Caliza Martin.	59
Figura 16. Afloramiento de la Caliza Abrigo del Cámbrico superior al W-SW del cerro La Pedregosa.	61
Figura 17. Afloramiento sobre el arroyo La Cieneguita al SW del cerro La Pedregosa donde se puede observar el contacto concordante y de manera transicional entre la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico medio y la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico tardío.	63
Figura 18. Fotografía panorámica vista desde la cima del Cerro La Pedregosa viendo al NE, en la cual se puede observar a la Caliza Abrigo con un rumbo NW-SE y un echado al NE, y se aprecia el contacto concordante (línea roja) entre la Cuarcita Bolsa y la Caliza Abrigo que sobreyace a la primera.	64

Figura 19. Afloramiento de la Caliza Escabrosa en el Flanco NE de la sierra Las Mesteñas.....	67
Figura 20. Fotografía viendo al NW tomada desde la cima del Cerro La Pedregosa, donde se observa un afloramiento típico y la forma de relieve que presenta la Caliza Escabrosa en la sierra Las Mesteñas.	69
Figura 21. Fotografía de un afloramiento de una caliza fosilífera de la Caliza Naco, ubicado en el flanco NE de la sierra Las Mesteñas.....	71
Figura 22. Afloramiento sobre el arroyo La Cieneguita, donde se observa un conglomerado polimíctico que se identifica como Conglomerado Glance. Se alcanza a ver clastos de granito, cuarcita, caliza y cuarzo principalmente.	75
Figura 23. Fotografías A y B al SW de Agua Chemali, donde se observa el contacto concordante y transicional entre el Conglomerado Glance y la Formación Morita.	76
Figura 24. Afloramiento de sedimentos correspondientes al Grupo Cabullona. ...	79
Figura 25. Afloramiento de riolitas sobre el arroyo La Cieneguita, al NE del cerro Las Pintas.....	80
Figura 26. Afloramiento del Esquisto Pinal al N-NE del rancho La Mesa, donde se observa claramente la foliación.	84
Figura 27. Fotografía tomada en las inmediaciones del rancho La Mesa donde se muestra un plano de falla con estrías de 75° de ángulo que pone en evidencia un fallamiento tipo normal.	87
Figura 28. Fotografía al oeste del rancho Baltasar sobre el Granito Mesteñas donde se observan estrías de una falla normal con un rake de 110° con respecto a la horizontal del plano de falla.	88
Figura 29. Fotografía panorámica de la Sierra Las Mesteñas viendo al NW desde el rancho Baltasar donde se muestra la exhumación del basamento y el basculamiento de todas las unidades.	89

Figura 30. A) estrías de falla con una rake de 9° B) estrías de falla con un rake de 13°. Ambos sistemas de estrías se presentan sobre el plano de falla que tiene un rumbo NE-SW, y representan un sistema de fallas con movimiento a rumbo.	91
Figura 31. Falla con desplazamiento a rumbo en los alrededores del cerro La Pedregosa.	92
Figura 32. Imagen satelital tomada de ESRI Imagery 2018 donde muestra los lineamientos en el área de estudio con un trend NE-SW.	93
Figura 33. Fotografía panorámica de la Fosa La Mesa viendo al SW, tomada desde lo alto del rancho La Mesa.	94
Figura 34. Distribución esquemática de los terrenos tectonoestratigráficos en Sonora. Modificado de Campa y Coney (1983).	96
Figura 35. Mapa tomado de Meijer (2014) donde muestra las rocas del Paleoproterozoico incluyendo el Terreno Pinal (color negro) que se encuentran expuestas en Arizona y se prolongan hacia México.	97
Figura 36. Modelo conceptual tomado de Meijer (2014) donde muestra la subducción que dio origen al Terreno Pinal y su interacción dorsal-trincheras.	98
Figura 37. Veta de cuarzo y óxidos emplazada en el Granito Mesteñas.	107
Figura 38. Nube de puntos densa del modelo uno mirando hacia el este.	109
Figura 39. Nube de puntos densa del modelo uno mirando hacia el norte.	110
Figura 40. Nube de puntos densa del modelo dos mirando hacia el norte.	110
Figura 41. Nube de puntos densa del modelo dos mirando hacia el noroeste. ..	111
Figura 42. Ortomosaico del modelo uno.	112
Figura 43. Ortomosaico del modelo dos.	113
Figura 44. MDE del modelo uno.	114

Figura 45. MDE del modelo dos.....	115
Figura 46. Modelo uno mirando hacia el este.....	116
Figura 47. Modelo uno mirando hacia el noroeste.	116
Figura 48. Modelo uno mirando hacia el oeste.	117
Figura 49. Modelo dos mirando hacia el noreste.	118
Figura 50. Modelo dos mirando hacia el norte.....	118
Figura 51. Modelo dos mirando hacia el noroeste.....	119
Figura 52. Unidades litológicas identificadas en el modelo uno.....	121
Figura 53. Cambio en la morfología del modelo uno que se interpreta como una falla.	121
Figura 55. Sección de Grijalva-Miranda (2019).	123
Figura 54. Modelo dos donde se muestra el cambio de los espesores en los estratos.	123

1. INTRODUCCIÓN

En el noreste del estado de Sonora, específicamente en la sierra Las Mesteñas, se encuentran rocas de las más antiguas de México, y al mismo tiempo representa una de las zonas menos estudiadas geológicamente hablando, por lo cual hace a esta localidad un lugar muy interesante para su estudio y así mismo aportar nuevos datos a la geología.

Las rocas que se tienen en la porción noreste de Sonora comprenden unidades litológicas que van desde el Precámbrico hasta el reciente. Se ha reportado un basamento de tipo ígneo-metamórfico: (Granito Mesteñas y Esquisto Pinal) (Ransome, 1904; Anderson y Silver, 1977 a; GEOCA, S.A., 1965) el cual es de una edad precámbrica y, corresponde al cratón de Norte América, conformando el cuerpo principal del área en estudio.

También se presentan formaciones sedimentarias pertenecientes a cuencas paleozoicas, las cuales corresponden a las formaciones Cuarcita Bolsa, Caliza Abrigo, Caliza Martin, Caliza Escabrosa y Caliza Naco (Ransome 1904). Así mismo se encuentran rocas mesozoicas del Cretácico, que se incluyen en los grupos Bisbee y Cabullona (Ransome, 1904; Taliaferro, 1933; Yza, 1984). Por último, para el Cenozoico está representado por rocas extrusivas de carácter riolítico y pórfidos de composición andesítica y riolítica, cubiertas estratigráficamente por sedimentos recientes.

Lo expuesto anteriormente se encuentra englobado dentro de una morfología de sierra y valles alargados preferencialmente en dirección NW-SE, debido a la tectónica extensiva que inicia en el Mioceno y que afecta a esta región y a gran parte del noroeste de México.

La sierra Las Mesteñas es de interés ya que el último trabajo de relevancia cartográfica y bioestratigráfica data de hace más de 30 años, el cual elaboró Peiffer-Rangin (1988), posterior a este, solo se tienen trabajos de estudio de géneros y especies de crinoides en la Formación Caliza Naco del Pensilvánico (Villanueva et al., 2016), y bioestratigrafía de conodontos en la Formación Caliza Martin del

Devónico (Lara-Peña, 2017). Por su parte, Gómez-Tagle (1967) realizó un estudio geológico del área comparando y correlacionando las unidades identificadas con las definidas por primera vez en su localidad tipo en el Cuadrángulo de Bisbee por Ransome (1904).

Es por ello que se decidió hacer este trabajo, el cual consistió en cartografiar y definir de nueva cuenta todas las unidades geológicas presentes en el área, así como presentar un nuevo mapa geológico a escala 1:25000, que puede ser utilizado como base para posibles estudios a futuro en este, se muestran de nuevo y de una mejor manera las diferentes unidades y contactos litológicos, la presencia de estructuras geológicas que nos dan nuevas evidencias por primera vez reportadas en el área y que nos ayudan a entender la tectónica local y regional y así mismo a comprender la evolución de la historia geológica de la sierra Las Mesteñas.

Se destaca que la realización de este trabajo está complementada con la utilización de nuevas tecnologías, ya que fue empleado un vehículo aéreo no tripulado (VANT), a los cuales también se le conocen como drones. La implementación de estas herramientas en la sierra Las Mesteñas nos aportó nuevos datos y nuevas técnicas de interpretar diferentes aspectos geológicos que están presentes en el lugar, aspectos estratigráficos, estructurales, topográficos y de morfología del terreno, que en conjunto nos facilita y nos da nuevas y diferentes maneras de obtener datos y analizar la geología.

Con el manejo de este vehículo, se elaboraron dos modelos 3D del área del cerro La Pedregosa, mediante la toma de cientos de imágenes aéreas que fueron procesadas mediante el software AgisSoft PhotoScan 15.0 versión de prueba.

1.1 Objetivo del Trabajo

Esta tesis tiene como objetivos de trabajo lo siguiente.

1. Realizar la cartografía del área en un mapeo a escala 1:25,000 mediante secciones de campo y haciendo uso de imágenes satelitales, lo cual va a permitir reconocer y describir de manera local todas las unidades que se encuentren en el área, así como aportar nuevos datos litológicos y estructurales que nos ayuden a entender e interpretar con mayor certidumbre la tectónica local y regional a lo largo de su historia.
2. Hacer uso de las nuevas tecnologías como lo son los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT´S) para la obtención de datos estratigráficos, estructurales y morfológicos que revele de mejor manera la geología y tectónica que predomina en el área.

1.2 Justificación

La sierra Las Mestañas resulta interesante para aportar nuevos datos y evidencias en las diferentes temáticas de la geología que se presentan en el área debido a que:

1. La geología del noreste del estado de Sonora ha sido muy poco estudiada y sobre todo en menor medida las rocas paleozoicas y precámbricas, ya que existen muy pocos trabajos en el área que aporten datos geológicos de todo tipo, como lo son litológicos, estructurales, tectónicos y de yacimientos minerales. Además, algunos de los trabajos previos datan de hace ya varias décadas, que no consideraban la tectónica de placas.
2. Realizar una comparativa entre las unidades identificadas en esta región del NE de Sonora con las unidades de la región SE del vecino estado de Arizona.
3. El uso de la nueva tecnología como lo son los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT´S), ayudaría a conocer la geología en áreas de interés e inaccesibles y aportaría nuevos conocimientos geológicos al área estudiada.

2. GENERALIDADES

2.1 Localización

El área de estudio se localiza en la porción noreste del estado de Sonora a 40 km al noroeste del poblado de Fronteras (fig. 1), ubicado la sierra Las Mesteñas. Se encuentra delimitada entre las coordenadas UTM de la zona 12N 3, 421,000 y 3, 433,000 m N Y 614,000 y 625,000 m E, comprendida en la carta topográfica Cuauhtémoc H12B44 a escala 1:50000, y Cuquiriachi H12B54 a escala 1:50000, ambas distribuidas por INEGI.

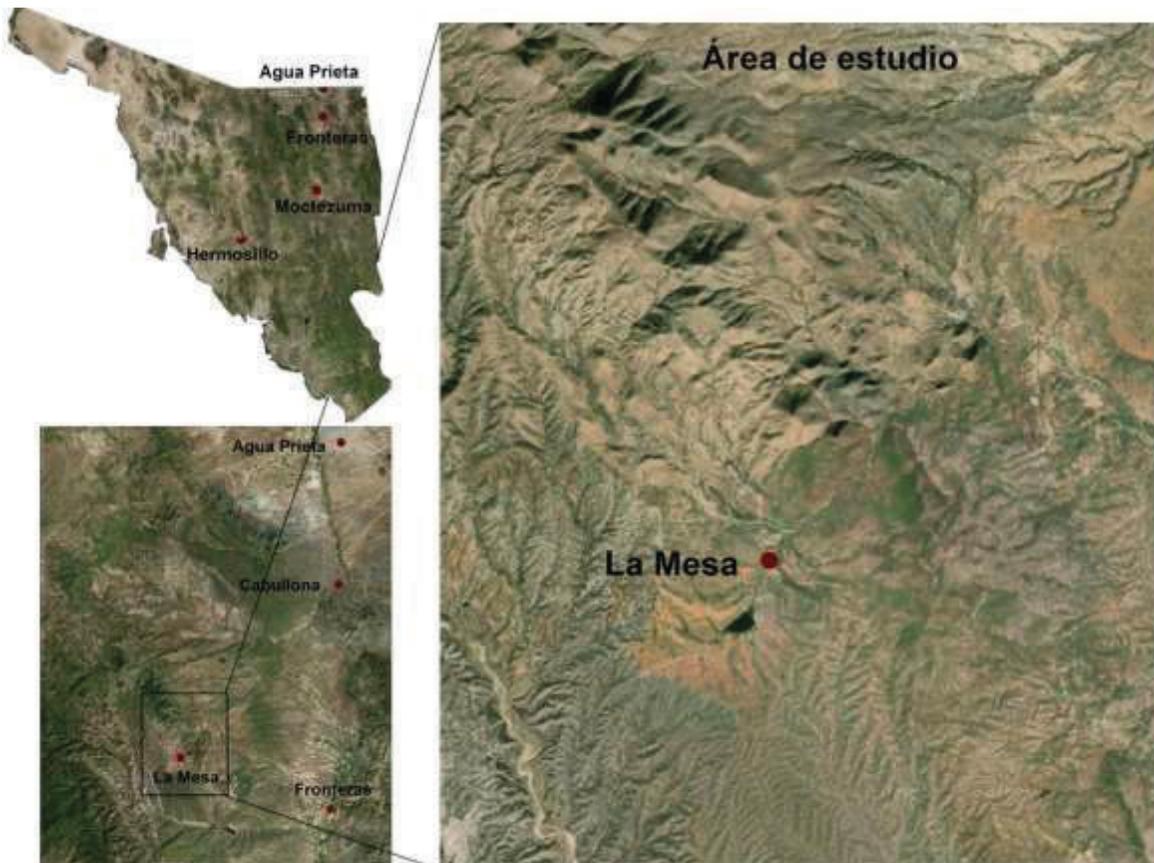


Figura 1. Localización del área de estudio.

2.2 Vías de acceso

Partiendo desde la ciudad de Hermosillo, el acceso al área de estudio se realiza tomando la carretera federal No. 14 Hermosillo-Moctezuma y después la carretera federal No. 17 Moctezuma-Agua Prieta. Cerca de 15 km después del poblado de Fronteras, se tiene el entronque de un camino de terracería que, de seguirse por poco más de 25 km, conduce al área de estudio ubicado a 5 km al noreste del Rancho La Mesa, área destinada para acampar durante el trabajo de campo (Figura 1).

2.3 Trabajos Previos

Para entender la evolución de la geología en la región de la sierra Las Mesteñas y el noreste del estado de Sonora es indispensable conocer y comprender el trabajo realizado por Ransome (1904) en Bisbee, Arizona a 55 km aproximadamente del área de estudio. Este autor definió las unidades correspondientes al Precámbrico, Cámbrico, Devónico, Carbonífero, las secuencias mesozoicas del Grupo Bisbee, así como depósitos continentales del Terciario.

En el trabajo de tesis profesional elaborada por Gómez-Tagle (1967), realizó un estudio geológico de la sierra Las Mesteñas en el municipio de Fronteras, Sonora, con el cual, estableció una serie de correlaciones con base a características litológicas, posiciones estratigráficas y contenido fósil de las unidades descritas por él, y las identificadas por Ransome (1904).

La Comisión Federal de Electricidad estuvo investigando en la región que comprende la cuenca Cabullona, haciendo exploración geológica en busca de carbón térmico (Yza et al, 1984).

Peiffer (1988), realizó un trabajo de mapeo geológico en la región. Presentó un mapa geológico utilizando imágenes de satélite y secciones medidas de la zona donde reconoce la distribución espacial de las formaciones reportadas por Gómez-Tagle (1967). En suma, Peiffer *opus cit.* menciona la presencia de conodontos en una secuencia devónica equivalente a la Caliza Martin, pero sin detallar géneros y especies, los cuales posteriormente estudió Lara-Peña (2017).

Villanueva et al. (2016), describieron por primera vez 8 géneros y 9 especies de crinoides correspondientes a la Formación Naco del Pensilvánico en la parte central de la sierra Las Mesteñas.

Lara-Peña (2017), desarrolló un estudio bioestratigráfico con base en conodontos en el área del cerro Las Pintas, en la parte centro-sur de la sierra Las Mesteñas. A partir de los resultados que obtuvo identificó el Devónico superior (Fameniano) de plataforma que es correspondiente con la Caliza Martin definida por

Ransome (1904) en Arizona y correlacionada en la sierra Las Mesteñas por Gómez-Tagle (1967), y que ha sido interpretada como depósitos de plataforma asociados al margen suroeste del cratón de Norte América (Huddle y Dobrovlny, 1952).

Finalmente, Grijalva-Miranda (2019), desarrolló un estudio geológico y paleontológico sobre la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico medio-superior al noreste del cerro La Pedregosa, con el cual se pretende dar a conocer aportes faunísticos y sedimentarios y así poder interpretar los ambientes de formación y que dieron su origen.

En cuanto al uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT's) y su aplicación de este en la fotogrametría, realmente se tienen muy pocos trabajos de este tipo de estudios ya que se trata de técnicas relativamente nuevas, por lo que se recopiló bibliografía que ayudaran a entender y procesar este tipo de datos fotogramétricos. Por lo siguiente se mencionan algunos trabajos previos a continuación referentes en este ámbito.

Díaz-Cabrera (2011), mediante su trabajo "Análisis Fotogramétrico de imágenes Adquiridas por un Avión No Tripulado" enfoca el uso de las imágenes aéreas con la posibilidad de realizar fotomosaicos, a partir de la sobreposición de imágenes aéreas de una zona rural.

Santos-Clavero (2014), en su estudio "Fotogrametría usando Plataforma Aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)", hace uso de un UAV para elaborar un levantamiento fotogramétrico en un área controlada.

Coello-Romero y Ballesteros-Abellán (2015), realizaron el estudio "Fotogrametría de UAV de Ala Fija y Comparación con Topografía Clásica, Universidad Politécnica de Madrid", donde llevaron a cabo una comparación entre dos procedimientos diferentes para obtener mapas y modelos digitales de terreno. Se realizó un levantamiento mediante GPS y otro con fotogrametría aérea utilizando un VANT.

En 2015, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, muestra las distintas aplicaciones de los drones en el entorno de la Ingeniería Civil, en su trabajo “Los Drones y sus Aplicaciones a la Ingeniería Civil”.

También en 2015, Villareal-Moncayo analizó la precisión de levantamientos topográficos usando drones respecto a la densidad de puntos de control dentro del campus de la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

Por último, García-Yeomans (2017) realizó fotogrametría digital utilizando un vehículo aéreo no tripulado para la realización de un estudio de peligro de inundación en el arroyo Los Olivos en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México.

2.4 Fisiografía

La fisiografía del estado de Sonora (Figura 2) está constituida por cuatro provincias importantes, la provincia fisiográfica Llanura Sonorense es la que presenta mayor extensión en el estado y cubre desde la frontera con Estados Unidos y Baja California hasta su límite con la provincia Llanura Costera del Pacífico que sólo abarca la región del Valle del Mayo; al oeste se delimita por el Golfo de California y al este por su límite con la provincia Sierra Madre Occidental donde ésta última se inicia a 50 km al sur del límite internacional con Estados Unidos para terminar en el río Santiago y el Eje Neovolcánico; por último, se tiene a la provincia fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte que, a pesar de tener una limitada representación en el estado, para fines de este trabajo posee importancia debido a que domina la fisiografía y geomorfología de la zona de estudio (CONABIO, 2016).

1. Sierras y Llanuras del Norte

Esta provincia se caracteriza por poseer sierras bajas y abruptas que se separan entre sí por amplias bajadas y llanuras, algunas de ellas denominadas bolsones. En esta provincia se encuentra una parte de la cuenca del Río Conchos, afluente del Bravo y, en su centro, el Bolsón de Mapimí. Se extiende por los territorios de Chihuahua y Coahuila, y en Sonora ocupa una pequeña zona en el extremo nor-noreste del estado en los municipios de Agua Prieta, Fronteras, Naco, Santa Cruz y Cananea, principalmente (CONAGUA, 2011).

Esta provincia se subdivide en cinco subprovincias: Llanuras y Médanos del Norte, Sierras Plegadas del Norte, Del Bolsón de Mapimí, Llanuras y Sierras Volcánicas y Laguna de Mayran, de entre las cuales resulta de interés la primera ya que caracteriza al área del estudio.

a. Llanuras y Médanos del Norte

Esta subprovincia está formada por extensos valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras. Predominan las rocas sedimentarias

(principalmente conglomerados) aunque se presentan pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas (CONAGUA, 2011).

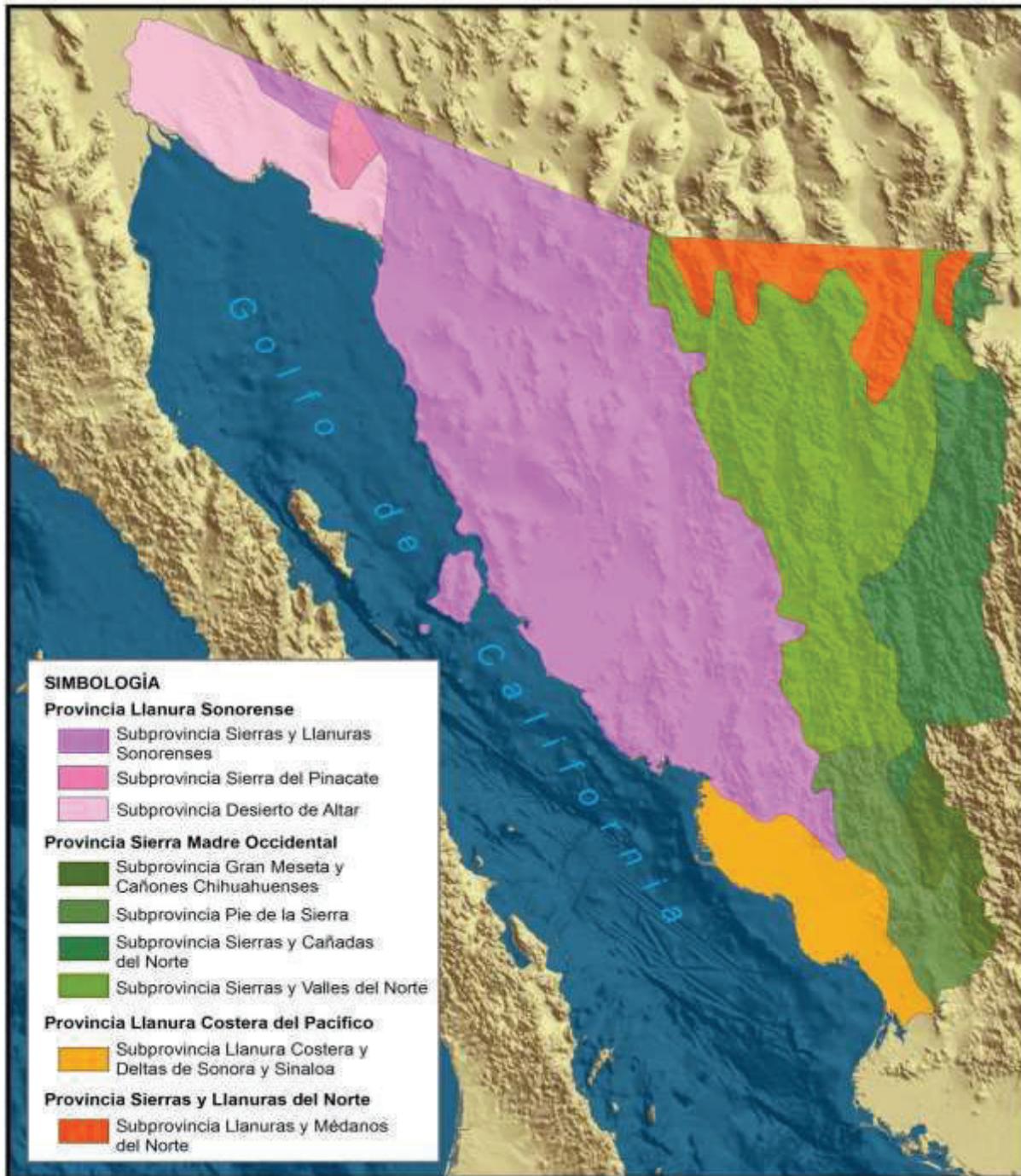


Figura 2. Mapa de las provincias y subprovincias fisiográficas del estado de Sonora (tomado de CONABIO, 2012).

2.5 Geomorfología

La geomorfología de Sonora (Figura 3) está representada de manera general por una planicie aluvial y de piedemonte extensa sobre la cual se erigen una serie de montañas que aumentan gradualmente en altitud de oeste a este: desde la costa del Golfo de California hasta culminar con las grandes elevaciones que constituyen a la Sierra Madre Occidental. Este elemento geomorfológico comprende cuatro unidades principales en su relieve: (1) El desierto de Altar en la parte noroccidental del estado en los límites con Baja California; (2) La planicie aluvial y de piedemonte con elevaciones menores localizada en una franja paralela a la línea de costa; (3) Las cadenas montañosas de bloque, transicionales a la Sierra Madre Occidental cuyos rasgos geomorfológicos se presentan hacia el este-sureste del estado y (4) El campo volcánico cuaternario El Pinacate (Lugo-Hubp, 1990).

El primero de los elementos geomorfológicos que constituyen, de manera general, una gran parte de Sonora es el desierto. Éste se extiende hacia el oeste-noroeste del estado. Consiste en una superficie nivelada cubierta de arena y con una baja densidad de vegetación y está conformado en un 70% por arenas en planicies onduladas; un 20% por barjanes de diversos tipos y el resto por dunas de hasta 80-100 m de altura formadas por la conjugación de barjanes más pequeños (Lancaster et al, 1987 fide Lugo-Hubp, 1990).

Por otro lado, el campo volcánico El Pinacate está constituido por un conjunto de cinco volcanes principales y lavas basálticas que construyen una estructura con forma ovalada y que presentan una altitud máxima de 1,190 msnm. También está compuesto por estructuras de menor tamaño como cráteres, derrames de lava y depósitos de cenizas como producto de un volcanismo asociado a la actividad tectónica actual de la extensión del norte del Golfo de California iniciado probablemente durante el Pleistoceno tardío.

Extendiéndose desde la línea de costa hacia el oriente, aproximadamente hasta los 500 msnm, se tiene una planicie con sedimentos aluviales, de piedemonte y eólicos, desmembrada por conjuntos de elevaciones, principalmentede rocas

intrusivas, metamórficas y, en menor medida, volcánicas. Se distribuyen como elevaciones residuales tipo montañas isla (inselbergs) con laderas empinadas y en proceso de destrucción a causa del intemperismo físico y la erosión. En su porción más oriental, dichas elevaciones forman estructuras alargadas y estrechas que se orientan paralelamente al Golfo de California con altitudes que pueden llegar hasta los 1,000 msnm o más. Este relieve domina por una franja de 15 km de ancho, aproximadamente, y constituyen un elemento de transición con una serie de cadenas montañosas de mayores dimensiones que se orientan NNW-SSE y que corresponden con las primeras manifestaciones de la Sierra Madre Occidental en Sonora.

Estas cadenas montañosas, que se conforman por rocas volcánicas terciarias, intrusivas y sedimentarias mesozoicas, se alternan con valles intermontanos que equivalen a bloques hundidos o grabens con rellenos sedimentarios aluviales y de piedemonte. El drenaje hídrico de esta zona está fuertemente controlado por las estructuras paralelas a las cadenas montañosas predominando una orientación norte-sur.

Hacia el este, bajo la influencia del ente geomorfológico llamado Sierra Madre Occidental, se tiene la predominancia de una serie de mesetas de riolita que a gran escala se hallan dispuestas horizontalmente y que representan la superficie de la Sierra Madre Occidental transformada por intensos procesos exógenos durante el periodo Cuaternario. De igual forma, dicha cadena montañosa es diseccionada por un conjunto de cañones profundos labrados por la erosión fluvial que en algunos casos pueden llegar a profundidades máximas de 1,500 m.

La erosión fluvial, favorecida por el tipo de litología y las tasas de precipitación anuales que en la porción sur pueden llegar a 1,500 mm además de un escurrimiento predominante hacia la vertiente del Pacífico, ha originado una fuerte acumulación marginal de sedimentos en los grandes deltas desarrollados por los ríos Yaqui, Mayo y Fuerte dominando los rasgos geomorfológicos en el extremo sur de Sonora, en lo que se conoce como Valle del Yaqui y Valle del Mayo.

