

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Geología

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y  
MINERALÓGICA DEL SKARN DE HIERRO  
"EL GARABATO", MUNICIPIO DE SUAQUI  
GRANDE, SONORA.

## TESIS

Que para obtener el grado de:

GEÓLOGO



PRESENTA:

PAULINA ROBLES ANDRADE

Hermosillo, Sonora, Junio 2007

# 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



Junio 26, 2007.

**Dr. Lucas Hilario Ochoa Landín**  
Director de Tesis  
Departamento de Geología  
Universidad de Sonora  
P r e s e n t e

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

**“CARACTERIZACION GEOLOGICA Y MINERALOGICA DEL SKARN DE HIERRO EL GARABATO, MUNICIPIO DE SUAQUI GRANDE, SONORA”**

Esto es con el fin de que la alumna: *Paulina Robles Andrade* pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

**DR. EFREN PEREZ SEGURA**  
**M.C. RICARDO AMAYA MARTINEZ**  
**DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN**

**PRESIDENTE**  
**SECRETARIO**  
**VOCAL**

Sin otro en particular, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**  
**“EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA”**

  
\_\_\_\_\_  
**M.C. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA.**



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA

C.c.p. Interesada  
C.c.p. Archivo





UNIVERSIDAD DE SONORA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

TEL. (662) 259 21 10  
FAX 259 21 11

**NOMBRE DE LA TESIS:**

**"CARACTERIZACION GEOLOGICA Y MINERALOGICA DEL  
SKARN DE HIERRO EL GARABATO, MUNICIPIO DE SUAQUI  
GRANDE, SONORA"**

**NOMBRE DE LA SUSTENTANTE:**

**PAULINA ROBLES ANDRADE**

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

  
DR. EFREN PEREZ SEGURA

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

  
M.C. RICARDO AMAYA MARTINEZ

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

  
DR. LUCAS HILARIO OCHOA LANDIN

ATENTAMENTE  
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"

---

M.C. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA.



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
DEPARTAMENTO  
DE GEOLOGIA

FJGN\*ar



## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme culminar mis estudios satisfactoriamente.

A mis padres y hermanos, por todo su amor, paciencia y ayuda económica que me brindaron a lo largo de mi formación. Los quiero mucho!

Agradezco infinitamente a mi director de tesis Dr Lucas H. Ocho Landín por recibirme nuevamente para terminar este trabajo que había abandonado, pero ante todo **“por ser como es”** la persona más sencilla, humilde y sobre todo trabajadora, un ejemplo a seguir para todos, gracias maestro.

A la Universidad de Sonora, en especial a todos los buenos maestro que laboran en el Departamento de Geología por brindarme la oportunidad de formarme académicamente.

Al MC. Ricardo Amaya Martínez y Dr. Efrén Pérez Segura por aceptar ser mis sinodales y por sus buenos comentarios.

Agradezco de la mejor manera al ing. Benito Noguéz Alcántar, por haberme permitido estar durante año y medio de becario así como también darme la oportunidad de conocer el grupo Peñoles. Al ing. Luis Felipe Novelo por permitirme estar aun con ellos y poder desarrollarme profesionalmente a pesar de lo latosa que soy. Al ing. Carlos Díaz de León por darme la oportunidad y confianza para salir a trabajar en el campo. Al ing. Eduardo Salvatierra Domínguez, por traerme como látigo para darle fin a este trabajo que ya tenia mucho tiempo de haber iniciado, a Héctor Mendivil y Clairet García por toda las molestias que les cause, a todas esas personas que ahí laboran que de una u otra forma me ayudaron y me dejaron alguna enseñanza no los nombro porque son muchísimos y nunca terminare pero cada uno de ellos saben cuanto los aprecio y que valoro mucho su amistad.

A todos los buenos amigos (amigos de mi pueblo, universidad y del trabajo) con los que tengo la fortuna de contar, y que me hacían sentir que me llamaba **“Y LA TESIS”** lo cual me impulso a terminar de una vez por todas, gracias los estimo y los quiero muchísimo.

..... *Maka ki te rangi!*

## INDICE

<b>I. RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>III. GENERALIDADES.....</b>	<b>5</b>
III.1. Localización.....	5
III.2. Metodología.....	5
<b>IV. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....</b>	<b>8</b>
<b>V. MARCO TECTÓNICO ESTRUCTURAL DE LA REGIÓN CENTRO SUR DE SONORA.</b>	<b>16</b>
<b>VI. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>19</b>
VI.1. Formación Tarahumara.....	20
VI.1.1. Miembro inferior.....	23
VI.1.1.1. Flujo andesítico.....	23
VI.1.1.2. Flujo andesítico con biotita.....	25
VI.1.1.3. Flujo andesítico-dacítico.....	27
VI.1.2. Sedimentos.....	29
VI.1.3. Miembro medio.....	30
VI.1.3.1. Toba vítrea lítico-cristalina.....	30
VI.1.3.2. Andesita porfídica.....	35
VI.2. Cenozoico continental indiferenciado.....	38
<b>VII. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SKARNS.....</b>	<b>40</b>
<b>VIII. DEPÓSITO DE HIERRO EL GARABATO.....</b>	<b>45</b>
VIII.1. Alteración progradante.....	50
VIII.1.1. Zona marmolizada.....	51
VIII.1.2. Zona de Granate>Piroxeno.....	51
VIII.2. Alteración retrógrada.....	60
VIII.3. Mineralización de hierro.....	67
VIII.4. Alteración hidrotermal.....	68
<b>IX. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>



REFERENCIAS CITADAS.....	79
--------------------------	----

### FIGURAS

Fig. 1. Distribución de los depósitos de hierro en el Estado de Sonora.....	4
Fig. 2. Localización y acceso del área de estudio.....	6
Fig. 3. Geología simplificada de la porción centro-sur del Estado de Sonora.....	9
Fig. 4. Columnas estratigráficas de la porción centro- sur del Estado de Sonora.....	14
Fig. 5. Mapa geológico 1:50 000, modificado de Flores-Vásquez.....	21
Fig. 6. Columna estratigráfica del área de estudio.....	24
Fig. 7. Mapa geológico-estructural del área de estudio.....	32
Fig. 8. A) Muestra el protolito y su correspondiente metamórfico en un proceso de metamorfismo isoquímico B) Dirección del flujo de elementos por difusión.....	43
Fig. 9. Skarnoide.....	44
Fig. 10. El zoneamiento de la mayoría de los skarns refleja la geometría del contacto con el plutón y flujo del fluido.....	44
Fig. 11. Modelos tectónicos idealizados para la formación de skarn.....	46
Fig. 12. Plano geológico simplificado de las zonas de skarn.....	49
Fig. 13. A) Sección esquemática A-A' donde se aprecia la zona marmolizada, B) afloramiento en planta, que muestra como la actinolita, calcita y magnetita reemplazan respectivamente a cristales de granate.....	54
Fig. 14. Distribución de las muestras de la zona $Px > Gr$ en donde la muestra PR03-30 está constituida por cristales de piroxeno intercrecidos con cristales de granate y la muestra PR03-29 constituida por cristales de piroxeno, representadas por una sección A en planta y un mayor detalle en la sección B transversal.....	62
Fig. 15. A) Sección en planta que muestra la ubicación de la zona transicional. B) Sección en planta en donde se aprecia como los cristales de actinolita + granate son mezclados con el cuerpo masivo de magnetita.....	64

Fig. 16. Secuencia paragenética de las alteraciones progradante y retrógrada del skarn de hierro El Garabato, eventos magmáticos y de alteración sucedidos en la región centro de Sonora.....	72
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Fig. 17. Representación de la alteración hidrotermal constituida por una zona de silicificación y una zona de argilización.....	73
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Fig. 18. Sección esquemática longitudinal (N-S) al cuerpo de skarn, donde se localiza la distribución de las diferentes zonas de alteración (progradante y retrógrada), con la localización de un cuerpo intrusivo a no más de 200 m del punto más bajo en la sección.....	78
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### FOTOGRAFÍAS

Foto 1. Microfotografía de la muestra PR07-6.....	26
Foto 2. Microfotografía de la muestra PR07-7.....	28
Foto 3. Microfotografía de la muestra PR07-7 en LN.....	28
Foto 4. Microfotografía de la muestra PR03-21.....	
Foto 5. Microfotografía de la muestra PR03-21, mostrando algunos fenocristales dentro de una matriz microcristalina en gran parte silicificada. LP, 4X.....	31
Foto 6. Horizonte calcáreo donde se pueden apreciar algunas bandas de pedernal con espesores variados.....	33
Foto 7. Fotografía de un afloramiento perteneciente a la unidad inferior del miembro medio, de la Formación Tarahumara donde se pueden observar algunos fragmentos angulosos de roca de composición andesítica-dacítica.....	36
Foto 8. Microfotografía de la muestra PR03-1.....	37
Foto 9. Microfotografía mostrando esferulitos producto de la desvitrificación de la roca. LP, 10X.....	37
Foto 10. Microfotografía de la muestra PR03-2.....	39
Foto 11. Microfotografía de la muestra PR03-8.....	53
Foto 12. Microfotografía de la muestra PR03-7.....	55
Foto 13. Microfotografía de la muestra PR03-7 en luz natural, resaltando de mejor manera la presencia de granate y actinolita. LN, 4X.....	55



Foto 14. Microfotografía de la muestra PR03-24.....	58
Foto 15. Microfotografía de la muestra PR03-24, en donde se muestra como la magnetita invade a los cristales de granate con centros hematizados LP,4X.....	24
Foto 16. Microfotografía de la muestra PR03-25.....	25
Foto 17. Microfotografía de la muestra PR03-25, resaltando los cristales de granate. LN, 4X.....	25
Foto 18. Microfotografía de la muestra PR03-30.....	63
Foto 19. Microfotografía de la muestra PR03-29.....	63
Foto 20. Microfotografía de la muestra PR03-20.....	65
Foto 21. Microfotografía de la muestra PR03-4.....	66
Foto 22. Microfotografía de la muestra PR03-4, en la cual se aprecian solo cristales de actinolita>tremolita. LP, 10X.....	66
Foto 23. Fotografía que muestra al cuerpo de magnetita con vestigios de lo que fue la estratificación de los horizontes calcáreos.....	69
Foto 24. Fotografía que muestra una vetilla de magnetita dentro de los horizontes calcáreos recristalizados.....	69
Foto 25. Microfotografía de la muestra PR03-4, mostrando la presencia de martitización con algunas zonas irregulares de hematita (color crema claro). LN, 20X.....	70
Foto 26. Microfotografía de la muestra PR03-4, mostrando la presencia de magnetita con delgadas (0.3 mm) bandas irregulares de silicatos. LN, 20X.....	70
Foto 27. Fotografía de la zona silicificada que muestra el fracturamiento vertical casi norte sur, acompañada de brechamiento heterogéneo.....	74
Foto.28. Fotografía que muestra el brechamiento dentro de la zona de silicificación, semejando una crackel breccia, siguiendo estructuras N-S.....	74
<b>ANEXOS</b>	
Análisis petrográfico.....	83



## I.- RESUMEN

El escenario geológico-tectónico de la porción centro-sur del Estado de Sonora está caracterizado por una gran variedad de mineralizaciones, las cuales consisten principalmente en sistemas de pórfidos de cobre, brechas de cuarzo turmalina, vetas de Au-Ag y skarns de Fe y Cu-Pb-Zn. Los sistemas porfídicos de la región se encuentran estructuralmente controlados, como es el caso de Suaqui Verde (SV) que se encuentra limitado por estructuras principales NE 60° SW a E-W y Cuatro Hermanos (CH) con estructuras de NE 80° SW, los cuales se encuentran hospedado en rocas volcánicas calcoalcalinas correspondientes a la Formación Tarahumara del Cretácico tardío – Terciario temprano, (Flores-Vásquez, 2006 y Zürcher, 2002).

La intrusión de los granitoides laramídicos dentro de las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, desarrolla una extensa alteración propilítica de proporciones regionales en todos los miembros de dicha formación, así mismo se tiene el desarrollo de estructuras brechoides de cuarzo-turmalina las cuales guardan una fuerte conexión a cúpulas granitoides. Por otro lado al noreste del pórfido SV se tiene un sistema de cuerpos vetiformes de cuarzo orientados NE 70° SW a E-W con poco desplazamiento por fallamiento post-mineral NW 40-50° SE, las cuales están desarrolladas dentro del miembro medio de la Formación Tarahumara. De igual manera la intrusión de este cuerpo batolítico permitió el desarrollo de zonas de metamorfismo de contacto en rocas volcánicas de composición andesítica en CH y el desarrollo de cuerpos de skarns en horizontes delgados de calizas en SV, como los depósitos de El Garabato, El Sapo, El Echal y otros más.

El skarn de hierro El Garabato se encuentra incluido entre el miembro inferior y superior de la Formación Tarahumara, reemplazando al paquete de rocas carbonatadas intercaladas con sedimentos volcanoclásticos depositados en cuencas extensas y someras durante un tiempo de relativa calma al final de la depositación del miembro inferior. El miembro inferior está representado por un flujo andesítico, flujo andesítico con biotita y un flujo andesítico-dacítico, el



miembro medio esta constituido por una toba vítrea lítico-cristalina y una andesita porfídica fluidal.

A nivel semiregional los cuerpos de skarn son irregulares y afloran de manera inconsistente a lo largo del contacto entre dichos miembros, dando la apariencia que los cuerpos podrían ser cortados por estructuras NW-SE que de alguna manera influyen en este comportamiento.

En este caso en particular, se presenta una serie de eventos muy bien definidos los cuales están representado por una alteración progradante bien definida constituida principalmente por una zona de Gr>Px, Gr>>Px, Px>Gr y marmolización en todos los casos; con una alteración retrograda sobre impuesta constituida principalmente por actinolita>tremolita + calcita que ocupa los espacios vacíos entre los cristales de granate y/o rellenando fracturas y en ocasiones hasta reemplazando los bordes, acompañado de clorita ± epidota que en la mayoría de las veces se encuentra de forma intersticial o en algunos casos reemplazando parcialmente a minerales ferromagnesianos. Así mismo, este ultimo estadio es cortado por una serie de vetillas tardías de cuarzo, calcita y cuarzo + calcita, con una mineralización de hierro introducida aparentemente en el inicio de la alteración retrógrada.



## II.- INTRODUCCIÓN

Los depósitos de hierro en el Estado de Sonora son poco distribuidos y parecen estar localizados a lo largo de una franja en el centro del Estado, con mayor tendencia a encontrarse en la parte oeste, como lo definió Pérez-Segura (1985). Los depósitos de este tipo parecen estar relacionados, la mayoría de las veces, a zonas de skarn asociados generalmente a cuerpos batolíticos de edad Larámide, activos durante gran parte del Mesozoico y del Terciario inferior. De la misma forma, se tienen depósitos de hierro los cuales no parecen corresponder a zonas de skarn, sino que tienden a relacionarse más a procesos magmáticos que hasta la fecha no se tiene bien establecido sus orígenes y donde algunos geólogos le han atribuido una conexión con depósitos tipo IOCG (Iron–Oxide–Copper–Gold deposits) los cuales han sido poco estudiados en esta región del país; un ejemplo de este tipo de yacimientos es el depósito de hierro El Volcán localizado en el centro de Sonora y algunos otros no registrados en la literatura.

Los depósitos de hierro en nuestro estado relacionados a zonas de skarn han sido poco inventariados y estudiados en detalle, por lo que una idea de su formación y tonelaje hasta el momento es difícil de estimar. Sin embargo, Pérez-Segura (1985) define para este tiempo una serie de yacimientos de este tipo, los cuales en general son relacionados a zonas de skarn hospedados en la mayoría de las veces en calizas paleozoicas, y en menor proporción en rocas cretácicas calcáreas afectados por intrusivos Laramídicos. Entre los más importantes señala los depósitos de San Marcos con 5,000,000 tons y los de Chinoverachi con 1,500,000 tons entre otros (Figura 1).

El presente estudio tiene como finalidad el reconocimiento y descripción mineralógica de un depósito de hierro asociado a una zona de skarn en el centro-sur del Estado de Sonora, denominado como El Garabato. Se espera que este estudio venga a enriquecer un poco el conocimiento que se tiene acerca de la mineralogía y formación de este tipo de depósitos de hierro en el Estado.