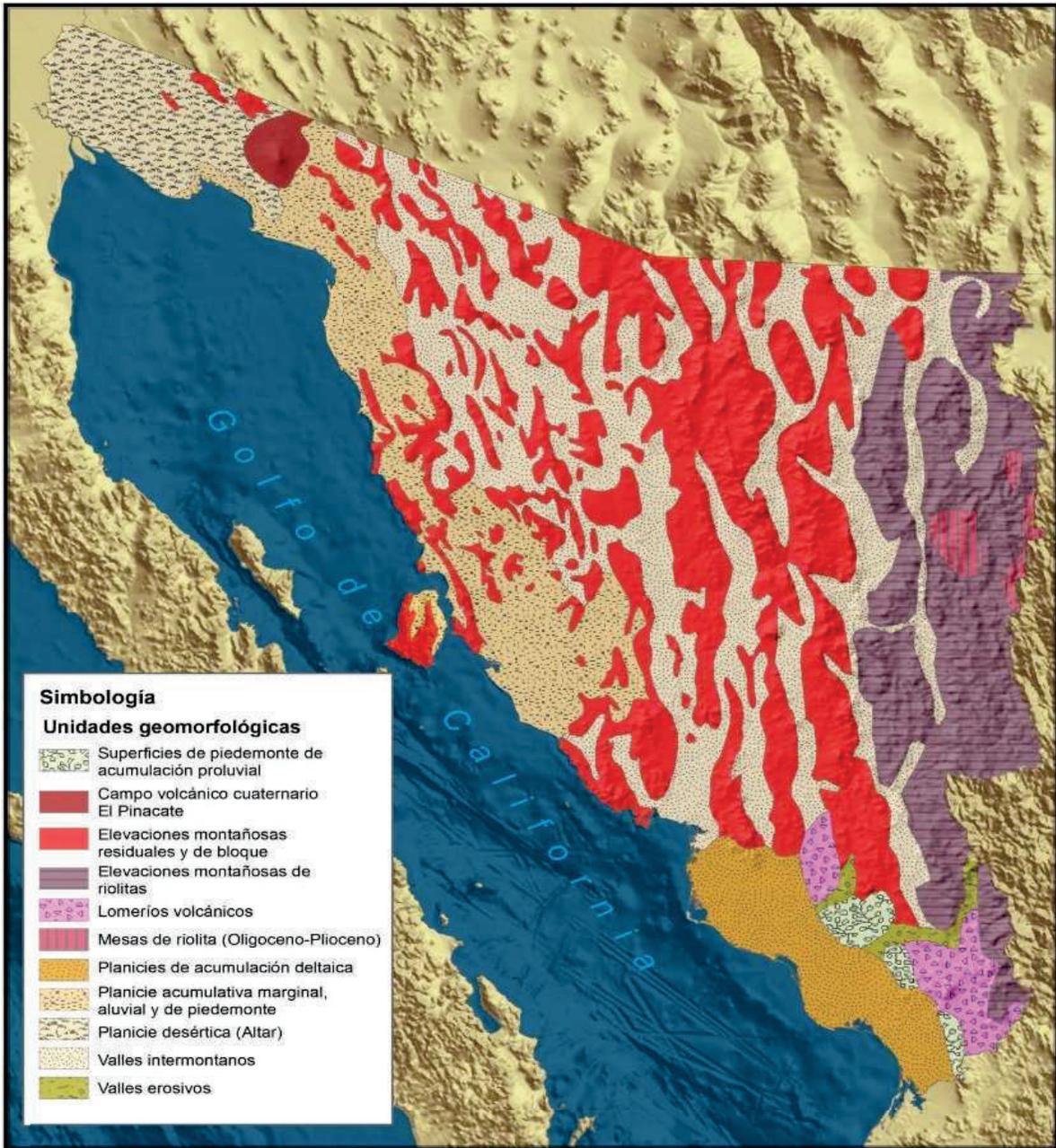


Figura 3. Mapa geomorfológico del estado de Sonora (tomado de Lugo-Hubp 1990).

2.6 Hidrología

El agua superficial del estado de Sonora está comprendida dentro de las regiones hidrológicas: 7, Río Colorado; 8, Sonora Norte; 9, Sonora Sur; 10, Sinaloa y 34, Cuencas Cerradas del Norte (INEGI, 1993).

Se enmarca en la región hidrológica 9, Sonora Sur, tiene una superficie de 137 504 km² en los estados de Sonora y Chihuahua. Está conformada por las cuencas Río Mayo, Río Yaqui, Río Mátape, Río Sonora y Río Bacoachi. La cuenca Río Yaqui tiene una orientación norte sur con un área de 57 739 km². La corriente superficial más importante es el río Yaqui.

2.7 Clima

El estado de Sonora se encuentra bajo la influencia de cuatro tipos de principalmente climas, teniendo un clima árido y semiárido en la Sierra Madre Occidental el cual representa el 48% del estado; 46.5% presenta un clima muy árido predominando en la Llanura Costera del Golfo y Llanura Sonorense mientras que el clima templado subhúmedo con una presencia del 4% predomina hacia el este del estado y un clima cálido subhúmedo hacia el sureste con 1.5% del territorio del estado (Figura 4)

Hacia el área de estudio en el municipio de Fronteras al noreste del estado, se tiene un clima semiárido templado dominando la mayor parte del territorio municipal (67.99%); sin embargo, aparecen variaciones locales que están representadas por climas árido templado (26.90%), árido semicálido (1.84%), templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad (3.05%) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano de humedad media (0.22%) (INEGI, 2009).

El rango de temperatura de la región va desde los 10° hasta los 20° C y tiene un rango de precipitación en la temporada de lluvias de 300 a 700 mm.

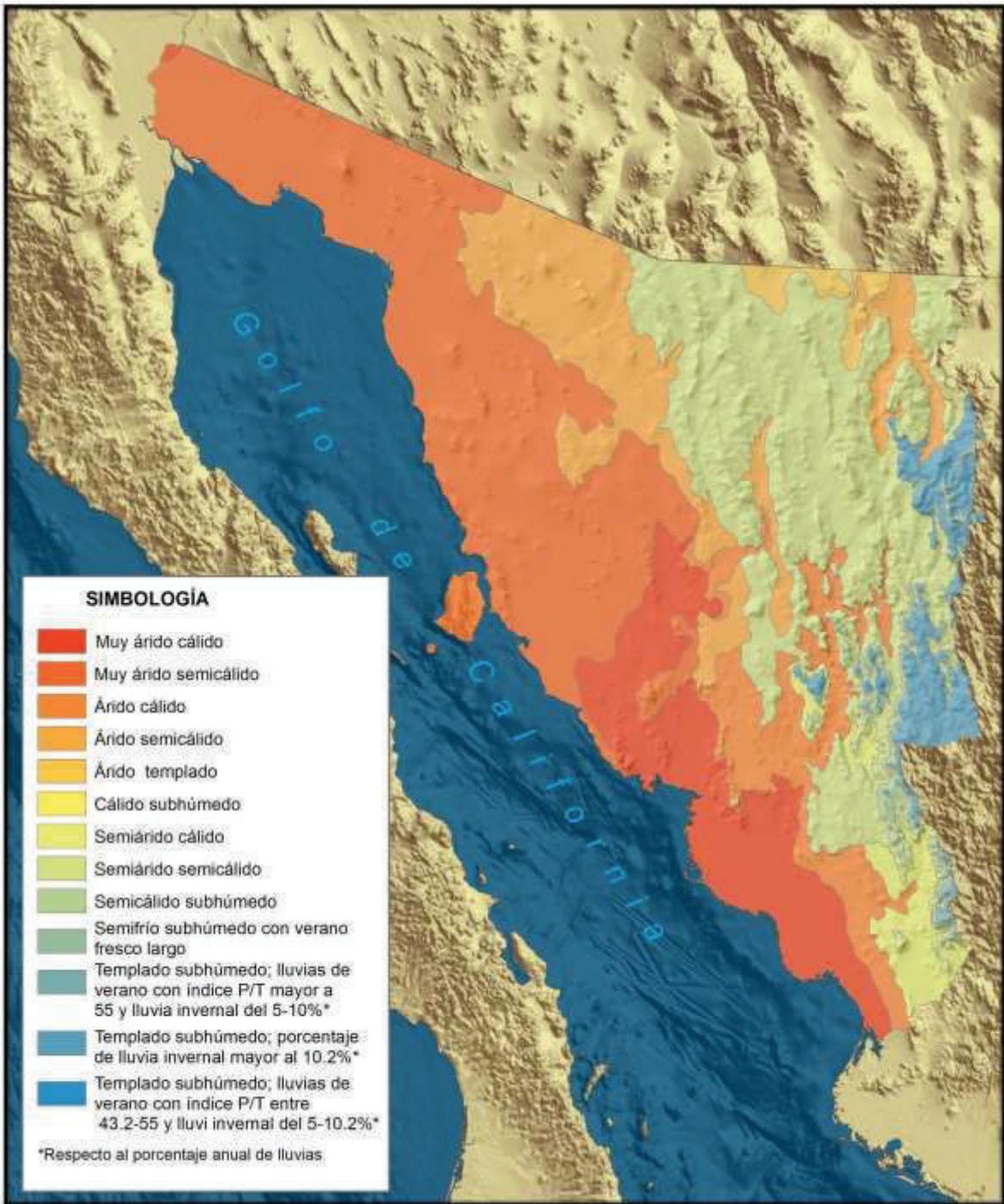


Figura 4. Mapa de la distribución de climas del estado de Sonora (tomado de CONABIO, 2016).

3. GENERALIDADES DE LOS VANT'S Y LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL.

La evolución tecnológica por la que se atraviesa en la actualidad ha obligado a la investigación sobre innumerables innovaciones tecnológicas útiles para aplicarlas en el campo de la ingeniería, una de estas son los UAVs (Unmanned Aerial Vehicle), o VANT's (Vehículos Aéreos No Tripulados), la incursión de estos en las ciencias exactas es relativamente nueva ya que data de principios del milenio (Villareal-Moncayo, 2015).

Gracias a la ciencia hoy por hoy los drones son utilizados en ámbitos civiles, de ingeniería, geociencias, militares, entre otras disciplinas más, puesto que debido a las características que poseen, obtienen acceso a lugares difíciles con condiciones extremas. Además de esto su aplicabilidad reduce costos de operación en grandes proyectos. En general de acuerdo a su aerodinámica se tienen dos tipos de drones los cuales corresponden a drones de ala fija y de ala rotativa (Villareal-Moncayo, 2015).

3.1 Uso de los drones en el ámbito de la geología y la ingeniería.

Los drones tienen un enorme atractivo debido al hecho de que pueden operarse con relativa autonomía (mínima intervención humana), por lo tanto, son útiles para tareas que requieren grandes áreas a cubrir con el mínimo uso de mano de obra. Estos incluyen un gran número de aplicaciones en el campo comercial, militar y civil (Al-Jarrah & Hasan, 2011).

El término fotogrametría con UAV (vehículos aéreos no tripulados "drones"), es una plataforma de medición fotogramétrica que es operada ya sea con control remoto (semiautónoma) o totalmente autónoma, se trata de una nueva aplicación en casi tiempo real y de bajo costo para la ingeniería (Villareal-Moncayo, 2015).

Recientemente, se han utilizado drones para la adquisición de imágenes. Con esto la producción de ortofotos, Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Tridimensionales o Modelos Digitales de Superficie (MDS) se convirtió en digital, en su mayoría automática y con poca respuesta de tiempo (Berteška & Ruzgiené, 2013).

Los vehículos aéreos no tripulados permiten llevar a cabo trabajos fotogramétricos que hasta hace poco tiempo sólo era posible realizar con métodos tradicionales muy costosos (García-Yeomans, 2017), los cuales pueden ser utilizados en algunas de las siguientes áreas de trabajo:

Topografía: Con la introducción de los vehículos aéreos no tripulados es posible aumentar la productividad en un levantamiento topográfico, presentando una alternativa considerable ya que se pueden cubrir grandes extensiones de terreno en tiempo reducido y por ende un ahorro de recursos significativo a comparación de otros métodos tradicionales (Villareal-Moncayo, 2015).

Cartografía: Permiten la toma de imágenes con alto nivel de detalle de zonas con corta extensión, las cuales son usadas para obtener la cartografía del sitio de estudio, obteniendo una base de datos que se pueden actualizar constantemente en períodos de tiempo relativamente cortos. (Villareal-Moncayo, 2015).

Ortofotografía: A través de un software específico es posible realizar una ortofotografía, la cual consiste en una imagen obtenida de manera casi ortogonal al terreno, sin distorsión ni efectos de perspectivas, combinando las características de detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano, permitiendo medir longitudes y áreas con muy poco error. Su resolución se mide en cm/px (Navione Drone Services, s.f.). La ortofotografía se utiliza para una mejor observación, la cual facilita el proceso del levantamiento topográfico (García-Yeomans, 2017).

Control de cuencas hidrográficas: Permiten controlar y analizar el estado de cuencas hidrográficas, áreas de riesgo de inundación y deslizamientos. Adicionalmente permiten evaluar y cuantificar el nivel de las reservas hidrográficas y su evolución a lo largo de diferentes períodos. (ACRE, 2014).

Control de zonas de riesgo: Su uso permite evaluar, documentar zonas de erosión y estudiar su evolución a lo largo del tiempo. Conocidos los resultados se toman las medidas necesarias para mitigar los efectos producidos sobre el terreno (ACRE, 2014).

3.2 Principios de la fotogrametría a baja altitud.

Fotogrametría: La palabra fotogrametría se deriva de las palabras griegas photos, que significa luz; gramma, que significa lo que está dibujado o escrito, y metrón, que significa medir. Usando en conjunto esas palabras, fotogrametría significa medir gráficamente por medio de la luz. Es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado (ISPRS, s.f.).

Fotogrametría Digital: Permite realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadores. (Jauregui, s.f.).

Debido a la fotogrametría, se ha generado la mayor parte de la cartografía mundial. La fotogrametría en la historia del tiempo se inició desde la fotogrametría analógica, seguida por la fotogrametría analítica, y hoy en la actualidad gracias a la revolución tecnológica en la fotogrametría digital (Universidad Nacional del Nordeste, 2012).

La fotogrametría nace a partir de la necesidad de extraer información métrica de las imágenes y el desarrollo de esta ha estado siempre unida a la precisión. La naturaleza de las cámaras, la regularidad o nivel de perfección de las lentes, el conocimiento preciso de los parámetros internos de la cámara y el ajuste de hacer por determinados métodos matemáticos, han sido factores absolutamente vitales para el desarrollo de la fotogrametría garantizando la precisión. Igualmente, la posición de la cámara en la toma fotográfica respecto a las anteriores, ha venido siendo uno de los limitantes fotogramétricos, tan sólo solventado tras la era digital. (Coder, 2013).

Cuando se toman imágenes a baja altitud, asumir que la superficie es plana, significa adquirir un riesgo en la realización del mosaico. Objetos como: árboles, rugosidades o desniveles, debidos a la orografía del terreno o incluso coches y edificios, pueden causar distorsión en la perspectiva de las imágenes. Sin un plano de referencia del terreno a estudiar, el solapamiento de las imágenes necesitaría de una profunda información, para la cual existen sensores o, por ejemplo, cámaras infrarrojas (García., 2009). Debido a ello, los puntos a diferente nivel en las imágenes pueden causar graves errores en la superposición de las imágenes individuales (Díaz-Cabrera, 2011).

Para la obtención de las imágenes a tratar con los softwares comerciales se debe tener en cuenta una serie de puntos como:

- La calibración de la cámara a partir del fotografiado de un patrón de calibración conocido
- Orientación relativa de las imágenes eligiendo puntos comunes en las distintas fotografías

Ya orientadas las imágenes se procede a extraer las características del modelo a partir de puntos, líneas y superficies. Este proceso ha sido a lo largo del tiempo normalmente manual, pero en algunas aplicaciones actuales, se ha creado la opción de ser o semi-manual o totalmente automático a través de la generación de una nube de puntos (Villareal-Moncayo, 2015).

La orientación absoluta es un proceso manual prácticamente en todos los casos de fotogrametría terrestre, ya que tenemos que asignar coordenadas conocidas a puntos del modelo para poderlo georreferenciar y escalar. Este proceso no sería necesario si las coordenadas de la toma fuesen lo suficientemente precisas (Villareal-Moncayo, 2015).

Cada uno de los procesos descritos anteriormente, a pesar de tener un carácter general, varía para cada software comercial, pudiendo incluir procesos notablemente diferentes a los planteados aquí de forma genérica (Coder, 2013).

4. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consistió en los siguientes pasos:

1. Revisión bibliográfica
2. Tres etapas de campo, con las cuales se realizó un mapeo a escala 1:25000, en las cuales se midieron estructuras y se tomaron imágenes aéreas con el uso de un VANT.
3. Elaboración de mapa, secciones y columna geológica del área que nos muestran los resultados obtenidos en el mapeo
4. Procesamiento de las imágenes capturadas por el VANT con la ayuda del software Agisoft PhotoScan versión 15.0 para la elaboración de fotogrametría digital.
5. Análisis e interpretación de los datos para obtención de resultados y conclusiones.

4.1 Trabajo de campo

Se realizaron visitas de campo a la Sierra Las Mestañas que se encuentra a 25 km aproximadamente al noroeste de Fronteras, Sonora, las cuales consistieron en tres etapas:

La primera etapa consistió en un reconocimiento general del área y el comienzo del mapeo y se midieron estructuras que estaban presentes.

La segunda etapa tuvo como fin seguir con el mapeo, toma de muestras y medidas de estructuras en la mayor parte del área posible.

Por último, la tercera etapa consistió en terminar con el mapeo del área estudiada, y en la toma de imágenes aéreas con él, que se tomaron sobre los alrededores del cerro La Pedregosa para llevar a cabo el modelo fotogramétrico. Para este último proceso de campo se desarrolló la siguiente metodología:

4.1.2 Vehículo Aéreo No Tripulado y Captura de Fotografías

El equipo utilizado para el levantamiento fotogramétrico es un VANT de la marca DJI, modelo Phantom 4 Pro Plus con una cámara de sensor CMOS de 20 megapíxeles, con un lente angular f/2.8 y un campo de visión de 94° (Figura .5).

Mencionado equipo fue utilizado para realizar el vuelo para la captura de las fotografías el día 14 de octubre de 2018 sobre, y a los alrededores del cerro La Pedregosa, tomando fotografías ortogonales y oblicuas a cada 3 segundos, con un traslape de 80% y con una altura aproximada de 50 metros por encima de la elevación más alta del área de vuelo, con un total de 927 fotografías obtenidas.



Figura 5. Vehículo Aéreo no Tripulado Phantom 4 Pro Plus.

4.2 Trabajo de gabinete

Esta etapa comenzó con la recopilación y lectura de bibliografía de trabajos previos del área de estudio, estudios regionales de todas las unidades desde el Precámbrico hasta el reciente que se encuentran en el área, estudios y artículos científicos estructurales, tectónicos, información sobre los yacimientos minerales de la región y su génesis, así como de trabajos previos que se han realizado con el uso de VANT'S en el entorno geológico o que tengan alguna relación con ello.

Se elaboró una base datos con todos los puntos mapeados en el área, la cual contiene coordenadas en X y Y, número de levantamiento, número y descripción de la muestra y medidas estructurales.

Con la base de datos se elaboró un mapa geológico del área a escala 1: 25,000 (Anexo 1), utilizando el software ESRI ArcGIS con la paquetería ArcMap, y posteriormente secciones y columna geológica.

4.2.1 Procesamiento de Datos

Las imágenes obtenidas son fotografías georreferenciadas, las cuales crean un mosaico que consiste en la unión de numerosas fotos traslapadas, cada una de ellas con sus coordenadas correspondientes. Dichas imágenes se exportan al software especializado en procesamientos fotogramétricos llamado Agisoft PhotoScan Professional, versión 15.0 (García-Yeomans, 2017).

Para procesar los datos se debe de establecer el sistema de coordenadas que se utilizó en el levantamiento fotogramétrico, posteriormente se creó una nube de puntos densa definida como el conjunto de los registros adquiridos con coordenadas X, Y, Z (Saez y Beltrán 2015), destacando que, mientras más puntos, mayor información y detalle se obtiene (García-Yeomans, 2017).

Normalmente este tipo de trabajos van apoyados de puntos de control tomados en el terreno mediante una estación total, los cuales son capturados y exportados al software que se está utilizando, y con ello mejorar el error que arroja el procesamiento de las imágenes aéreas por sí solo. En este caso, durante este trabajo, no se llevó a cabo esta parte de la metodología, debido a la dificultad del terreno, tales como grandes bloques de roca muy sueltos, fuerte fracturamiento que dificulta el caminar, abundante vegetación que cierra el paso en algunos lugares, así como presencia de fauna salvaje en el lugar, además de la falta de caminos, lo que obligaría a caminar grandes distancias con el equipo y ponerlo en riesgo. Cabe destacar que el error que proporciona el procesamiento de las imágenes aéreas es de muy pocos metros, lo cual no tendría influencia en el tipo de escala que se está trabajando y el tipo de resultados que se quiere obtener.

5. MARCO GEOLÓGICO

5.1 Geología Regional

En la porción noreste de Sonora la geología se representa por afloramientos de un basamento ígneo de carácter plutónico, así como metamórfico, el cual, es sobreyacido por secuencias carbonatadas paleozoicas, rocas fluvio lacustres, carbonatadas y vulcanosedimentarias cretácicas, rocas lávicas y pórfidos de edad Oligoceno y depósitos fluviales del Cuaternario.

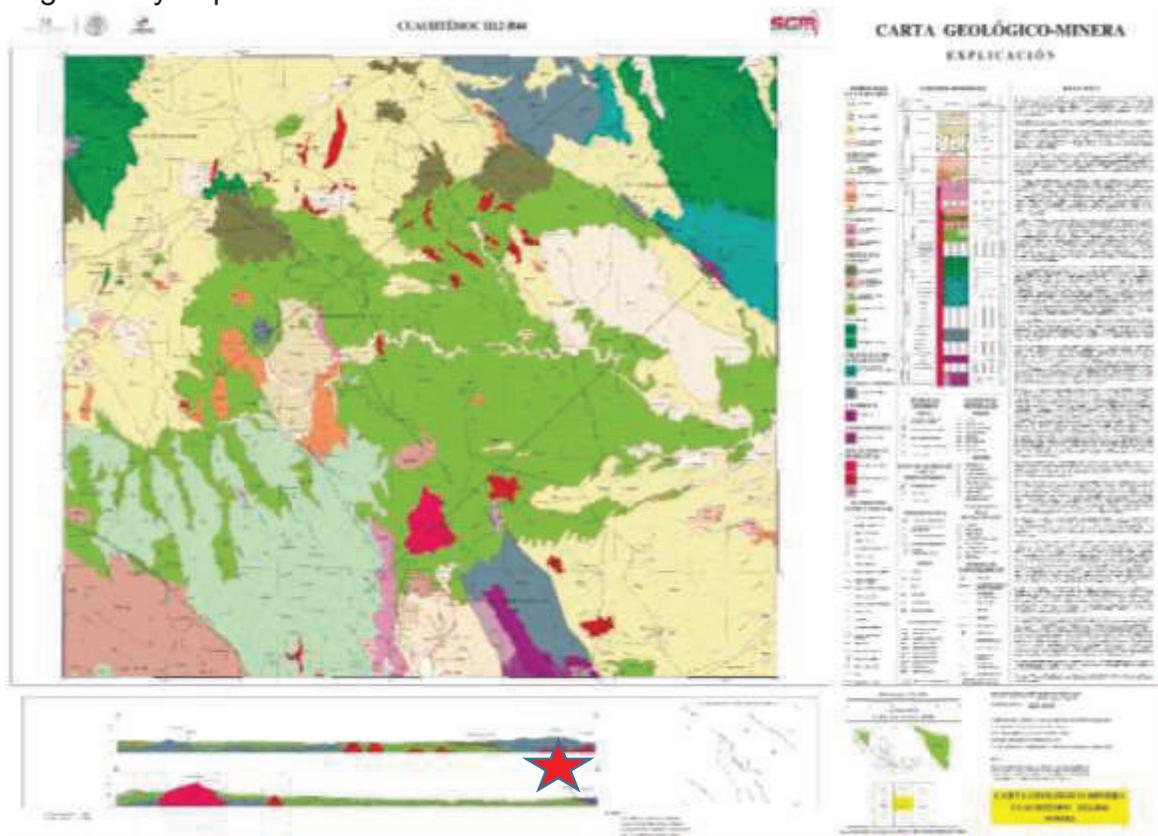


Figura 6. Mapa geológico regional tomado de la carta Cuauhtémoc H12B44 emitida por el SGM.

Regionalmente la zona estudiada presenta un gran interés geológico, ya que de según a lo expuesto por Taliaferro (1933), la sierra Las Mesteñas se localiza dentro de lo que enmarcó como la cuenca Cabullona. Depositándose en ella sedimentos que marcan la línea de costa de un mar del Cretácico Tardío, dichos sedimentos fueron depositados en una cuenca de tipo estructural, que a su vez los protegió de la erosión, de manera que parte de ellos han sido preservados.

5.1.1 Precámbrico

Las rocas más antiguas que afloran hacia esta parte de la región noreste del estado de Sonora, pertenecen al llamado bloque de Norteamérica o cratón norteamericano, están representadas por el Esquisto Pinal compuesto de esquistos micáceos y gneis (Ransome, 1904; Anderson y Silver, 1977 a, b; Anderson y Schmidt, 1983; Keep, 1996) y por rocas intrusivas de composición granítica asociadas al Granito Cananea de 1.4 Ga. (Anderson y Silver, 1977); de igual manera se tienen afloramientos del Granito Mesteñas del Proterozoico medio (GEOCA, S.A., 1965) que aflora en la sierra Las Mesteñas y se correlaciona con el Granito Cananea que aflora en lo que se conoce como sierra Los Ajos (Guzmán et al, 2013).

En la sierra Las Mesteñas se encuentra expuesto el Esquisto Pinal, lo que a su vez constituyen el cuerpo principal del lugar; otro de los sitios donde es posible observar afloramientos de esta unidad es en el flanco SW de la sierra Los Ajos, y en las cercanías del flanco SW de la sierra de la Morita (Gómez-Tagle, 1967).

Los principales afloramientos se encuentran en el SE del Estado de Arizona y en el flanco W de las Montañas Pinal de donde derivó su nombre. Son correlacionables con los esquistos Vishnú del Gran Cañón; donde su espesor es desconocido (Ransome, 1904).

El Esquisto Pinal es intrusionado por el Granito Cananea, el cual consiste en un magmatismo que evoluciona de granodioritas a granitos (Valentine, 1936). El Granito Mesteñas, también intrusiona al Esquisto Pinal, este último presenta una textura porfídica y al que se le asigna una edad similar al Granito Cananea (Anderson *et al.* 1979).

Las rocas del basamento Precámbrico del bloque Norteamérica se encuentran expuestas en varias áreas del noreste de Sonora, estas rocas forman parte de la secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias depositadas hace 1.7 Ga (Anderson, et al., 1980) que se encuentran fuertemente plegadas y afectadas por

metamorfismo de la facies esquistos verdes hace 1.64 Ga (Ortega-Gutierrez et al, 1992). Se correlacionan con el Esquisto Pinal que aflora en las montañas Pinal del sureste de Arizona; y que muestra afinidad con la provincia Mazatzal del sur de Arizona y Nuevo México. Mientras que, los afloramientos que se tienen del Granito Mesteñas se encuentran expuestos en su localidad tipo de la sierra las Mesteñas, y en el cerro Cabullona, específicamente en una pequeña ventana del río Cabullona.

De manera general, los afloramientos Precámbricos del noreste de Sonora se prolongan hasta los territorios de Chihuahua, donde desaparecen debajo de la cubierta de rocas más jóvenes, en su mayoría de origen volcánico (Roldan-Quintana, 1982).

5.1.2 Paleozoico

El Paleozoico del noreste de Sonora está constituido por calizas, dolomías, calizas con lentes de pedernal, cuarcitas y lutitas con una columna compuesta de 3,300 m de espesor mostrando un importante basculamiento de las rocas pre-Devónico medio posiblemente atribuido a la Orogenia Antlerana (Roldán-Quintana, 1982).

En el noreste Sonora y sureste de Arizona se tiene afloramientos correspondientes a la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior y de la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico superior (Ramsome, 1904).

La Formación Cuarcita Bolsa está representada por una arenisca de color gris-rosado, de grano medio a grueso, cuyos principales constituyentes son granos de cuarzo sub-redondeado, y con estratificación cruzada. Esta unidad del Cámbrico inferior se encuentra aflorando principalmente en su localidad tipo en la sierra Escabrosa al oeste del Cuadrángulo de Bisbee (Ransome, 1904), en la sierra Las Mesteñas (Gómez-Tagle, 1967; Peiffer, 1988; Lara-Peña, 2017), en el cerro Cabullona (Taliaferro, 1933; Yza, 1984), en la sierra El Tule (González-León, 1986), y en la sierra Los Ajos (Anderson et al. 1979).

El Cámbrico superior está representado por la Formación Caliza Abrigo (Ransome, 1904), al cual define con este nombre a los sedimentos que constituyen una sección compuesta por estratos delgados y laminares de calizas y dolomías, con algunas capas delgadas de pedernal, y que en la parte superior se encuentran horizontes margosos probablemente fosilíferos.

Se encuentra aflorando en el área de Bisbee estudiada por Ransome (1904), lugar donde la definió originalmente. En Sonora está expuesta en la sierra Las Mesteñas (Gómez-Tagle, 1967; Peiffer, 1988; Lara-Peña, 2017), en la sierra El Tule (González-León, 1986), en el cerro Cabullona (Taliaferro, 1933; Yza, 1984), y en la sierra Los Ajos (Anderson et al. 1979), además de algunos otros pequeños afloramientos.

El Devónico en la región está representado por la Formación Caliza Martin, Ransome (1904), cuya localidad tipo se encuentra en el Monte Martin de la sierra Escabrosa, en Arizona. Se caracteriza por contener calizas de color gris oscuro, de estratificación que va de delgada a mediana, con abundantes lentes de pedernal y tallos de crinoideos. Además de la localidad anterior, se encuentran aflorando en la región central de Arizona (Huddle y Dobrovlny, 1952), sierra El Tule (González-León, 1986), sierra Las Mesteñas (Gómez-Tagle, 1967; Peiffer, 1988; Lara-Peña, 2017), y en el cerro Cabullona (Yza, 1984; Taliaferro, 1933).