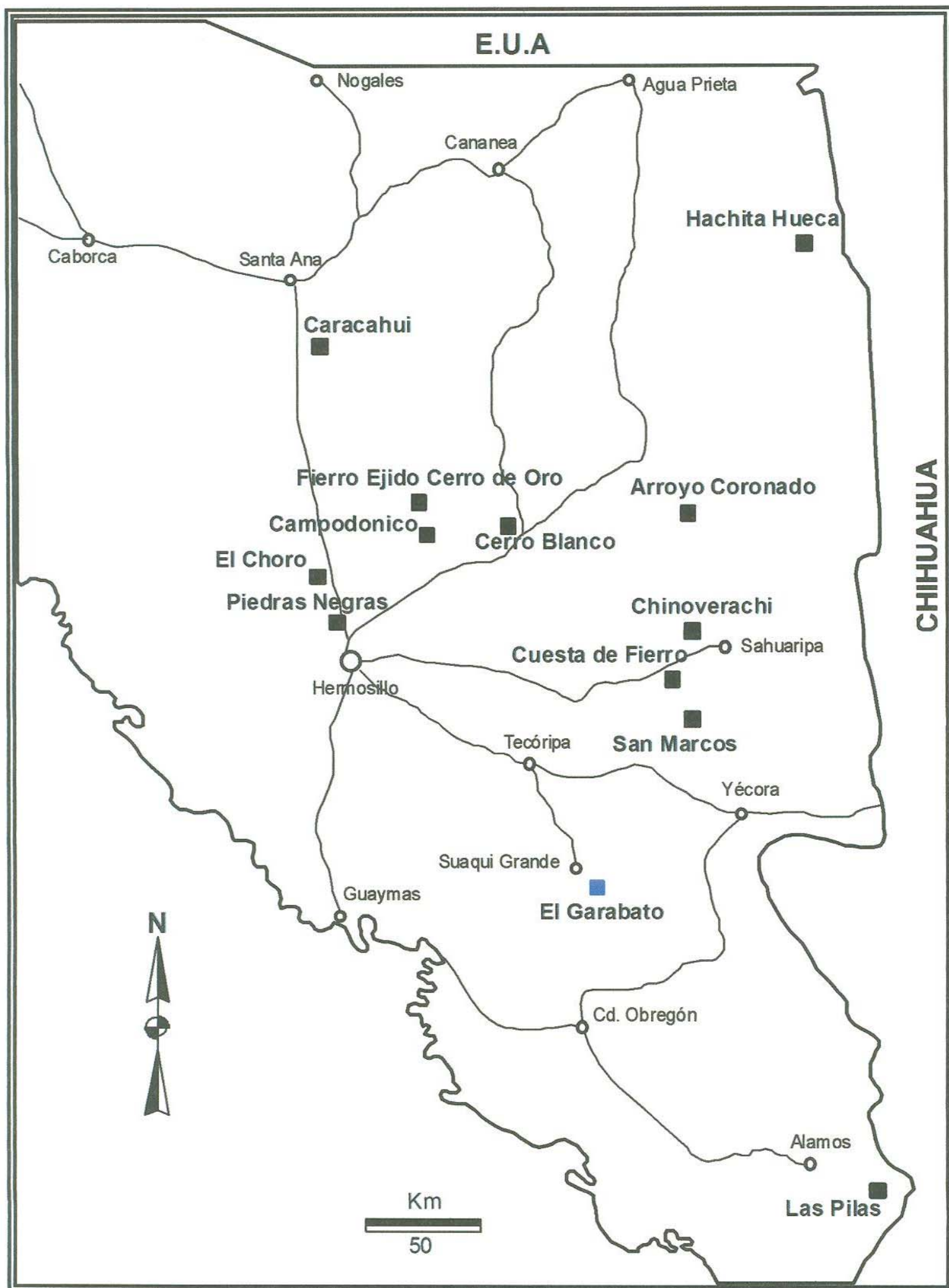


Figura 1.- Distribución de los depósitos de hierro en el Estado de Sonora, modificado de Pérez-Segura (1985) y Consejo de Recursos Minerales (1992). El recuadro en color azul representa el área de estudio.

### **III.- GENERALIDADES**

#### **III.1 Localización**

El área de estudio se localiza en la porción centro-oriental del Estado de Sonora, aproximadamente a 100 km de la ciudad de Hermosillo, dentro del Municipio de Suaqui Grande, estando delimitada por las coordenadas UTM: 3'137,700 - 3'138,300 Norte y 616,800 - 617,300 Este, dentro de la carta topográfica INEGI Suaqui Grande (H12D74) escala 1:50,000. El acceso es a través de la carretera internacional No. 16, pavimentada en su totalidad, la cual inicia en Hermosillo, conectando con Tecóripa, Tónichi y Yécora, llegando hasta la ciudad de Chihuahua. En el kilómetro 118 se encuentra el poblado de Tecóripa donde se aparta hacia el sur otra carretera pavimentada que termina en el poblado de Suaqui Grande. De ahí aproximadamente a 10 km en línea recta se encuentra el área de estudio, a la cual se llega por un camino de terracería que se encuentra en buenas condiciones gran parte del año (Figura 2).

#### **III.2 Metodología**

Este estudio se desarrollo siguiendo tres etapas básicas:

- Compilación y análisis de material bibliográfico
- Trabajo en campo
- Trabajo de laboratorio y gabinete

El primer paso consistió en la compilación de toda la información disponible acerca de los yacimientos de skarn de hierro, así como los trabajos realizados en el área de estudio y zonas aledañas. Para esta etapa se reconocieron los trabajos más importantes relacionados con estos depósitos, como son: Einaudi, Meinert, Newberry, (1981); Einaudi, Burt, (1982); Pérez-Segura, (1985); Meinert, (1992); Meinert, (1998), de la misma forma estudios realizados en la parte centro de Sonora por: McDowell, Roldán-Quintana and Connelly, (2001); Roldan-Quintana, (2002); Flores-Vásquez, (2006).



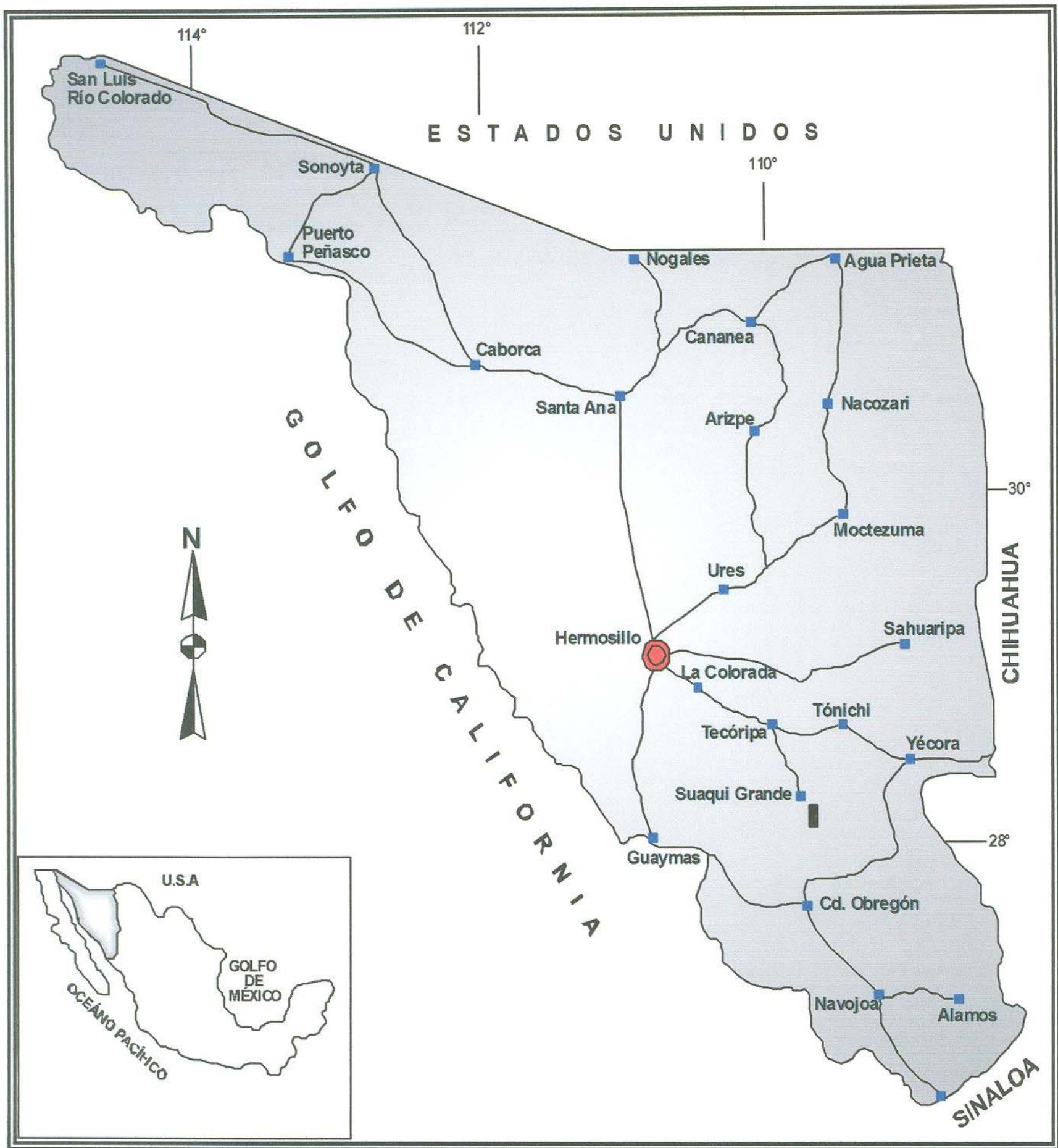


Figura 2.- Plano de localización del área de estudio, donde se muestran distintas poblaciones y el acceso a ellas. El recuadro pequeño en color negro, en la parte centro-sur de la figura representa el área de estudio.

El trabajo de campo consistió en un reconocimiento geológico, con el fin de identificar la litología del área de manera local y semiregional, distribución de alteración y mineralización así como también las estructuras relacionadas. De manera simultánea, se recolectaron 36 muestras de roca para estudio petrográfico y mineragráfico.

El trabajo de gabinete correspondió a la preparación de 33 láminas para estudio petrográfico y siete secciones pulidas las cuales se elaboraron en el laboratorio de petrografía del Departamento de Geología, así como la información generada en las actividades anteriores, fue ordenada, analizada y descrita para la realización de este trabajo de tesis.



#### IV.- MARCO GEOLÓGICO

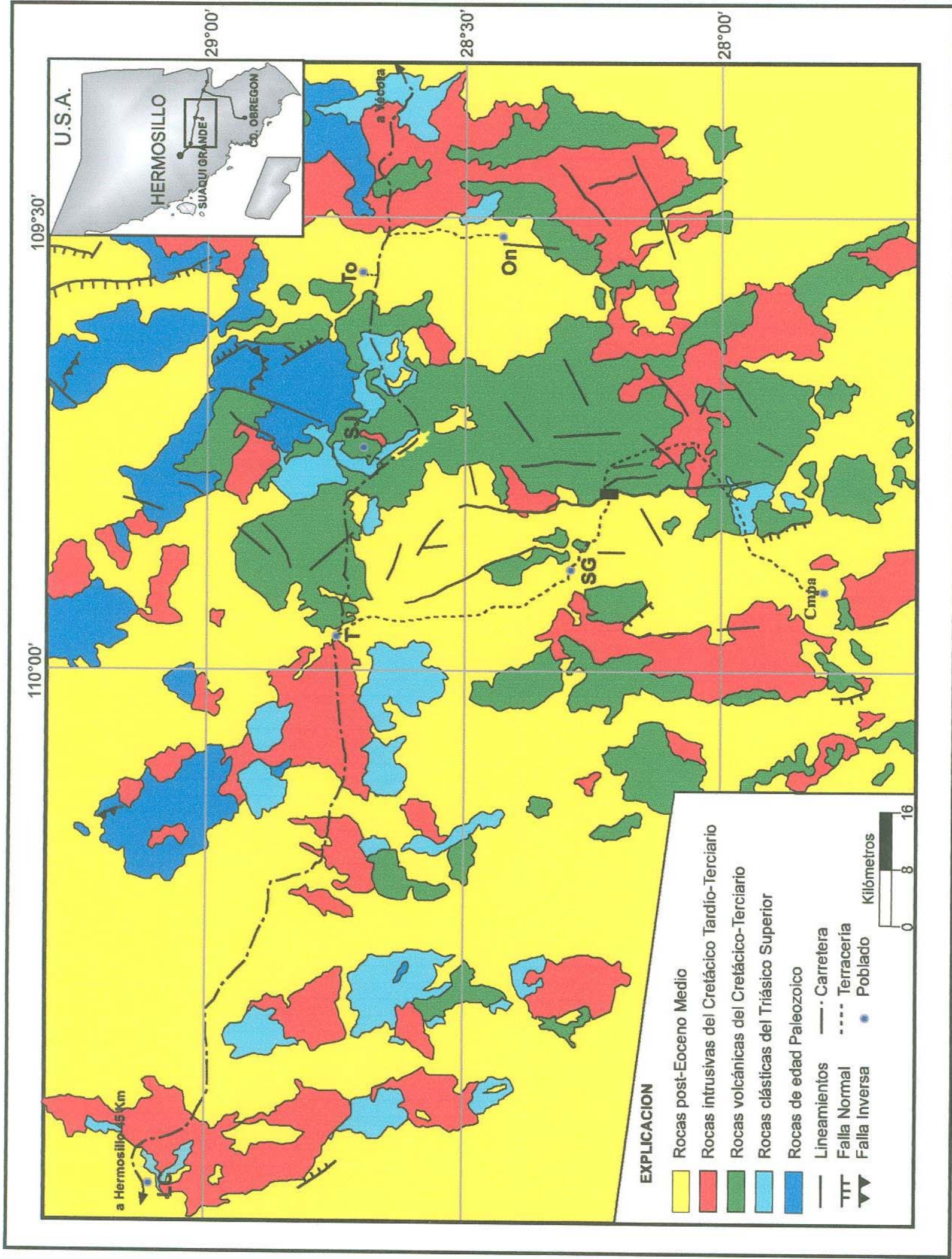
Las rocas más antiguas que afloran en la parte central del Estado de Sonora se localizan al norte-noreste del poblado de San Javier y corresponden a rocas del Paleozoico que se extienden en una dirección este-oeste, las cuales están representadas por una secuencia de estratos de lutita, limolita, cuarcita, conglomerado y caliza, con intercalaciones de pedernal (Figura 3). La edad de esta secuencia se asigna a partir de fósiles índices como graptolitos, radiolarios, conodontos y fusulínidos de edad Ordovícico, Devónico, Misisipico-Pensilvánico y Pérmico (Bartoliní-Navarro et al., 1994; Stewart y Roldán-Quintana, 1991).

Estas rocas están sobreyacidas discordantemente por el Grupo Barranca con una edad del Triásico Tardío, las cuales afloran en la región de San Javier, La Barranca y Tecóripa (porción centro-este del Estado de Sonora) con un espesor aproximado de 3000 m. El Grupo Barranca ha sido relacionado a depósitos continentales y ambientes marinos someros, que fueron acumulados en una cuenca tipo rift o pull-apart, aparentemente formada por fallamiento transtensional y/o extensional activo durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano (Stewart y Roldán-Quintana, 1991). Dumble (1900) describe en los alrededores de San Javier y Tónichi un conjunto de rocas sedimentarias, representadas por estratos de lutita, arenisca y conglomerado, a las que denomina como División Barranca a la cual divide en tres miembros: inferior, medio y superior.

King (1939) en un reconocimiento regional que realizó, modifica el rango de División a Formación Barranca, mas tarde Alencaster (1961b) al estudiar y correlacionar las rocas del Triásico de Sonora, propone modificar el rango de Formación Barranca a Grupo Barranca y además considera justificable elevar a rango de formación a cada uno de los miembros, quedando de la base a la cima: Formación Arrayanes, Formación Santa Clara y Formación Coyotes.

La Formación Arrayanes tiene un espesor aproximado de 1150 m y es dividida informalmente en miembro inferior, medio y superior aflorando los miembros inferior y superior en los poblados de San Javier y Tónichi, los cuales están compuestos por estratos de arenisca de color gris medio y gris café claro





**Figura 3.-** Geología simplificada de la porción central del Estado de Sonora (carta Sonora 1:500,000 modificada de COREMI). El recuadro de la parte superior derecha define la parte tomada de dicha carta. El recuadro en color negro de la parte centro/derecha de la figura representa el área de estudio. Abreviaciones: LC La Colorada; On: Onavas; T: Tecóripa; SG: Suaqui Grande; SJ: San Javier; C: Cumuripa. Modificado de Flores-Vásquez.



de grano fino a medio con cuarzo subangular a subredondeado y escaso feldespatos. En esta localidad es común observar capas de grano grueso a muy grueso y localmente niveles de conglomerado con clastos de cuarcita gris y café, pedernal, y en menor proporción cuarcita blanca y pedernal rojo. El miembro medio consiste de limolitas de color gris en general sin estratificación interna y menor cantidad de areniscas, siendo la abundancia de limolitas y el color rojo de intemperización características que lo hacen distintivo de los dos miembros anteriores. Las descripciones de esta Formación indican que estas rocas fueron depositadas en ambientes fluviales y deltas marinos (Stewart y Roldán-Quintana 1991).

La Formación Arrayanes es sobreyacida concordantemente por la Formación Santa Clara, en donde el contacto entre ellas se encuentra bien definido, debido al cambio brusco de areniscas-limolitas de la Formación Arrayanes a una secuencia de limolitas, lutitas carbonosas y areniscas que componen a la Formación Santa Clara. Esta formación tiene un espesor aproximado de 1400 m y es dividida en dos unidades principales: una de grano fino y otra de grano grueso, la primera de ellas se compone de areniscas, limolitas, conglomerados, lutitas carbonosas y carbón, donde son comunes los fósiles de plantas, braquiópodos (*Lingula*) pelecípodos y una única localidad de amonites (Alencaster, 1961b). La unidad de grano grueso consta de proporciones similares de areniscas y limolitas, con cantidades menores de areniscas conglomeráticas y conglomerados, lutitas carbonosas y carbón. Dentro de esta formación existe una variable cantidad en número, tamaño y dimensión de mantos de carbón y que en mayor o menor proporción han sido transformados a grafito (Obregón y Arriaga, 1991). Al igual que la Formación Arrayanes, esta formación está compuesta por depósitos fluviales y deltas marinos.

La Formación Santa Clara es suprayacida en contacto discordante por la Formación Coyotes, la cual tiene un espesor estimado de 600 m (Stewart y Roldán-Quintana 1991) y esta constituida por depósitos de abanicos aluviales, que se caracterizan por la presencia de ortoconglomerado con clastos angulosos



a subredondeados de guijarros y cantos de cuarcita y pedernal en una matriz arenosa y de grano fino a grueso, así mismo presenta paraconglomerado, limolita roja grisácea, arenisca amarilla-gris y roja grisácea, interestratificado con el ortoconglomerado.

El Grupo Barranca a su vez es sobreyacido discordantemente por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, la cual fue descrita por Wilson y Rocha (1946) como una secuencia de rocas volcánicas de composición variable que va de andesítica a dacítica, y las cuales están representadas por flujos, brechas y aglomerados.