El Misisípico está representado por la Formación Caliza Escabrosa, la cual fue definida por Ransome (1904) en la Sierra Escabrosa, Arizona. Esta formación se caracteriza por caliza de aspecto granuloso, de estratificación gruesa, con una coloración gris claro, observándose la presencia de fósiles de tallos de crinoideos y braquiópodos. La Caliza Escabrosa se encuentra expuesta además de su localidad tipo, en la parte central de Arizona (Huddle y Dobrovlny, 1952), sierra El Tule (González-León, 1986), sierra Las Mesteñas (Gómez-Tagle, 1967; Peiffer, 1988; Lara-Peña, 2017), y en el cerro Cabullona (Yza, 1984; Taliaferro, 1933).

El Pensilvánico en el noreste de Sonora y sureste de Arizona está comprendido por la Formación Horquilla, la cual se representa de calizas de color gris claro de estratificación delgada, con numerosos fósiles, y en la parte superior interestratificación de areniscas y margas. Fue identificada por primera vez en el cuadrángulo de Bisbee por Ransome (1904), e identificada por Taliaferro (1933) en Sonora, en la cuenca de Cabullona. También se encuentra expuesta en la sierra Las Mesteñas (Gómez-Tagle, 1967; Peiffer, 1988; Villanueva et al., 2016; Lara-Peña, 2017), y en la sierra El Tule (González-León, 1986).

5.1.3 Mesozoico

Hacia el noreste de Sonora no se ha reportado la presencia de rocas triásicas o jurásicas, e incluso se habla de un hiatus que abarca dichos periodos de tiempo (Palafox *et al.*, 1998); así, sobre la secuencia carbonatada paleozoica se tienen los depósitos detrítico-carbonatados asociados al Grupo Bisbee del Cretácico Inferior y cuyas características marinas se intensifican, a grandes rasgos, hacia el este (Guzmán *et al.*, 2013). Asimismo, se identifica una unidad del Cretácico Superior constituida por depósitos de areniscas y limolitas rojas asociada al Grupo Cabullona. Si bien, la Comisión Federal de Electricidad (1983) da el nombre de Formación Ceniza a una secuencia volcanosedimentaria datada por el método Rb/Sr correspondiendo al Jurásico Temprano y siendo la localidad tipo la sierra de La Ceniza, situada a 18 Km al SE de Agua Prieta, Sonora

Para el Cretácico Inferior (Ransome, 1904) definió al importante Grupo Bisbee, en la localidad del mismo nombre en el Arizona, está constituido por cuatro formaciones del Cretácico Inferior, las cuales fueron depositadas discordantemente sobre rocas paleozoicas. Las formaciones que comprenden al Grupo Bisbee son:

El Conglomerado Glance, sobre el cual se depositó la Formación Morita, que a su vez es cubierta por la Caliza Mural, y por último la formación más joven de este grupo, constituida por la Formación Cintura. Las secuencias del Cretácico Inferior se encuentran aflorando en gran parte del estado Sonora y del vecino estado de Arizona.

El Conglomerado Glance fue definido por Ransome (1904) y comprende la formación basal del Grupo Bisbee. Está representado por rocas conglomeráticas, de clastos sub-redondeados y mal clasificados compuestos de calizas, cuarcitas, granito cuyas fuentes son correspondientes a los intrusivos precámbricos de la región, y clastos del Esquisto Pinal.

Ransome (1904) consideró una alternancia de areniscas de grano fino a medio, lutitas delgadas, limolitas, areniscas conglomeráticas, conglomerados, calizas y horizontes de lutitas carbonosas, en la cima de la formación hay areniscas calcáreas. La localidad tipo de esta formación se encuentra en el cerro la Morita, al norte de la sierra Las Mestañas, en el municipio de Naco Sonora (Yza, 1984).

La Formación Caliza Mural (Ransome, 1904) se encuentra dividida en dos miembros: El Inferior, constituido por intercalación de areniscas calcáreas, lutitas de color gris violeta y calizas fosilíferas, principalmente con ostreas. El Miembro Superior formado por calizas de estratos gruesos, masivas y coloración gris claro.

La Formación cintura (Ransome, 1904) y sus equivalentes en el sureste de Arizona se ha interpretado como depositados bajo condiciones deltaicas progradantes, donde el miembro Inferior de la formación representa a la facies de prodelta, el miembro medio a la facies de frente deltaico y el miembro superior a la facies de planicie deltaica, siendo esta última la que contiene los mantos carboníferos de mayor interés (Yza, 1984).

El Cretácico Superior fue descrito originalmente por Taliaferro (1933) en la cuenca de Cabullona, correspondiente a la región noreste de Sonora, dando así el nombre de Grupo Cabullona a las formaciones Snake Rigde, Formación Arenisca Camas, Formación Lutita Packard, Formación Capas Rojas Superiores y Toba Riolfítica. Posteriormente González-León y Lawton (1995) renombraron a tres unidades: Corral de Enmedio, Arenisca Camas, Lutita Packard, Lomas Coloradas y el Conglomerado El Cemento; en el primer cambio integró a la Formación Snake Ridge en las formaciones Corral de Enmedio y Arenisca Camas, en el segundo a la Formación Capas Rojas Superiores la renombra como Formación Lomas

Coloradas, y el tercero el Conglomerado El Cemento lo correlacionó lateralmente con la Formación Lutita Packard y Lomas Coloradas (Galindo-Ruiz, 2017).

(Palafox et al. 1998) propone que sobre el Grupo Cabullona discordantemente se encuentra una secuencia de rocas volcánicas compuestas de paquetes de riolitas y tobas riolíticas, andesitas, tobas andesíticas, andesitas y areniscas de edad Cretácico Tardío al Oligoceno, y que pudieran pertenecer al Complejo Volcánico Inferior de Mc Dowell (1978). Adicionalmente se emplazaron grandes cuerpos intrusivos de composición félsica a intermedia, e intrusiones hipabisales de tipo porfídico de composición intermedia.

5.1.4 Cenozoico

El Cenozoico en esta zona de Sonora comprende principalmente secuencias volcánicas caracterizadas principalmente por andesitas, riolitas, basaltos e ignimbritas; que también incluye traquitas y tobas de diversas composiciones de edad Oligoceno (Cochemé, 1985).

Sobre esta secuencia de rocas volcánicas se encuentran los depósitos correspondientes a la Formación Baucarit, compuesta de conglomerados, areniscas y basaltos de edad Mioceno. Sobre ella yace una segunda generación de paquetes de conglomerados y areniscas que se consideran de edad Pleistoceno. Estas unidades antes mencionadas se encuentran ampliamente distribuidas en los valles de la región. Finalmente, en el cuaternario, se depositaron arenas y limos, y algunos derrames de basalto. El aluvión reciente está compuesto de gravas, arenas y arcillas (Palafox et al, 1998).

5.2 Geología local (Sierra Las Mesteñas)

La geología local que enmarca el área de estudio, específicamente en la sierra Las Mesteñas, muestra una columna geológica que está conformada por rocas de distintas edades; desde el Precámbrico hasta el Reciente (Figura 7), enmascaradas en un régimen tectónico particular que afecta a la porción noreste del estado de Sonora (Ver anexo 1, Mapa Geológico de la Sierra Las Mesteñas).

Columna geológica de la Sierra Las Mesteñas

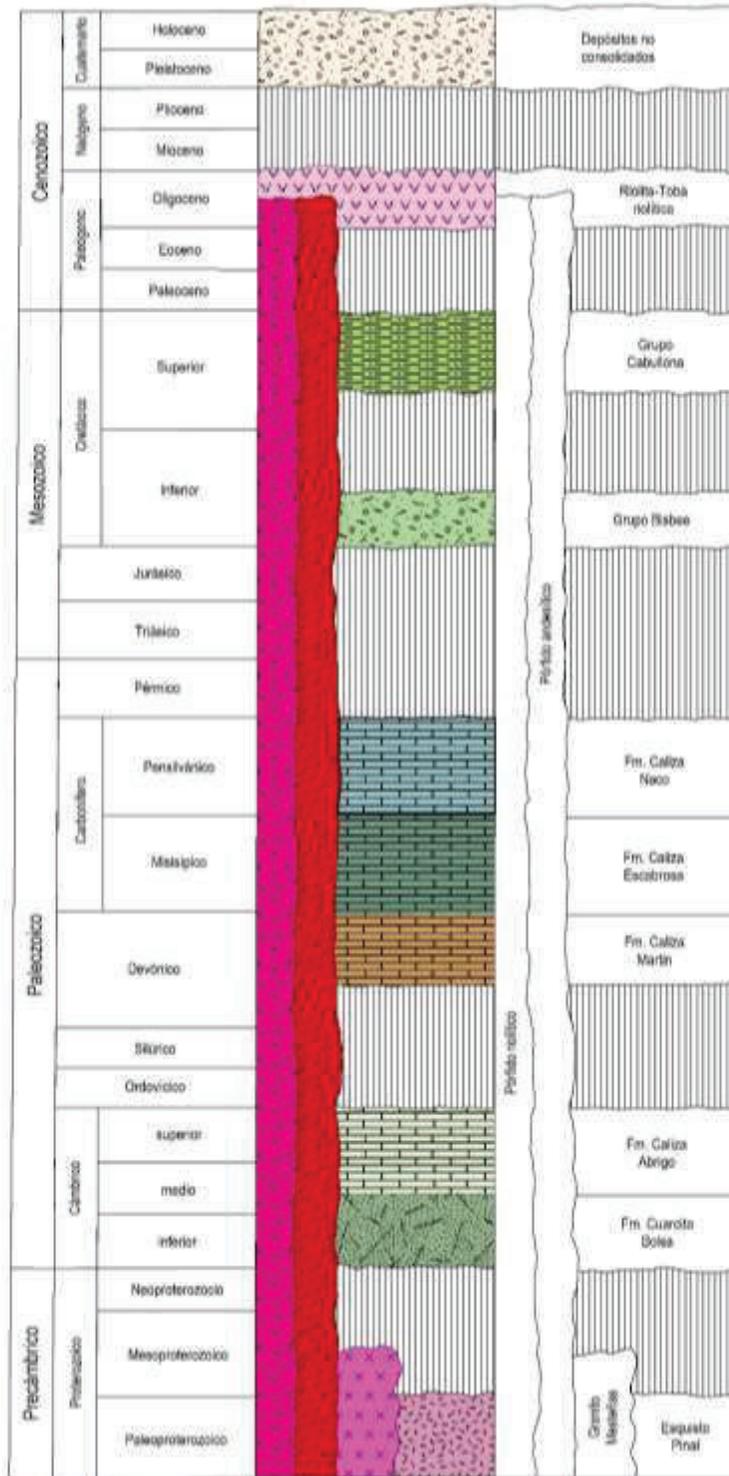


Figura 7. Columna geológica de la Sierra Las Mesteñas.

5.2.1 Precámbrico

Las rocas precámbricas presentes están definidas por los afloramientos del Esquisto Pinal, para el cual Ortega et al. (1992) reporta una edad de 1640 Ma (Paleoproterozoico), y por el Granito Mesteñas que lo intrusióna (1589 Ma) (GEOCA, S.A., 1965). Ambas unidades se encuentran sobreyacidas discordantemente por la Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior.

5.2.1.1 Esquisto Pinal

En 1904, Ransome define al Esquisto Pinal como un potente complejo de rocas metamórficas, representadas por esquistos y gneises de color gris oscuro verdoso, de grano fino, textura uniforme y con un lustre satinado en la superficie de intemperismo, encontrándose como principales constituyentes, cuarzo y sericita, y localmente turmalina y biotita.

En Sonora Taliaferro (1933), reportó el Esquisto Pinal en el sureste del cerro La Morita en el municipio de Agua Prieta, y Gómez-Tagle (1967), reconoció a esta unidad en la sierra Las Mesteñas, pero sin indicar la ubicación exacta del o los lugares donde se encuentra aflorando en el área, solo menciona que se trata de rocas metamórficas de aspecto micáceo y color gris claro verdoso. Así mismo, Peiffer (1988), menciona a tales rocas metamórficas dentro de una de sus cinco secciones que presenta en su trabajo realizado en el lugar. Tal sección corresponde a la que realizó en las inmediaciones del cerro La Pedregosa, en la cual indica al esquisto, pero sin definir espesores.

En este trabajo se identificó en tres zonas de la sierra Las Mesteñas con afloramientos del Esquisto Pinal. La primera área se encuentra expuesta en la parte SW del cerro Las Pintas y aproximadamente a 1 km al N-NE del rancho La Mesa, ambos lugares en la parte central de la sierra Las Mesteñas. En el lugar se observan gneises de color gris blancusco, con tonalidades rosadas y rojizas, en algunas zonas superficiales donde se observa intemperismo, la coloración presente va de un gris oscuro rojizo a un gris claro con óxidos. Se caracteriza por tener

bandeamientos y segregaciones de cuarzo, además de presentar un aspecto micáceo, y lustre satinado en la superficie de erosión (Figura 8)

Otra de las áreas donde se encuentran aflorando es en la parte central y central-poniente de la sierra, específicamente en el flanco SW del cerro La Pedregosa, prolongándose unos kilómetros en dirección S-SE y dirección NW con respecto al sitio.

En el lugar se presentan rocas micáceas con foliación, de un color gris claro verdoso a un gris claro y localmente con tonalidades de un gris rojizo y naranja. La mineralogía que presenta estos esquistos son principalmente moscovita, segregaciones de cuarzo-sericita, epidota y biotita que ha sido alterada a clorita, siendo estos dos últimos minerales mencionados, los que les dan la típica coloración verdosa. También se observan cristales de estauroлита de gran tamaño y abundancia (Figura 9).



Figura 8. Afloramiento aproximadamente 1.5 km al N-NE del rancho La Mesa, en el flanco poniente de la sierra Las Mesteñas, donde se observan rocas metamórficas que se identifican como gneis correspondiente a la unidad Esquisto Pinal.

La tercera zona donde aflora el Esquisto Pinal, corresponde a la zona sur-sureste de la sierra, en los alrededores del lugar que se conoce como El Rebarito hasta casi el rancho Los Berrendos. El esquisto que aflora en este lugar comprende características muy similares a las manifestadas en las cercanías del flanco SW del cerro La Pedregosa. Tales similitudes engloban tanto mineralogía como aspecto físico, como lo es la presencia una roca metamórfica de aspecto micáceo, de una coloración que va de un gris claro verdoso aun gris claro rojizo y lustre satinado, con ocurrencia de mica moscovita de manera foliada, segregaciones de cuarzo-sericita, así como epidota y clorita, y por último pequeños cristales de estauroлита.



Figura 9. Afloramiento del Esquisto Pinal, al NW del cerro Las Pintas y al S del cerro La Pedregosa, cerca del camino entre rancho La Mesa y Mesa La Pedregosa. En la imagen resalta los grandes y abundantes cristales de estauroлита que se pueden apreciar fácilmente.

El Esquisto Pinal en la sierra Las Mesteñas correspondería a un metamorfismo regional de grado medio-alto para las rocas esquistosas, y un metamorfismo regional de alto grado para los gneis presentes que lo comprenden. Dado las características observadas se puede decir que el protolito de estas rocas debieron ser rocas sedimentarias de cuarzo y arcillas, y rocas de origen volcánico, tal y como lo han mencionado otros autores anteriormente.

Lo anterior concuerda con lo estipulado por Meijer (2014), quien mencionó que el Esquisto Pinal corresponde a un complejo de rocas con metamorfismo regional, que en conjunto forman el Terreno Pinal, y de igual manera con el Terreno Mazatzal del noreste de Sonora, mayor parte de Arizona y Nuevo México, descrito por (Iriondo, 2004). El Terreno Pinal comprende una amplia región que va desde la parte central de Arizona, en los alrededores de Phoenix, hasta la parte nortee-noreste de Sonora, extendiéndose en Arizona al este hacia Nuevo México.

Meijer (2014) dijo que la formación del Esquisto y Terreno Pinal, procedió de un interacción dorsal-trinchera bajo un arco magmático en tiempos paleoproterozoicos, donde la parte central de este terreno se caracteriza por evidenciar metamorfismo de grado medio, y las partes extremas, hacia el N-NW cerca de Phoenix, y hacia el S-SE en el noreste de Sonora, se caracteriza por un metamorfismo que va de grado medio a alto, tal y como se presenta y se evidencia en este trabajo.

En el área estudiada se identificó el contacto superior del Esquisto Pinal, el cual está representado por una superficie de erosión sobre la cual se depositaron discordantemente los sedimentos de la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior (Figura 10).

En suma, el Esquisto Pinal en la sierra Las Mesteñas se encuentra intrusionado por el Granito Mesteñas (1589 Ma), el cual muy seguramente afectó y creó nuevo metamorfismo sobre estas rocas. Adicionalmente, en todas las áreas donde el Esquisto Pinal se encuentra aflorando, se observan algunas vetas de cuarzo-turmalina y óxidos, donde los espesores alcanzan varios metros. Cabe destacar que por relaciones de corte y que éstas solo se encuentran afectando a

las rocas metamórficas y no al Granito Mesteñas, este complejo ígneo-metamórfico se le asigna una edad que va de 1650 Ma (edad del Esquisto Pinal) hasta 1489 Ma (edad del Granito Mesteñas). El emplazamiento de las vetas en el esquisto y gneis pudiera estar relacionado con los procesos hidrotermales de la intrusión del Granito Mesteñas, que si bien en tiempo e historia geológica correspondería a la etapa final de subducción que generó un arco magmático de edad Mesoproterozoica que describe (Meijer, 2014). La veta se describe de mejor manera más adelante en este documento.

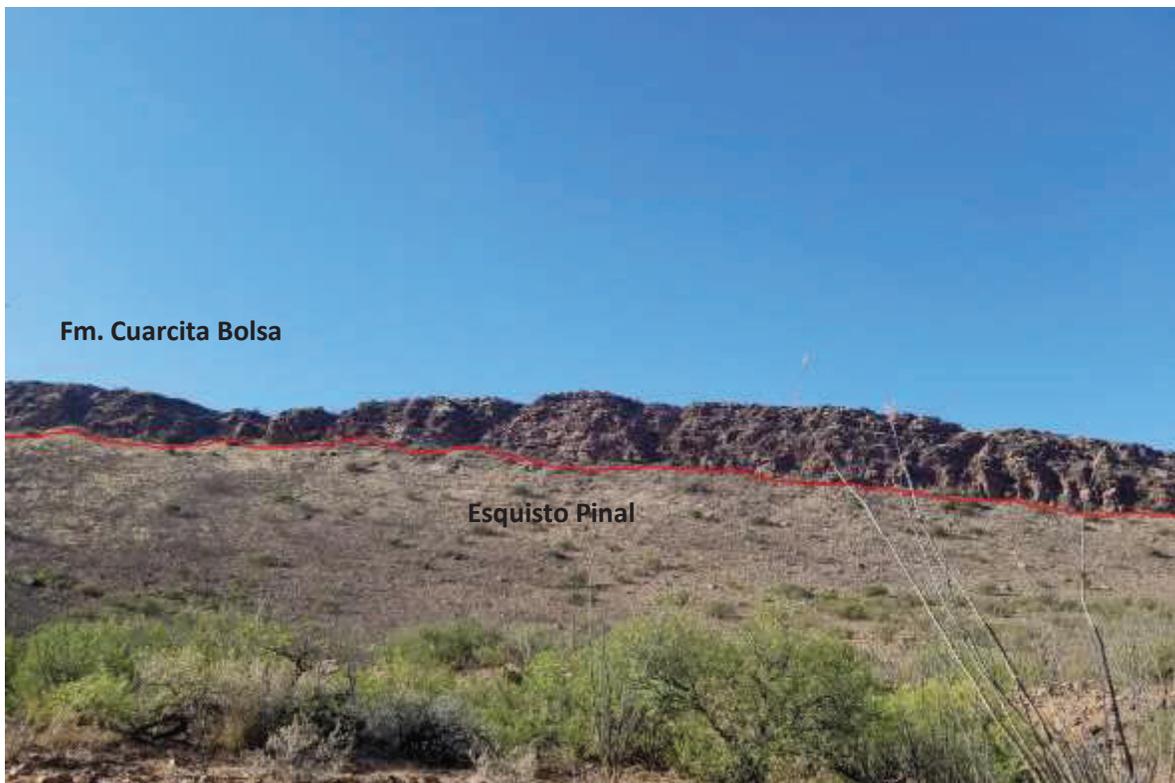


Figura 10. Fotografía del cerro La Pedregosa con rumbo NW-SE, viendo hacia el NE. Se aprecia contacto entre el Esquisto Pinal del Paleoproterozoico (base) y la Formación Cuarcita Bolsa de edad Cámbrico inferior (cima), la cual se encuentra discordantemente sobre una superficie de erosión (línea roja dibujada).

5.2.1.2 Granito Mesteñas

El Granito Mesteñas comprende cuerpos intrusivos de composición félsica, de forma irregular y textura granítica, que corresponde a una edad del Mesoproterozoico (1589 Ma), la cual fue asignada por la compañía de Geólogos Consultores Asociados, S.A. (GEOCA, S.A.), al realizar un estudio geológico-radiométrico en una porción de la sierra Las Mesteñas, en la cual se le consideró como localidad tipo. Dicho cuerpo ígneo a su vez intrusión en algunas partes al Esquisto Pinal, y se caracteriza por tener xenolitos de estas rocas metamórficas antes mencionada (Gomez-Tagle, 1967). Este mismo autor menciona que las características litológicas más importantes de este granito son; rocas ígneas intrusivas de color gris verdoso que intemperizan a un gris amarillento de textura porfídica, observándose ocasionalmente xenolitos de esquistos muy deleznable.

Dadas las características geológicas que presenta el Granito Mesteñas, es posible correlacionarlo con el granito porfídico que menciona Ransome (1904) para el Cuadrángulo de Bisbee, en el estado de Arizona, pero que equivocada e inciertamente Ransome le asigna una edad del Jurásico. Así mismo aflora en la sierra Cabullona (Taliaferro, 1933), y es correlacionable con el Granito Cananea mediante características litológicas, el cual fue fechado por Anderson y Silver (1977) con una edad de 1440 +/- 15 Ma.

En este trabajo se pudo identificar al Granito Mesteñas en una amplia extensión territorial en el área. Prácticamente se pudo observar en todo el flanco poniente de la sierra Las Mesteñas, en dirección NW-SE, y adicionalmente los alrededores del camino que va del Rancho La Mesa al Rancho Baltazar en dirección NE.

El granito presente se puede definir como un granito de textura porfídica de una coloración gris rojiza-amarillenta de grano muy grueso, y está conformado por cristales de cuarzo, feldespato potásico (especialmente microclina), plagioclasas sódicas, moscovita y biotita, así como turmalina. En algunas zonas donde aflora, las micas se encuentran alteradas a clorita, y los feldespatos y plagioclasas han sido transformados a arcillas y sericita. En algunos afloramientos, el Granito Mesteñas

se encuentra sin alteración, donde su grano muy grueso se presenta de manera pegmatítica, con grandes megacrystales de feldespatos potásicos que alcanzan aproximadamente de 10 a 15 cm de longitud, así como grandes cristales de cuarzo, turmalina y mica moscovita. Esta última textura se puede observar en el arroyo La Cieneguita, del lado oriente del camino que va del rancho La Mesa al rancho Baltazar, muy cerca de un contacto con la Cuarcita Bolsa. (Figura 11)



Figura 11. Afloramiento del Granito Mesteñas sobre el arroyo La Cieneguita, al lado oriente del camino que va del rancho La Mesa al rancho Baltazar. En la fotografía se puede ver al Granito Mesteñas con textura pegmatítica donde se observan grandes cristales, principalmente de feldespatos potásicos.

Tal y como lo menciona Gómez-Tagle (1967), este cuerpo granítico se encuentra intrusionando de manera irregular al Esquisto Pinal, y en conjunto forman el basamento y los cuerpos principales de la sierra Las Mesteñas, e igualmente conforman el basamento del noreste de Sonora y gran parte de los estados de Arizona y Nuevo México.

El Granito Mesteñas se encuentra en contacto superior con la Cuarcita Bolsa, la cual se encuentran depositados los sedimentos de esta formación mediante una discordancia en una superficie de erosión (Figura 12).

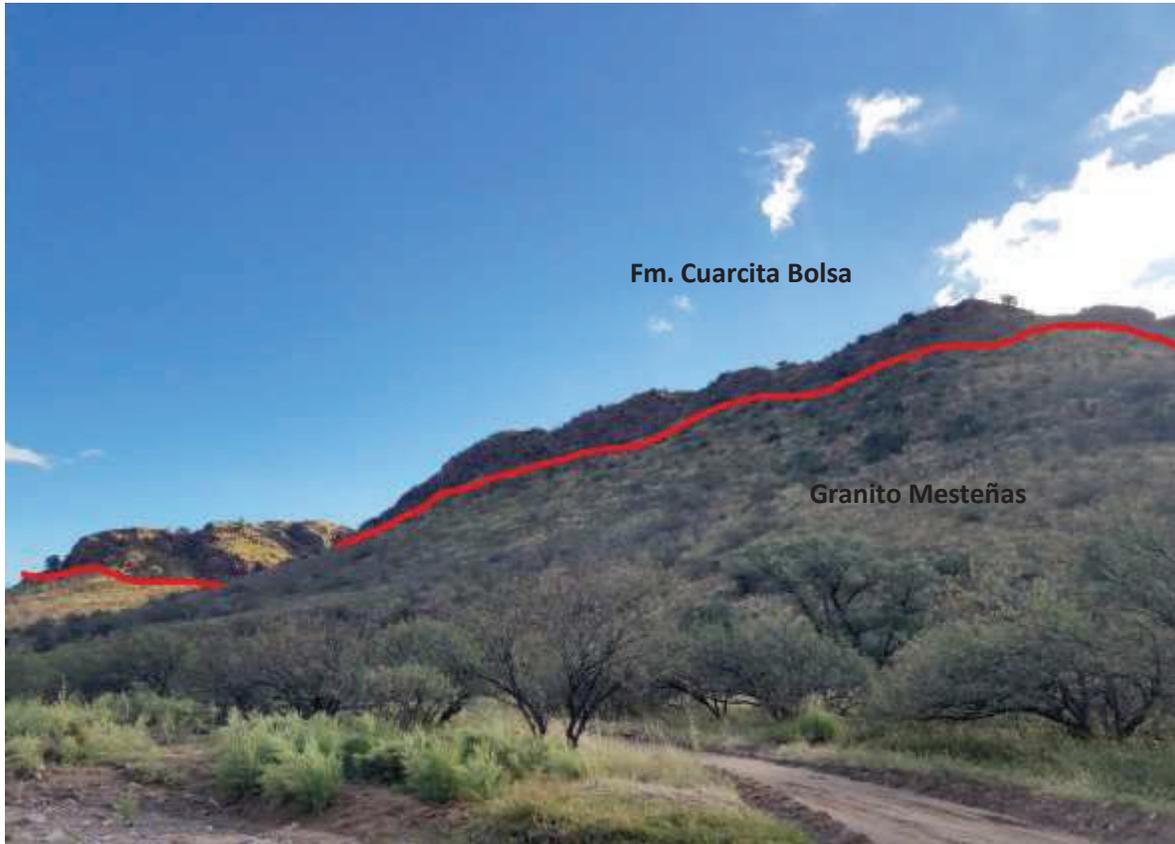


Figura 12. Fotografía mirando al SE, donde se muestra el contacto discordante (línea roja) entre el Granito Mesteñas del Precámbrico (base) y la Cuarcita Bolsa (cima).

5.2.2 Paleozoico

En la sierra Las Mesteñas el Paleozoico está representado por grandes paquetes de rocas sedimentarias principalmente carbonatadas, salvo la base que está compuesta de sedimentos clásticos. Las rocas paleozoicas que están presentes en el área van desde el Cámbrico inferior hasta el Pensilvánico, existiendo un hiatus que incluye el Ordovícico y el Silúrico, y adicionalmente el Pérmico.

Adicionalmente se tiene evidencia de por lo menos 2 eventos tectónicos en el área, la primera una discordancia angular entre el Paleozoico inferior y superior, y la segunda, otra discordancia angular entre el Paleozoico superior y Mesozoico.

5.2.2.1 Formación Cuarcita Bolsa

El Cámbrico inferior en esta región está representado por la Formación Cuarcita Bolsa, la cual engloba sedimentos de origen clástico que fueron definidos en el Cañón Bolsa de la sierra Escabrosa al oeste de Bisbee, Arizona por Ransome (1904) y le asigna esta edad basándose únicamente en las relaciones estratigráficas con que se presenta.

Según Ransome (1904), la parte superior de esta unidad estratigráfica se encuentra constituida principalmente por intercalaciones rítmicas de areniscas y lutitas, y hacia la base en la parte inferior por varios horizontes conglomeráticos en los que predominan clastos de cuarzo sub-redondeados. Otra de las características presentes en esta formación, es que presenta estratificación cruzada sobre todo en las capas conglomeráticas basales.

En la sierra Las Mesteñas la Formación Cuarcita Bolsa se pudo observar con características muy similares a las mencionadas en Arizona, por lo que se identificó a esta formación en gran parte del área con un rumbo preferencial NW-SE y en algunos lugares con rumbo NE-SW, así como basculamientos cercanos a los 45° en dirección NE y SE.