Estudios recientes realizados por McDowell et al., (2001) en el arroyo El Obispo, dividieron a dicha secuencia en miembro inferior, medio y superior. El miembro inferior consta de aproximadamente 20 m de ignimbrita riolítica, 145 m de tobas andesíticas, líticas y en menor proporción toba lítica riolítica, sobreyacidas concordantemente por una arenisca volcánica oscura y limolita café oscuro, seguidas por tobas andesíticas líticas. El miembro medio consta de una secuencia de 60 m de espesor compuesta de caliza con lentes de pedernal e interestratificaciones de litarenita volcánica, con la presencia de algas y fragmentos de raíces de palmas (McDowell et al., 2001). El miembro superior consta 60 m de ignimbrita riolítica rica en cristales, 70 m de flujos de andesita de grano fino, seguido por 125 m de ignimbrita lítica con abundante fragmento de pómez. McDowell et al (2001), en una sección a través del arroyo Las Uvalamas-Cerro el Tarais, estimaron un espesor mínimo combinado de 2 500 m para la Formación Tarahumara, debido a que la base no esta expuesta y el contacto superior es erosional. Para el área de Suaqui Verde, se hizo una separación en tres miembros al igual que en el arroyo El Obispo. El miembro inferior consta de aproximadamente 1400 m de flujos de lava dacítica (?), junto con capas delgadas de ignimbrita y toba riolítica. El miembro medio, que sobreyace concordantemente, está compuesto de al menos 500 m de litarenita volcánica y limolita, aglomerado y toba andesítica, junto con estratos delgados de caliza. El miembro superior consta de 1 000 m de toba riolítica rica en cristales interestratificada con delgados flujos (?) de riodacita.

localiza ~10 km hacia el noroeste del poblado de Suaqui Grande, donde Damon et al., (1983a) por el método de K-Ar determinan edades de  $58.8 \pm 1.3$  y  $56.4 \pm 1.2$  Ma en hornblenda y biotita respectivamente. Además en el área de Suaqui Verde los mismos autores fechan sericita en intrusivo cuarzodiorítico en  $56.7 \pm 1.1$  Ma. Estudios más recientes efectuados por Barra et al., (2005) obtuvieron edades por el método Re-Os de  $57 \pm 0.3$  Ma para molibdenita relacionada a la etana de alteración potásica.

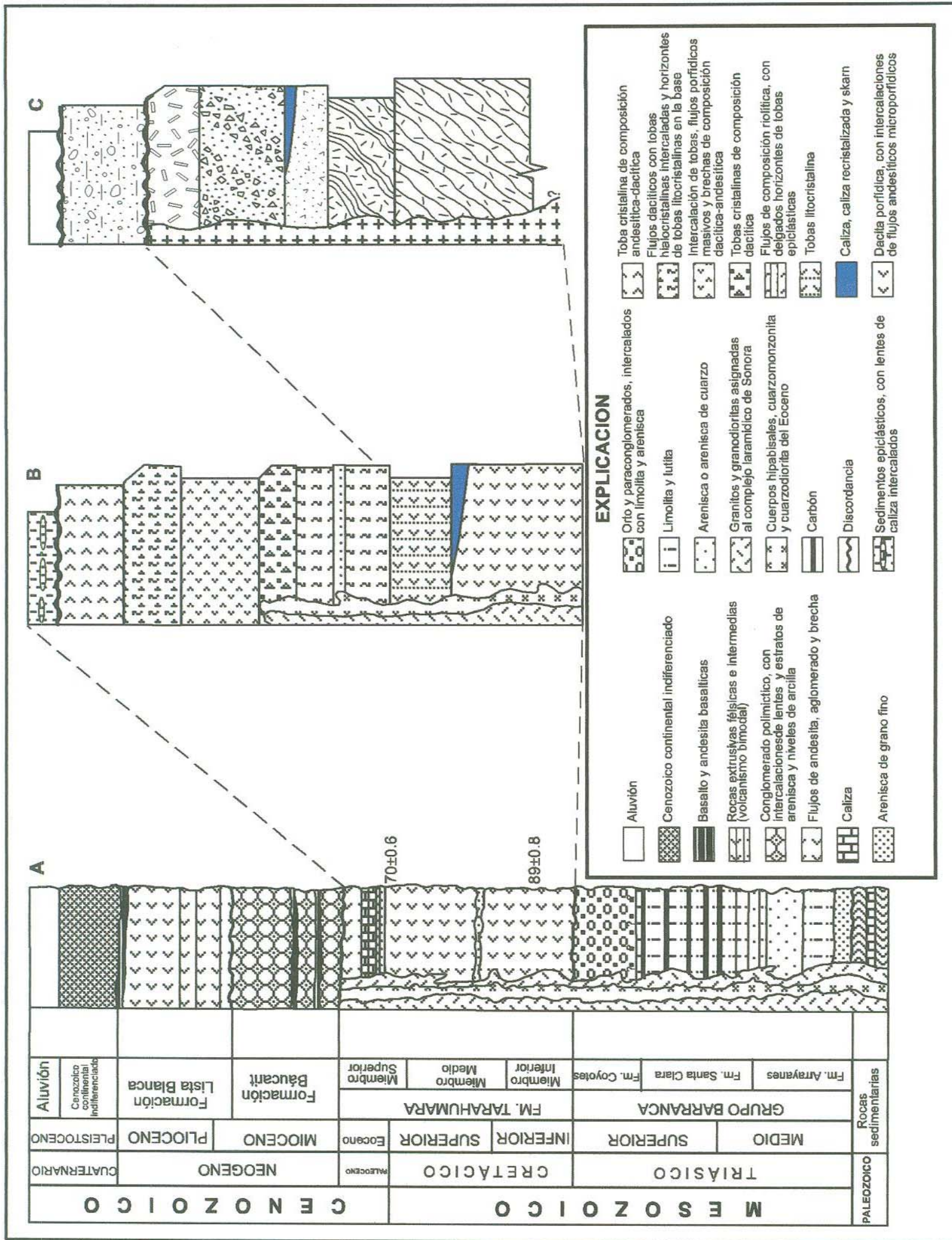


Este conjunto de rocas intrusivas se han emplazado y han alterado a las rocas sedimentarias triásicas del Grupo Barranca y a las volcánicas cretácicas de la Formación Tarahumara, llegando en ocasiones a formar y desarrollar yacimientos minerales de una magnitud y tipología variada por ejemplo de metasomatismo, metamorfismo de contacto e hidrotermales.

Las rocas del Complejo Batolítico de Sonora, que junto con la Formación Tarahumara conforman parte del arco magmático de edad Cretácico Tardío-Terciario temprano, son sobreyacidas en discordancia o en contacto por falla por unidades de rocas sedimentarias clásticas y volcánicas del Terciario, las cuales cubren discordantemente a rocas del Paleozoico, dichas unidades corresponden a la Formación Báucarit. Dumble (1900) propuso por primera vez el nombre de División Baucarí, para describir una secuencia de sedimentos clásticos, cuya localidad tipo se ubica en la porción sur del Estado de Sonora.

Más tarde King (1939) redefine el nombre, además de cambiar su rango, quedando como Formación Báucarit, tal y como se le conoce y refiere actualmente. El mismo autor, la divide en miembro inferior y superior; el primer miembro consta de uno o más flujos de basaltos intercalados con aglomerados basálticos, que contienen fenocristales de olivino alterados a augita y hornblenda. El miembro superior contiene escasas rocas volcánicas (principalmente tobas) y espesor significativo de secuencias clásticas de grano grueso (conglomerado y arenisca), que sobreyacen en discordancia a rocas que van desde el Paleozoico Superior al Oligoceno. En general esta formación está constituida por sedimentos clásticos bien consolidados compuestos de alternancia de conglomerados polimícticos con intercalaciones de lentes y estratos de areniscas y niveles de arcilla, además en algunas localidades se presentan derrames de andesita, basalto y tobas riolíticas en diferentes niveles de la secuencia, cuyos depocentros probablemente fueron cuencas continentales cerradas (McDowell et al., 1997).





**Figura 4.-** Columnas estratigráficas esquemáticas de la porción centro-sur del Estado de Sonora. Columna "A" modificada de Franco-Martínez (1994), columna "B" modificada de Flores-Vásquez (2006) y columna "C" área local, con la litología explicada en la Figura 6.



La asignación de la edad de la Formación Báucarit ha sido realizada por medio de dataciones radiométricas Damon y Bikerman, (1964); Damon, (1975) y Damon et al.,(1983b); Morales- Montaña et al., (1990 y 1991); McDowell y Roldán-Quintana (1991); Cochemé y Demant, (1991); McDowell et al., (1997); Menicucci, (1975); Roldán-Quintana (1979) y estudios palinológicos Martínez-Hernández (1984). Los resultados reportados determinan rangos de edad con un límite inferior de  $27.1 \pm 0.9$ , el cual es contemporáneo con las rocas volcánicas oligocénicas de la Sierra Madre Occidental. Por otra parte, el límite superior se obtuvo en el cerro Lista Blanca por una datación Ar-Ar de una ignimbrita riolítica que dio edades de  $12.2 \pm 0.3$  Ma (McDowell et al., 1997) correspondiente a la base de la Formación Lista Blanca que sobreyace concordantemente a la Formación Báucarit. Dumble (1900), utiliza este nombre para describir un conjunto de rocas volcánicas con una composición variable de andesitas a riolitas, a las cuales les asigna el nombre de División Lista Blanca y dado que sobreyace en concordancia al Grupo Báucarit, les asigno una edad del Triásico. Posteriormente King (1939), les asignó una edad del Cretácico y estudios mas recientes Morales-Montaña et al., (1990) reportan una edad  $10.4 \pm 0.2$  Ma, al fechar por el método de K-Ar rocas correspondientes a un flujo latítico en la parte superior de esta formación. Edades similares fueron obtenidas por Bartolini et al., (1994) y Gans (1997) los cuales lo asignaron al límite superior de la Formación Lista Blanca. En general es una secuencia compuesta por flujos de lava riolítica, intercalados con niveles de toba, ignimbrita y arenisca tobácea, con un espesor aproximado de 48 m (Amaya-Martínez et. al., 1992).

La Formación Lista Blanca es sobreyacida por flujos de basalto y andesita basáltica, cuyo rango de edad oscila entre 10 y 6 Ma ó más jóvenes y son correlacionables con algunas rocas en la región de Guaymas, Sonora (Mora-Álvarez, 1993 y Paz-Moreno, 1992).



## V.- MARCO TECTÓNICO-ESTRUCTURAL DE LA REGIÓN CENTRO-SUR DE SONORA

Los rasgos estructurales y tectónicos que caracterizan a la región centro-sur del Estado de Sonora están representados por eventos compresivos y distensivos principalmente, los cuales seguramente dan la morfología actual de la región, provocando la fragmentación y yuxtaposición de unidades geológicas que difieren en edad y origen.

La depositación de las rocas del Grupo Barranca, son el producto de un evento distensivo de una edad pre-Triásico Tardío; regido por un sistema estructural de fallamiento orientado este-oeste que delimitan a las rocas paleozoicas hacia el norte, de las mesozoicas hacia el sur, como ha sido sugerido, Stewart y Roldan (1991) formadas a partir de un sistema de cizalla lateral sinistral (Mojave-Sonora Megashear de edad Triásico Tardío-Jurásico Temprano), atribuida a la separación de los bloques de Norte América, África y América del Sur.

Posterior a su depositación y previo a su desplazamiento, la formación Tarahumara y el Grupo Barranca son afectados por una fase compresiva causante del desarrollo de fallas inversas y pliegues, algunos de dimensiones regionales, formando anticlinales y sinclinales simétricos, buzantes hacia el NE (Franco- Martínez, 1994). Algunos ejemplos de estas estructuras se observan en la Sierra de San Javier, donde conforman un sinclinal irregular, fallado e inclinado hacia el este-sureste con algunos pliegues con tendencia al sureste, mostrando una tendencia paralela al sinclinal principal así como capas volteadas, inclinadas hacia el noroeste (Stewart y Roldán-Quintana, 1991).

En el Cretácico Temprano se desarrolla en el Noroeste de México con una actividad volcánica importante generada por efecto y evolución de un arco volcánico, originado por la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norte América, (Rangin, 1977). Durante este tiempo, en Sonora existían varios dominios paleogeográficos, dentro de los cuales sobresalen dos en particular: uno al occidente representado por un arco volcánico y otro al oriente,



representado por una cuenca interpretada como la continuación de la cuenca Chihuahua, como es propuesto por Rangin (1977).

Dicho arco volcánico produjo una secuencia de rocas de composición andesítica-dacítica que se extruyeron en forma de derrames, brechas, aglomerados y materiales piroclásticos, que en conjunto definen a un volcanismo calcialcalino, constituyendo estas rocas a la formación Tarahumara, la cual no presenta evidencia de efectos compresivos, únicamente un intenso fracturamiento que es producto del empuje, levantamiento y del emplazamiento de los cuerpos intrusivos asignados a la orogenia Laramídica con una edad del Cretácico Tardío-Terciario (Franco-Martínez, 1994)

Los afloramientos del miembro inferior de la Formación Tarahumara generalmente son masivos y compactos, en cambio el miembro superior por su carácter volcanoclástico es estratiforme, presenta fallamiento y basculamiento con inclinaciones de 10° a 30° hacia el este y noreste. Por la composición calcialcalina de la Formación Tarahumara y su contemporaneidad con el batolito cretácico, McDowell et.al., (1994) sugieren que las rocas de la Formación Tarahumara junto con el batolito de Sonora corresponden al arco magmático Laramídico, producto de la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica y registraron el progreso de la placa convergente y la deformación continental relacionada en el Cretácico Tardío-Terciario temprano de Sonora (Roldan-Quintana, 2002).

Las rocas del Terciario Superior (Neógeno) están representadas por sedimentos clásticos bien consolidados con alternancia de conglomerado polimíctico y estratos de areniscas y de arcillas correspondientes a la Formación Báucarit y por derrames riolíticos de la Formación Lista Blanca, encontrándose generalmente en contacto por falla o discordancia con las rocas mas antiguas y presentan inclinaciones muy fuertes que varían entre 40-75° E, 40° NE y 25° SE. La deposición de estas rocas fue durante el evento distensivo del Terciario medio – tardío “Basin and Range” , en donde se desarrollaron fallas normales de varios km de longitud, con un rumbo N-S con variaciones de 10 a 20° tanto al NW como al NE, formando estructuras de tipo graben y semigraben “half



graben" que actuaron como recipientes de los sedimentos clásticos y rocas volcánicas, registrando el progreso de la extensión en el Terciario de Sonora en un marco tectónico de tras-arco (McDowell et. al., 1997). La tectónica distensiva del Estado de Sonora ha conducido a varias conclusiones, Henry y Aranda-Gomez (1992) sugieren dos episodios distensivos principalmente que inician en ~23 y ~13 Ma. Stewart y Roldan-Quintana (1994) infieren tres episodios: fallamiento de "detachment" Oligoceno-Mioceno, fallamiento normal poco espaciado (antes de ~10 Ma) y fallamiento "Basin and Range" posterior a 10 Ma. Gans (1997) indica una extensión principal orientada ~N 50° E con fallas normales NW en el Oligoceno-Mioceno, respaldada por secuencias fechadas entre 26 y ~20 Ma. Posteriormente, ocurre una extensión con tendencia NS a NNW entre ~20 y 17 Ma con fallas normales de alto ángulo ampliamente espaciadas, las cuales cortan a las rocas previamente falladas e inclinadas; por ultimo una marcada extensión ocasionada por el protogolfo en Sonora ocurrió ~27 y 12 Ma, mientras restos de la placa Farallón todavía estaban subduciéndose (Gans,1997). McDowell et.al., (1997) concluyeron que la extensión más temprana en la porción centro-sur del Estado de Sonora ocurrió a los 27 Ma, la cual empezó en la mayoría de las cuencas a los 24 Ma y se generalizó en toda el área a los 20 Ma. Este tiempo es generalmente coincidente con el desarrollo de los "Metamorphic Core Complex" en el norte de Sonora y parte de Arizona, Nevada y Utha y con el arco magmático de 24 a 15 Ma en el oeste de Sonora y Baja California. Estos últimos autores, basados en el análisis de contactos concordantes, edad de la Formación Báucarit y Formación Lista Blanca indican que no necesariamente ocurrieron dos periodos distintos de extensión, si no que existe una continuidad en los procesos extensivos hasta el Mioceno tardío, lo cual es evidenciado por la sedimentación y rotación de estratos más jóvenes a 11.5 Ma. Durante este tiempo la extensión fue contemporánea con la evolución inicial de la provincia extensional del Golfo de California. La mayor parte del tiempo Terciario, la deformación estuvo asociada principalmente a esfuerzos de tensión que continúan hasta el Cuaternario.



## VI.- GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Dentro del contexto geológico-tectónico del área de estudio se encuentran diferentes tipos de mineralizaciones como son: Pórfido de cobre, brechas de cuarzo turmalina, vetas de Au-Ag y skarns de Fe y Cu-Pb-Zn. Los primeros están ampliamente distribuidos en esta región del centro de Sonora y los más representativos de este tipo corresponderían a los pórfidos de cobre de Cuatro Hermanos (CH) y Suaqui Verde (SV) descritos por Zürcher (2002) y Flores-Vásquez (2006) respectivamente. En ambos depósitos sus facies de alteración y mineralización son controlados y limitados por estructuras NE 80° SW (CH) y NE 60-70° SW (SV) y hospedados dentro de las rocas de la Formación Tarahumara. La intrusión del batolito laramídico permitió el desarrollo de zonas de metamorfismo de contacto en rocas volcánicas de composición andesítica en CH y el desarrollo de cuerpos de skarns en horizontes delgados de caliza en SV, tales como los depósitos de El Garabato, El Sapo, El Echal y otros más. Hacia la parte norte y sur del área, se observan brechas de cuarzo-turmalina que muestran una fuerte conexión a cúpulas de los granitoides laramídicos. Estas estructuras brechoides tienen una forma poco elíptica tabular con orientaciones preferenciales NE 40-70° SW, desarrolladas en las zonas de contacto entre los intrusivos y la Formación Tarahumara o con rocas del Grupo Barranca como es el caso de la brecha La Ventana descrita por Flores-Vásquez (2001). Por otro lado al noreste del pórfido SV se tiene un sistema de cuerpos vetiformes de cuarzo orientados NE 70° SW a E-W con poco desplazamiento por fallamiento post-mineral NW 40-50° SE, las cuales están desarrolladas dentro del miembro medio de la Formación Tarahumara.

Todos estos tipos de mineralización, aparentan guardar una relación genética y espacial durante la evolución magmática en esta región la cual parece haberse registrado en varias etapas, iniciando con el emplazamiento de los cuerpos batolíticos, formación de las brechas de cuarzo-turmalina, seguida por los cuerpos de skarn y vetas, estas últimas tal vez relacionadas con la introducción del pórfido cuarzo-feldespático que dio origen al sistema de pórfidos de cobre.



Los depósitos de skarn de hierro que afloran en esta zona, en particular "El Garabato", es el objetivo principal de estudio de este trabajo, por lo que a continuación se hace la descripción de las rocas circundantes a este skarn de hierro, seguida de una descripción donde se enfatiza su composición mineralógica, texturas, alteración y disposición espacial del skarn El Garabato (Figura 5).

### **VI.1.- Formación Tarahumara**

De manera general, las rocas más antiguas que afloran en el área, consisten en un paquete de rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Tarahumara la cual ha sido dividida en miembro inferior, medio y superior por McDowell et al (2001) y Flores-Vásquez (2006). El miembro inferior tiene un espesor estimado de 380 m y está compuesto en su base por flujos con textura microporfídica, afanítica a veces traquítica y/o seriada de composición andesítica, andesita-basalto, andesita-dacita, conteniendo hacia la parte media intercalaciones de lava dacítica porfídica con 1-2% de cuarzo modal en forma de ojos. Este miembro en su parte superior está compuesto por rocas piroclásticas, principalmente tobas holocristalinas dacíticas y tobas cristalolíticas, que son sobreyacidas concordantemente por un estrato de caliza de aproximadamente 8 m de espesor. Este horizonte calcáreo se observa parcialmente recristalizados formando cuerpos de skarn de hierro o skarnoides, con rumbo NE 40° SW y echados de 35-40° SE, prolongándose hasta por 400 m aproximadamente de longitud. McDowell et.al (2001) obtuvieron edades U-Pb en zircones separados de una ignimbrita de composición dacítica (?) que sugieren  $89 \pm 0.8$  Ma, la cual se ubica en la parte basal de este miembro, Flores-Vásquez (2006), ver Figura 5.

En forma concordante y encima del horizonte de calizas, se encuentra el miembro medio, que al igual que el miembro inferior tiene una longitud de varios kilómetros en dirección de su rumbo N-NE. El miembro medio puede ser clasificado en tres unidades, divididas así y fácilmente diferenciables por su carácter textural y mineralógico dominante.



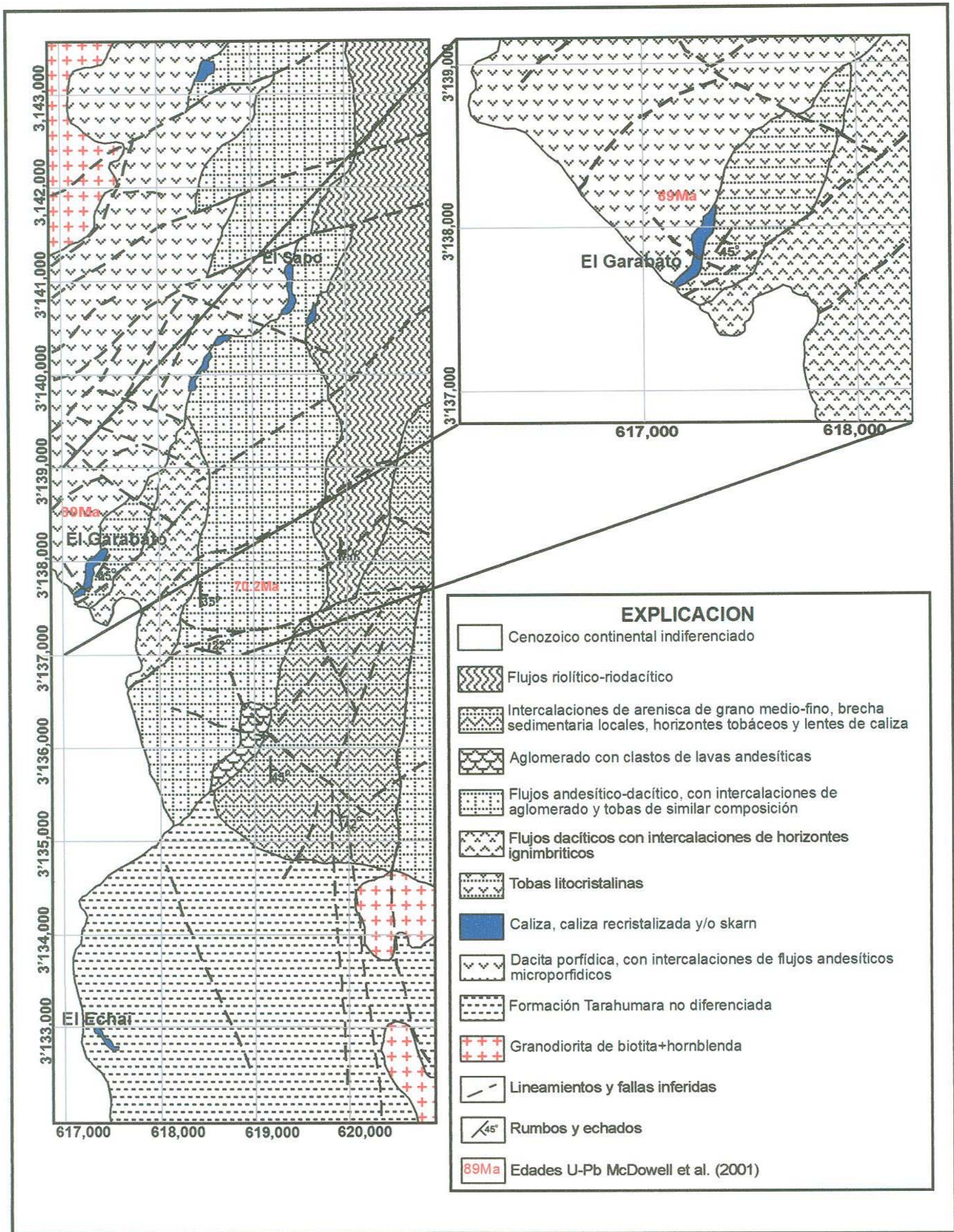


Figura 5.- Mapa geológico 1:50,000 modificado de Flores-Vásquez (2006).



La primer unidad de este miembro tiene un espesor aproximado de 320 m y consta predominantemente de rocas piroclásticas, representadas por tobas líticas, cristalinas y menor proporción de flujos porfídicos de composición dacítica y andesítica; la segunda unidad consta de 600 m de espesor y está conformada por intercalaciones de flujos de composición dacítica-andesítica con presencia de tobas soldadas del tipo ignimbritas de hasta 60 m de espesor. Esta unidad puede incluir flujos porfídicos masivos de composición andesítica intercalados y al final se observan afloramientos de aproximadamente 50 m de espesor constituidos por autobrechas con fragmentos de flujos andesíticos porfídicos. La última unidad puede alcanzar 1,000 m de espesor con una fuerte presencia de flujos porfídicos masivos principalmente de composición andesítica-dacítica tobas cristalinas y holocristalinas de composición andesítica-dacítica, y brechas de composición similar. Generalmente se tienen brechas volcánicas aflorando de forma masiva por más de 180 m de espesor al final del miembro medio, como ha sido sugerido por Flores-Vásquez (2006).

El miembro superior puede alcanzar cerca de 500 m de espesor máximo y está conformado por flujos de composición riodacítica a riolítica, con esporádicas intercalaciones de toba riolítica. Los flujos riolíticos son generalmente de textura porfídica a veces traquítica con microlitos de feldespatos potásico y plagioclasa, en partes con cuarzo modal, con estructuras de flujo en parte involuta a escala de afloramiento. McDowell et.al (2001) fecharon inicios de este miembro superior designando en este estudio una edad  $70.2 \pm 0.6$  Ma en una toba riolítica utilizando el método U-Pb en zircones.

Las rocas que circundan al skarn de hierro El Garabato, corresponden a la parte superior del miembro inferior y parte inferior del miembro medio los cuales están compuestos de flujos porfídicos de composición andesita-dacita principalmente y en menor proporción por rocas piroclásticas. Generalmente tienen una dirección NNE-SSW con echados hacia el SE del orden de 30-60°, aunque en la mayoría de las veces no presentan rasgos estructurales que definan bien su posición. Sin embargo, ellas guardan un fuerte paralelismo con el cuerpo de skarn, el cual presenta una posición fácilmente distinguible (Figura



5). Dado que el skarn El Garabato ha sido desarrollado sobre un delgado horizonte compuesto de sedimentos finos del tipo limonita y material calcáreo (caliza) depositados entre el miembro inferior y medio, la descripción del área de estudio se inicia con la parte superior del miembro inferior, se continúa con la zona de sedimentos, y se finaliza con la parte inferior del miembro medio. Los nombres de miembro inferior y medio son tomados y referidos al escrito de Flores-Vásquez (2006), solo que en este caso se hace una definición y descripción mas a detalle, dividiendo los miembros en unidades, dado la escala y tamaños de la zona de skarn. Una sección simplificada de la estratigrafía al bajo y al alto del cuerpo de skarn, es dada a continuación. (Figuras 6 y 4)

#### **VI.1.1.- Miembro Inferior**

Este miembro se encuentra localizado en la parte baja del cuerpo de skarn de hierro El Garabato (Figuras 6 y 7) y representa aproximadamente los últimos 300 m de la parte superior del miembro inferior para la Formación Tarahumara descrita por Flores-Vásquez (2006). Se compone de tres unidades, las cuales presentan una pseudos-estratificación con rumbos variados de NE 10-15° SW y echados de 30-40° hacia el SE. Para una mejor apreciación y estudio, la parte superior del miembro inferior se subdividió en unidad inferior, media y superior, denominadas como flujo andesítico, flujo andesítico con biotita y flujo andesítico-dacítico respectivamente.

##### **VI.1.1.1.- Flujo andesítico**

Esta unida aflora en la parte más al oeste-suroeste del área cartografiada a detalle y mantiene un espesor promedio de 170 m, prolongándose hacia la parte norte por más de 200 m dentro del área. Está cubierta en su lado oeste por gravas terciarias y descansa en conformidad debajo de la unidad de andesita con biotita. En superficie aflora de manera masiva, con un color verde claro-oscuro y textura fina porfídica, en donde se alcanzan apreciar cristales euhedrales-subhedrales de plagioclasa, epidota, clorita, gránulos diseminados de magnetita y una silicificación que varía de débil a moderada, con la presencia



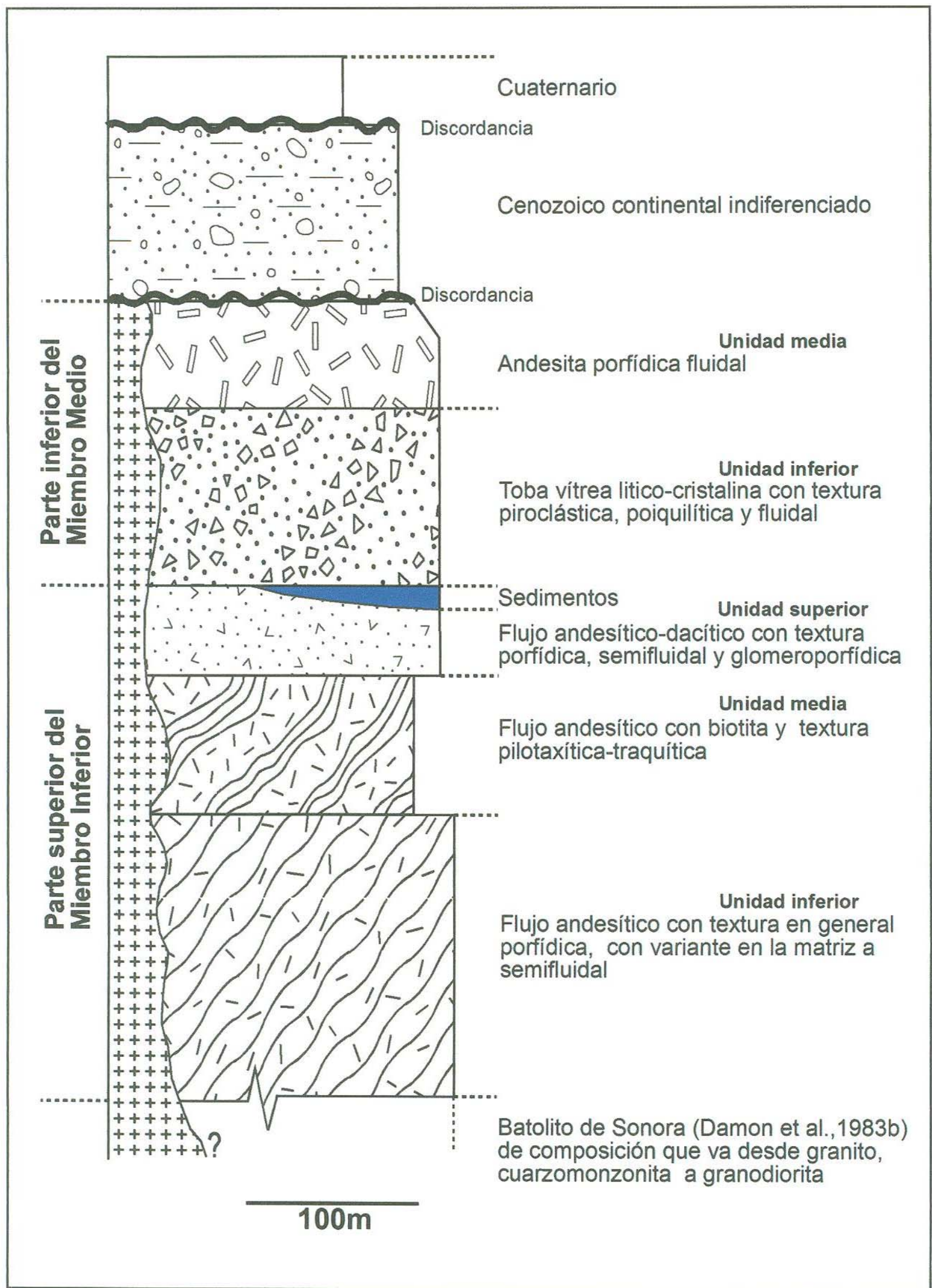


Figura 6.- Columna estratigráfica del área de estudio.



de pequeños cristales de actinolita-tremolita a lo largo de delgadas y diminutas fracturas.

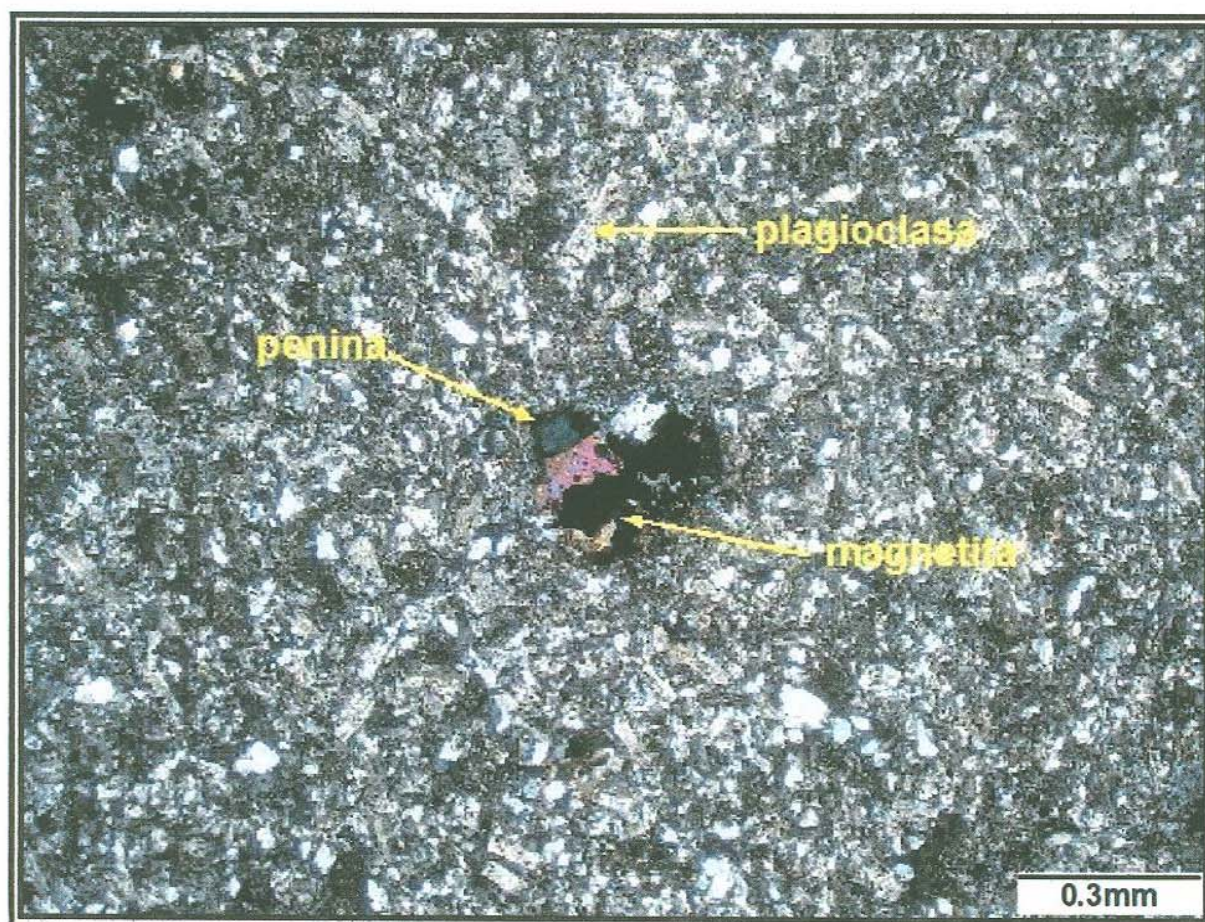
En sección delgada presenta una textura en general porfídica, con una variante en la matriz a semifluidal. Presenta fenocristales de feldespato (~2-3%) subhedrales de 0.4 mm de largo, ligeramente orientados y sostenidos en una matriz pilotaxítica compuesta de pequeños cristalitas de plagioclasa semi-orientados y en contacto unos con otros, los cuales pueden alcanzar mas del 60% total de la roca. De manera intersticial entre los cristalitas de plagioclasa, se observan escasos cristales anhedrales de cuarzo los cuales parecen ser producto de una incipiente silicificación que afecta a toda la lámina. Se observan esporádicas manchas de clorita acompañadas con magnetita y hematita, las cuales podrían corresponder a ferromagnesianos ya alterados. También se tiene de forma intersticial, cristales subhedrales-anhedrales de calcita menores de 0.2 mm (Foto 1). Por su textura y composición carente de cuarzo modal, esta roca puede clasificarse como un flujo andesítico.