En el área de estudio la Cuarcita Bolsa se presenta como una unidad de areniscas y areniscas conglomeráticas que van de color café-rosado a marrón en superficie fresca, a un café más oscuro con tonalidades pardas y rojizas en superficie intemperizada, se le puede observar un tamaño de grano de medio a grueso de textura sacaroide muy notoria, cuyos principales constituyentes son granos de cuarzo semirredondeados y algunos feldespatos. Otra de las características principales que se perciben es la estratificación cruzada muy notoria, también llamada espinazo de pescado (Figura 13), la cual se pudo observar en la gran mayoría de los afloramientos presentes, así como estructuras flaser y

horodaciones creadas por organismos. Estas horadaciones solo fueron observadas en un lugar en específico de la sierra, dicho afloramiento corresponde en el arroyo La Cieneguita, del lado oriente del camino que va del rancho La Mesa al rancho Baltazar (Figura 14).



Figura 13. Afloramiento de la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior sobre el arroyo La Cieneguita al W del Rancho Baltazar, muy cerca del contacto con el Granito Mesteñas, donde se puede observar estratificación cruzada o también llamada estratificación cola de pescado, la cual corresponde a una estructura sedimentaria primaria.

Tal y como lo menciona Ransome (1904) y Gómez Tagle (1967) en sus respectivos trabajos, la Cuarcita Bolsa forma grandes acantilados o escarpes en la forma de presentarse en el relieve, tal y como se observó en el terreno y en el modelo uno realizado mediante fotogrametría digital (Figura 52).



Figura 14. Afloramiento de la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior sobre el arroyo La Cieneguita al W del rancho Baltasar, muy cerca del contacto con el Granito Mesteñas, donde se puede observar icnofosiles hechas por organismos al momento de la sedimentación.

Los cuerpos principales de esta formación se encuentran en las inmediaciones del cerro La Pedregosa, prolongándose hacia el NW y hacia el SE y cabe destacar que se encuentra afectado por fallas de componente a rumbo, pudiéndose observar de manera notoria en campo, y de mejor forma mediante imágenes de satélite. Las fallas laterales presentan un rumbo de desplazamiento NE-SW, dejando al cuerpo principal de la sierra desplazado o interrumpido en por lo menos 3 grandes bloques.

También se tiene afloramientos del Cámbrico inferior en las partes centro y sur del área, muy probablemente afectados y llevados ahí por movimientos tectónicos. Dichos afloramientos se encuentran sobre el cerro Las Pintas y del lado oriente del camino del Rancho La Mesa al Rancho Baltasar, al norte del cerro Baltasar, los cuales se encuentran afectados por lineamientos y desplazamientos a rumbo en dirección aproximada E-W y NE-SW.

Todos los afloramientos de la Cuarcita Bolsa expuestos en el área presentan características muy similares de textura, coloración, estratificación, estructuras sedimentarias primarias, y de relieve que forman prominentes paredes rocosas, donde el rumbo de estratificación se puede observar con tendencia NW-SE y un echado preferencial que fue medido en promedio de 40° a 45° con dirección NE.

Se hace suponer que de acuerdo con lo observado en campo y lo descrito en trabajos previos en la región, el origen de deposición de la Cuarcita Bolsa se dio en un ambiente marino de litoral, tal y como lo manifiesta sus características. El conglomerado identificado en la base de esta formación, la estratificación cruzada en horizontes inferiores, las horadaciones presentes y además la textura sacaroide de las areniscas hace inferir que se trata de un ambiente de playa o muy cercano a la línea de costa en el cual se dio su génesis.

Los detritos principalmente de cuarzo y feldespato potásico que son identificados en el conglomerado basal de esta unidad hace pensar que provienen el Granito Mesteñas que principalmente se compone de cuarzo y feldespato, del Esquisto Pinal que contiene cantidades considerables de cuarzo en su estructura, o bien, de la veta de cuarzo del Precámbrico que se encuentra emplazada en los cuerpos metamórficos y se puede observar en varios lugares del área.

En la parte superior de esta formación se observó una secuencia rítmica de lutitas y areniscas que hacen suponer que a finales del depósito de esta unidad probablemente se desarrolló una planicie de la estratificación de espinazo de pescado, la flaser y esta intercalación que puede ser interpretada como ritmitas de mareas.

La Formación Cuarcita Bolsa se encuentra en contacto sobreyaciendo discordantemente al Esquisto Pinal y al Granito Mesteñas del Precámbrico. Principalmente sobre el primero en los alrededores del cerro La Pedregosa y en la parte oeste y noroeste del cerro Las Pintas. El contacto sobre el Granito Mesteñas se puede observar en el flanco NW de la sierra en los alrededores del cerro Las Pilitas, en la parte norte y noreste del cerro Las Pintas, también sobre gran parte del lado oriente del camino que va del rancho La Mesa al rancho Baltasar (Figura 10), así como al E de Los Berrendillos en la zona SE de la sierra.

El contacto superior se encuentra de manera concordante con la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico superior, tal y como fue descrito por Ransome (1904). En la sierra Las Mesteñas se puede ver ese contacto de manera transicional en el arroyo La Cieneguita al SW del cerro La Pedregosa.

Así mismo, se tienen otros contactos estructurales que involucran a esta formación, los cuales se encuentran cerca del rancho Baltasar y en las cercanías del cerro Las Pintas. El primero pone en contacto por falla normal con los sedimentos Cretácico Superior asociados al Grupo Cabullona. El segundo se tiene en el flanco este del cerro Las Pintas, que pone en contacto a estas rocas con las rocas de la Formación Caliza Martín mediante posible falla normal que se infiere sobre un arroyo que crea un pequeño valle, el cual se cree que corresponde a la traza de la posible estructura (Figura 15).

Por lo tanto, se ha determinado a esta formación como del Cámbrico inferior, debido a sus relaciones estratigráficas que sobreyace discordantemente al Esquisto Pinal y al Granito Mesteñas, que a su vez subyace concordantemente a la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico superior, correspondiendo así a la Formación Cuarcita Bolsa de la sierra Escabrosa que Ransome (1904) dio su localidad tipo en las cercanías de Bisbee. De igual manera también se puede correlacionar con la Cuarcita Capote de la región de Cananea, al oeste del área de estudio, y con la Cuarcita Provedora de la región de Caborca (García-Cortez et al., 2001).



Figura 15. Fotografía panorámica viendo al este donde se observa e infiera el posible contacto estructural de falla normal entre la Cuarcita Bolsa y la Caliza Martin.

5.2.2.2 Formación Caliza Abrigo.

El Cámbrico superior en el área de estudio y en la región está representado por la Formación Caliza Abrigo, la cual comprende un paquete de calizas, calizas arenosas y calizas margosas, todas ellas fosilíferas que fueron identificadas en el Cuadrángulo de Bisbee, Arizona por Ransome (1904); en Sonora esta formación fue identificada por Taliaferro (1933) en la cuenca de Cabullona.

Según Ransome (1904) en la localidad tipo, esta formación se define como sedimentos que están constituidos por estratos delgados y laminares de calizas y algunas bandas finas de pedernal, y mientras en la parte superior de esta formación se compone de horizontes margosos más o menos fosilíferos.

En la sierra Las Mesteñas la Caliza Abrigo de igual manera que la Cuarcita Bolsa que la subyace se pudo observar con características muy similares a las mencionadas por Ransome (1904) en Arizona, y a lo estudiado por Peiffer (1988), con lo que se pudo identificar a esta formación en área con un rumbo preferencial NW-SE, así como basculamientos que rondan los 45° de echado en dirección NE

En la sierra Las Mesteñas la Caliza Abrigo está representada por una secuencia de calizas arenosas, calizas y calizas arcillosas, comportándose de esta manera de la base a la cima, específicamente al NE del cerro La Pedregosa. La estratificación es variante en toda la unidad, en la cual los estratos van de delgados o laminares hasta gruesos, sobre todo en la parte superior. Algunos estratos muestran dolomitización, horizontes de pedernal, nódulos de pedernal e intraclastos. Se le observa una coloración principalmente gris pardo y café a café claro en superficie de intemperismo, mientras que en superficie fresca se puede ver una variación de gris y gris oscuro a un café claro y café rojizo o pardo. En cuanto a la fauna fósil, se observaron tallos de crinoides, braquiópodos y restos de trilobites, así como abundantes oolitas.

Los principales afloramientos de la Caliza Abrigo se encuentran en la parte central norte y el flanco NE de la sierra Las Mesteñas, especialmente al NE del cerro La Pedregosa donde se puede ver el mayor paquete de esta unidad y donde se observaron la mayor parte de las características de relación estratigráfica con la que se identificó. Los afloramientos presentan un rumbo NW-SE y echado al NE, y los cuales están desplazados por fallas de componente a rumbo, al igual que la mayoría de las formaciones presentes en la zona de estudio. Dichos desplazamientos no son tan notorios en campo, salvo en las inmediaciones del cerro La Pedregosa, pero si un poco más visibles mediante imágenes satelitales. También se tienen otros afloramientos al W-SW del cerro La Pedregosa, en los cuales presentan características muy parecidas a las descritas anteriormente (Figura 16).

Además, se presenta un pequeño afloramiento correspondiente a esta formación al SE del Cerro Las Pintas, muy cerca del camino que va del rancho La Mesa al rancho Baltasar, el cual según Peiffer (1988) y Lara-Peña (2017), lo

asignaron como del Cámbrico superior. Este este trabajo se observó un pequeño afloramiento al SE del cerro Las Pintas, sobre un arroyo en dirección S-SE, y el cual presenta características muy similares a las que definieron los autores antes mencionados en sus respectivos trabajos en la sierra Las Mestañas, pero no se puede afirmar con certeza que tal afloramiento corresponde a la Caliza Abrigo.

Este pequeño afloramiento pudo haber sido llevado ahí por movimientos tectónicos, especialmente fallas a rumbo que dominan el área, o bien, la mayor parte del cuerpo que comprende a esta formación pudiera haber sido desplazado u ocultado por dichos movimientos tectónicos.



Figura 16. Afloramiento de la Caliza Abrigo del Cámbrico superior al W-SW del cerro La Pedregosa.

Por la fauna fósil existente en esta formación, se le puede considerar típicamente de origen marino, e inferir que al final del depósito de los sedimentos de la Caliza Abrigo, el mar sufrió una ligera transgresión, esto se propone de acuerdo a las características que se presentan en la parte superior de la formación, específicamente ocurrencia de calizas margosas.

El contacto inferior de esta formación es concordante con la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior, mencionado por Ransome (1904). Cabe destacar que en el área de estudio se pudo identificar esa transición entre el Cámbrico inferior y superior en el arroyo La Cieneguita al SW del cerro La Pedregosa (Figura 17), y de igual manera se identificó el contacto concordante, ya que ambas formaciones presentan el mismo ángulo de pendiente en la misma componente de dirección, la cual corresponde a 45° NE (Figura 18). Este contacto concordante se puede observar con claridad en la posterior del cerro La Pedregosa, el cual se infiere que dicho contacto es dividido y cubierto por sedimentos de arroyo.

El contacto superior de la Formación Caliza Abrigo es discordante con la Formación Caliza Martín del Devónico superior, que está sobreyaciendo mediante una discordancia angular a la formación en discusión. En el área de estudio se pudo interpretar con base a los echados que presentaba la Caliza Abrigo y la Caliza Martín que la sobreyace, la primera corresponde a un echado aproximado de 45° y la segunda aun echado de unos 35° aproximadamente, sugiriendo que se trata de una discordancia angular por las variaciones de pendientes que se presentan en la estratificación correspondiente para cada formación. Se hace pensar que muy probablemente dicha discordancia sea producto de un evento tectónico a mediados del Paleozoico, posiblemente a inicios del Devónico

Se le asigna una edad del Cámbrico superior, debido a sus relaciones estratigráficas, ya que sobreyace concordantemente a la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico inferior, y a su vez subyace discordantemente a la Formación Caliza Martín del Devónico misma edad que es asignada a esta unidad que aflora en el

cuadrángulo de Bisbee (Ransome, 1904) y en el cuadrángulo de Dragon (Cooper y Silver, 1964).



Figura 17. Afloramiento sobre el arroyo La Cieneguita al SW del cerro La Pedregosa donde se puede observar el contacto concordante y de manera transicional entre la Formación Cuarcita Bolsa del Cámbrico medio y la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico tardío.

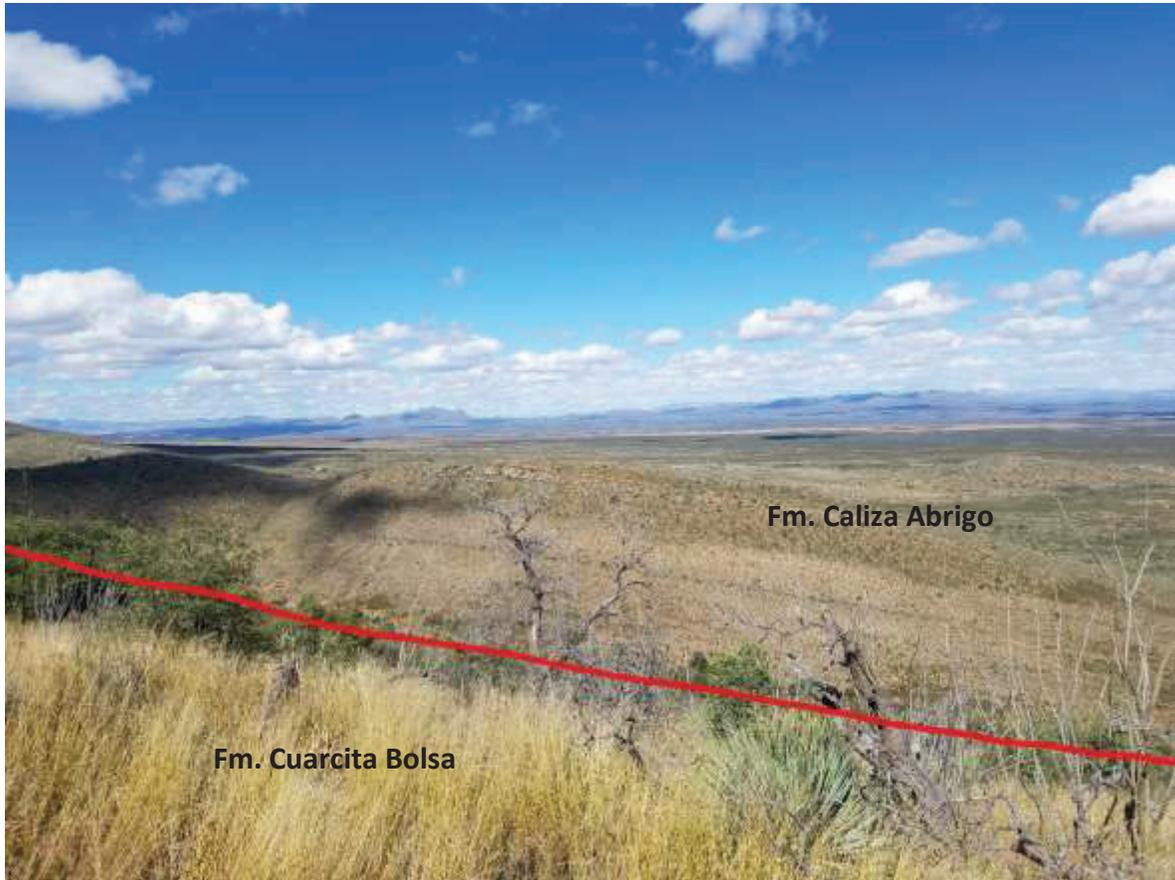


Figura 18. Fotografía panorámica vista desde la cima del Cerro La Pedregosa viendo al NE, en la cual se puede observar a la Caliza Abrigo con un rumbo NW-SE y un echado al NE, y se aprecia el contacto concordante (línea roja) entre la Cuarcita Bolsa y la Caliza Abrigo que sobreyace a la primera.

5.2.2.3 Formación Caliza Martín

En la región noreste de Sonora y en la sierra Las Mesteñas el Devónico es comprendido por la Caliza Martín propuesta por Ransome (1904), quien asigna como localidad tipo el Monte Martín de la sierra Escabroza, en el estado de Arizona. Propone a esta formación como un paquete de calizas compactas grises a grises oscuras, con una estratificación mediana a gruesa, y que ocasionalmente se le puede ver horizontes de lutitas calcáreas. Este autor le asignó edad devónica a esta formación con base a el contenido fósil de braquiópodos como *Spirifer whitneyi*.

En el presente trabajo la Caliza Martín sobreyace estratigráficamente a la Caliza Abrigo, y se le puede observar con características semejantes a las mencionadas por Ransome (1904), se le logró identificar a esta formación en el área y presenta un rumbo preferencial NW-SE, además de basculamientos que rondan los 55° de echado con dirección NE.

La Caliza Martín se pudo identificar litológicamente y sus características son afines a las que menciona Ransome (1904) por primera vez. Se distinguió a esta formación como un paquete de calizas, y calizas arenosas en estratos que van de un tamaño mediano a grueso, con coloraciones de diferentes tonalidades de grises, que van de un color gris claro en superficie fresca, y un color gris poco rosado para la superficie intemperizada. En algunos horizontes se pudieron observar nódulos de pedernal. Se identificó de manera general fauna fósil que corresponden a briozoarios, crinoides, corales y braquiópodos. Cabe destacar que recientemente Lara-Peña (2017) le asigna una edad del Devónico medio en base a conodontos.

La Formación Caliza Martín se encuentra aflorando en el flanco NE de la zona en estudio, la cual se presenta con una orientación que va de NW-SE, y se encuentra interrumpida y desplazada de igual manera que las unidades antes descritas, por fallas de movimiento a rumbo, con una componente de desplazamiento NE-SW. Así mismo se encuentran unidades litológicas de un tamaño parecido al descrito por Ransome (1904) y Peiffer-Rangin (1988) correspondiente a la Caliza Martín en la zona E y NE del cerro Las Pintas, que muestra Lara-Peña (2017). Este afloramiento hace pensar que muy probablemente se encuentre aflorando en el lugar por movimientos tectónicos.

Los sedimentos reconocidos para esta formación son típicos de procedencia marina, hecho que se basa en la presencia de fósiles encontrados indicando adicionalmente que se depositaron en aguas poco profundas, tal y como lo evidencia los aportes arenosos en las calizas.

En otras localidades el contacto inferior está representado por una caliza margosa, y estratificación delgada y laminar típicas de la Caliza Abrigo, que yace discordantemente por debajo de las calizas de color gris y gris oscuro de

estratificación mediana y gruesa de la Caliza Martín. Este contacto no se logró observar en el presente trabajo, pero se interpretó de acuerdo a relaciones estratigráficas y también por las variaciones de la pendiente que presentan cada una, como lo son de 30° y 55° en promedio para cada una buzando al NE, respectivamente para la Caliza Abrigo y la Caliza Martín (Figura 15).

El contacto superior está definido por la Formación Caliza Escabrosa que descansa en aparentemente concordancia sobre esta unidad. Este contacto se pudo observar en la mayor parte del flanco NW del área, pero no de igual manera al E del cerro Las Pintas, ya que en este lugar se infiere que el contacto debe de ser estructural debido al cambio de pendiente que se manifiesta en ambas formaciones y que regionalmente se tiene identificadas a ambas mediante un contacto concordante.

Las características litológicas que presenta esta formación en el área de estudio, nos indica que tiene relación con los sedimentos de la Caliza Martín, que describió por primera vez Ransome (1904) en el Cuadrángulo de Bisbee, destacando que la Formación Caliza Martín de la sierra Las Mesteñas, presenta variaciones con respecto a la del Monte Martín, pero de acuerdo a las características litológicas y estratigráficas con que se observa, esta es correlacionable en cuanto edad con la localidad tipo. Así mismo, ha sido identificada en el Cuadrángulo de Dragon (Cooper y Silver, 1964), en las colinas Tombstone (Gulluly, 1956), y en varios puntos de la región noreste del estado de Sonora.

5.2.2.4 Formación Caliza Escabrosa

En la sierra Las Mesteñas el Misisípico se caracteriza por estar presente la Formación Caliza Escabrosa, fue identificada por Ransome (1904) en la sierra Escabrosa, perteneciente al Cuadrángulo de Bisbee en Arizona. Ransome (1904) define como Caliza Escabrosa para un paquete de calizas granulosas, de estratificación gruesa a masiva, con una coloración que va de blanco grisáceo a gris oscuro, que contiene tallos de crinoides y corales principalmente.

En el área de estudio fue posible identificar a esta formación como una unidad de calizas de aspecto granuloso (Figura 19), con una estratificación que va de gruesa a masiva, de color gris a gris oscuro en superficie fresca y que intemperiza a gris blanquecino y gris rosado, donde además se le puede ver la presencia de fósiles que se identifican como crinoides, corales y braquiópodos, pero sin definir especies. Estas características litológicas y de fósiles concuerdan con esta formación con lo dicho por Ransome (1904) en Arizona, y lo mencionado por Peiffer-Rangin (1988) en la sierra Las Mesteñas.



Figura 19. Afloramiento de la Caliza Escabrosa en el Flanco NE de la sierra Las Mesteñas

La Caliza Escabrosa se encuentra aflorando en gran parte de la sierra Las Mesteñas, pero concentrándose principalmente en el flanco NE y en el S-SE de la sierra. En la porción noreste del área, esta unidad representa aparentemente el mayor espesor, de igual manera conforma las partes más altas, topográficamente hablando, y así mismo conforma escarpes más pronunciados y notorios. En el área estudiada esta formación se encuentra segmentada en bloques debido a fallas con desplazamiento a rumbo, siendo esta característica notoria en campo.

En la porción sur-sureste de la sierra Las Mesteñas, está expuesta en gran medida en una porción que va entre el cerro Baltasar, cerro El Cartucho y el camino entre los ranchos Los Berrendos y Baltasar. De igual manera que en el flanco NE, la Caliza Escabrosa en la parte S-SE de la sierra, representa granes elevaciones topográficas y de muy difícil acceso.

Por último, se tienen otros afloramientos correspondientes a esta formación, en lo que se refiere a la parte central del área, específicamente al E del cerro Las Pintas. Estos afloramientos se encuentran por fallas de componente a rumbo, concretamente en su parte norte y sur, y con desplazamientos en dirección E-W, y ligeramente SW-SE.

Las características litológicas de las calizas, pertenecientes a esta formación, así como la presencia de abundantes fósiles de crinoides y corales, nos indican que pertenecen a sedimentos típicos de un ambiente marino somero.

Para la Caliza Escabrosa se tiene como contacto inferior a la Formación Caliza Martín de manera concordante. Este contacto está representado por un notorio cambio litológico entre de la cima de las calizas del Devónico que se presentan como calizas con abundante pedernal y las calizas granulosas de estratificación gruesa y masiva del Misisípico. Este contacto se puede notar e inferir que se presenta al oeste del cerro La Pedregosa, cerca y por encima topográficamente del arroyo La Cieneguita, debido a las condiciones del terreno, por escarpes pronunciados, y por lo que no se puede acceder a observar de cerca a este contacto. Si bien también se tiene este contacto y se puede observar de buena manera es al este del cerro Las Pintas, sobre un pequeño arroyo, el cual

hace pensar que se trata de algún tipo de fallamiento, pero no fue posible encontrar evidencias que afirme esta teoría (Figura 20).



Figura 20. Fotografía viendo al NW tomada desde la cima del Cerro La Pedregosa, donde se observa un afloramiento típico y la forma de relieve que presenta la Caliza Escabrosa en la sierra Las Mesteñas.

El contacto superior esta dado de manera concordante con la Formación Caliza Naco del Pensilvánico, donde de igual manera que en el contacto inferior, está bien marcado por un cambio litológico que va de calizas gruesas y masivas de aspecto granuloso para la Caliza Escabrosa, a calizas de color gris claro y tonalidades azules. Dicho contacto solo se puede inferir, ya que no observo en el campo, y solo se interpreta en el flanco NE de la sierra Las Mesteñas.

De acuerdo a las características litológicas de las rocas que conforman a esta unidad en el área de estudio, se identifica a la Formación Caliza Escabrosa, descrita por primera vez en la sierra Escabrosa del Cuadrángulo de Bisbee, Arizona (Ransome, 1904). Además, también estas rocas son correlacionables con las identificadas en el Cuadrángulo de Dragon (Cooper y Silver, 1964), y las rocas misisípicas del Arizona Central (Huddle y Dobrovlny, 1952), así como en la sierra El Tule (González- León, 1986).

5.2.2.5 Formación Caliza Naco

En el área de estudio se tiene a la Formación Caliza Naco que corresponde al Pensilvánico, formación tipo de esa edad que es encontrada en el noreste de Sonora y sureste de Arizona. Esta formación fue establecida por primera vez en el Cuadrángulo de Bisbee, Arizona por Ransome (1904), e identificada en Sonora por Taliaferro (1933).

Ransome (1904) definió a la Caliza Naco como un paquete de calizas densas, con una coloración gris claro, finamente estratificadas, con numerosos fósiles, y en la parte superior interestratificación de capas arenosas y margosas.

En la sierra Las Mesteñas la Caliza Naco se manifiesta como un paquete de calizas y locales dolomías, de estratificación que va de delgada a mediana con coloraciones gris claro y gris rosado en superficie fresca, y que intemperizan a un gris pardo con tonalidades azulaceas. Adicionalmente se logró identificar capas de calizas arenosas, y estratos delgados o cuerpos irregulares de pedernal negro. Las calizas presentan fauna fósil como crinoides, los cuales en un trabajo reciente por Villanueva-Olea et al. (2016) describió por primera vez ocho géneros y nueve especies en el lugar. También se tiene presencia de corales solitarios, corales coloniales, bryozoarios y braquiópodos (Figura 21).



Figura 21. Fotografía de un afloramiento de una caliza fosilífera de la Caliza Naco, ubicado en el flanco NE de la sierra Las Mesteñas.

La Caliza Naco en el área e estudio se encuentra únicamente aflorando en el flanco NE de la sierra, la cual gran parte de los afloramientos se encuentran parcialmente cubiertos por sedimentos aluviales recientes; dicha formación se encuentra desplazada en dos bloques debido a movimientos estructurales con desplazamiento a rumbo que de manera general se encuentran afectando gran parte el área. En el lugar el afloramiento más representativo encontrado se

encuentra al N-NE del cerro La Pedregosa, en el cual, se pueden identificar la gran mayoría de las características litológicas, estratigráficas y paleontológicas que representa a esta formación. Adicionalmente cabe destacar que la Caliza Naco de igual manera a todas las unidades sedimentarias descritas en la sierra Las Mesteñas, presenta un rumbo de estratificación NW-SE con echado al NE.

Dadas las características litológicas de organismos marinos fósiles y la apariencia de una caliza pura, nos indicarían que se trata de sedimentos típicos de un ambiente marino que fueron depositados en aguas someras a un poco más profundas.

El contacto inferior está representado de forma concordante con la Formación Caliza Escabrosa; no se puede ver de manera clara, solo se puede inferir de acuerdo a las características litológicas que presentan; una caliza gruesa a masiva de color gris claro rosado con crinoides principalmente, para la formación del Misisípico, mientras que para la formación del Pensilvánico, una caliza de estratos delgados y medianos con coloraciones grises y azules, horizontes de pedernal, así como diferentes tipos de fauna característica. Este contacto solo se observa en el flanco NE de la sierra en estudio, considerando que se presenta de manera estructural debido a cambios en el echado que manifiestan.

Regionalmente el contacto superior está dado de manera discordante con la Formación Conglomerado Glance del Cretácico Inferior, perteneciente el Grupo Bisbee, sin embargo, en el área estudiada es inferido ya que las rocas de la cima del Conglomerado Glance se encuentran cubiertas y solo afloran localmente en algunos arroyos en el flanco oriente de la sierra Las Mesteñas, pero debido a su ubicación y presencia, se infiere como contacto estructural.

Se le ha asignado la edad a esta formación de Pensilvánico, debido a sus relaciones litológicas, contenido fosilífero, y posición estratigráfica al sobreyacer concordantemente sobre la Caliza Escabrosa y a su vez subyace discordantemente bajo la Formación Conglomerado Glance del Cretácico Inferior, correspondiendo así a la Formación Caliza Naco que aflora en el Cuadrángulo de Bisbee (Ransome, 1904) y que a la vez se correlaciona con la descrita por Taliaferro (1933) en la

cuenca de cabullona, con las colinas Tombstone por Gulluly (1956) y por la calizas del Cuadrángulo de Dragon (Cooper y Silver, 1964).

5.2.3 Mesozoico

El Mesozoico en la sierra Las Mesteñas está representado por dos Grupos sedimentarios que corresponden al Grupo Bisbee del Cretácico Inferior definido por Ransome (1904), y al Grupo Cabullona del Cretácico Superior definido por Taliaferro (1933). El primero está representado en el área de estudio solamente por el afloramiento de las dos primeras unidades, mientras que para el grupo del Cretácico Superior solo se reconocieron pequeños afloramientos y espesores de roca que tienen la característica de pertenecer a este.

5.2.3.1 Grupo Bisbee

El Grupo Bisbee (Ransome, 1904) en la sierra Las Mesteñas esta dado solamente por la exposición de las dos primeras unidades que corresponden a la Formación Conglomerado Glance y la Formación Morita. Ambas unidades afloran solamente en pequeños lugares del lado oriente de la sierra, principalmente en arroyos.

5.2.3.1.1 Conglomerado Glance

El Cretácico Inferior en la Sierra Las Mesteñas está representado por la Formación Conglomerado Glance perteneciente al Grupo Bisbee, grupo que fue definido en el cuadrángulo de Bisbee, Arizona, por Ransome (1904) como una unidad de rocas conglomeráticas que representan la formación basal, esto en la localidad tipo y que son cubiertas concordantemente por rocas de la Formación Morita.

En el área de estudio solo aflora en pequeñas áreas al oriente de la sierra, en las cuales se pudo observar como un conglomerado polimíctico que está constituido por clastos sub-redondeados, mal clasificados, donde los clastos van

desde dos hasta decenas de cm; los clastos son principalmente de granito, correspondiente al Granito Mesteñas, de cuarcita que coinciden con la Cuarcita Bolsa del Esquisto Pinal, de calizas de las diferentes secuencias paleozoicas, y de cuarzo blanco lechozo correspondiente a las vetas de cuarzo precámbricas que se encuentran emplazadas en el Esquisto Pinal. Los diferentes clastos se encuentran dentro de una matriz arenosa que le dan una coloración café rojiza predominantemente (Figura 22).

El Conglomerado Glance tiene su origen debido al producto de la erosión de formaciones preexistentes de edades precámbricas y paleozoicas, que han generado los clastos que la constituyen, y donde muy probablemente el depósito se dio en un ambiente de abanico aluvial dentro de cuencas extensionales en tiempos cretácicos. Las características que presentan los clastos de esta unidad como lo es la mala clasificación y la angulosidad de los mismos, y el cementante arenoso que lo compone, hace pensar que el depósito de los sedimentos se llevó a cabo cerca de la fuente de origen, lo que pone en evidencia su muy poco transporte.

Los contactos litológicos para esta formación en la sierra Las Mesteñas están dado de la siguiente manera: el contacto inferior está representado por un cambio litológico entre la Caliza Naco y esta unidad; dado que el Conglomerado Glance solo aflora localmente en algunos arroyos y se encuentra cubierto por sedimentos. Se infiere que el contacto es de tipo discordante de acuerdo a como se presenta de manera regional y, además, localmente en el área se da de manera estructural con respecto a las unidades paleozoicas. Cabe destacar que no se pudo identificar a este contacto en el área de estudio.

El contacto superior está dado por la Formación Morita que sobreyace concordantemente y transicionalmente a esta formación basal del Grupo Bisbee. Dicho contacto se encuentra en al menos un arroyo cerca del camino que va del rancho La Mesa a la Mesa La Pedregosa, quedando en un área restringida al SW de lo que se conoce como Agua Chemali, y al SE de Mesa Pedregosa (Figura 23 A, B).



Figura 22. Afloramiento sobre el arroyo La Cieneguita, donde se observa un conglomerado polimíctico que se identifica como Conglomerado Glance. Se alcanza a ver clastos de granito, cuarcita, caliza y cuarzo principalmente.



Figura 23. Fotografías A y B al SW de Agua Chemali, donde se observa el contacto concordante y transicional entre el Conglomerado Glance y la Formación Morita.

5.2.3.1.2 Formación Morita

En la sierra Las Mestañas para en Cretácico Inferior se tiene a la Formación Morita, la segunda unidad del Grupo Bisbee, descrita por Ransome (1904), y la que identificó como una secuencia de areniscas y lutitas que van de color gris a rojizas con algunas capas de areniscas conglomeráticas de granos angulosos y lentes de caliza impura, presentando además lutitas calcáreas en la parte superior de esta formación.

En el área de estudio la Formación Morita aflorando muy localmente, siendo la zona del contacto transicional con el Conglomerado Glance la que se pudo identificar en campo, observándose como una unidad de areniscas de grano medio a grueso de clastos angulosos, en su mayoría de cuarzo detrítico. Además, presenta una coloración que va de gris a una tonalidad verdosa, donde la base de esta unidad está representada por una alternancia en capas delgadas de areniscas conglomeráticas y lutitas de color gris pardo verdoso.

Las rocas que comprenden a la Formación Morita en la región presentan características de ambientes fluviales a transicionales. La predominancia de areniscas nos indica que el origen de estas, ricas en cuarzo que caracterizan a esta formación, indicarían que la fuente de donde provinieron los sedimentos que comprenden a la formación, tuvieron origen de la erosión de unidades precámbricas y paleozoicas que se encuentran cerca en la región, tal y como pudieran ser el, la Cuarcita Bolsa y las mismas vetas de cuarzo emplazadas en el Esquisto Pinal que aportan los detritos de cuarzo subangulosos. Dicha característica indicaría que los sedimentos no tuvieron un transporte prolongado y que la cuenca a la cual llegaban los clastos principalmente de cuarzo se encontraba cerca de un posible alto topográfico que comprenderían tales unidades precámbricas y paleozoicas.

El contacto inferior esta dado de maneta concordante y transicional con el Conglomerado Glance. Dicho contacto se puede ver en pequeños arroyos cerca de Agua Chemali, en las partes bajas del flanco oriente de la Sierra (Figura 22 A, B)

Ya que no se tienen a las dos unidades superiores del Grupo Bisbee y la Formación Morita se encuentra cubierta por sedimentos recientes, no se pudo identificar el contacto superior, pero se infiere que puede estar en contacto estructural con las rocas que corresponden al Grupo Cabullona.

Se identifica a esta formación de acuerdo a sus características y relaciones estratigráficas, sobre todo por el claro contacto con el Conglomerado Glance, relacionando así a esta unidad con la Formación Morita que describe Ransome (1904) en las cercanías de Bisbee, Arizona, también se tienen afloramientos importantes de esta formación en las Montañas Dragon y algunos otros sitios del SE de Arizona (Viveros, 1965), así como en el noreste de Sonora en la sierra Cabullona y cerro La Morita, siendo esta última su localidad tipo (Taliaferro, 1933).

5.2.3.2 Grupo Cabullona

El Grupo Cabullona (Taliaferro, 1933) en la sierra Las Mestefñas es conformado solamente por pequeños afloramientos y espesores que a su vez se encuentran cubiertos por sedimentos recientes. Dichos afloramientos se componen de estratificaciones delgadas y laminares de areniscas color café y lutitas de color gris verdoso oscuro con restos de pequeñas plantas fósiles. En el área se pudo identificar pequeños afloramientos con formas de montículos en las cercanías del rancho Baltasar y también sobre el camino a la Mesa Pedregosa, en las cercanías de Agua Chemali, en donde se piensa que corresponden al Grupo Cabullona dado que se identificaron lutitas fósiles de color café verdoso y que presentan un muy alto fracturamiento que hace que se disgreguen al tacto, también se observaron algunos restos de plantas fósiles en la lutita. Se piensa que estos sedimentos corresponden al Grupo Cabullona, ya que topográficamente se encuentran por encima de los sedimentos del Grupo Bisbee del Cretácico Inferior, además de que no se tiene evidencia estructural que diga todo lo contrario en cuanto a eso (Figura 24).



Figura 24. Afloramiento de sedimentos correspondientes al Grupo Cabullona.

5.2.4 Cenozoico

El cenozoico en la sierra Las Mestañas se caracteriza solamente por la presencia de pórfidos que comprenden una edad tardía del magmatismo Laramide (Damon et al., 1981), dando como producto pequeños afloramientos de pórfidos andesíticos y riolíticos que afectan a rocas paleozoicas del área. Adicionalmente se tiene rocas volcánicas de la misma edad que comprenden riolitas y tobas riolíticas. Así mismo se tienen sedimentos recientes que cubren grandes extensiones en los valles que rodean a esta sierra en mención.

5.2.4.1 Riolita-Toba riolítica

En la sierra Las Mestañas se tienen algunas riolitas y tobas riolíticas que según Ramírez-López y otros (2012), se tratan de rocas de una edad Oligoceno. En el área se identificaron a estas riolitas, presentándose como rocas de colores claros, tonalidades que van de blanco a rosado (Figura 25). Es una roca de grano fino con bastante cuarzo y algo de feldespatos potásico principalmente. En algunos lugares se presenta como una toba riolítica, y en ambas rocas se le observó una silicificación de ligera a moderada.



Figura 25. Afloramiento de riolitas sobre el arroyo La Cieneguita, al NE del cerro Las Pintas.

Esta unidad de rocas volcánicas aflora en el área de estudio, al NE del cerro Las Pintas, en los alrededores del rancho Baltasar, y en los alrededores de El Rebarito, en el camino que va del rancho Baltasar al rancho Los Berrendos.

Realmente estos derrames riolíticos no comprenden áreas muy extensas, en algunos casos presentan pseudoestratificación, sobre todo en los afloramientos que rodean al Rancho Baltasar. Esta unidad volcánica (Ramírez-López et al., 2012), le asigna una edad del Oligoceno, y estratigráficamente estas riolitas se encuentran descansando sobre los sedimentos del Grupo Cabullona en su contacto inferior, y lo sobreyacen sedimentos recientes.

5.2.4.2 Pórfido Andesítico

En área de estudio Peiffer-Rangin (1988), así como (Ramírez-López et al, 2012), mencionan la presencia de un pórfido andesítico en el flanco NE de la sierra Las Mesteñas, asignándole una edad del Oligoceno.

En este presente trabajo solo se cartografió al noreste del cerro La Pedregosa, encontrándose muy posiblemente en contacto estructural con respecto a las secuencias paleozoicas. El pórfido andesítico, tiene condiciones buenas y favorables económicamente hablando, ya que se tiene registro de una obra minera llamada La María, donde Guzmán-Espinoza et al. (2012) evidencian altos valores de Au y Ag en esa obra abandonada, dejando un potencial incierto pero favorable para esta unidad.

5.2.4.3 Pórfido Riolítico

El Servicio Geológico Mexicano en 2003 cartografió una roca que clasificó como pórfido riolítico, que aflora en el flanco SE de la sierra Las Mesteñas, y que así mismo le asignó una edad del Oligoceno. En este presente trabajo solo se cartografió mediante imágenes satelitales, donde se ve claramente que afecta a rocas paleozoicas, específicamente a la Cuarcita Bolsa.

La intrusión de este cuerpo porfídico, que corresponde a una etapa tardía del magmatismo Laramide pudiera haber favorecido para la mineralización en el área de afectación a las rocas sedimentarias.

5.2.4.3 Depósitos no consolidados

En al área se tienen sedimentos recientes que se han depositado después del último evento extensivo que predomina en el noroeste de México. Esos sedimentos rellenan grandes valles que rodean a la sierra Las Mesteñas, que de igual manera está controlada estructuralmente en un régimen NW-SE. Dichos sedimentos se componen de conglomerados polimícticos mal clasificados, arenas y gravas que cubren a las formaciones que han quedado sepultada en esos grandes valles de edad Pleistoceno-Holoceno

5.3 Geología estructural

En el área de estudio los aspectos geomorfológicos que caracterizan el relieve consiste en una sierra alargada de rumbo NW-SE, y cortada por estructuras longitudinales y perpendiculares, que es circundada por valles rellenos de material clástico que derivan del mismo alto topográfico en estudio, y de los sistemas de montañas vecinas que en conjunto conforman una sucesión de sierras altas alargadas. Esta morfología del terreno es producto de una de las ultima etapas tectónicas distensivas que afectó el noroeste de México y suroeste de los Estados Unidos a partir del terciario, específicamente a partir del Mioceno, que dislocó y fragmentó a las unidades litológicas que existían en el lugar, dificultando y ocultando aún más el panorama estructural.

Se tienen rasgos estructurales que se distinguen como fallas normales y a rumbo, posibles pliegues, foliación, estratificación, pseudoestratificación, flujos volcánicos y lineamientos que se relacionan a diferentes eventos tectónicos que han actuado en la sierra Las Mesteñas a través del tiempo geológico.

La interpretación de imágenes de satélite que comprenden el área refleja rasgos geomorfológicos de un relieve alto y bajo que es regido por estructuras de orientación NW-SE, y a la vez cortado y desplazado por estructuras con rumbo NE-SW y E-W. La orientación de las primeras estructuras es típica de esta zona de la región, se le asigna a la tectónica distensiva del *Basin and Range*, y las segundas estructuras se le pueden asociar a la tectónica transtensiva relacionada con la apertura del Golfo de California, o si bien a una fase tardía de la tectónica distensiva del *Basin and Range*.

5.3.1 Deformación Dúctil

La deformación dúctil en la sierra Las Mesteñas está representada por planos de foliación que están presentes en las rocas metamórficas precámbricas del Esquisto Pinal, los cuales comprenden esquistos de cuarzo-sericita, muscovita y

estauroлита, que afloran en gran parte del poniente de la sierra, desde el flanco NW, hasta el SE. Se tienen dos grandes zonas principales de afloramientos del Esquisto Pinal, y que a su vez cada una de estas tiene un régimen de foliación característico. La primera zona se encuentra al S-SE del área, donde se tiene una foliación con un rumbo preferencial de 70° - 80° SE y con 45° - 75° al SW de inclinación, mientras que la segunda zona comprende una amplia extensión que se encuentra al norte y noreste del rancho La Mesa, la cual tiene una foliación que va de 45° - 55° SE y una inclinación de 25° - 45° al SW (Figura 26).



Figura 26. Afloramiento del Esquisto Pinal al N-NE del rancho La Mesa, donde se observa claramente la foliación.

5.3.2 Deformación Dúctil-Frágil

Peiffer (1988) menciona que algunos bloques de la Caliza Escabrosa del Misisípico que afloran en los altos topográficos del flanco NE de la sierra Las Mesteñas se encuentran plegados, formando sinclinales y anticlinales; pero en este trabajo no se encontraron evidencias concretas de esto, salvo fuerte fracturamiento y pequeños bloques aparentemente rotados y desprendidos de su roca original, sin embargo esto muy probablemente está relacionado con la traza de una falla con desplazamiento a rumbo que se encuentra muy cerca del lugar.

De ser cierto lo que dice Peiffer-Rangin (1988), que la unidad correspondiente al Misisípico este plegada sobre la unidad del Devónico esos plegamientos corresponderían a bloques deslizados en un contexto tectónico-estructural muy local, ya que no hay evidencia en otros puntos de la región, y además podría estar relacionado con la orogenia del Orogenia Antlerana (Fries, 1962) que comienza en el Devónico y se extiende hasta el Misisípico y muy probablemente hasta el Pensilvánico.

Por otra parte, históricamente las unidades correspondientes al Grupo Bisbee del Cretácico Inferior y el Grupo Cabullona del Cretácico Superior presentan este tipo de deformación, pero por lo menos esto no es evidente dentro del área de estudio. Este tipo de deformación es característica y muy común encontrarla en rocas correspondientes a estas edades, no solo en el noreste de Sonora, sino en toda la región noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, relacionado a las orogenias que se conocen como Orogenia Mesocretácica y Orogenia Laramide.

Es posible que este tipo de deformación no se encuentre en rocas de esta edad en la sierra Las Mesteñas, o bien no se identificó debido a los afloramientos locales presentes en la zona, ya que adicionalmente se encuentran afectados por la tectónica distensiva del Mioceno, que creó un sistema de sierras y valles alargados con dirección NW-SE y N-S, presentándose estos afloramientos cretácicos en los valles o grabens de las cuencas que circundan los horst del área, y que a su vez los aportes de sedimentos detríticos provenientes de las sierras altas que enmascaran

y cuben los afloramientos y posibles evidencias de deformación dúctil-frágil en el lugar.

5.3.3 Deformación Frágil

La deformación frágil en el área se interpreta como fallas normales locales que pudieran extenderse de manera regional con una orientación NW-SE y N-S, también fallas muy locales con desplazamiento a rumbo con dirección NE-SW y E-W, así como lineamientos y fosas creados por estas estructuras antes mencionadas.

5.3.3.1 Fallas Normales

Las primeras estructuras que corresponden a fallas de tipo normal originaron fosas con esa orientación que rodean a la sierra Las Mesteñas, y crearon amplios valles que son rellenados por depósitos continentales de gravas y arenas. Las segundas estructuras generaron desplazamientos de bloques de manera perpendicular o casi perpendicular a la dirección de las primeras estructuras, siendo por lo tanto más jóvenes que las primeras en diferentes eventos tectónicos, o bien, corresponden al mismo contexto tectónico, pero las segundas comprenden la etapa tardía de ese evento distensivo. Además de movimientos de bloques, los fallamientos a rumbo generaron lineamientos en las rocas presentes, específicamente en las rocas graníticas y riolíticas que afloran en el área, presentando una tendencia que concuerda con los rumbos de las estructuras, de igual manera las fallas son identificables mediante imágenes de satélite, pero también con evidencia clara encontrada en campo (Figura 27).

Las estructuras principales están dadas por fallas normales con dirección NW-SE, que afectan especialmente a rocas precenozoicas. Se tienen estructuras principales que dominan y definen la morfología de la sierra, las cuales la delimitan por ambos flancos. Para la primera y más importante estructura, se tiene en el flanco poniente como una falla que ha sido evidenciada con estrías, que limita el alto

topográfico, con la fosa de nombre La Mesa. Estas estrías fueron medidas en los pocos afloramientos que se vieron presentes dando como promedio alrededor de 75° de rake en dirección SW sobre las estrías con respecto a la horizontal del plano de falla.



Figura 27. Fotografía tomada en las inmediaciones del rancho La Mesa donde se muestra un plano de falla con estrías de 75° de ángulo que pone en evidencia un fallamiento tipo normal.

Mientras que del lado oriente se infiere otra estructura de carácter normal que limitaría a la sierra con un amplio valle. Esto solo se infiere debido a que el basculamiento de todas las formaciones sedimentarias presentes en el lugar están

basculadas con dirección NE, dejando así la traza estructural cubierta por sedimentos que caen por las pendientes, y enmascarando la posibles evidencias, salvo unas cuantas estrías presentes en rocas graníticas sobre el arroyo La Cieneguita, muy cerca del camino al rancho Baltasar, dando así pruebas que confirman que en efecto, el flanco oriente de la sierra Las Mesteñas se encuentra afectado por la tectónica distensiva del Mioceno medio-tardío y que da las características morfológicas del terreno (Figura 28).



Figura 28. Fotografía al oeste del rancho Baltasar sobre el Granito Mesteñas donde se observan estrías de una falla normal con un rake de 110° con respecto a la horizontal del plano de falla.

En suma, ambas estructuras con dirección NW-SE originaron que el horst se levantara dejando por el flanco poniente una gran fosa de nombre La Mesa, y por el flanco oriente un gran valle que se le han aportado gran cantidad de sedimentos,

debido al levantamientos del horst y que fue basculado en dirección NE, dejando expuesto el basamento cristalino del lado poniente (Figura 29).

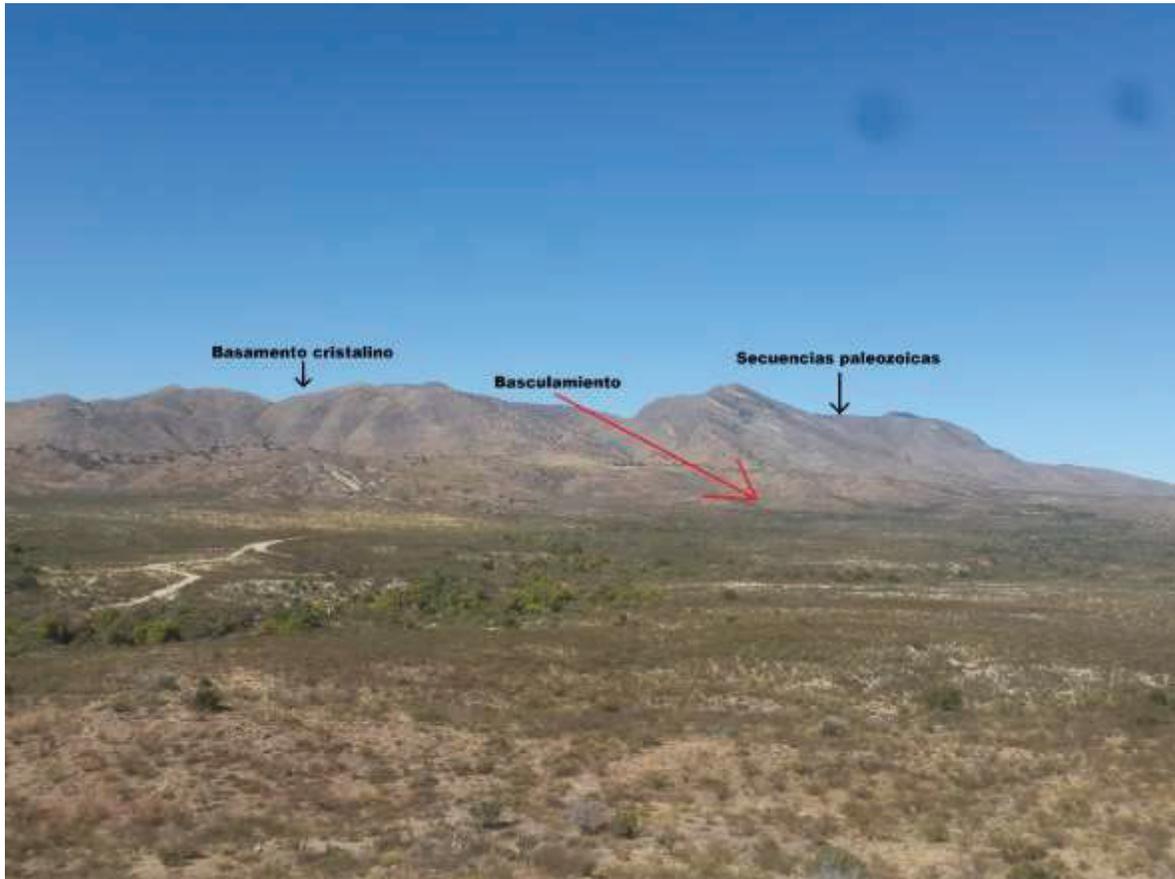


Figura 29. Fotografía panorámica de la Sierra Las Mesteñas viendo al NW desde el rancho Baltasar donde se muestra la exhumación del basamento y el basculamiento de todas las unidades.

5.3.3.2 Fallas a rumbo

Las segundas estructuras en tiempo y eventos geológicos corresponden a fallas con movimiento a rumbo que originaron desplazamientos de bloques de manera perpendicular o casi perpendicular a la dirección de las primeras estructuras de tipo normal, además de movimientos de bloques, los fallamientos a rumbo generaron lineamientos en las rocas presentes, los cuales pueden ser identificados fácilmente mediante imágenes satelitales, y también se interpretó movimientos de

este tipo mediante el modelo dos elaborado con fotogrametría digital en las inmediaciones del cerro La Pedregosa

El fallamiento a rumbo divide y desplaza a la sierra Las Mesteñas en varios bloques de considerable tamaño y algunos otros menores, en microbloques o pequeños cuerpos desplazados. Ese fallamiento puede encontrar evidencia en campo principalmente en los alrededores del cerro Las Pintas y en específico en el arroyo La Cieneguita, el cual comprende en conjunto parte de fallas a rumbo y lineamientos producto de este evento probablemente transtensivo (Figura 30 a, b). Se buscó evidencia de esto en otras zonas del área, y solo se encontraron rasgos e indicios topográficos, así como de relieve, vegetación, color y textura de la roca que revela este tipo de deformación en el lugar, además de poderlo visualizar y entender este régimen estructural mediante imágenes satelitales donde se aprecia claramente. Adicionalmente en el cerro La Pedregosa se pudieron observar elementos que confirman este tipo de deformación; se encontró en el flanco NE de este cerro, muy cerca de la traza de una falla a rumbo un bloque correspondiente a la Cuarcita Bolsa con un rumbo y echado totalmente perpendicular al rumbo preferencial que presenta ésta y todas las unidades sedimentarias en el área, siendo un rumbo al NE y un echado al SE el que presentaba este bloque, en lugar manifestar una actitud hacia el NE y SE respectivamente, lo que indicaría que se trata de deformación frágil asociada a movimiento lateral y muy cercano a la estructura que lo provocó (Figura 31).

El tipo de deformación asociado a fallas de tipo rumbo, de no estar relacionado a la última etapa distensiva del *Basin and Range*, pudiera tener relación con la tectónica transtensiva que originó la apertura del Golfo de California a finales del Mioceno, y que dichos eventos se extenderían hasta esta parte del noreste de Sonora.

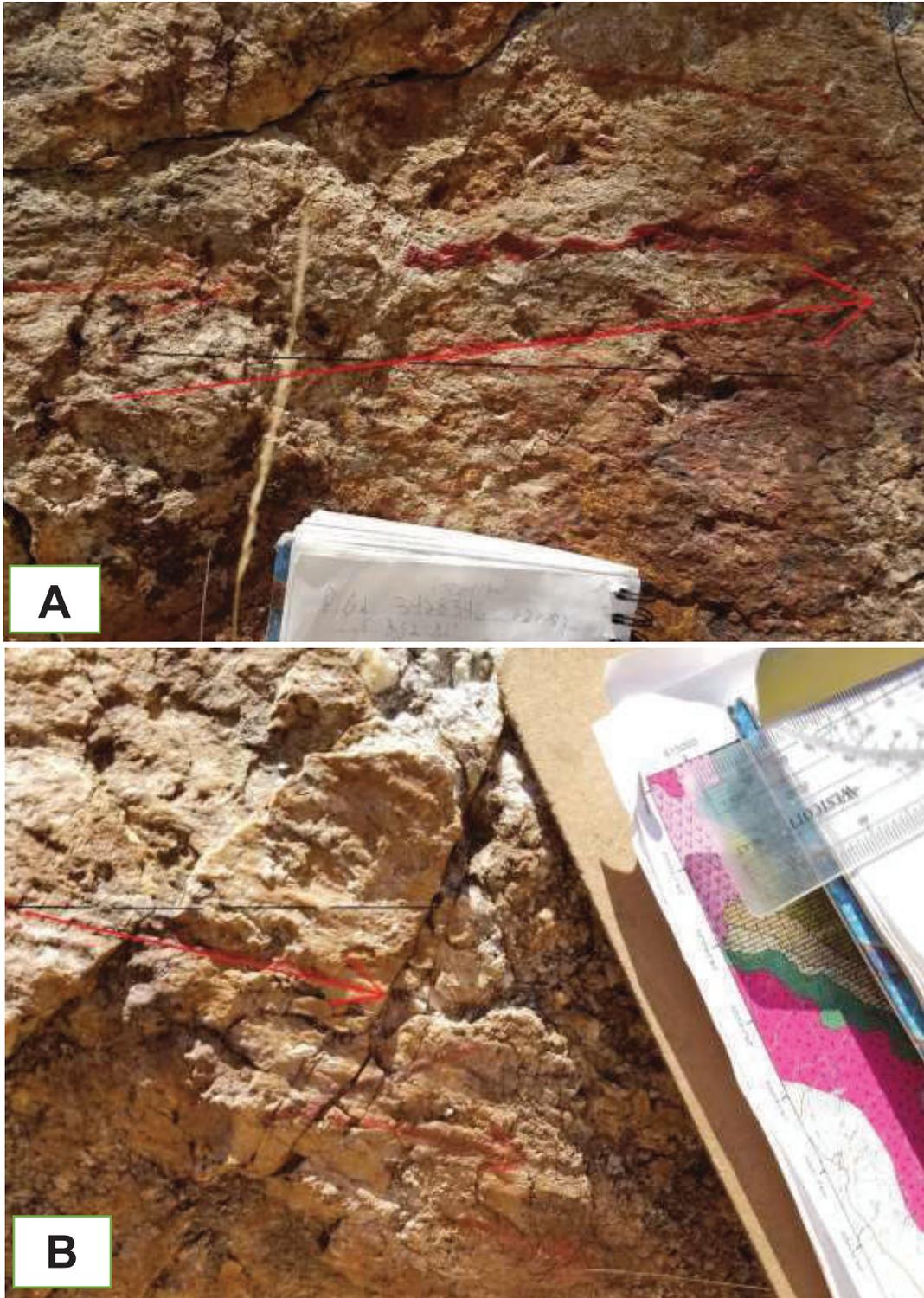


Figura 30. A) estrías de falla con una rake de 9° B) estrías de falla con un rake de 13° . Ambos sistemas de estrías se presentan sobre el plano de falla que tiene un rumbo NE-SW, y representan un sistema de fallas con movimiento a rumbo.



Figura 31. Falla con desplazamiento a rumbo en los alrededores del cerro La Pedregosa.

5.3.3.3 Lineamientos

Se observaron lineamientos mediante imágenes satelitales, principalmente en la parte central este del área, al N-NE del cerro Las Pintas y al W-NW del rancho Baltasar; estos lineamientos se encuentran afectando específicamente a las rocas graníticas y riolíticas que afloran en el área, presentando una tendencia que concuerda con los rumbos de las estructuras, s con dirección NE-SW y E-W, de igual manera las fallas, pero estas a comparación de los lineamientos, si presentan evidencias de campo. De igual manera que el fallamiento a rumbo, estas estructuras

5.3.3.4 Fosas

En el área de estudio se tiene una fosa muy importante delimitada por fallas normales de un contexto extensivo del Mioceno, la cual lleva el nombre de Fosa La Mesa (Ramírez-López et al., 2012). Dicha fosa comprende un graben estructural entre dos horst, los cuales corresponderían a la sierra Las Mesteñas del lado oriente y sierra Los Ajos del lado poniente, siendo estos aportadores de sedimentos que han rellenado esta cuenca desde el inicio de su formación (Figura 33).



Figura 33. Fotografía panorámica de la Fosa La Mesa viendo al SW, tomada desde lo alto del rancho La Mesa.