#### **VI.1.1.2.- Flujo andesítico con biotita**

Esta unidad aflora en la parte oeste del área cartografiada a detalle, tiene un espesor aproximado de 80 m con una extensión de más de 300 m hacia la parte norte del área, descansando en conformidad debajo del flujo andesítico-dacítico. El afloramiento se presenta de manera masiva de color verde oscuro con textura afanítica principalmente, con variante a fluidal, con cristales de magnetita diseminados en gran parte de la roca y escasos cristalitas subhedrales de ferromagnesianos y feldespatos ligeramente orientados.

En sección delgada se presenta como un flujo de composición andesítica, con textura principalmente pilotaxítica-traquítica y en ocasiones glomeroporfídica, compuesta principalmente por fenocristales de plagioclasa y feldespato potásico. Los cristales de plagioclasa son subhedrales-anhedrales, menores de 1.5 mm, y distribuidos en un 60% (por la alteración que presentan fue difícil estimar su composición); en cambio, los cristales de feldespato potásicos son anhedrales con tamaños menores de 1 mm, conformando el 30%





**Foto 1.-** Microfotografía de la muestra PR07-6 perteneciente a la unidad inferior del miembro Inferior, mostrando un cristal de ferromagnesiano (biotita?) alterado a clorita (penina) y magnetita, sostenidos en una matriz pilotaxítica de cristales de plagioclasa y aislados cristales de cuarzo. LP, 4X.



del volumen de la roca.

Se observan fantasmas de cristales de posible ferromagnesianos, probablemente hornblenda?, de forma longitudinal y basal de 0.2 y 0.4 mm respectivamente, algunos de ellos cloritizados y distribuidos en un 8% del volumen de la roca. Se tienen escasos cristales subhedrales de turmalina chorlo? menores a 0.7 mm, distribuidos en cantidades no mayores de 2%. Todos estos cristales se encuentran dentro de una pasta compuesta por microlitos de plagioclasa>>feldespatos potásico menores a 0.1 mm en tamaño. Es importante resaltar en esta sección la presencia de cristales de biotita muy fina menores o igual a 0.01 mm de diámetro, fuertemente distribuida de manera diseminada en gran parte de la lámina.

Como minerales de alteración se tiene una moderada-intensa biotitización secundaria reemplazando total o parcialmente a cristales ferromagnesianos de probable hornblenda?, acompañada de una silicificación moderada afectando parcialmente a cristales de plagioclasa y feldespato potásico y débil presencia de magnetita diseminada (biotita>>sílice>magnetita) (Fotos 2 y 3) y Figura 7.

#### **VI.1.1.3.- Flujo andesítico-dacítico**

Esta unidad al igual que las otras dos unidades aflora en la parte oeste del área cartografiada a detalle en este trabajo, tiene un espesor aproximado de 50 m con extensión aproximada de 300 m hacia la parte norte del área cartografiada y se encuentra de forma concordante al flujo andesítico con biotita. En superficie se presenta de manera masiva de color gris-verde claro, porfídico principalmente con cristales subhedrales de plagioclasa de 2-4 mm de largo del 15-20% aproximadamente, sostenidos en una matriz fina con microlitos de plagioclasa posiblemente silicificados y algo de magnetita diseminada.

En sección delgada esta unidad se presenta como un flujo de composición andesítica-dacítica con textura porfídica principalmente, con variante a glomeroporfídica y semifluidal constituida principalmente por cristales euhedrales-subhedrales de oligoclasa menores a 3 mm, parcial y totalmente



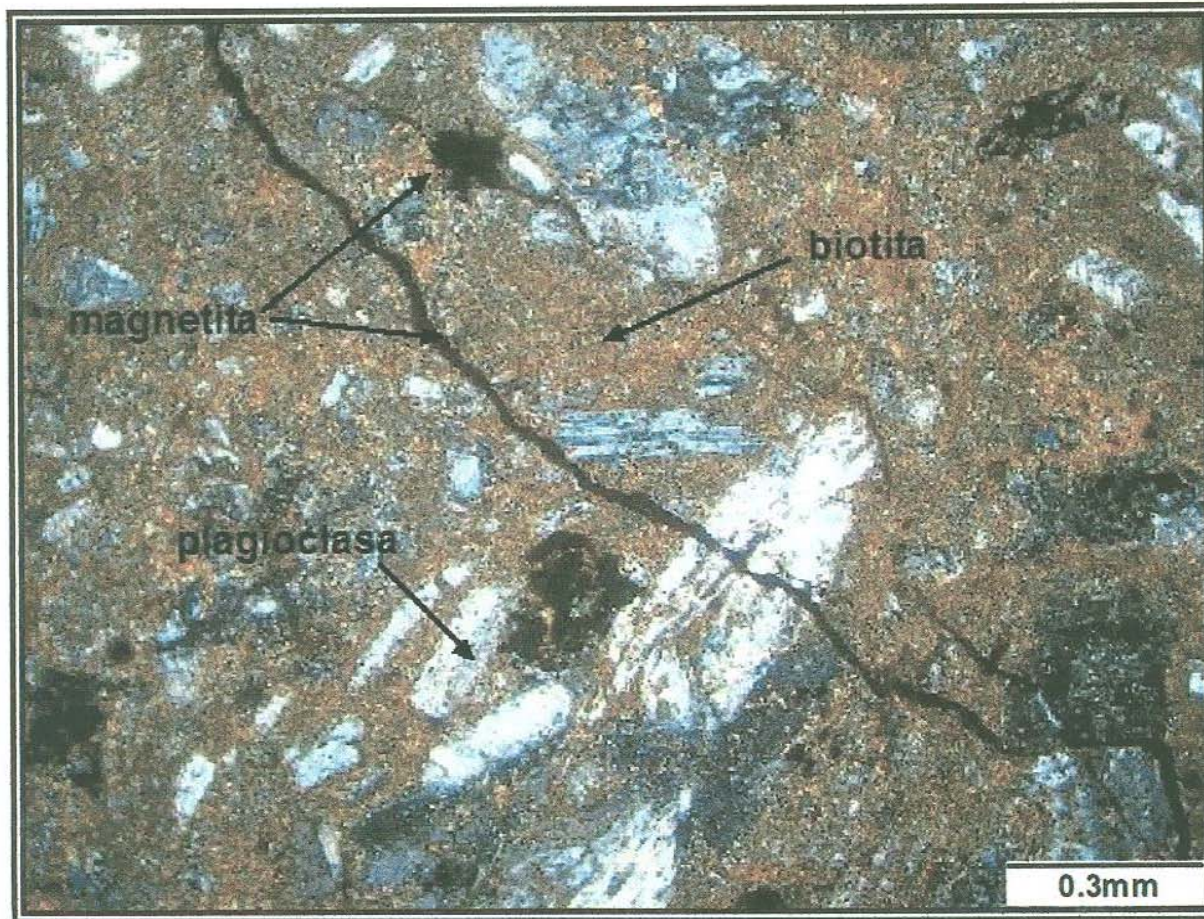


Foto 2.- Microfotografía de la muestra PR07-7 perteneciente a la unidad media del miembro inferior. Nótese la biotita secundaria en gran parte de la lámina cortada por una vetilla de magnetita. LP, 10X.

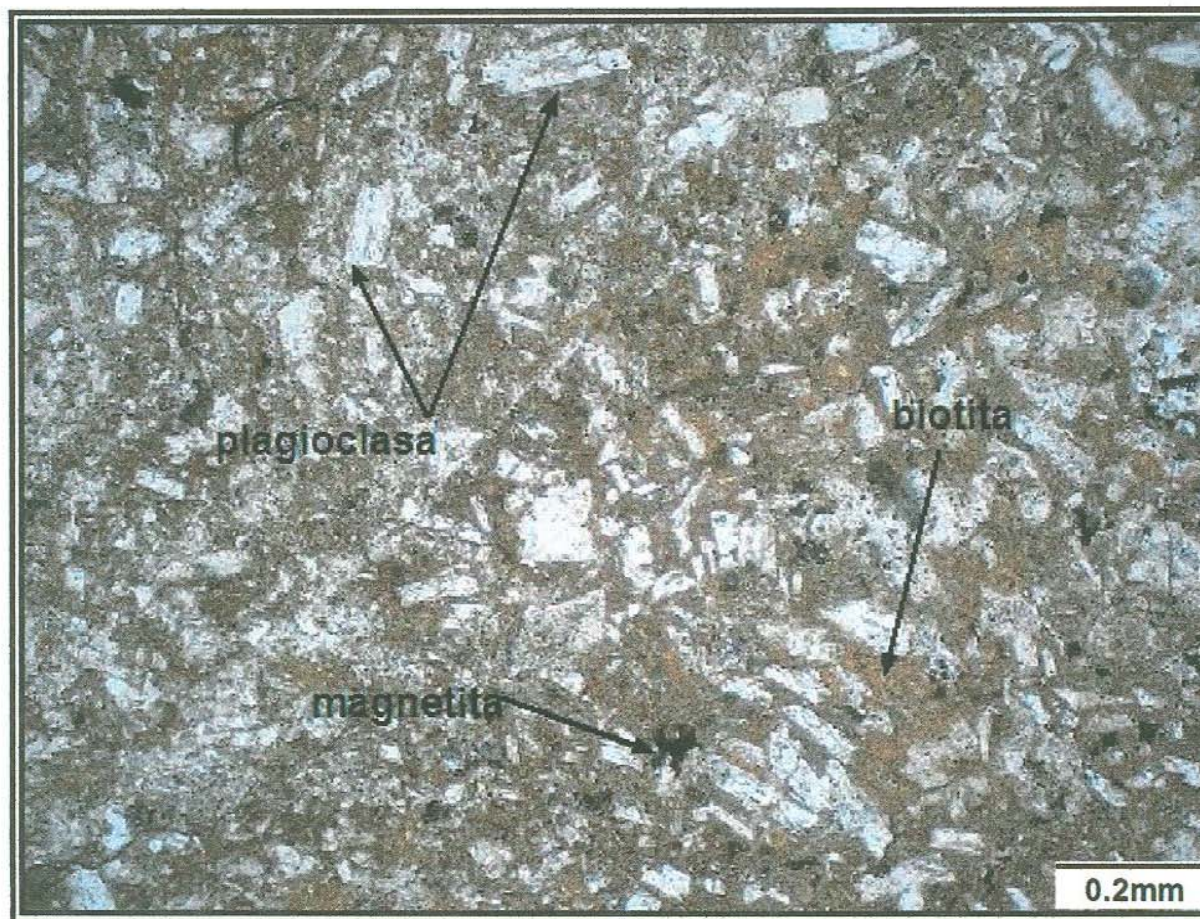


Foto 3.- Microfotografía de la muestra PR07-7, mostrando la textura pilotaxítica y biotitización de la roca. LN, 4X.



reemplazados por sílice, alcanzando un 30% del volumen total de la roca. Por otro lado se observan cristales subhedrales de biotita (~10%) menores a 2 mm en su mayoría cloritizados a penina, así como parcialmente reemplazados por sílice. Se observan escasos cristales subhedrales-anhedrales de epidota (~2%) y hornblenda (~8%) menores a 1 mm de largo, así como cristales aislados de cuarzo modal (~2%) menores a 0.3 mm presentando algunos de ellos golfos de corrosión; también pobremente distribuidos se cuenta con la presencia de algunos cristales subhedrales de turmalina (~3%) menores de 0.5 mm y esporádicos minerales opacos de magnetita-hematita en un 5%. Dichos cristales se encuentran sostenidos dentro de una matriz microcristalina silicificada en su mayoría distribuida en un 40% aproximadamente.

Como minerales secundarios de alteración se tiene una moderada-intensa silicificación en gran parte de la lámina, débil-moderada clorita-penina en algunos cristales ferromagnesianos y débil magnetita-hematita (Fotos 4 y 5) y Figura 7.

#### **VI.1.2.- Sedimentos**

Sobreyaciendo concordantemente a las rocas volcánicas descritas líneas arriba, se tiene un horizonte calcáreo que ha sido parcial o totalmente reemplazado por el skarn de hierro El Garabato y el cual alcanza un espesor de 4-20 m, aunque en promedio podría ser del orden de 10 m. Claramente este horizonte se encuentra interestratificado entre el miembro inferior y medio de la Formación Tarahumara y se extiende de una manera mas o menos regular por aproximadamente 400 m siguiendo un rumbo variable de NE 10-20° SW y echados de 30-60° al SE.

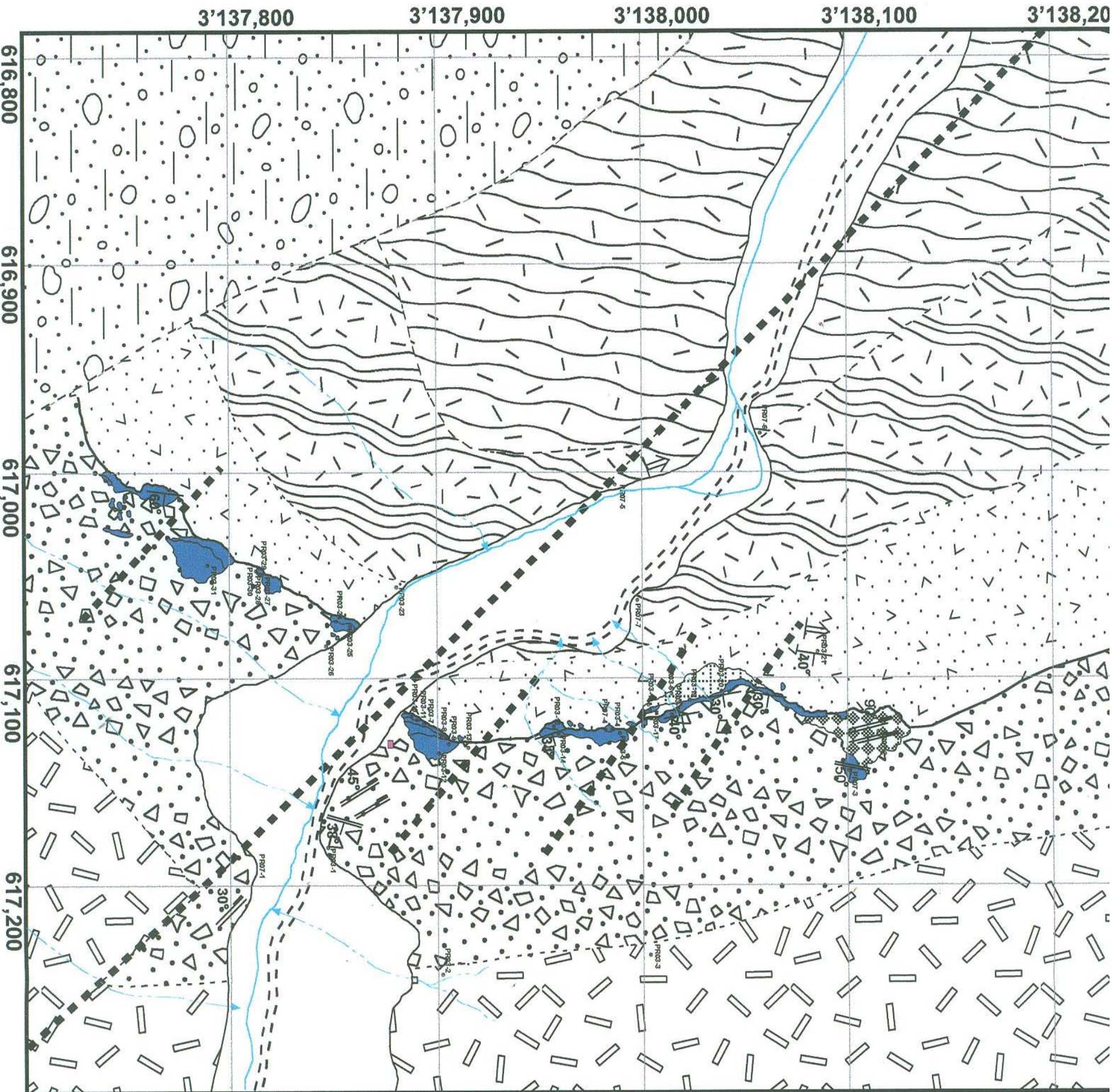
Este horizonte calcáreo está conformado, en su mayoría, por estratos de caliza recristalizada, caliza con bandas o nódulos de pedernal y caliza laminada (Foto 6). En ninguna de las láminas delgadas y muestras de superficie se observó evidencia alguna de presencia de fósiles, que pudieran ayudar a establecer con exactitud el ambiente de formación de estos cuerpos calcáreos; sin embargo, estudios realizados por Flores-Vásquez (2006), sugiere que estas

Para una mejor apreciación y estudio esta parte interior del miembro medio, se subdividió en unidad inferior y media, denominadas como toba vítrea lítico-cristalina y andesita porfídica fluidal respectivamente.

#### **VI.1.3.1.- Toba vítrea lítico-cristalina**

Esta unidad se encuentra de forma concordante a los sedimentos, aflora en la parte este-sureste del área cartografiada, con un espesor aproximado de





**FORMACIÓN TARAHUMARA**

**Miembro Inferior**

**Miembro Medio**

- indiferenciado
- Unidad media
- Andesita porfídica
- Unidad inferior
- Toba vítrea lítico-cristalina
- Caliza con bandas de pedernal, caliza recristalizada y skarn
- Unidad superior
- Flujo andesítico-dacítico
- Unidad media
- Flujo andesítico con biotita
- Unidad inferior
- Flujo andesítico
- Silicificación
- Argilización
- Estructuras**
- Lineamientos y fallas inferidas
- Fracturamiento
- Pseudo-estratificación
- Rumbo y echado de estratificación
- Rumbo y echado de flujos
- Arroyos
- Caminos
- Muestra petrográfica

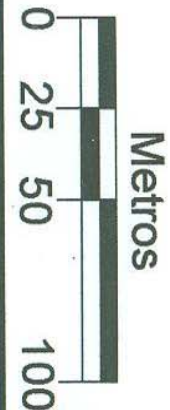


Figura 7.- Mapa geológico-estructural del área de estudio.





**Foto 6.-** Horizonte calcáreo donde se pueden apreciar algunas bandas irregulares de pedernal con espesores variados que van desde ~ 2-4 cm de ancho. Aunque no es claro en la foto, la parte gris de estos horizontes calcáreos, se encuentra fuertemente recristalizada.



100 m y extendiéndose hacia la parte norte por más de 350 m, manteniendo un aparente paralelismo con los horizontes calcáreos que contiene el cuerpo de skarn. En superficie estas rocas se presentan de forma masiva, presentando una textura principalmente piroclástica con variante a fluidal, con fragmentos de color oscuro observándose algunos de color más claro de probable andesita y dacita? con diámetros menores a 5 cm. Dichos fragmentos presentan texturas variadas que van desde afanítica, porfídica y fluidal, alcanzando un 40% del volumen total de la roca. Esta fracción lítica es sostenida en una matriz tobácea de color claro, lográndose apreciar algo de pseudo-estratificación en bandas con presencia de epidota, algunos ferromagnesianos cloritizados  $\pm$  epidotizados y una moderada silicificación (Foto 7).

En sección delgada la unidad inferior se presenta como una toba vítrea lítico-cristalina presentando una textura principalmente piroclástica ligeramente fluidal, en la que se observan cristales de plagioclasa menores de 1 mm de largo y parcial o totalmente reemplazados por sílice que hace difícil determinar su composición. Así también, se presentan algunos cristales de hornblenda menores de 0.7 mm reemplazados por sílice y en algunas partes cloritizados a penina, con formas subhedrales-anhedrales y constituyendo un 25 % de la muestra. Se tienen escasos cristales de cuarzo (<1%), con golfos de corrosión y débilmente fracturados, acompañados de cristales aislados de epidota menores a 0.1 mm, con algunos minerales opacos de magnetita. Por otro lado, se tiene la presencia de aproximadamente un 15% de fragmentos de composición andesítica-dacítica menores de 1 mm de diámetro, con formas bien definidas, aunque algunos presentan sus bordes un poco difusos quedando estos como fantasmas; regularmente, presentan una textura incipiente de flujo con variante a traquítica y en ocasiones afanítica, sostenidos en una matriz en su mayoría vítrea  $\pm$  silicificada donde se observan espículas y esferulitos productos de la desvitrificación de la roca, distribuida en un 60% dentro de la muestra. Como alteración presenta una débil-moderada silicificación y una débil cloritización a penina (Fotos 8 y 9).



### **VI.1.3.2.- Andesita porfídica fluidal**

Esta unidad se encuentra aflorando en la parte más al este del área cartografiada a detalle en este trabajo, tiene un espesor aproximado de 60 m extendiéndose hacia la parte norte. Se encuentra de forma concordante a la toba vítrea lítico-cristalina. Estas rocas afloran de forma masiva con un color verde claro, con textura porfídica con variante a fluidal, se observan algunos cristales subhedrales de plagioclasa menores de 6 mm, cristales subhedrales de anfíboles cloritizados gran parte de ellos, ocupando del 10-15% del volumen de la roca y escasos cristales de cuarzo, sostenidos dentro de una matriz fina de color claro.

En sección delgada esta unidad se presenta como una andesita de textura porfídica con variantes de poiquilítica, fluidal y glomeroporfídica, compuesta principalmente por fenocristales euhedrales-subhedrales de oligoclasa-andesina. Los cristales de plagioclasa tienen un tamaño que varia entre 1 a 4 mm de longitud distribuidos en un 35%; por otro lado se tiene un 20% de fenocristales euhedrales-subhedrales de hornblenda menores de 4 mm de largo, mostrándose en cortes longitudinales así como también en cortes basales, con tamaños menores a 0.5 mm, con presencia de clorita  $\pm$  epidota en algunos de ellos. Se observan algunos cristales subhedrales-anhedrales de actinolita (2%) menores 1 mm y epidota menores de a 0.05 mm en un 2%, con escasos granulitos de esfena? y cristales de magnetita en (1%). Toda esta fracción cristalina es sostenida en una matriz microcristalina con incipiente flujo compuesta por microlitos de plagioclasa, alcanzando un 40% del volumen total de la roca. Como alteración presenta una moderada cloritización a penina  $\pm$  epidotización en cristales ferromagnesianos principalmente, acompañada de una débil silicificación (Foto 10).





**Foto 7.-** Fotografía de un afloramiento perteneciente a la unidad inferior del miembro medio, de la Formación Tarahumara donde se pueden observar algunos fragmentos angulosos de roca de composición andesítica-dacítica.





Foto 8.- Microfotografía de la muestra PR03-1 perteneciente a la unidad inferior del miembro medio, mostrando una toba vítrea lítico-cristalina nótese las espículas de vidrio abundantes en esta sección. LN, 4X.

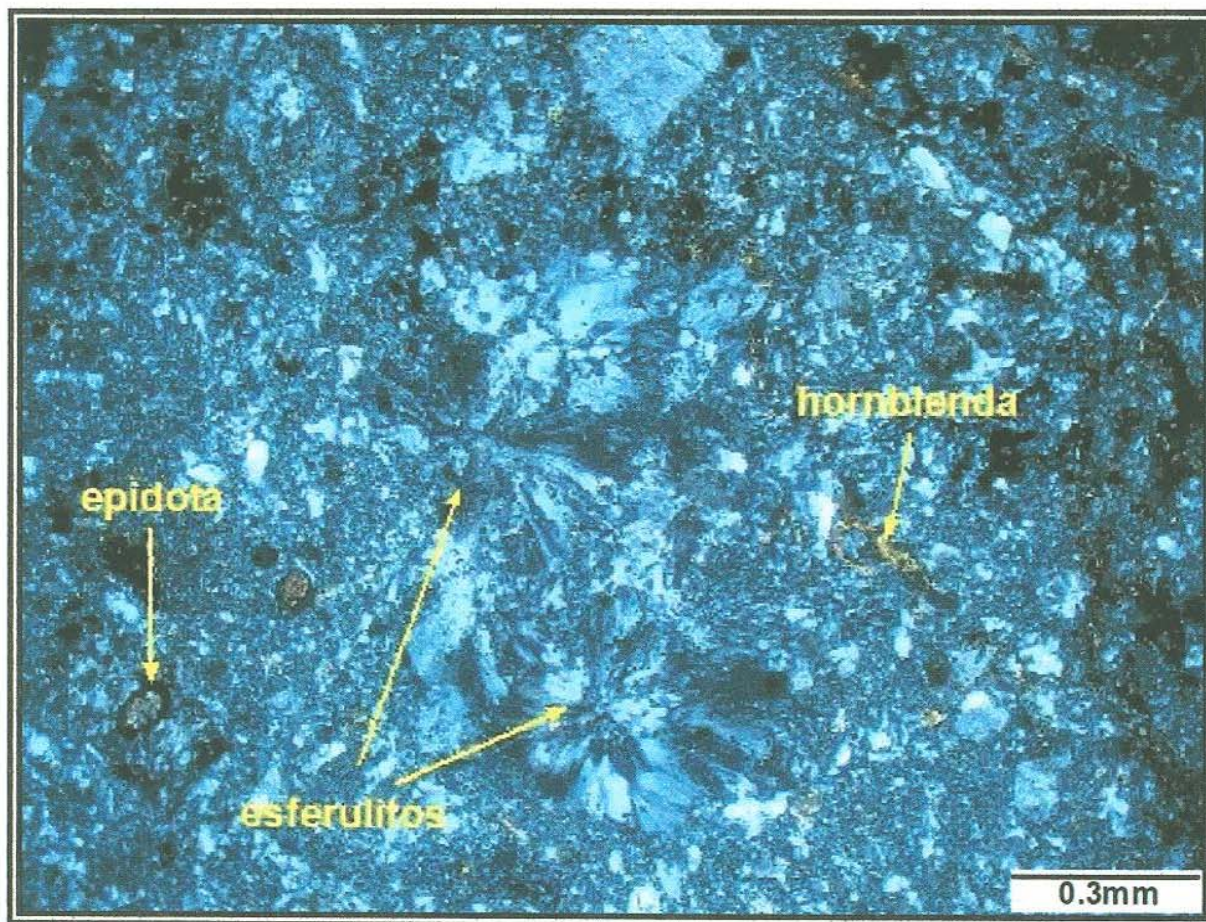


Foto 9.- Microfotografía de la muestra PR03-1 mostrando esferulitos producto de la desvitrificación de la roca. LP, 10X.



## **VI.2.-Cenozoico continental indiferenciado**

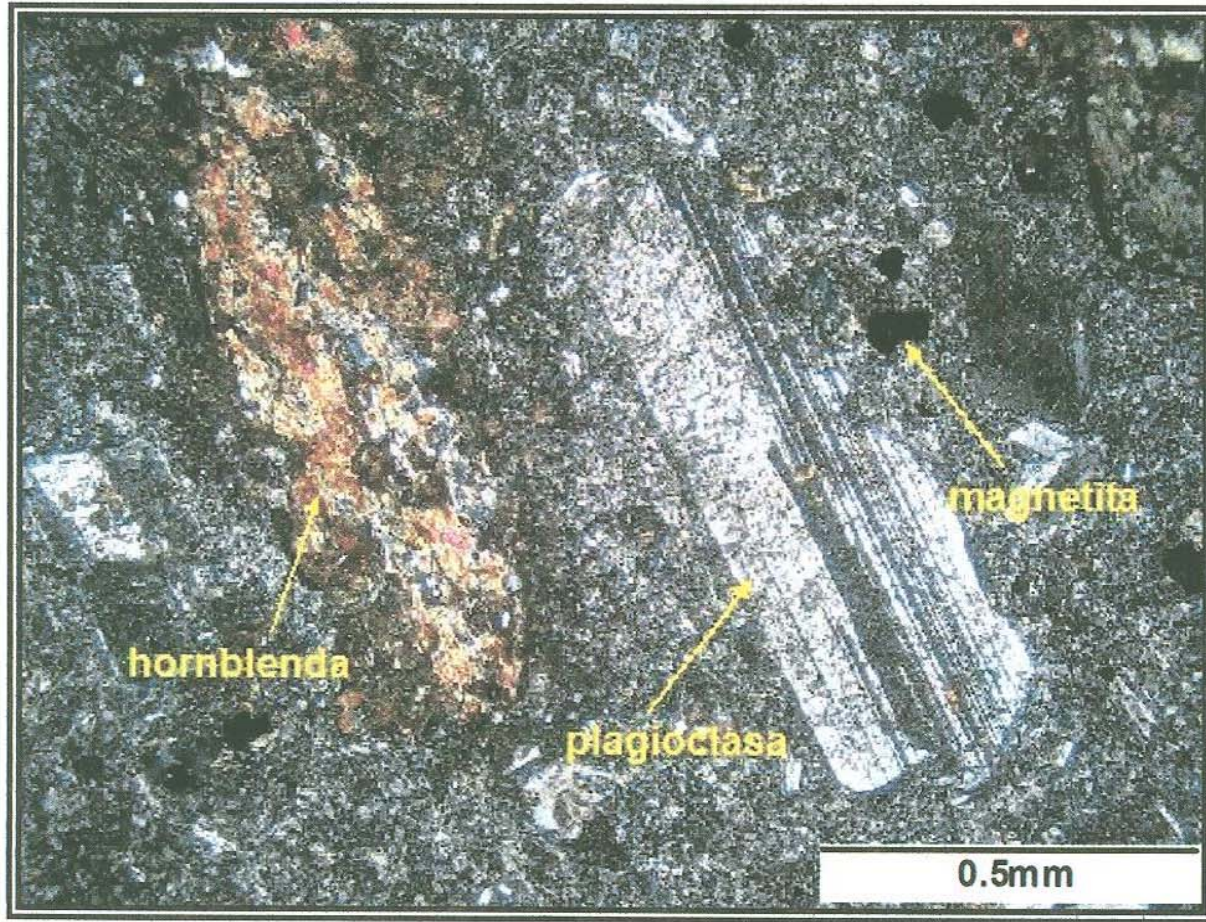
Este término se aplica para designar el depósito de un conjunto de materiales clásticos, gravas y arenas, rellenando a los grandes valles, depresiones y partes bajas del centro de Sonora. Esta unidad litológica, aflora en un gran número de localidades, con espesores muy variados los cuales parecen corresponder a una variedad de ambientes de depósito, como aquellos formados en flancos de montañas ("pie de monte"), abanicos aluviales, depósitos de talud y planicie de inundación. Sin embargo, los sedimentos a partir de abanicos aluviales rellenando extensivas cuencas son los más frecuentes dentro del área de estudio y pueden ser reconocidas como gravas regularmente mal consolidadas.

El espesor de estas gravas es muy variable, las cuales pueden alcanzar mas de 250 m, con una amplia distribución en el área de estudio, principalmente rellenando cuencas alargadas en una dirección norte-sur y NW-SE, las cuales coinciden con fallas en la misma dirección, producto de una fase distensiva, seguramente atribuida al Terciario superior.

Estos sedimentos clásticos están constituidos por gravas escasamente consolidadas, con fragmentos de unos cuantos cm, hasta más de 20 y 30 cm de diámetro, presentándose de angulosos a subangulosos, con una variedad de tonos y colores que van desde un gris claro a café grisáceo y pardo rojizo, dependiendo de la cantidad y composición de los fragmentos de roca; así como también, la presencia y características del material arcilloso. Los componentes, que varían de tamaño desde arcillas hasta arenas y fragmentos, son muy variados, existiendo un factor controlador en el entorno geológico y la distancia de la fuente de origen, como ha sido sugerido por Franco-Martínez (1994).

De esta manera, es muy frecuente observar la presencia y predominio de fragmentos principalmente de la Formación Tarahumara, Grupo Barranca, Lista Blanca y Báucarit, como ha sido comentado por Franco-Martínez (1994). Sin embargo, dentro del área de estudio solo se encuentran rocas pertenecientes a la Formación Tarahumara y en menor proporción a granitoides productos de la orogenia Larámide que afloran en los alrededores, todos ellos incluidos dentro





**Foto 10.-** Microfotografía de la muestra PR03-2 perteneciente a la unidad media del miembro medio, mostrando una andesita con textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol dentro de una matriz fina microcristalina. Note como los cristales de anfíbol han sido alterados a clorita + epidota. LP, 4X.



de una matriz areno – arcillosa. En algunas localidades se tiene la presencia de estratos más arenosos, con una compactación mayor y en donde los fragmentos presentan una redondez mas desarrollada.

Esta secuencia de gravas, cubre discordantemente a todas las unidades existentes en el área, con mayor frecuencia a cubrir las rocas en el lado oeste-suroeste del área de estudio (Figuras 6 y 7). Estas gravas son sobreyacidas, de manera discordante, por aluviones cuaternarios de origen fluvial.

El origen de estas gravas se relaciona a un ambiente continental, formado por procesos erosivos de las partes altas, que generalmente delimitan a la cuenca o parte baja donde se depositaron; además, su distribución y continuidad no es tan homogénea como parecería, ya que en algunas partes se observa como cubre a conglomerados mal clasificados, con fragmentos exclusivamente formados de rocas volcánicas sin la presencia de rocas graníticas, lo cual denota una evolución tectónica-estructural de esta región del centro de Sonora mas compleja que la aquí descrita.

Por su posición dentro de la columna estratigráfica, estos sedimentos son considerados de edad Cuaternaria, específicamente Pleistoceno (Figura 6).

## **VII.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SKARNS DE HIERRO**

Las características geológicas, mineralógicas, geoquímicas y texturales de los depósitos de skarn que se dan a continuación, se tomaron de una serie de artículos y libros escritos por personas reconocidas en el estudio de este tipo de yacimientos, destacando los de Einaudi et al., (1981); Einaudi y Burt, (1982), Meinert, (1998); así mismo, se incluye la recopilación bibliográfica realizada por Pérez-Segura (2006) en lo que respecta a este tipo de depósitos.

La característica de los skarns, a diferencia de otros tipos de depósitos minerales, es la presencia de una ganga de grano grueso generalmente rica en Fe, así como la presencia de una mezcla de silicatos de Ca-Mg-Fe-Al, formados por procesos metasomáticos a temperatura relativamente alta. Así, la mineralogía que define a una roca como skarn es una variedad de minerales



calcosilicatados con predominio de granate y piroxeno, como ha sido definido por Einaudi et al., (1981), Meinert (1992).

El proceso metamórfico que forma los skarns, también incluye la formación de hornfels calcosilicatado a partir de sedimentos pelítico-calcareos con minerales similares a los skarns, pero formados a partir de metamorfismo isoquímico (Figura 8); mármol como secuencia de la cristalización de la caliza pura; mármol de wollastonita a partir del metamorfismo de una caliza sucia. También se tiene una roca del tipo skarnoide, un término que se refiere a rocas de textura fina, bandeadas, pobres en Fe y que reflejan, al menos en parte, la composición del protolito (Figura 9).