5.4 Tectónica e historia geológica

La historia geológica y tectónica de la sierra Las Mesteñas y del noreste de Sonora, no es muy clara hoy en día debido a la compleja geología y hiatus cronológicos ocurridos a través del tiempo que entorpecen más al entendimiento de geología de la región y el área en estudio; sin embargo, con este trabajo desarrollado y con los anteriores aportes de investigadores nacionales y extranjeros, se expone la siguiente historia geológica que tentativamente explica la evolución y la tectónica del área en estudio.

5.4.1 Precámbrico

El Precámbrico en el noreste del estado de Sonora, incluyendo a la sierra Las Mesteñas, comprende unas de las regiones más antiguas de México geológicamente hablando, el cual se desarrolla dentro del cratón Norteamérica de acuerdo a la clasificación de terrenos tectonoestratigráficos que presenta Campa y Coney (1983) (Figura 34), y que así mismo, la zona de estudio se anexa al cratón de Norteamérica muy cerca de su borde suroeste geográficamente hablando (Noguez-Alcántara, 2008).

Si se habla del Precámbrico, se tiene que hablar del basamento, el cual está representado por las rocas cristalinas del Esquisto Pinal, y el Granito Mesteñas, o bien Granito Cananea para el área de Cananea. El Esquisto Pinal que fue definido Ransome (1904) en Bisbee, sin embargo, ha sido recapitulado, estudiado y analizado por varios investigadores, los cuales han aportado nuevos conocimientos, como Anderson (1989), quien refiere a las zonas donde aflora el Esquisto Pinal como el Terreno Pinal (Figura 35).

Se tienen varias propuestas que han sugerido para la génesis del protolito, y de la formación de estas rocas metamórficas, tal y como menciona Condie et al. (1985) quienes sugieren que las rocas que dieron origen a este esquisto se depositaron en un rift continental, o en una grieta continental que se desarrolló en

un margen pasivo (Keep, 1996), o en una cuenca trasarco o intra-arco (Copeland y Condie, 1986; Anderson, 1989).

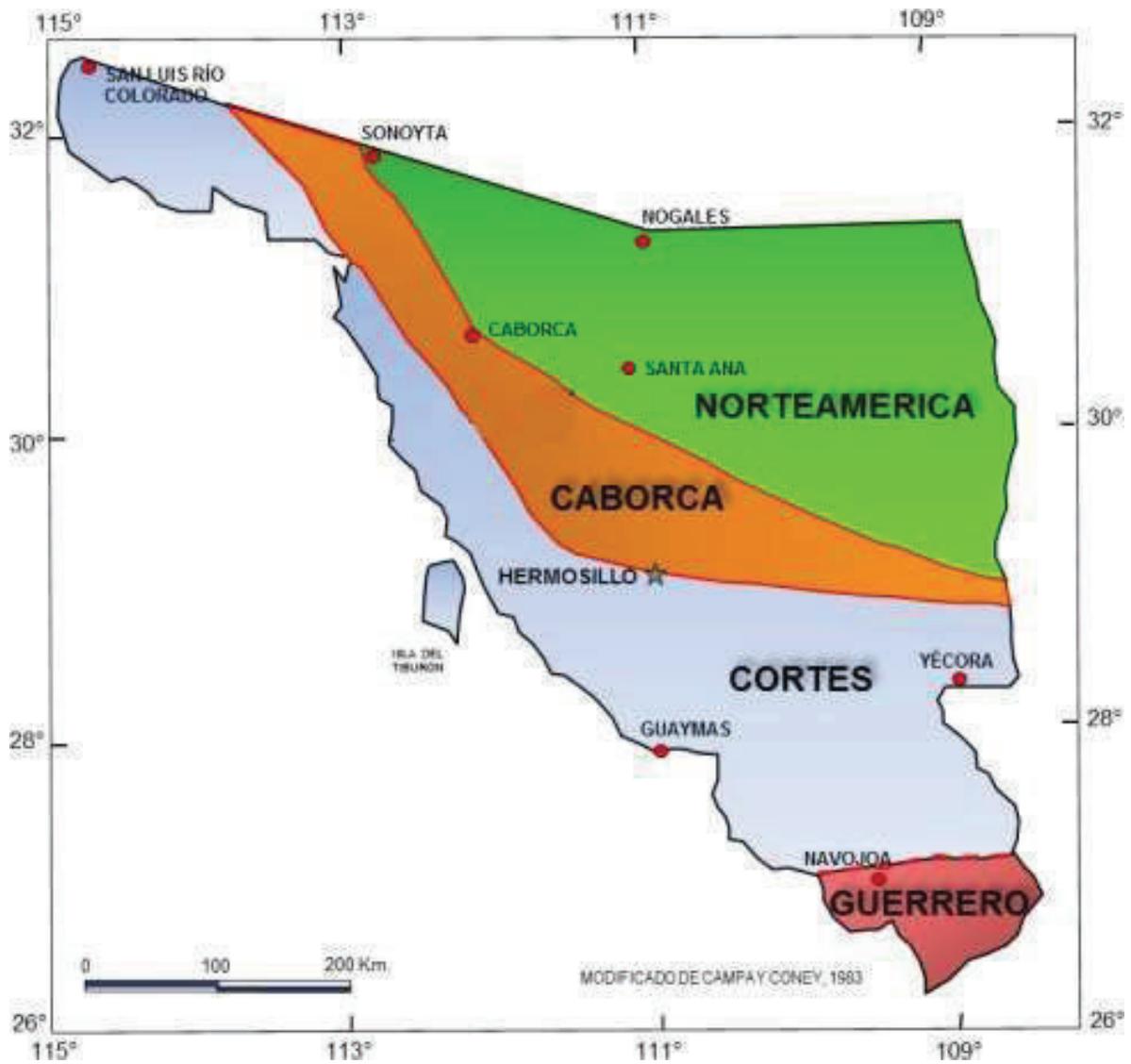


Figura 34. Distribución esquemática de los terrenos tectonoestratigráficos en Sonora. Modificado de Campa y Coney (1983).

Meijer (2012) realizó un nuevo análisis geológico, geoquímico, geocronológico, y de datos estructurales para el Terreno Pinal, donde propuso un modelo que indicaría que dicho terreno pertenecía a un complejo de ante-arco – subducción y que fue sometido a las interacciones de una dorsal oceánica en el Paleoproterozoico.

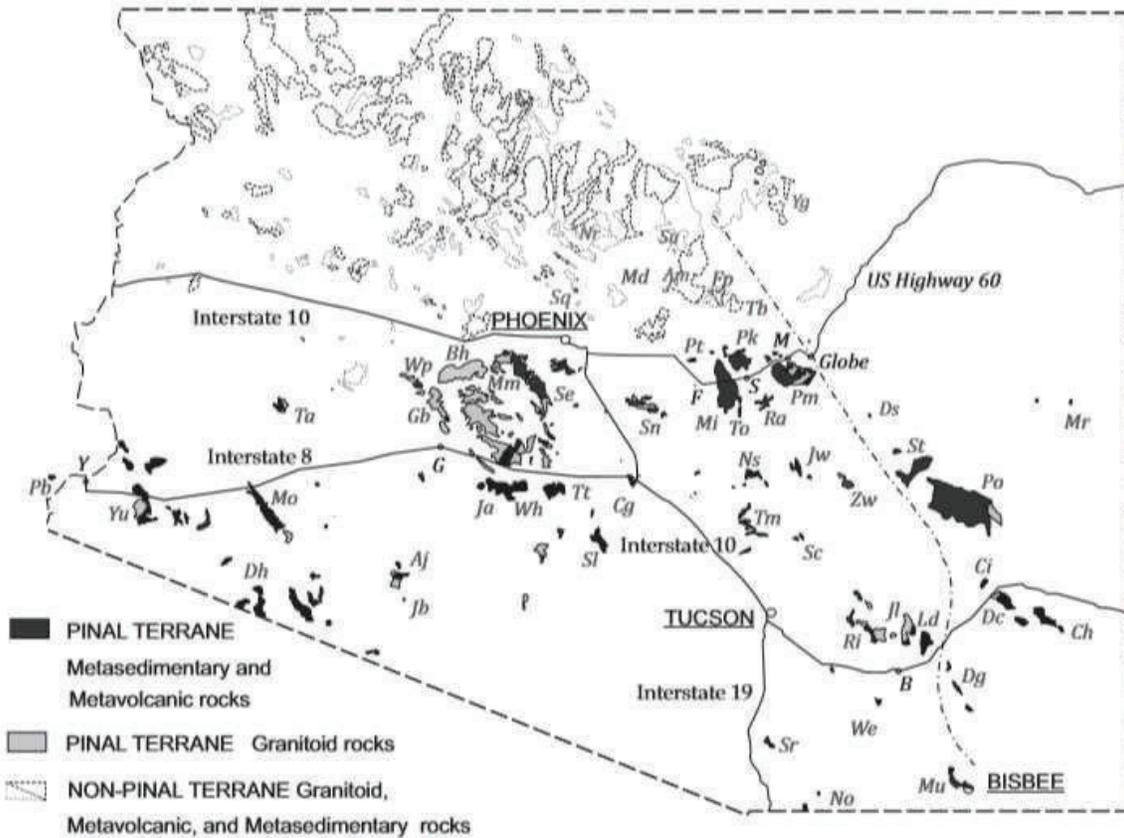


Figura 35. Mapa tomado de Meijer (2014) donde muestra las rocas del Paleoproterozoico incluyendo el Terreno Pinal (color negro) que se encuentran expuestas en Arizona y se prolongan hacia México.

Nuevamente Meijer (2014) menciona que la interacción de la dorsal-trinchera en el sistema de subducción no fue uniforme creando variaciones en el metamorfismo que se encuentran dentro del Terreno Pinal (Figura 36), dando como resultado un metamorfismo de grado medio en la parte central de este terreno, y un metamorfismo de una grado medio-alto para las partes extremas de esta área, las cuales comprenden hacia al norte en los alrededores de Phoenix y hacia el sur en México, en el noreste de Sonora. Lo anterior concuerda con lo descrito para la

definición que dio Ransome (1904) para la localidad tipo del Esquisto Pinal y lo identificado en el terreno en este trabajo realizado.

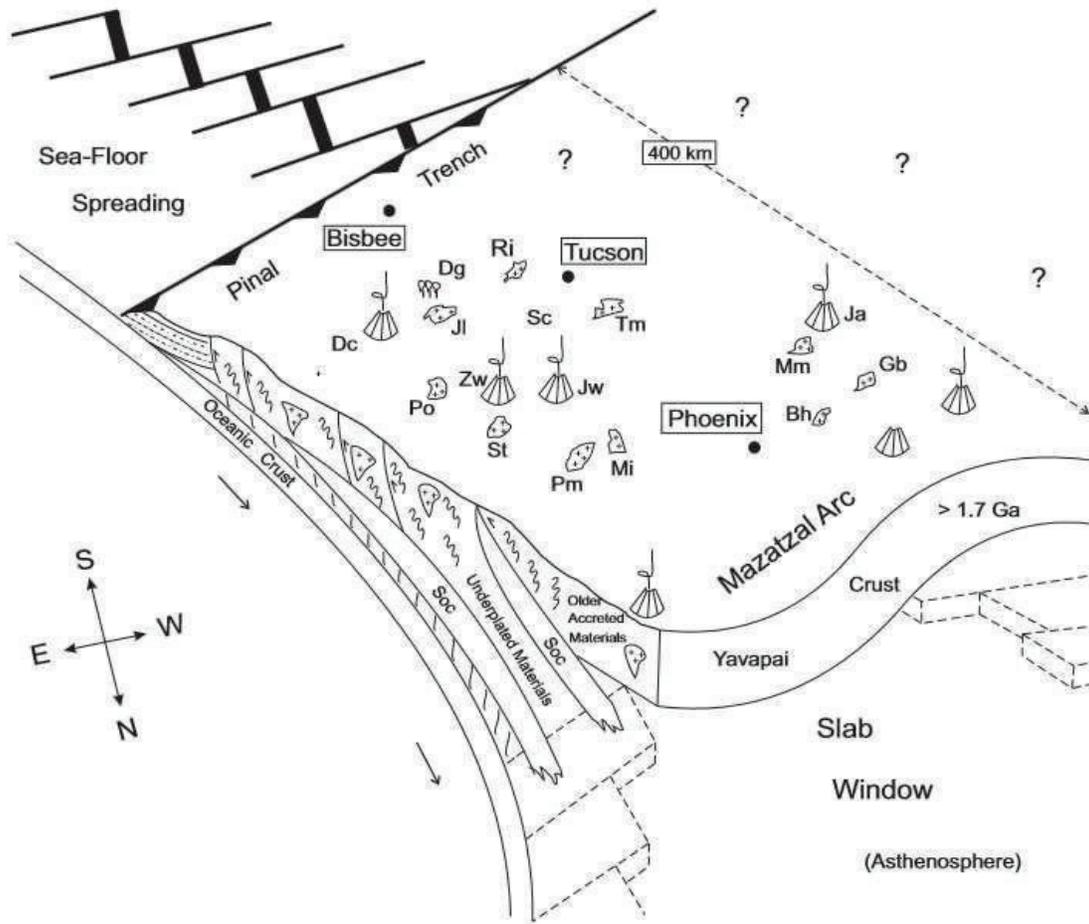


Figura 36. Modelo conceptual tomado de Meijer (2014) donde muestra la subducción que dio origen al Terreno Pinal y su interacción dorsal-trincheras.

El primero describe a estas rocas como un esquisto de cuarzo y sericita de color verde, con abundante moscovita, lo que indicaría un típico y común esquisto verde dentro de la facies de esquistos verdes que revelan un metamorfismo de grado medio, tal y como concuerda con la ubicación de las Montañas Pinal, que se encuentran en la parte central del Terreno Pinal propuesto por Anderson (1989), y que según Meijer (2014) esa área comprende una zona de metamorfismo de grado medio. En cuanto a lo observado en este trabajo se identificó al Esquisto Pinal como

una roca esquistosa de cuarzo y sericita con moscovita, pero además abundantes cristales de estaurolita que se identifican fácilmente, adicionalmente se reconoció una zona donde los esquistos evolucionaron a gneis con claros bandeamientos de cuarzo bien identificables. En conjunto los esquistos con presencia de estaurolita y el haber encontrado afloramientos de gneis dentro del área de estudio, pone en evidencia, además de rectificar y de afirmar lo que proponía Meijer para su modelo donde ubicaba a la parte sur-sureste del Terreno Pinal, o sea en Sonora, México, como una zona de metamorfismo que va de grado medio a alto.

Después del evento de formación del Esquisto Pinal en el Paleoproterozoico hace aproximadamente 1650 Ma., el mismo Meijer (2014) plantea la presencia de intrusiones durante la fase tardía de este evento de subducción esto en el Mesoproterozoico, lo cual se podría afirmar para la sierra Las Mesteñas y el noreste de Sonora con la exposición del Granito Mesteñas y el Granito Cananea que ambos son correlacionables en edad y génesis (Anderson y Silver, 1979).

Durante los siguientes 400 Ma. la región permaneció quiescente permitiendo que los procesos erosivos degradaran el relieve montañoso y dejaran una superficie más uniforme, y así mismo a finales del Neoproterozoico hace unos 800 Ma. el mar comenzó a invadir el territorio peneplanizado depositando sedimentos que al consolidarse formaron las primeras rocas sedimentarias de la región (González-León, 2013).

5.4.2 Paleozoico

Desde finales del Precámbrico y durante los inicios del Paleozoico se tuvo una estabilidad tectónica, donde el mar comenzó a invadir el territorio previamente peneplanizado y favoreció a el deposito, principalmente en un contexto de mares someros y tropicales que prevalecieron hasta finales del Cámbrico, donde se depositó un potente espesor de sedimentos (González-León, 2013). La evidencia mediante la representación de la Cuarcita Bolsa, que con base en sus características litológicas y texturales sugieren una génesis a partir de sedimentos ricos en cuarzo y feldespatos que provenían de altos tipográficos erosionados, los cuales corresponderían al Esquisto Pinal, Granito Mesteñas y otros granitos correlacionables que afloran en la región, así como las vetas de cuarzo del Precámbrico emplazadas en las rocas metamórficas.

A principios de esta era los mares albergaron formas evolucionadas de vida que se habían desarrollado de los primeros organismos que habitaban la Tierra durante el Precámbrico; tales organismos evolucionados corresponden a trilobites, braquiópodos, bivalvos y arqueociátidos. Así mismo, durante el Ordovícico y hasta mediados del Pérmico, los mares continuaron invadiendo intermitentemente a la región, ya sea obedeciendo a fluctuaciones globales del nivel marino o a procesos tectónicos; las rocas y fósiles que registran los fenómenos bióticos y geológicos de esos tiempos están ahora expuestos en diversas zonas (González-León, 2013).

Para el Paleozoico medio se tiene evidencias de una orogenia que afecta la región ya que se puede evidenciar por discordancias angulares entre la Formación Caliza Abrigo del Cámbrico superior, y las rocas de la Formación Caliza Martin del Devónico medio, la cual corresponde a la Orogenia Antlerana (Fries, 1962).

Por otra parte, se puede inferir los efectos de una nueva orogenia a finales del Paleozoico, la cual corresponde a la Orogenia Sonorana (Fries, 1962) y que se interpreta como una discordancia de las unidades paleozoicas y las mesozoicas, tales unidades corresponden a la Formación Caliza Naco del Pensilvánico y las rocas del Cretácico Inferior.

5.4.3 Mesozoico

A comienzos del Mesozoico, a partir del Triásico el régimen tectónico de la margen oeste de Norteamérica cambió de pasivo a activo al presentarse un proceso de convergencia de placas litosféricas. De esta forma, la Cordillera Norteamérica se desarrolló por acreción de terrenos, magmatismo y deformación compresiva dirigida hacia el interior del continente, produciéndose durante el Mesozoico las deformaciones Nevadiana, Sevier y Larámide (Guzmán-Espinoza y otros, 2012).

Cabe destacar que las orogenias Nevadiana y Sevier no presentan manifestación o evidencia en esta parte del estado de Sonora sobre el Bloque Norte América, ni tampoco de formación de rocas, ya que durante el Triásico y principios del Jurásico prevaleció una invasión marina, y además en el centro del estado de Sonora se desarrollaron grandes deltas en el cual florecieron bosques tropicales cuyos restos dieron origen depósitos de carbón (González-León, 2013). Así mismo, en el Jurásico Medio los mares se retiraron al crearse en el norte del estado un arco magmático que produjo un levantamiento cortical y formación de montañas. Al termino de dicho episodio volcánico empezó una última invasión marina cuyas aguas permanecieron cubriendo al estado hasta principios del Cretácico, dando así la formación de los afloramientos sedimentarios correspondientes para este tiempo en el estado, pero sobre todo el origen del Grupo Bisbee que representa claramente esta etapa de invasión marina en el continente. Por último, los mares se retiraron hace 100 Ma, dejando así al descubierto los cuerpos montañosos que se encontraban sumergidos y que poco a poco fueron atacados por los agentes erosivos que ocasionaron la deposición de material clástico sobre las plataformas recientemente formadas, dando así origen al diferentes unidades distribuidas en el estado de Sonora que corresponden al tiempo geológico del Cretácico Superior, pero que en el noreste del estado dicho producto se llevó a cabo dentro de la cuenca de Cabullona dando génesis al conocido Grupo Cabullona de Taliaferro (1933). Estas rocas fueron formadas por grandes ríos, lagos y deltas tropicales a medida

que descendía el nivel del mar, en las cuales florecían grandes bosques y había abundante fauna de vertebrados (González-León, 2013).

Al mismo tiempo que existían estas condiciones durante el Cretácico Tardío, comenzó una fase de volcanismo generalizado e intenso que se prolongó por 30 millones de años. Las rocas extrusivas de este arco volcánico, así como también las profundas cámaras magmáticas que lo alimentaban se encuentran ahora expuestas como sierras de rocas de origen granítico que forman una gran mayoría de los afloramientos rocosos del estado (González-León, 2013).

Este vulcanismo es contemporáneo a la Orogenia Larámide (Damon et al., 1981) que se presenta deformando a los sedimentos de las rocas de los grupos Bisbee y Cabullona, desarrollándose plegamientos amplios y microplegamientos, que si bien esta deformación no pudo ser evidente dentro de la sierra Las Mesteñas, si se manifiesta en la región en la cercanía de algunas sierras aledañas como la sierra La Negrita que se encuentra algunos kilómetros al noreste. Esto se dio por un cambio en la cinemática de las placas Farallón y Norteamérica, principalmente en dirección convergente y con un incremento en la velocidad de la misma. Estos cambios dieron como resultado el inicio de los procesos de subducción en la porción occidental y noroeste del país (Ramírez-López et al., 2012).

5.4.4 Cenozoico

A inicios del Cenozoico continuó el arco Laramide por algunos millones de años más, y fue seguido por un nuevo arco magmático continental en el Eoceno, el cual es acompañado por cúpulas graníticas de menor magnitud que originan apófisis y troncos de diferentes composiciones que afectaron a las rocas anteriores (Ramírez-López et al., 2012). De igual manera en el Oligoceno ocurrió un evento de vulcanismo que tuvo como resultado la formación de la Sierra Madre Occidental la cual a partir de entonces, es que inicia a configurar la actual morfología de Sonora que después fue afectada y terminada de amoldar con los eventos distensivos del Mioceno. Tales argumentos se pueden evidenciar con la ocurrencia de algunos

cuerpos porfídicos no muy grandes que en estudios anteriores los asocian a esta edad y evento. Así mismo durante el terciario, las rocas mesozoicas y las estructuras laramídicas de Sonora, fueron cubiertas por varios eventos de vulcanismo, los cuales han sido ampliamente estudiados por Roldan-Quintana y Solano-Rico (1978).

A finales del Oligoceno y a principios del Mioceno, la tectónica del noroeste de México cambia de un régimen compresivo a extensivo, conocidos como Orogenia Laramide el primero, y el segundo como *Basin and Range*, donde de acuerdo a Nourse (1989), las estructuras Core Complex en el norte de Sonora, representan la primera deformación extensional documentada que representa deformación dúctil y fueron expuestas en superficie. El proceso del *Basin and Range* corresponde a un evento tectónico distensivo que produjo sistemas de fallamiento normal de alto ángulo con dirección NW-SE y N-S, que dio lugar a los rasgos morfoestructurales más típicos de la región que corresponden a sierra alargadas separadas por depresiones o fosas rellenas de materiales clásticos continentales.

En esta etapa que caracteriza a gran parte de Sonora, es común encontrar la presencia de bloques inclinados hacia el oriente o hacia el poniente, los cuales se encuentran limitados por grandes fallas con las direcciones ante mencionadas.

Este evento tectónico del *Basin and Range* no está fuera de contexto en el área de estudio, donde claramente la sierra Las Mestañas se encuentra delimitada por grandes estructuras normales con dirección NW-SE en ambos flancos de la misma. Del lado poniente dado la intervención de una de esas estructuras normales se encuentra expuesto el basamento cristalino en las partes altas no afectadas, y en la parte baja de se encuentra una amplia depresión que lleva por nombre Fosa La Mesa que ha sido rellena por aportes sedimentarios recientes. Mientras que del lado oriente, se encuentran las secuencias paleozoicas basculadas hacia una gran planicie donde se encuentra La Mesa Los Gatos. Dicho basculamiento de las rocas paleozoicas se debe a la presencia de una estructura de origen extensivo que tiene una dirección igual a la de la gran mayoría que obedecen una tendencia NW-SE.

Durante el Mioceno tardío, la tectónica del noroeste de México vuelve a cambiar de un régimen extensivo a uno transtensional, con el cual tuvo como resultado lo que se le llama como la Apertura del Golfo de California y que continua actualmente con la separación de la Península de Baja California del continente (González-León, 2013). Asociado a esto en gran parte del estado se tiene registrado magmatismo, así como estructuras que tienen relación directa con este contexto transtensional; que si bien en el área se tienen estructuras que muy posiblemente estén relacionadas con este evento o bien pudiera estar involucradas dentro de la última etapa extensiva del Mioceno medio mediante fallas de transferencia que cortan perpendicularmente a los cuerpos alargados previamente afectados por esta extensión según lo mencionan Ramírez-López et al. (2012). Dichas fallas pueden tener una relación más directa con el evento transtensivo de la apertura del Golfo de California, ya que en el área de la sierra Las Mestefñas al parecer también se encuentran afectando sedimentos no consolidados poco recientes por unos rumbos de falla NE-SW y E-W que presentan estas fallas a rumbo.

Por último, en la región la actividad neotectónica, que, si bien no se tienen precisamente en el área, si se presenta a algunos kilómetros al este representada por una sismicidad activa a lo largo de la Falla Pitaycachi, y como ejemplo se tiene el más reciente sismo destructivo provocado por esta falla en 1887 (González-León, 2013). Se cree que muy posiblemente el origen y la actividad de esta falla este dada por la distensión asociada a la formación del Rift del Rio Grande (García-Cortes et al, 2001).

5.5 Yacimientos minerales

La sierra Las Mestañas presenta buenas condiciones geológicas y mineras para el desarrollo y emplazamiento de mineralización de acuerdo con lo observado en los presentes trabajos de campo, y lo reportado por otros estudios en el área, específicamente los realizados por el Servicio Geológico Mexicano. Se tienen rocas en el área desde el Precámbrico hasta el reciente, las cuales en su gran mayoría presentan las condiciones favorables en cierta medida para encajonar o bien portar mineralización. En cuanto a la génesis de los yacimientos minerales, abarcan casi todos los periodos tectónicos que se tiene registro en el área, donde la subducción Laramide fue la más productiva regionalmente hablando, y se cree que muy posiblemente sea la que mayor aporte de mineralización tenga en el área de estudio.

Desde el Precámbrico hasta el reciente se irán describiendo las diferentes manifestaciones mineralógicas y prospectos que se encontraron en el área o bien que han sido reportadas.

En las rocas precámbricas se tienen evidencias de posibles manifestaciones mineralógicas en ambas unidades. Primeramente, en las rocas del Esquisto Pinal se observó el emplazamiento de vetas de cuarzo, turmalina y óxidos que muy probablemente estén relacionados a procesos magmáticos de una intrusión de edad mesoproterozoica del Granito Mestañas (Figura 36). A simple vista no se tienen evidencias de posible mineralización, pero Ramírez-López et al. (2012) hicieron geoquímica en una de las vetas cerca del Rebarito, la cual llamaron prospecto La Niña, arrojando valores Cu, Pb y Zn, resultando valores poco interesantes. La

actitud de esa veta está dada por un rumbo 73°NE-SW y un echado de 78 al NW con unos 10 metros de espesor y que se prolonga a profundidad.



Figura 36. Fotografía mirando al NE donde se observa veta de cuarzo, turmalina y óxidos.

El Esquisto Pinal puede presentar posibilidades de contener tierras raras, que si bien sabemos en los últimos años son potencialmente económicas. Esto se puede inferir de acuerdo a la génesis de los protolitos que componen a estas rocas metamórficas, destacando aportes de magmas basálticos que fueron diferenciados a magmas riolíticos (Meijer, 2014), los cuales se sabe que son los que presentan históricamente la mayor presencia de tierras raras, pesadas y ligeras. Para

comprobar esto, se sugiere realizar análisis geoquímicos en diferentes zonas o regiones donde aflora el Esquisto Pinal y así obtener una relación de posible presencia de estos elementos.

Para la unidad del Granito Mesteñas, Ramírez-López et al. (2012) reconocieron por lo menos 3 pequeños prospectos emplazados en estas rocas al oeste del Rancho Baltasar, los cuales corresponden a vetas de origen hidrotermal con algunos valores principalmente de Pb, Ag y Au. Todos los prospectos presentan actitudes en sus vetas que van con un rumbo NE-SW y echado al NW con unos cuantos metros de espesor. Los nombres de los prospectos corresponden a San Andrés, San Ricardo y San Ricardo 2.



Figura 37. Veta de cuarzo y óxidos emplazada en el Granito Mesteñas.

Así mismo se encontró una veta delgada en el arroyo La Cieneguita al NE del cerro Las Pintas, la cual corresponde a una veta de cuarzo con óxidos y un pequeño halo de alteración potásica, dicha estructura tiene una dirección NE-SW casi N-S. (Figura 37).

El paleozoico es la era que menos potencial mineralización presenta, muy probablemente a la estabilidad tectónica que prevalecía en ese tiempo, pero eventualmente pudieran representar mineralizaciones tipo skarn o mármol, debido a que son afectadas por intrusiones cenozoicas. En cuanto a las rocas del Mesozoico se encuentra una manifestación mineral al suroeste del Rancho Baltasar reportada por Ramírez-López y otros (2012), la cual consiste en una veta de cuarzo y óxidos de origen epitermal que se encuentra emplazada en la roca de sedimentos que se le atribuyen al Grupo Cabullona. La veta tiene una longitud de 100 m y 3 metros de espesor con una actitud de 55°NE-SW de rumbo, y un echado de 72° hacia el NW. Se le realizaron muestreos cuales arrojaron valores poco favorables en Cu, Pb, y Zn.

Por último, se tiene un pórfido andesítico en el flanco NE de la sierra Las Mesteñas en la zona que se conoce como las minitas, en el área Guzmán-Espinoza et al. (2012) reportaron el prospecto más favorable o con mejores condiciones económicas que se encuentra en el área. El prospecto lleva por nombre La Maria y consiste en una veta aurífera emplazada en un pórfido andesítico de pequeñas dimensiones, con rumbo NE-SW de 65° y echado al NW de 70°, con una longitud de 30m y 60 cm de espesor. Dicha veta arrojó resultados geoquímicos muy alentadores de hasta 32 g/t de Au y algunos gramos de Ag, lo que sugiere realizar estudios a más detalle para definir el potencial o la posible extensión u ocurrencia de más vetas de este tipo en el área que comprende el pórfido.

6. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL EN EL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio se realizaron dos modelos tridimensionales empleando técnicas fotogramétricas mediante la captura de 926 fotografías con la utilización de un vehículo aéreo no tripulado. El modelo uno tuvo lugar sobre el cerro La Pedregosa correspondiente a las unidades Esquisto Pinal y Cuarcita Bolsa y el modelo dos se llevó a cabo al NE de este cerro sobre la unidad Caliza Abrigo.

Para cada uno de los modelos primeramente se elaboró una nube de puntos de enlace y con ello una nube de puntos densa (Figura 38, 39, 40 y 41).

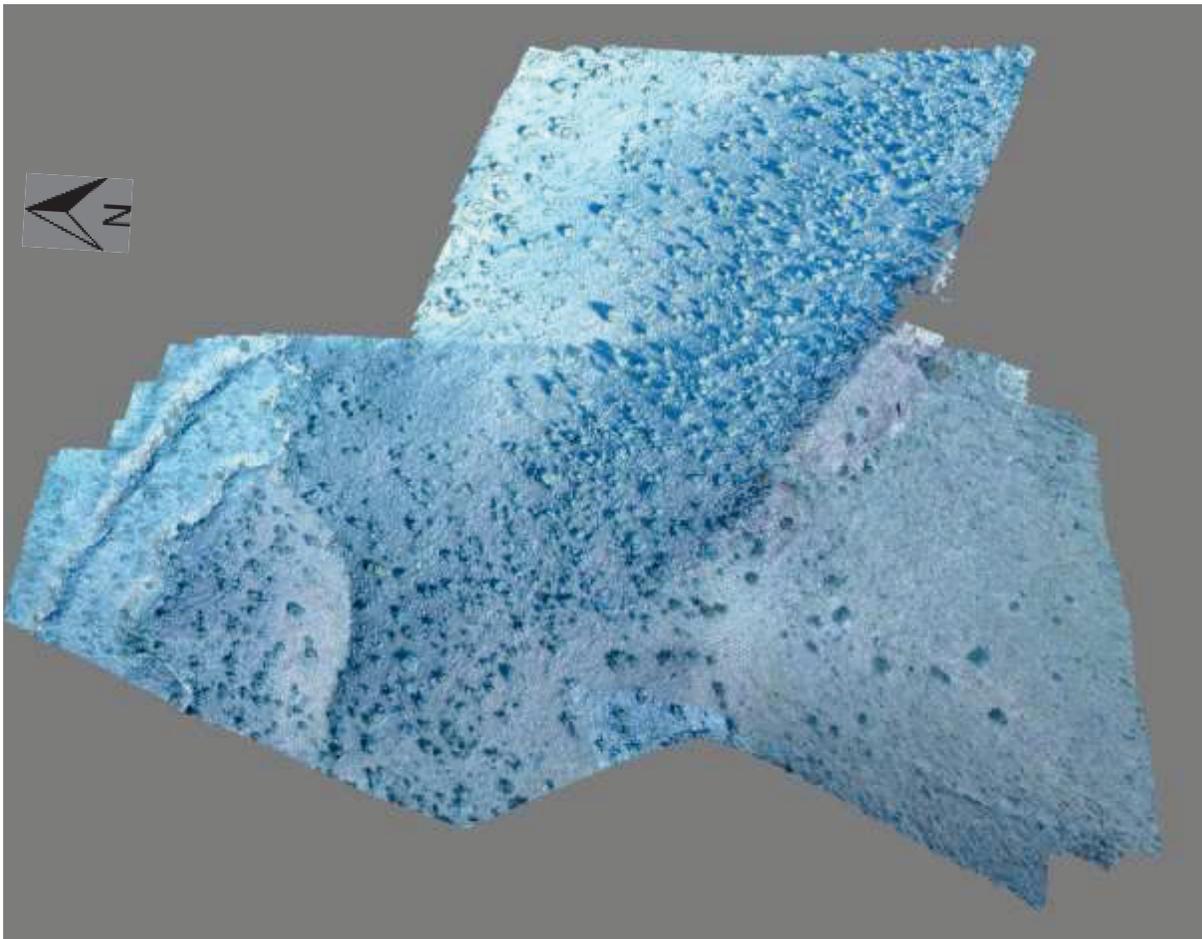


Figura 38. Nube de puntos densa del modelo uno mirando hacia el este.

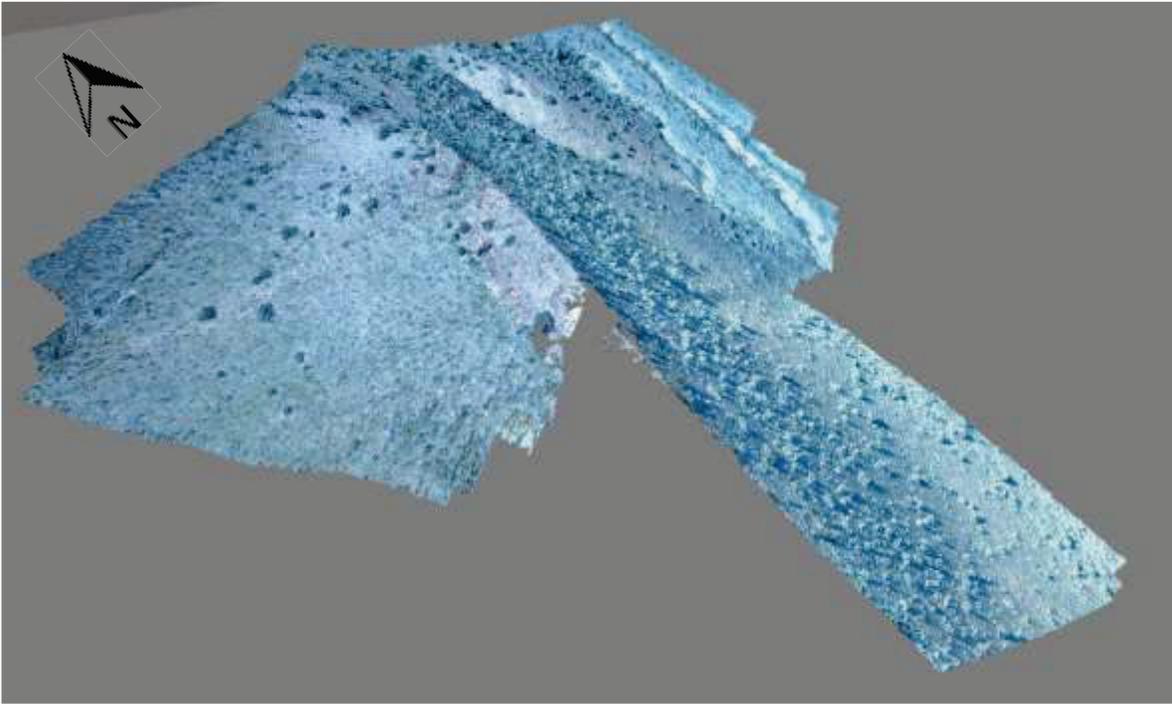


Figura 39. Nube de puntos densa del modelo uno mirando hacia el norte.

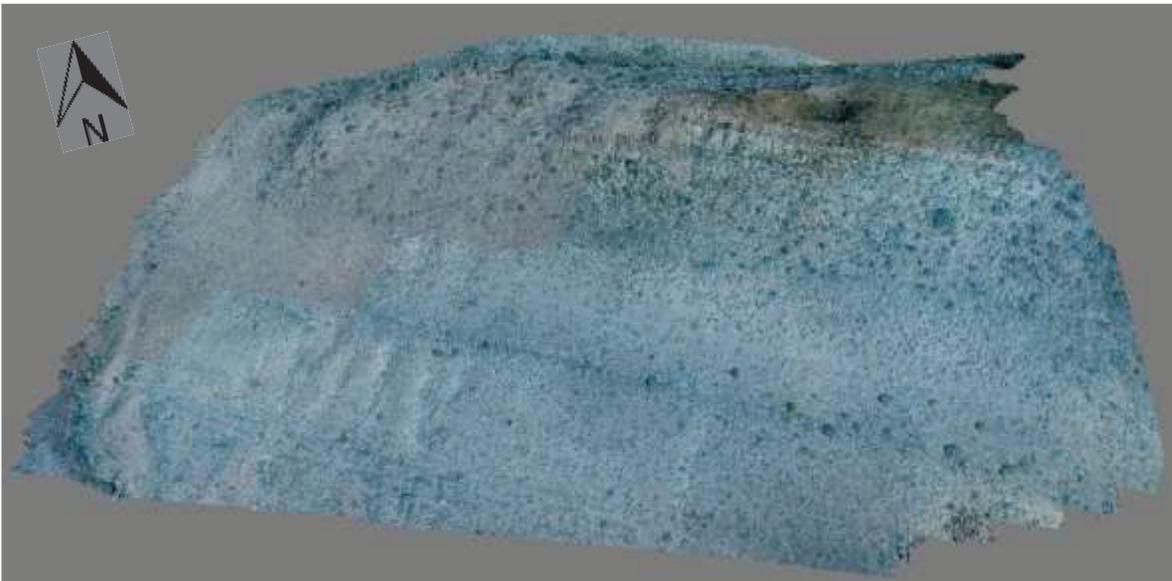


Figura 40. Nube de puntos densa del modelo dos mirando hacia el norte.

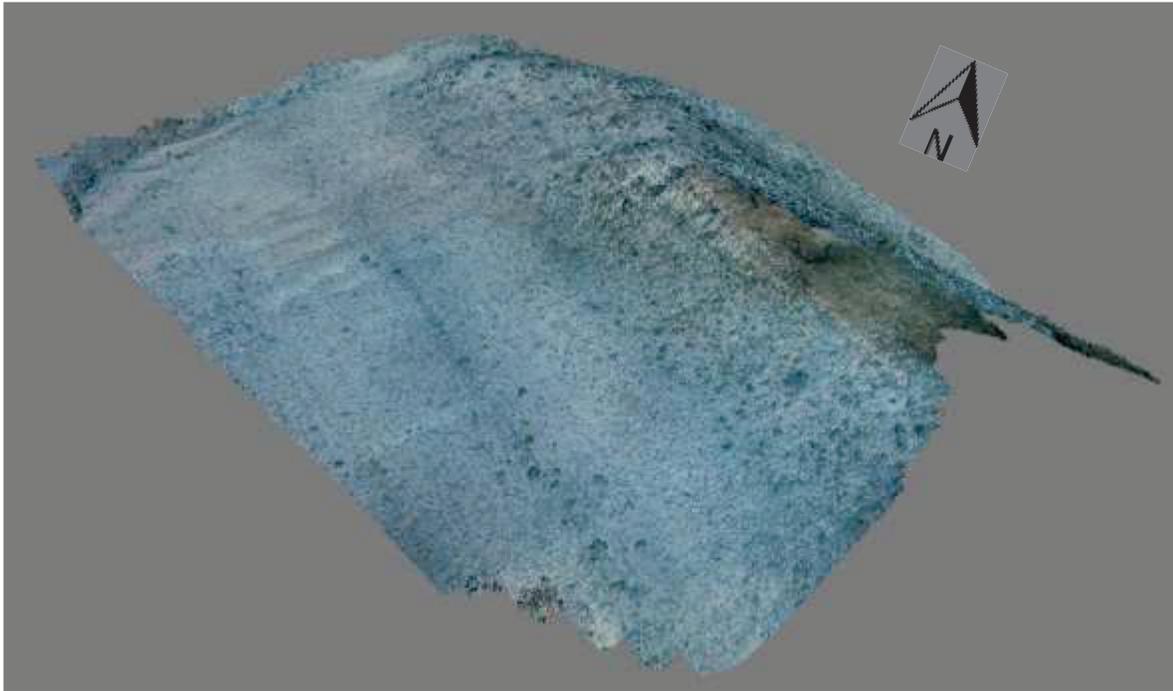


Figura 41. Nube de puntos densa del modelo dos mirando hacia el noroeste.

Para el modelo uno se crearon 330,618 puntos de enlace y una nube densa con 190,042,976 puntos, mientras que para el modelo dos se crearon 144,387 puntos de enlace y una nube densa con 79,787,710 puntos.

Posteriormente se creó un respectivo ortomosaico georreferenciado (Figura 42 y 43), y un Modelo Digital de Elevación (MDE) de igual manera con referencia geográfica (Figura 44 y 45) para ambos modelos.

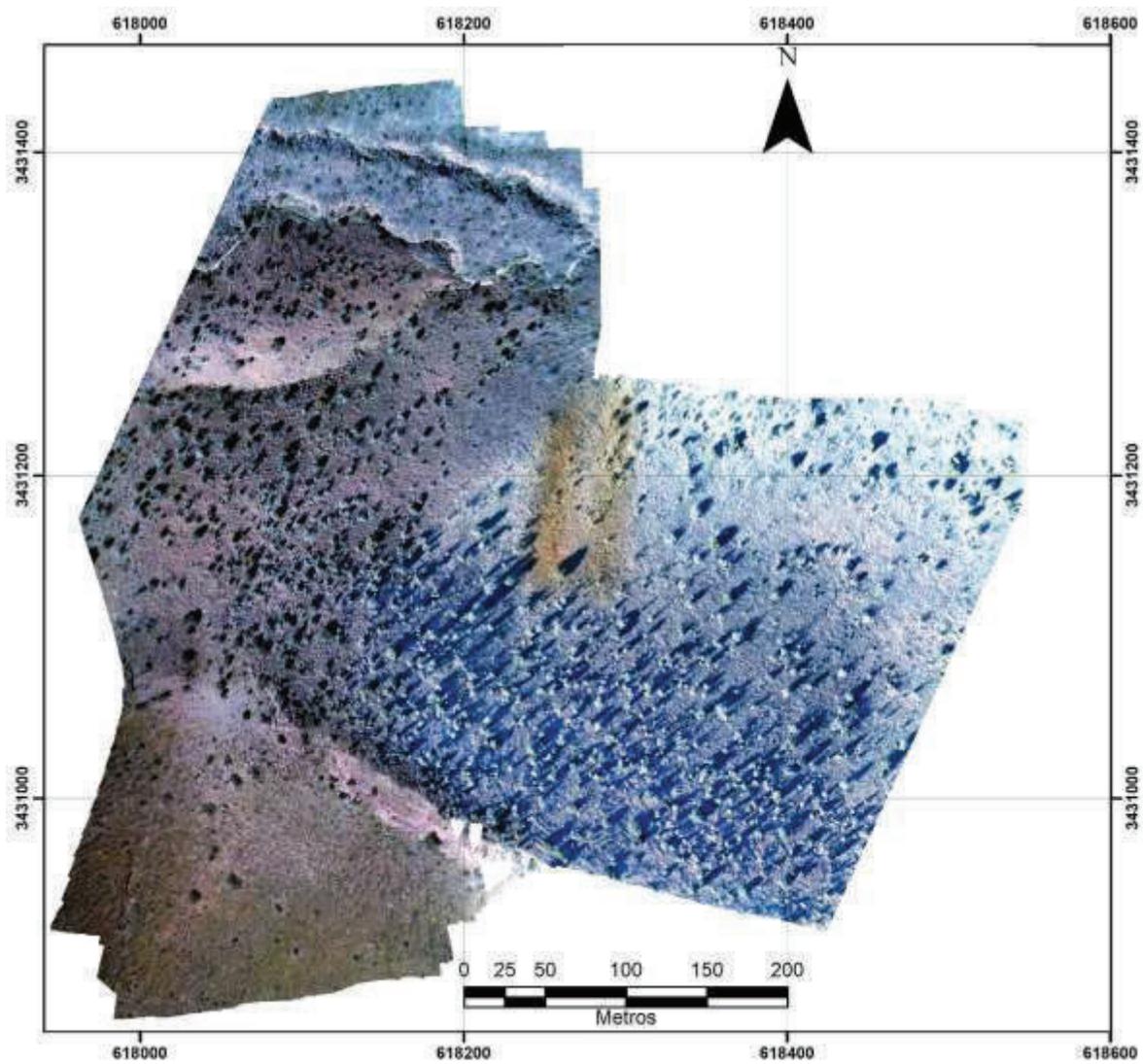


Figura 42. Ortomosaico del modelo uno.

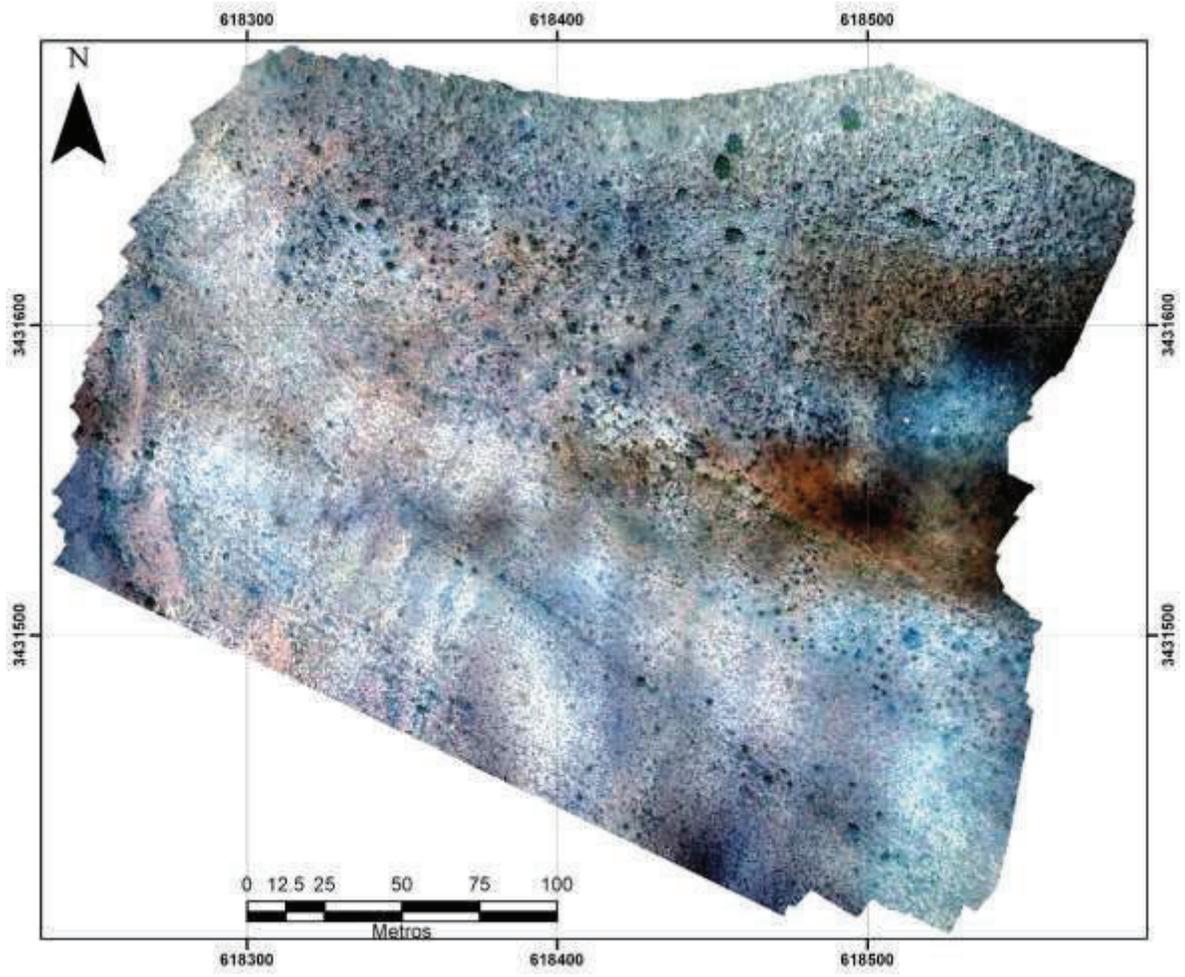


Figura 43. Ortomosaico del modelo dos.

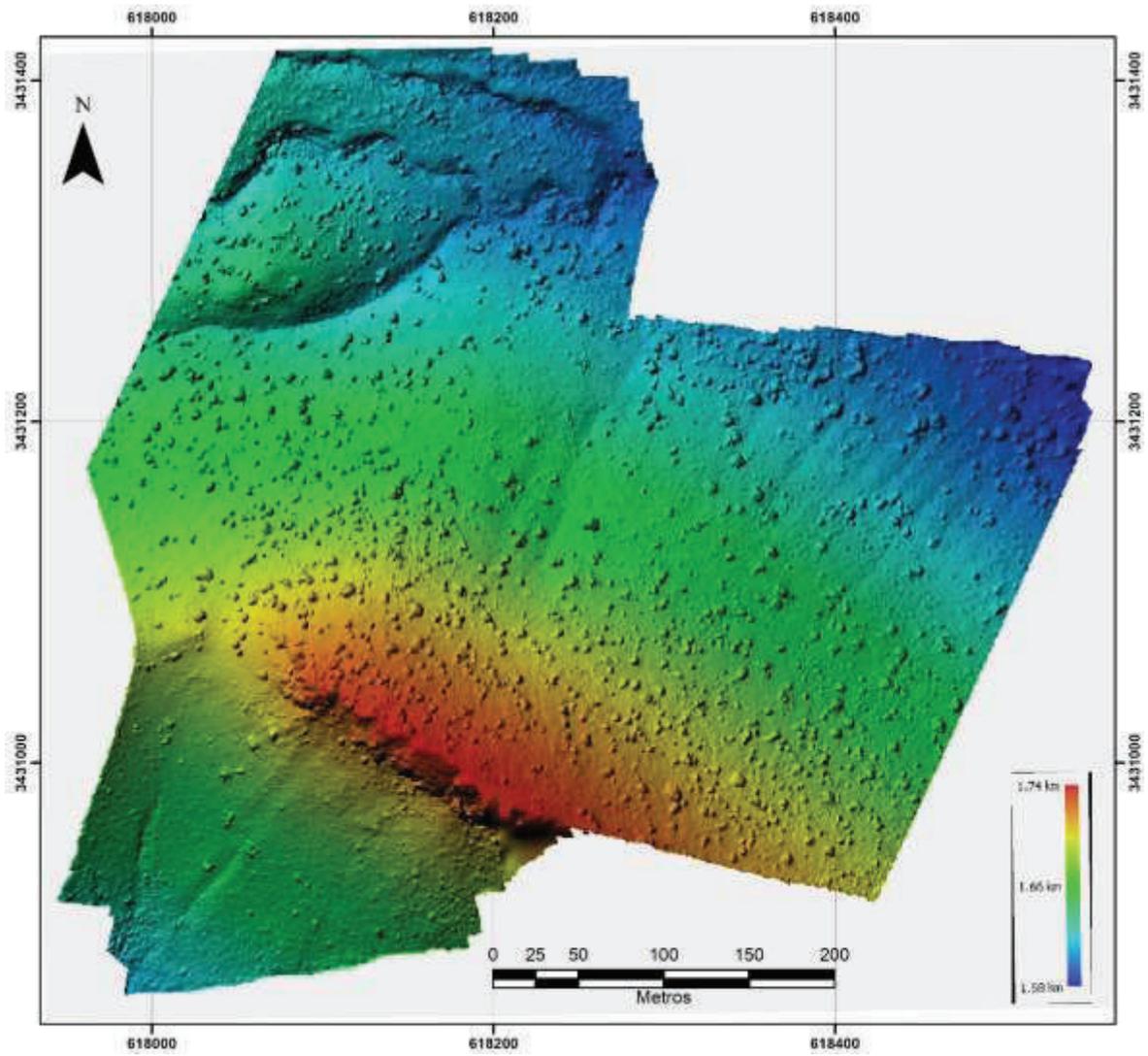


Figura 44. MDE del modelo uno.

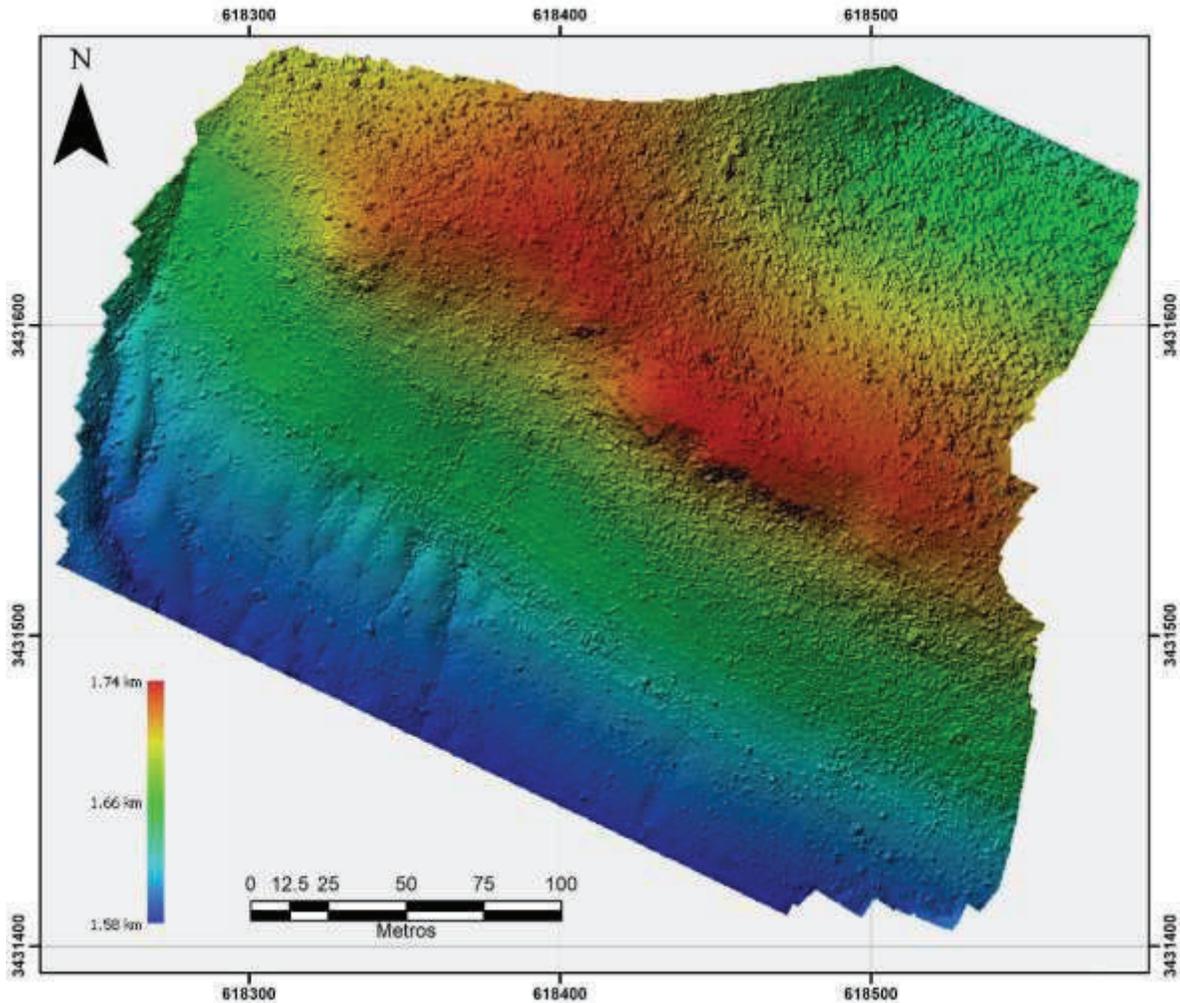


Figura 45. MDE del modelo dos.

Finalmente, mediante los ortomosaicos y los MDE se crearon los modelos tridimensionales (anexo 2 y 3 en disco), los cuales para ambos modelos se presentan en tres ángulos diferentes para cada uno (Figura 46, 47, 48, 49, 50, 51).

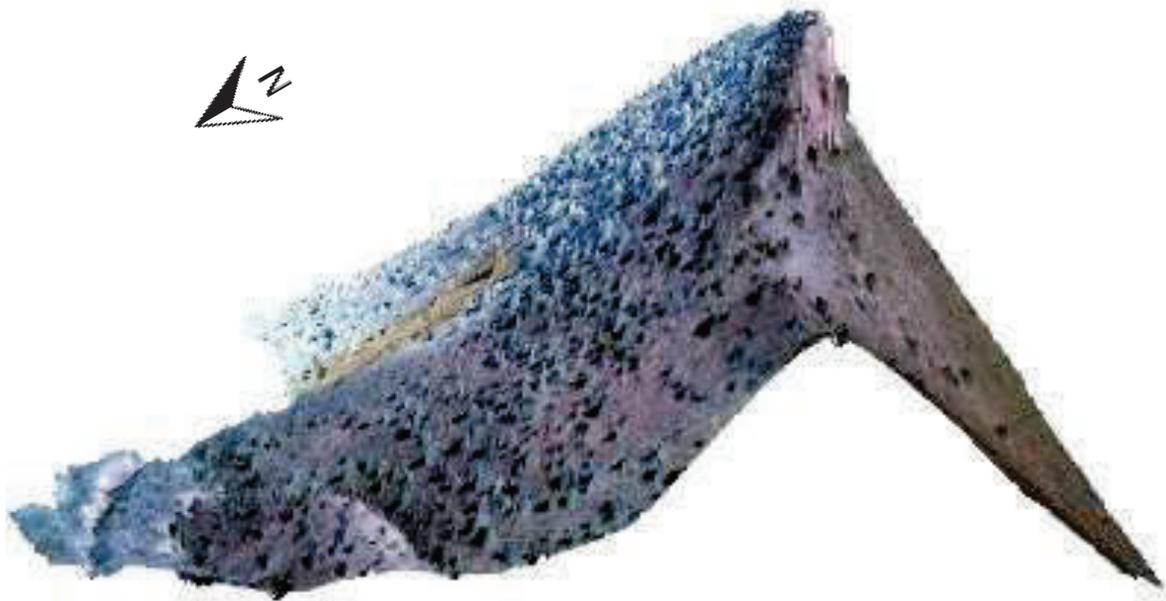


Figura 46. Modelo uno mirando hacia el este.