Un punto importante durante la formación de este tipo de depósito, es que la roca transformada a skarn puede ser tanto la roca intrusiva como las rocas sedimentarias intrusionadas, denominándose endoskarn para el primer caso y exoskarn para el segundo (Figura 10). Por otro lado, de acuerdo a la composición original de las rocas carbonatadas o magnesianas el skarn producto puede resultar de composición cálcico o magnesiano. También se habla de skarn dístales como aquellos formados lejos de la fuente de los fluidos o próximos para referirse a los skarns en zonas de contacto con cuerpos intrusivos. Recientemente ha nacido el término de skarn reducidos y oxidados (Einaudi et al, 1981, Meinert, 1998); los cuales son referidos de acuerdo a su mineralogía, como aquellos ricos en piroxeno o ricos en granate respectivamente. Otros términos muy comunes, tales como skarn prógrado y retrogrado, son utilizados de acuerdo con la evolución espacio-temporal del skarn. Esto es, se habla del producto de un estadio inicial de mayor temperatura y producción de minerales como granate y piroxeno para el primero y tardío, de menor temperatura, presencia de agua y producción de minerales como actinolita-tremolita, clorita, epidota, cuarzo, calcita etc., para el segundo.

Otra forma práctica de clasificar los skarns, es de acuerdo con el contenido principal del metal económico Einaudi et al. (1981), de tal forma que han sido clasificados en skarns de Au, Cu, Fe, Mo, Sn, W y Zn-Pb.



En general, los yacimientos de tipo skarn se presentan en ambientes geológicos variados que van desde el Precámbrico hasta el Terciario tardío. La mayoría de los depósitos de importancia económica son relativamente jóvenes y están relacionados con actividad magmática-hidrotermal asociados con plutonismo diorítico a granodiorítico en cinturones orogénicos (Einaudi y Burt, 1982).

El tema principal de este trabajo de tesis son los skarns de hierro, los cuales alcanzan a tener grandes dimensiones variando de 300-500 millones de toneladas en contenido de Fe, que son principalmente minados por su contenido de magnetita, aunque pueden contener cantidades menores de Cu, Co, Ni y Au, con poca ganga de silicatos. Este tipo de yacimientos se relaciona más a arcos de islas oceánicas, asociados con dioritas y sus equivalentes extrusivos. Existen dos ambientes tectónicos ideales para la formación de skarn de hierro y son los de tipo de arco de isla y el tipo cordillerano, conteniendo magnetita como mineral de mena.

Los skarn de magnetita-cálcicos de arcos de islas tienen como características principales la asociación con gabros y dioritas en secuencias vulcano-sedimentarias, la presencia de metasomatismo sódico ampliamente distribuido y concentraciones anómalas de cobalto y níquel algunas veces. Las rocas típicas en estos ambientes incluyen basaltos, andesitas y tobas interestratificadas con areniscas, grauvacas, lutitas y margas; los intrusivos varían de gabros a granodioritas, con menor cantidad de rocas alcalinas como plagiogranitos y plagiosienitas, las dioritas son las rocas más comunes en este tipo de ambiente (Figura 11). El depósito de magnetita puede ocurrir dentro de la roca intrusiva y reemplazando a la roca encajonante; sin embargo, el depósito de magnetita más común ocurre en secuencias de caliza y andesita o en contacto con dioritas. Una característica notoria de esta clase de depósitos es la intensa y amplia alteración de las rocas ígneas, los minerales de skarn consisten de granate y piroxeno con poca cantidad de epidota, ilvaita y actinolita. Además del endoskarn, la roca intrusiva presenta como minerales de alteración albita, ortoclasa, y escapolita en vetillas y frente de reemplazamiento.



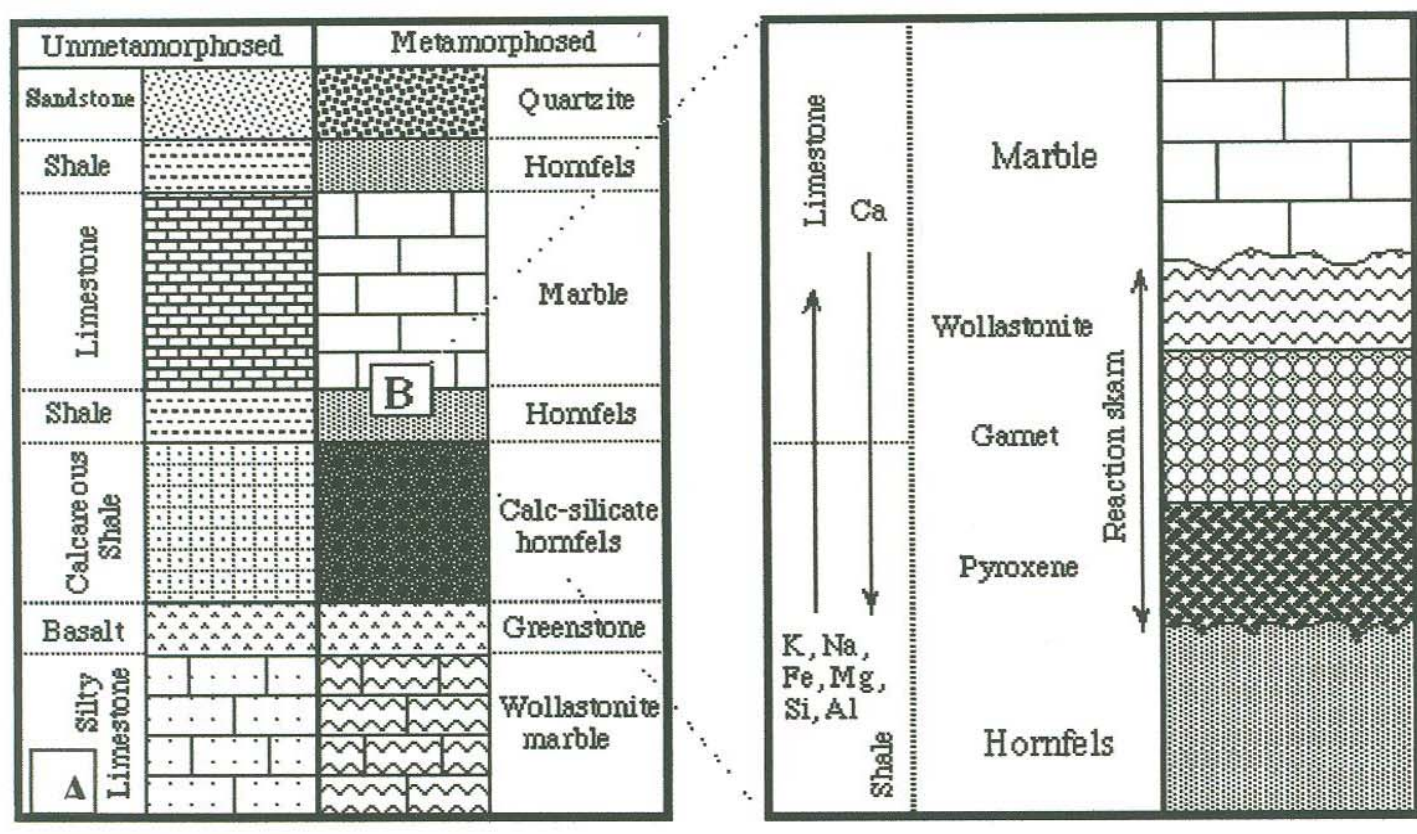


Figura 8.- A) Muestra el protolito y su correspondiente metamórfico en un proceso de metamorfismo isoquímico B) Dirección del flujo de elementos por difusión, Meinert (1993).







En cambio, los skarn de magnetita-magnésicos de tipo cordillerano se encuentran relacionados a rocas ígneas de tipo cuarzo-monzonitas pobres en Fe y tienden a formar skarn de magnetita solo en dolomías, se encuentran en cinturones orogénicos en skarn de sulfuros de metales base donde se encuentran dolomías, se asocian típicamente a rocas hipabisales y diques granodioríticos y cuarzo-monzoníticos y raramente a granitos (Figura 11). Los plutones en este tipo de yacimientos tienen una amplia distribución de endoskarn; los principales minerales de skarn son: forsterita, diópsida, periclasa, talco y serpentina; no contienen mucho hierro. En un estadio temprano de alta temperatura se puede formar skarn de diópsida-espínela cerca del plutón y skarn de forsterita-calcita en la dolomía.

La formación del skarn prógrado es sucedido por presencia de un skarn cálcico de granate-piroxeno, un estadio tardío que incluye la formación de flogopita, serpentina y boratos acompañados por magnetita. Es característico de los skarn de magnetita magnésicos ser pobres en sulfuros y en algunos casos puede darse la destrucción total del skarn prógrado.

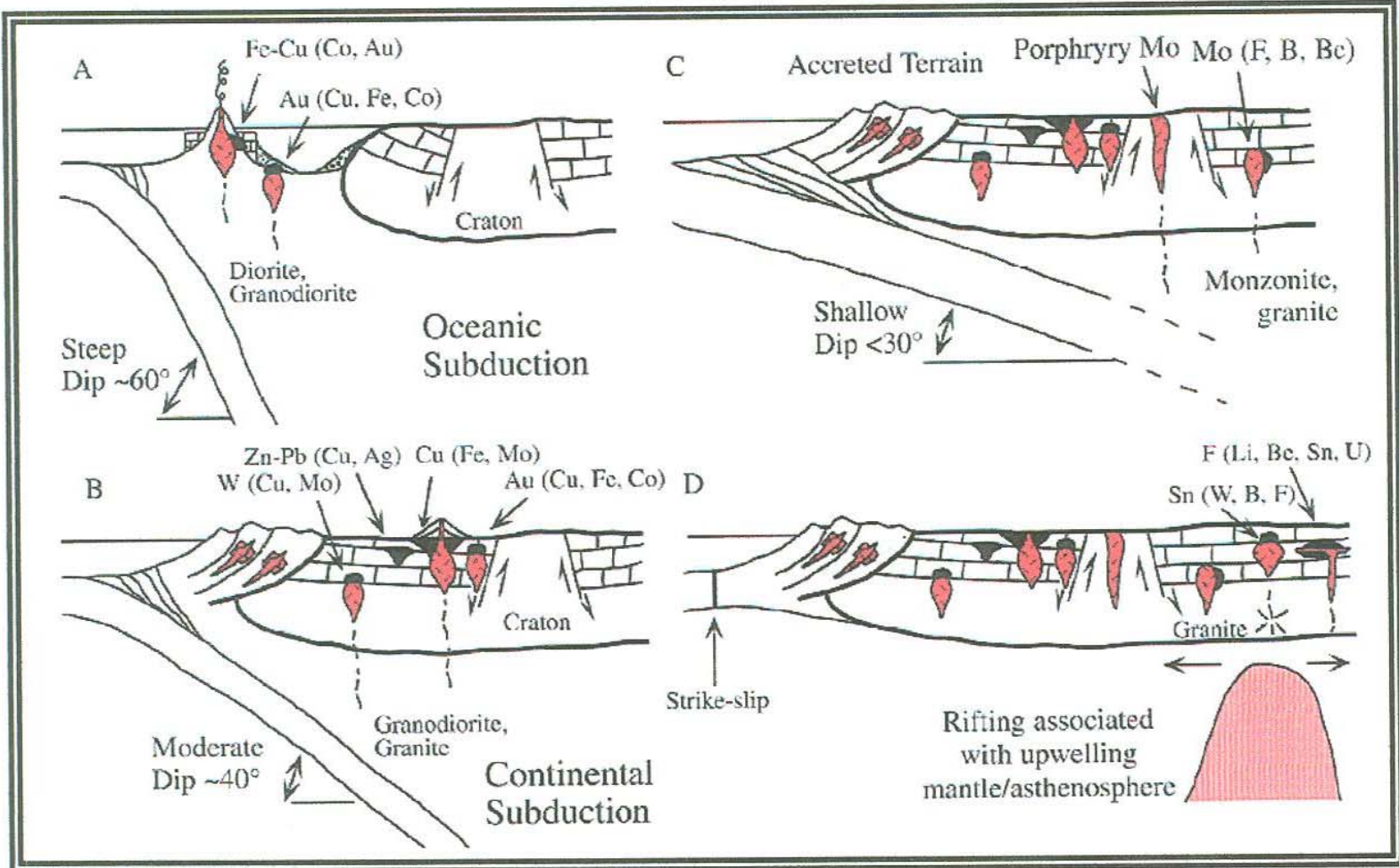
### **VIII.- DEPÓSITO DE HIERRO EL GARABATO**

El depósito de Hierro El Garabato se localiza al sureste del poblado de Suaqui Grande aproximadamente a 9 km en línea recta, teniendo su mejor exposición sobre el camino de terracería que comunica al poblado Suaqui Grande con el poblado de Cumuripa o bien por el arroyo Las Uvalamas.

Como se mencionó líneas arriba el skarn El Garabato, se encuentra incluido entre el miembro inferior y medio de la Formación Tarahumara, reemplazando al paquete de rocas carbonatadas intercaladas con sedimentos volcanoclásticos depositados en cuencas restringidas y someras durante un tiempo de relativa calma al final de la depositación del miembro inferior.

A nivel semiregional, como se observa en la figura 5, los cuerpos de skarn son irregulares y afloran de manera inconsistente a lo largo del contacto entre dichos miembro, dando la apariencia que los cuerpos podrían ser cortados por





**Figura 11.-** Modelos tectónicos idealizados para la formación de skarn. A) Subducción oceánica en un ambiente de cuenca tras-arco B) subducción continental con terrenos oceánicos acrecionados. C) Ambiente de subducción transicional de bajo ángulo D) Ambiente de "rift" continental o por subducción, (Meinert, 1993).



estructuras NW-SE que de alguna manera influyen en este comportamiento. Además, aunque de manera general, se observa una continuidad de depositación de los miembros, se tienen que el contacto entre el miembro inferior y medio, parecería ser ligeramente discordante o acuñarse a diferencia con el contacto del miembro superior, lo cual indicaría un lapso de tiempo entre el final del miembro inferior y la depositación de la parte inferior del miembro medio, lo cual en parte apoya el tiempo de calma entre el miembro inferior y medio, aunque no se descarta el desplazamiento posterior por fallas NW-SE.

Los cuerpos de skarn que se alojan entre el miembro inferior y medio de la Formación Tarahumara pueden ser seguidos por mas de 3.5 km en una dirección NNE de manera mas o menos ininterrumpida (Figura 5); con una última manifestación en esta dirección del cuerpo mineralizado El Sapo, localizado a 3 km en esta dirección del skarn El Garabato (Figura 5). El skarn El Sapo parece corresponder a un cuerpo metamórfico polimetálico?, el cual presenta un desarrollo importante de piroxeno + <granate ± <calcopirita ± esfalerita ± galena y calcita recristalizada. De la misma manera, pero sin presentar la misma continuidad, hacia el SSE de El Garabato, se tiene a 4 km aproximadamente el depósito de skarn El Hechal. Presenta una orientación NW 30-40° SE, y esta compuesto por piroxeno + <granate + malaquita + bornita (?) ± trazas de sulfosales y valores anómalos de Ag, con gran contenido de magnetita, Flores-Vásquez (2006). Hasta la fecha no se tiene gran información acerca de estos pequeños cuerpos de skarn (El Sapo y El Hechal), solo se tiene el conocimiento dentro de la literatura que son pequeños cuerpos irregulares de skarn que se encuentran de forma concordante dentro de la Formación Tarahumara. y su mineralogía es pobremente conocida.

El propósito de este trabajo es el de cartografiar a detalle (escala 1:500) y mostrar el comportamiento y mineralogía del skarn de hierro El Garabato, considerando su desarrollo, composición y distribución de hierro, lo cual permitirá hacer una comparación con otros tipos de skarn similares en Sonora y enriquecer el conocimiento de estos depósitos en el noroeste de México.



La cartografía a detalle mostró que el cuerpo puede ser seguido hacia el NNE por espacio de 400 m de manera ininterrumpida, partiendo del arroyo Las Uvalamas o bien del camino principal del área (Figura 12). Para una mejor descripción del skarn de hierro, se ha dividido este cuerpo en parte norte y sur. La parte norte presenta al skarn de hierro seccionado en tres pequeños cuerpos de forma irregular, principalmente cubiertos, en su mayoría, por rocas pertenecientes a los miembros inferior y medio de la Formación Tarahumara. Esta segmentación en cuerpos individuales seguramente puede ser atribuido a fallamiento NW-SE, el cual es bastante común en esta área y aunque las estructuras se encuentran cubiertas y no fue posible medirlas directamente en el campo, la expresión sospechosa de distintos saltos y pequeños arroyos en esta dirección permiten sugerir su presencia, lo cual es ayudado por la escala del mapeo que permite inferir en detalle cualquier manifestación de este tipo.

En general, el cuerpo de skarn en su parte norte presenta una orientación preferencial NE 5-15° SW con un echado promedio de 37° hacia el SE, con dimensiones variadas en cada uno de los cuerpos cartografiados que van desde 15 x 20 m en su parte sur, 8 x 40 m en su parte media y 5 x 80 m en su parte mas al norte, con un cuerpo remanente hacia el noreste de 10 x 10 m. Observándose una clara disminución del cuerpo hacia el extremo más al nort-noreste del área cartografiada, hasta desaparecer. Una posibilidad es que haya sido cubierto o que se adelgace hasta desaparecer a lo largo del contacto entre estos dos miembros. Dentro de esta misma división norte se tiene una zona con fuerte silicificación y argilización que serán descritas a detalle en líneas más adelante.