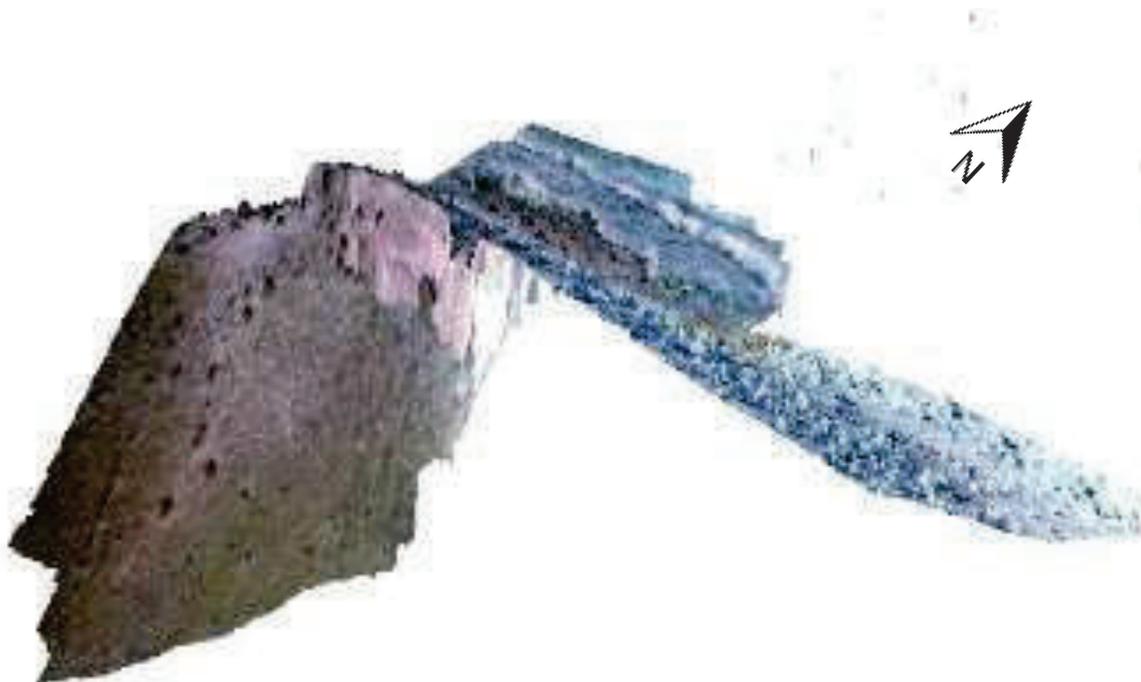


Figura 47. Modelo uno mirando hacia el noroeste.

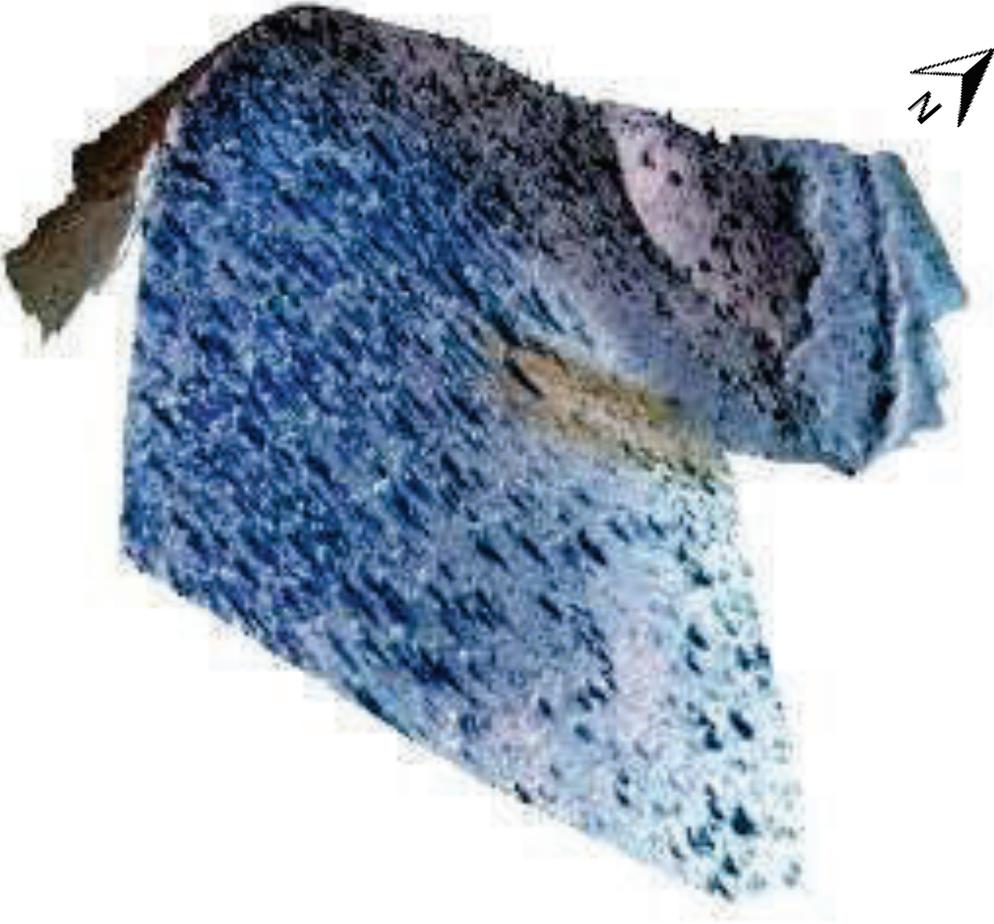


Figura 48. Modelo uno mirando hacia el oeste.



Figura 49. Modelo dos mirando hacia el noreste.



Figura 50. Modelo dos mirando hacia el norte.



Figura 51. Modelo dos mirando hacia el noroeste.

7. RESULTADOS

Como resultados de este trabajo se logró el objetivo principal, el cual consistió en elaborar un mapa geológico de la sierra las mesteñas a escala 1: 25,000 (Anexo 1), en el que se plasmó todos los resultados y datos obtenidos en campo, adicionalmente dada la interpretación del plano geológico realizado para este trabajo se elaboraron dos secciones geológicas que fueron anexadas en el mapa geológico de la sierra Las Mesteñas.

También se generó una columna geológica donde se representan las 14 unidades identificadas en el área que representan geocronológicamente a los eventos que dieron origen en tiempo y forma a cada una (Figura 7).

En cuanto al trabajo fotogramétrico realizado mediante un Vehículo Aéreo no tripulado en el área de estudio, se elaboraron dos modelos tridimensionales, teniendo como resultado final los modelos antes mencionados se pudieron obtener nuevos datos geológicos que ayuden a entender a la geología del área y que de igual manera nos muestran una forma nueva y diferente de obtener datos, información y de interpretar a la ciencia geológica con las mismas facilidades que la tecnología nos va arrojando.

En el modelo uno se logró identificar morfológicamente a las unidades Esquisto Pinal del Paleoproterozoico y la Cuarcita Bolsa, misma que forma grandes escarpes sobre la primera unidad (Figura 52), así como como el cambio de relieve continuo que es interrumpido de manera abrupta, lo cual se propone como una falla a rumbo que a la vez es interpretada en campo (Figura 53).

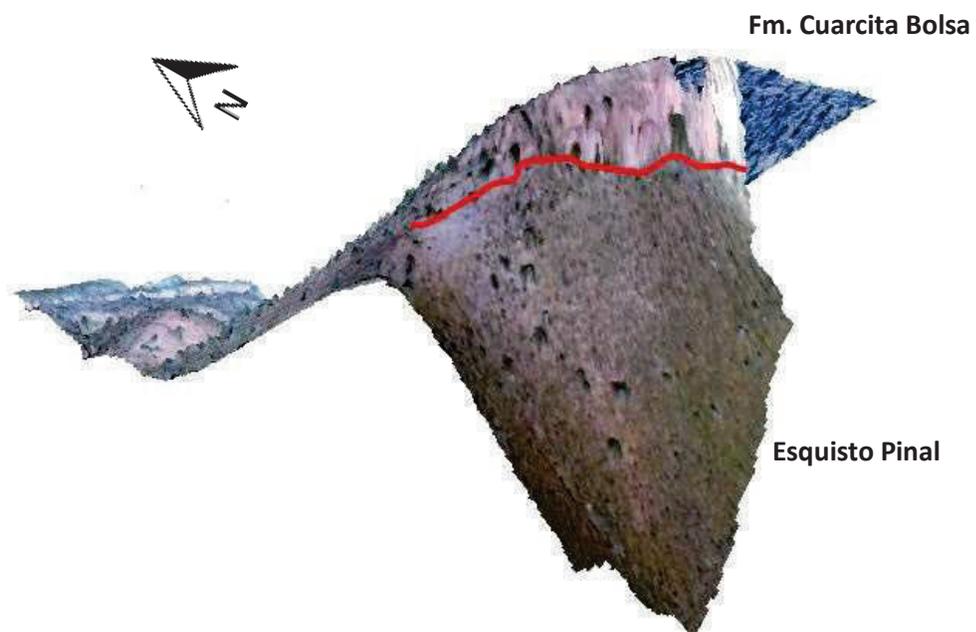


Figura 52. Unidades litológicas identificadas en el modelo uno.

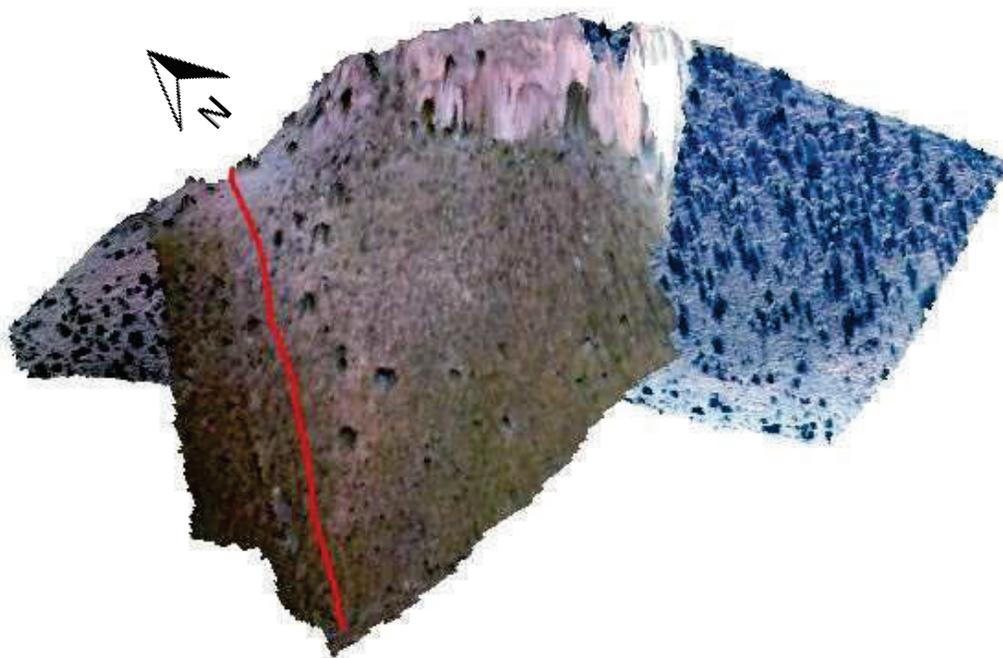


Figura 53. Cambio en la morfología del modelo uno que se interpreta como una falla.

Para el modelo dos correspondiente a la unidad Caliza Abrigo, se logró identificar claramente una estratificación con una dirección NW-SE, con un echado hacia el NE. Se identifica fácilmente que la estratificación aumenta de grosor de la base a la cima, pudiéndose comparar con la sección y la columna estratigráfica propuesta por (Grijalva-Miranda, 2019), donde gran parte de la base de este modelo se aprecia una estratificación delgada y mediana, mientras que, en la cima y parte más alta, se observa una estratificación más gruesa que a la vez forma escarpes de algunos metros de altura (Figura 54 y 55). En comparativa se puede observar el grosor de la estratificación y el buzamiento de los mismos tanto en el modelo como en la sección de Grijalva-Miranda (2019).

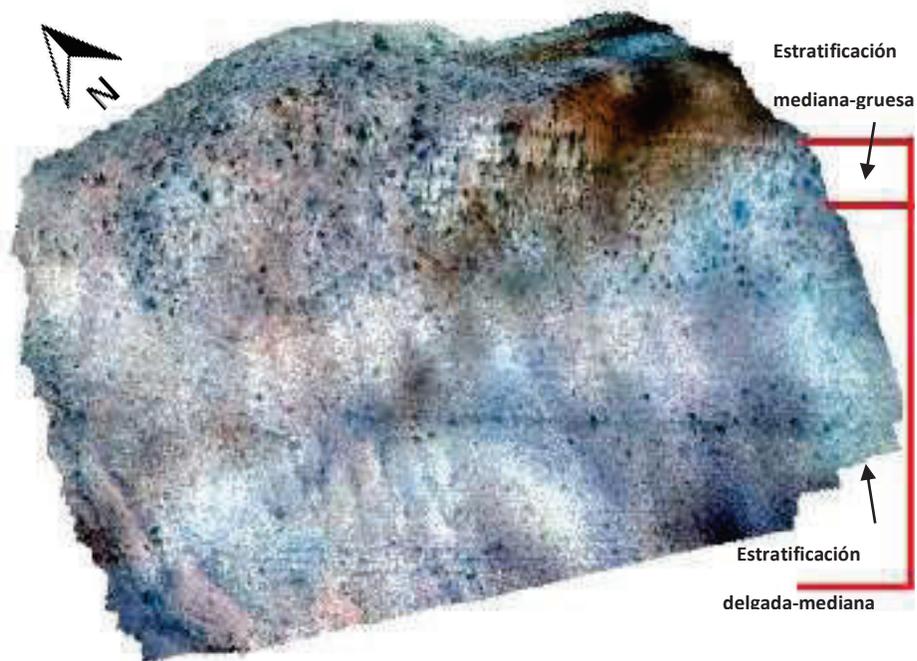


Figura 55. Modelo dos donde se muestra el cambio de los espesores en los estratos.

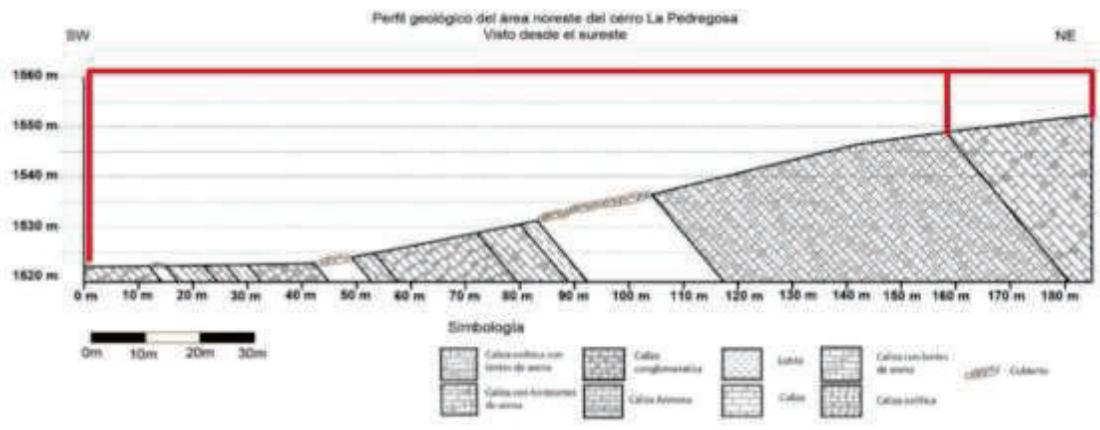


Figura 54. Sección de Grijalva-Miranda (2019).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo aporta nuevos datos geológicos tanto local como regionalmente.

Como efecto final de la realización del mapa geológico de la sierra Las Mesteñas a escala 1:25000, en el cual se mapearon las 14 unidades litológicas encontradas, de las cuales tres de ellas no se habían identificado en el área y que servirá como base para futuros trabajos que se realicen en el área.

Se puede concluir que las rocas metamórficas identificadas en el área, específicamente gneises y esquistos con estauroлита nos indican un metamorfismo regional que va de grado medio a alto y que coincide con el modelo propuesto por Meijer (2014).

Las vetas de cuarzo emplazadas en el Esquisto Pinal corresponderían muy probablemente a los procesos magmáticos producto de la intrusión del Granito Mesteñas en el Mesoproterozoico.

Se reconoce el contacto transicional entre las formaciones Cuarcita Bolsa y Caliza Abrigo, el cual solamente había sido identificado por Ransome en 1904.

Se corrobora que las discordancias regionales también están presentes en la sierra Las Mesteñas entre las unidades del Paleozoico inferior y superior, así como entre las unidades del Paleozoico superior y el Mesozoico.

Se tienen evidencias estructurales primera vez reportadas en el área que indican eventos de transtención mediante fallas de rumbo NE-SW y E-W, así como lineamientos que obedecen esas direcciones de esfuerzos.

La morfología de la sierra está dada por los eventos extensivos del *Basin and Range* y por los eventos transtensivos muy probablemente relacionados con la Apertura del Golfo de California.

La utilización de los vehículos aéreos no tripulados en el área nos ha dejado nuevas técnicas de cómo aprovechar estas herramientas, de cómo utilizarlas y bajo

qué condiciones, así como también nuevos datos mediante los dos modelos obtenidos, los cuales nos indican que la Cuarcita Bolsa forma grandes escarpes sobre las unidades del Paleoproterozoico, dando así esa morfología característica, además se identifica una posible falla que limita el cerro La Pedregosa.

Adicionalmente se obtuvieron e identificaron rasgos estratigráficos correspondientes a la Caliza Abrigo y que se comparan mediante el modelo dos con la sección realizada por Grijalva-Miranda (2019).

Se recomienda realizar estudios a detalle de la estratigrafía del área debido a la escasez de trabajos de este tipo a lo amplio de su territorio de exposición, sobre todo en Sonora.

Así mismo se recomienda el uso de vehículos aéreos no tripulados para este y otros tipos de estudios e investigaciones, ya que permite de buena manera la interpretación de modelos digitales con buena resolución, y además de que pueden ser usados en lugares de difícil acceso o peligrosos para la integridad humana, siendo controlados desde un lugar seguro, esto para enfocarse y lograr diversos objetivos que nos ofrecen información actualizada y precisa.

9. BIBLIOGRAFÍA

ACRE. (2014). Vehículos-aéreos-no-tripulados.pdf. In ACRE (Ed.).

Al-Jarrah, M. A., & Hasan, M. M. (2011). HILS setup of dynamic flight path planning in 3D environment with flexible mission planning using Ground Station. *Journal of the Franklin Institute*, v. 348(1), p. 45-65.

Anderson, P., 1989. Proterozoic plate tectonic evolution of Arizona, in Jenney, J.P., and Reynolds, S.J., eds., *Geological Evolution of Arizona: Arizona Geological Society Digest*, v. 17, p. 17–55.

Anderson, T. H., and Silver, L.T., 1977a. U-Pb Isotope Ages of Granitic Plutons Near Cananea, Sonora. *Economic Geology*, v. 72, p. 827-836.

Anderson, T. H., and Silver, L.T., 1977b. Geochronometric and stratigraphic outlines of the Precambrian rocks of northwestern México: *Geological Society of America Abstracts with programs*, v.9, p. 880.

Anderson, T.H., and Silver, L.T., 1979. The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, in Anderson T.H. y Roldán-Q., J., eds., *Geology of northern Sonora: Annual Meeting of the Geological Society of America, Guidebook-Field Trip No. 27*, p. 59–68.

Anderson, T.H., Silver, L.T., and Salas, G.A., 1980. Distribution and U-Pb isotope ages of some lineated plutons, northwestern México: *Geological Society of America, Memoir 153*, 269-283.

Anderson, T.H., Schmidt, V.A., 1983. A model of the evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time: *Geological Society of America Bulletin*, v. 94(8), p. 941-966.

Berteška, T., & Ruzgienė, B. (2013). Photogrammetric mapping based on UAV imagery. *Geodesy and Cartography*, v. 39(4), p. 158-163.

Campa, M.F., Coney, P.J., 1983. Tectono-stratigraphics terranes and mineral resource distributions in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciencies, 20, 1040–1051.

C.F.E., 1983. Informe Anual de Actividades. Residencia de Estudios Carboníferos de Sonora C.F.E.: Informe Interno.

Cocheme, J. J., 1985, Le magmatisme cézoïque dansle NW du mexique. Cartographie de la región Yecora Maicoba, Mulatos.Illustration magmatique de la fin d´ un régime en subduction type cordillerain et du passage a un régime distensif. Thése d´état. Univ. d´ Aix Marseille III.

Coder, A. O., 2013. Digitalización automática del patrimonio arqueológico a partir de fotogrametria. 4.

Coello-Romero, A., Ballesteros-Abellán, G., 2015. Fotogrametría de UAV de Ala Fija y Comparación con Topografía Clásica. Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid, España.

CONABIO. 2016. Portal de geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAGUA, 2011. Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero 2660 Cuitaca, Estado de Sonora. Organismo de Cuenca Noroeste, Dirección Técnica, p. 32.

Copeland, P., and Condie, K.C., 1986. Geochemistry and tectonic setting of Lower Proterozoic supracrustal rocks of the Pinal Schist, southeastern Arizona: Geological Society of America Bulletin, v. 97, p. 1512–1520.

Cooper, J. y L.T. Silver. 1964. Geology and ore deposits of the Quadrangle Cochise Country, Arizona, U.S. Geol. Surv., Prof. Paper 416, v.1 196 p., 39 figs., Washington, D.C.

Díaz-Cabrera, M. 2011. Análisis Fotogramétrico de Imágenes Adquiridas por un Avión No Tripulado. Tesis de maestría, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.

Fries, C. Jr., 1962. Reseña geológica el Estado de Sonora, con énfasis en el Paleozoico: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros, v. 14, p. 257-273.

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. 2015. Los Drones y sus Aplicaciones a la Ingeniería Civil. Capítulo 5. P. 67 – 75.

García-Cortez, J.A., Morales-Morales, H., Mancillas-Gutiérrez, A. 2001. Carta Geológico-Minera escala 1:250,000 Agua Prieta H12-3, Sonora y Chihuahua. Servicio Geológico Mexicano (SGM).

García, J., & Perez, M. 2009. Utilización de imágenes aéreas digitales de pequeño formato para la evaluación de desastres.

García-Yeomans, A. S. 2017. Uso de vehículos aéreos no tripulados y fotogrametría digital en el estudio de inundación en una zona urbana: caso Arroyo Los Olivos, Hermosillo, Sonora. Departamento de Geología, Universidad de Sonora. Tesis profesional. p. 1-108.

GEOCA, S.A. 1965. Informes de los Estudios Geológicos-Radiométricos realizados para la C.N.E.N., en la Sierra de las Mesteñas, Son., Méx.(inédito).

Gómez-Tagle, A. 1967. *Estudio geológico de la Sierra de las Mesteñas, municipio de Fronteras, Estado de Sonora*. Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional. p. 1-69.

González-León, C. M. 1986. Estratigrafía del paleozoico de la Sierra Del Tule, noreste de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista, v. 6, núm. 2, p. 117-135.

González-León, C. M. 2013. La Geología de Sonora: Una historia de 1800 millones de años. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología.

Grijalva-Miranda, S.M. 2019. Estudio Paleontológico del Proterozoico-Cámbrico del Cerro La Pedregosa, Sierra Las Mestefñas, Sonora, México. Departamento de Geología, Universidad de Sonora. Tesis profesional. p. 1-77.

Gulluly, J. 1956. General Geology of Central Cochise Country Arizona, U.S. Surv., Prof. Paper 281, VI+169 pags., 9 fig., 13 lams., Washington, D.C.

Guzmán-Espinoza, J. B., Fierro-Vázquez, J. R., Jaimes-Deloya, E. R., Morales-Morales, H. 2012. Carta Geológico-Minera y Geoquímica escala 1:50000 Cuauhtémoc H12-B44 Sonora. Servicio Geológico Mexicano.

Huddle, J. W., Dobrovlny, E. 1952. *Devonian and Mississippian Rocks of Central Arizona*. Geological Survey Professional Paper 233-D, p. 67-112.

INEGI. 2000. Fisiografía. Síntesis de información geográfica del estado de Sonora. p.13-16

ISPRS. (s.f.). Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Jauregui, L. (s.f.) Introducción a la Fotogrametría. P. 1 – 3.

Keep, M., 1996, The Pinal Schist, southeast Arizona, USA: Contraction of a Paleoproterozoic rift basin: Journal of the Geological Society of London, v. 153, p. 979–993.

Lara-Peña, R. A. 2017. Bioestratigrafía de conodontos del devónico superior en el área del Cerro Las Pintas, noreste de Sonora, México. Departamento de Geología, Universidad de Sonora. Tesis Profesional. p. 1-90.

Mc Dowell, F. W. 1978. The volcanic section near Yecora, Sonora, and its regional significance. Department of geological sciences, University of Austin Texas.

Meijer, A., 2012. Pinal Schist of southern Arizona: Evidence for spreading ridge–trench interactions in the Paleoproterozoic: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 44, no. 6, p. 8.

Meijer, A. 2014. The Pinal Schist of southern Arizona: A Paleoproterozoic forearc complex with evidence of spreading ridge-trench interaction at ca.1.65 Ga and a Proterozoic arc obduction event. *Geological Society of America Bulletin*. P 1-19.

Noguez-Alcántara, Benito, 2008. Reconstrucción del Modelo Genético y Evolución tectónica del yacimiento tipo Pórfido Cuprífero Milpillas, Distrito de Cananea, Sonora, México., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 391p.

Nourse, J.A., 1989. Geological evolution of two cristal scale shear zone, Part II: The Magdalena Metamorphic Core Complex. Ph. D. Dissert. Calif. Inst. Tech. P.64-396.

Palafox-Reyes, J.J., Mendoza, A., Minjarez, V.A. 1992. Geología de la región de la Sierra Caracahui (Sonora, México). *Boletín del Departamento de Geología, UNISON, Hermosillo, Sonora, México*. V.9 n°1, p.19-34.

Palafox-Reyes, J. J., Minjarez, I., Monreal, R., Almazán, E., Morales, M., Ochoa, L., Rodríguez, R., Rivera, B. 1998. Carta Geológico-Minera escala 1:250,000 Nacozari H12-6 Sonora y Chihuahua. Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Peiffer-Rangin, F. 1988. *Biostratigraphic study of Paleozoic rocks of northeastern and central Sonora*, unpublished manuscript on file with J.H. Stewart, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California and F.G. Poole, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, p. 90.

Ramírez-Lopez, J.A., Lucero Morales, E., Morales-Morales, H. 2012. Carta Geologica-Minera y Geoquimica escala 1:50000 Cuquiárichi H12-B54 Sonora. Servicio Geológico Mexicano.

Ransome, F. L. 1904. *Geology and ore deposits of the Bisbee Quadrangle, Arizona*. Department of the Interior, United States Geological Survey. Professional Paper No. 21, p. 168.

Roldán-Quintana, J. 1982. Evolución tectónica del Estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista, v. 5, núm. 2, p. 178-185.

Roldán-Quintan, J., y Solano-Rico, B., 1978. Contribución a a la estratigrafía de las rocas volcánicas del estado de Sonora: Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v.1, núm. 1 p. 19-26.

Rodríguez-Castañeda, J.L., y Anderson, T.H., 2011. El arco magmático jurásico en Sonora, México—Distribución, edades y ambiente tectónico, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 4, p. 81–111, 7 figs.

Saez-Paredes, D., Beltrán-Noguera, A. 2015. Los Drones y sus Aplicaciones a la Ingeniería Civil. Capítulo 5: Aplicaciones cartográficas. P. 67 – 70.

Santos-Clavero, D. 2014. Fotogrametría usando Plataforma Aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Tesis de licenciatura, Universidad politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

Taliaferro, N.L. 1933. An Occurrence of Upper Cretaceous Sediments in Northern Sonora México: Jour Geol. Vol. 41 No. 91 p. 12-37.

Universidad Nacional del Nordeste. 2012. Principios de Fotogrametría., v. 26.

Valentine W. G., 1936. Geology of the Cananea Mountains, Sonora; Mexico., Geol. Soc. of Am. Bull. vol. 47, p. 53-86.

Villareal-Moncayo, J. V. 2015. Análisis de la Precisión de Levantamientos Topográficos mediante el Empleo de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) respecto a la Densidad de Puntos de Control. Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

Viveros M.A., 1965. Geología del Área de CabullonaCaloso, Mpio. de Agua Prieta, Sonora, México, D.F. UNAM, Facultad de Ingeniería, Tesis Profesional, 80 Páginas.

Yza, R., Alcántara, J., Silva, N. 1984. *Exploración carbonífera en el Estado de Sonora*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 45, núm. 3, p. 17-40.