La parte sur del skarn presenta cuatro pequeños cuerpos de forma irregular, los cuales se observan seccionados de la misma manera que en la división norte pero estos se encuentran cubiertos en su mayoría por rocas derivadas de los miembro inferior y medio principalmente y por gravas terciarias hacia la parte suroeste del área cartografiada. Presentan una dirección más constante de NE 15° SW e inclinación muy similar a la división norte, comportándose de manera un poco más vertical hacia la parte suroeste del



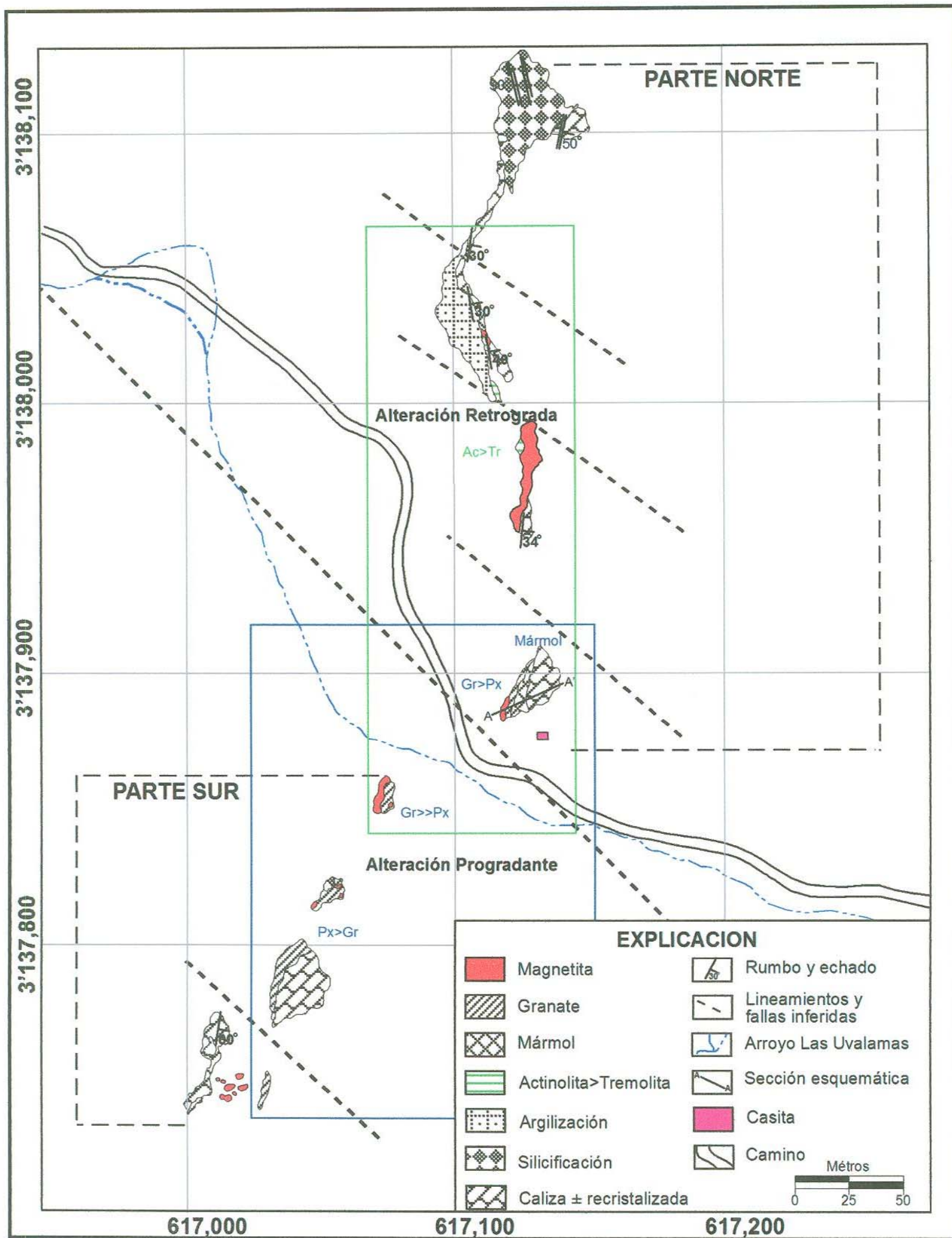


Figura 12.- Plano geológico simplificado de las zonas del skarn El Garabato, mostrando la división en dos partes(norte y sur) y áreas de alteración definidas como: retrógrada, progradante y una última hidrotermal (argilización y silicificación).



cuerpo de skarn. Las dimensiones varían desde 5 x 10 m en su parte norte, 8 x 15 m y 20 x 30 m en su parte media y 8 x 35 m en su parte más al sur (Figura 12).

Mineralógicamente el skarn de hierro El Garabato puede ser dividido en 3 zonas de acuerdo a la presencia de ciertos minerales producto del metamorfismo y/o metasomatismo, las cuales nos señalan etapas de evolución del cuerpo de skarn, como han sido documentadas en la literatura por Einaudi et al.,(1981) y Meinert et al., (1992). Para el cuerpo de skarn El Garabato y siguiendo la nomenclatura y definición de los skarn, se nombraron las dos zonas denominadas como: alteración progradante (Gr>Px; Gr>>Px, Px>Gr, marmolización); alteración retrógrada (actinolita-tremolita, calcita, cuarzo) y mineralización de Fe. Se tiene una cuarta zona la cual es definida como alteración hidrotermal constituida por una fuerte silicificación y argilización, las cuales se describen y se separan de las otras al parecer por tratarse de eventos diacrónicos del skarn. A continuación se presenta una descripción detallada de cada una de estas zonas mineralógicas (Figura 12).

#### **VIII.1.- Alteración Progradante**

De acuerdo con la evolución espacio-temporal del skarn, se habla de un skarn prógrado, el cual está constituido principalmente por los minerales típicos del skarn granates y piroxenos con sus respectivas variaciones, los cuales son el producto de un estadio inicial de metamorfismo que pueden marcar temperaturas del orden de 300° - 550°C, como fue definido por Einaudi et al., (1981). Con esto en mente, dentro del área de estudio fue posible identificar tres zonas las cuales se encuentran ubicadas en la parte centro – sur del área cartografiada a detalle y que están representadas por una zona de mármol, otra zona de Gr>Px, Gr>>Px y por ultimo una zona de Px>Gr (Figura 12). A continuación se hace la descripción por zonas de las muestras más representativas que coinciden con dicha alteración.



### **VIII.1.1.- Zona Marmolizada**

Generalmente los remanentes de caliza que aún se pueden reconocer en la zona de skarn se encuentran recrystalizadas; sin embargo, la mejor exposición de este tipo de roca o afloramiento se encuentra en la parte centro del área cartografiada, estando en contacto con una zona de granates y una caliza mas o menos recrystalizada que puede alcanzar una longitud de mas de 20 m aproximadamente (Figura 13 A, sección A-A'). En superficie este afloramiento es de color gris blanco a blanco rojizo con textura fina sacaroide, con delgadas bandas (2-3 mm) de color rojizo compuestas de hematita, con esporádicos fenocristales de granate de color café claro íntercrecidos de hasta 1.5 cm de diámetro.

En lámina delgada presenta un mosaico de cristales principalmente euhedrales-subhedrales de calcita, con tamaños variables de 0.2 –1.5 mm de diámetro, los cuales alcanzan más del 85% del volumen total de la roca., presentando en parte un fuerte maclado y formas romboédricas típicas de este mineral. De manera intersticial y/o aglutinada se tiene la presencia de cristales subhedrales de actinolita>tremolita (~8%) menores a 0.1 mm; así mismo, se hacen acompañar por cristales euhedrales – subhedrales de piroxeno (~%5) menores a 0.2 mm, con escasos cristales subhedrales de epidota (~2%) menores a 0.1 mm de diámetro, (Foto 11). Hacia el norte de este cuerpo, se observan esporádicos fragmentos en forma de grandes bloques de caliza recrystalizada, siempre en la parte de arriba del cuerpo de skarn (Figura 12 y 13A).

### **VIII.1.2.- Zona de Granate-Piroxeno (Gr>Px, Gr>>Px y Px>Gr)**

Dentro del cuerpo de skarn El Garabato, está zona esta bien definida en la parte centro (Figura 12) donde es claro como los cristales de granates se acumulan de forma masiva (Gr>>Px) y de la misma manera se puede observar como disminuyen en forma de delgadas bandas que en algunas ocasiones llegan acuñarse, como sucede en la parte norte de esta zona, cambiando a una proporción de Gr>Px. En ocasiones, el contenido de granates con respecto al



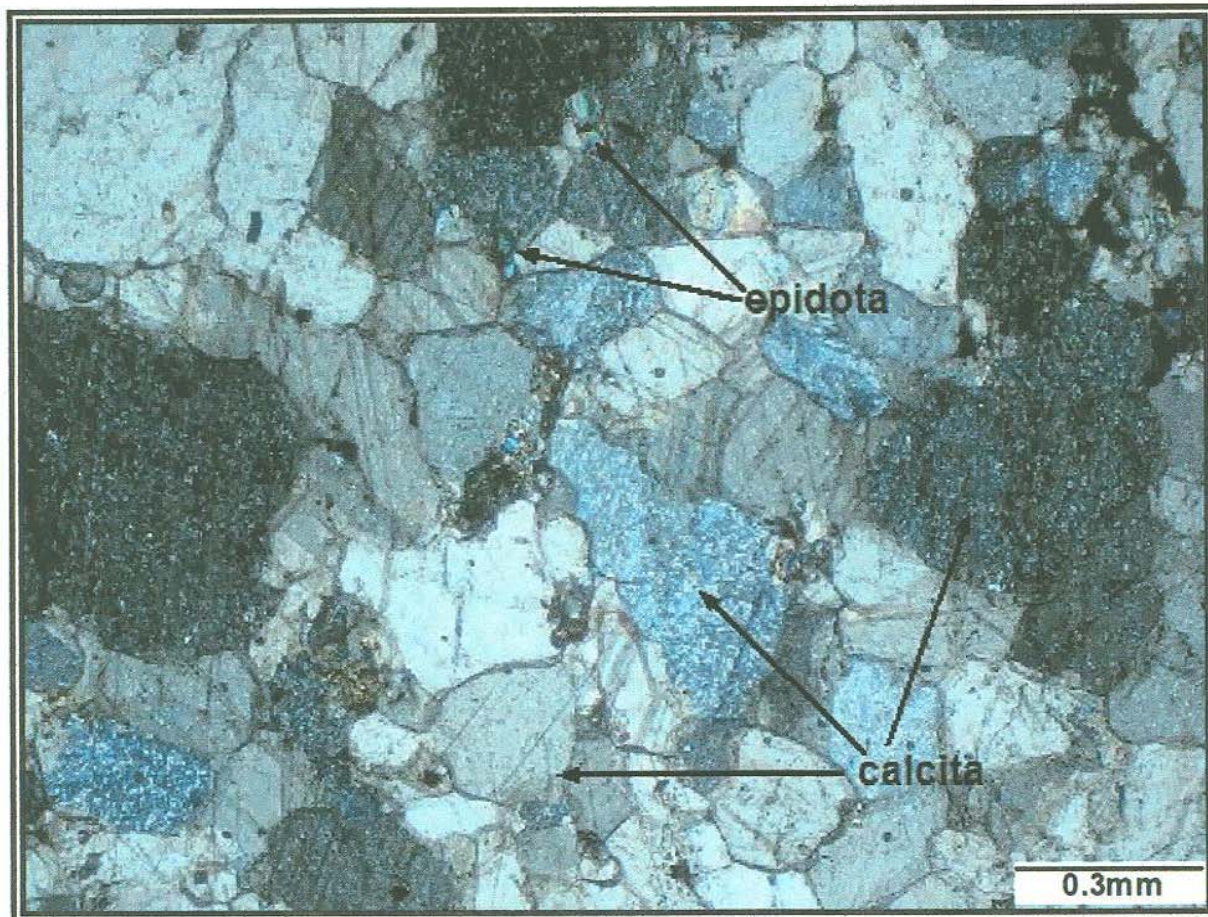
piroxeno decrece, mostrándose como manchas irregulares con cierta tendencia a encontrarse en el centro de esta zona. A continuación, se describe la parte donde el contenido de cristales de granates varía de Gr>Px a Gr>>Px, como sucede en la parte centro de esta zona progradante, incluyendo las partes con Px>Gr, ver Figura 12.

En superficie la zona de Gr>Px tiene una longitud aproximada de 1.50 m y se encuentra en contacto entre una zona de mármol ± granate en su parte superior y una zona de magnetita masiva ± granate en su lado inferior (Figura 13A, sección A-A'). En superficie está representada principalmente por cristales subhedrales más o menos finos de granate de color verde – verde claro con variante a café claro este último por la cercanía al cuerpo de magnetita. También se encuentran algunos cristales fibrosos de ferromagnesianos menores a 5 mm probablemente anfíboles del tipo de la hornblenda y/o actinolita>tremolita.

En lámina delgada presenta una textura granoblástica compuesta principalmente por cristales euhedrales-subhedrales menores a 1.5 mm de granate de grano fino, presentando algunos de ellos un ligero zoneamiento y distribuidos en un 60% del volumen total de la roca. Acompañan de manera intersticial a estos cristales de granate, pequeños cristallitos anhedrales de cuarzo (~5%) menores a 0.1 mm, así como pequeños cristales fibrosos y/o aciculares de actinolita>tremolita (~15%) menores a 0.5 mm de largo. Por otro lado, de forma intergranular se tienen cristales de anfíbol probablemente hornblenda? (~10%) en tamaños menores a 0.6 mm de largo, intercrecidos con cristales de actinolita y minerales opacos (~10%) de posible magnetita. Como un evento posterior se presentan vetillas de cuarzo menores a 0.2 mm de ancho que cortan a los cristales anteriormente descritos. Hay que resaltar la aparición de la alteración retrógrada ya que se encuentra afectando a los cristales de granate sin llegar a ser más importante que el contenido de granate. (Foto 12 y 13).

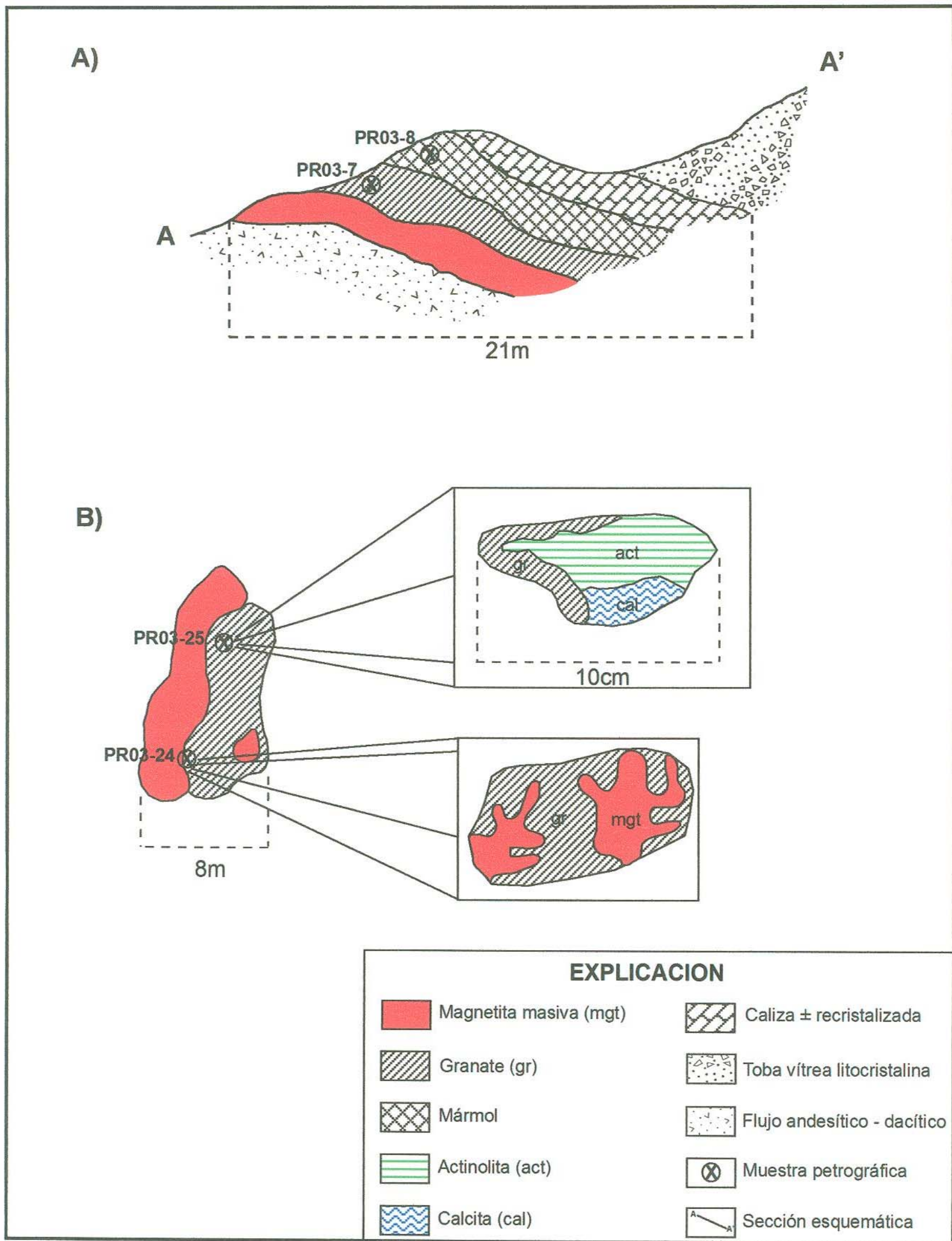
Siguiendo con la alteración progradante pero un poco al suroeste, cruzando el arroyo Las Uvalamas, se tiene otro pequeño afloramiento con una relación de granate>>piroxeno (Gr>>Px) (Figura 12) que tiene una longitud





**Foto 11.-** Microfotografía de la muestra PR03-8, marmól en donde se observa un mosaico de cristales euhedrales – subhedrales de calcita fuertemente empaquetados. Note los cristales oscuros de epidota, distribuidos entre y en contacto con los granos de calcita. LP, 4X.





**Figura 13.-** A) Sección esquemática A-A' donde se aprecia la zona marmolizada, B) afloramiento en planta, que muestra como la actinolita, calcita y magnetita reemplazan respectivamente a cristales de granate.



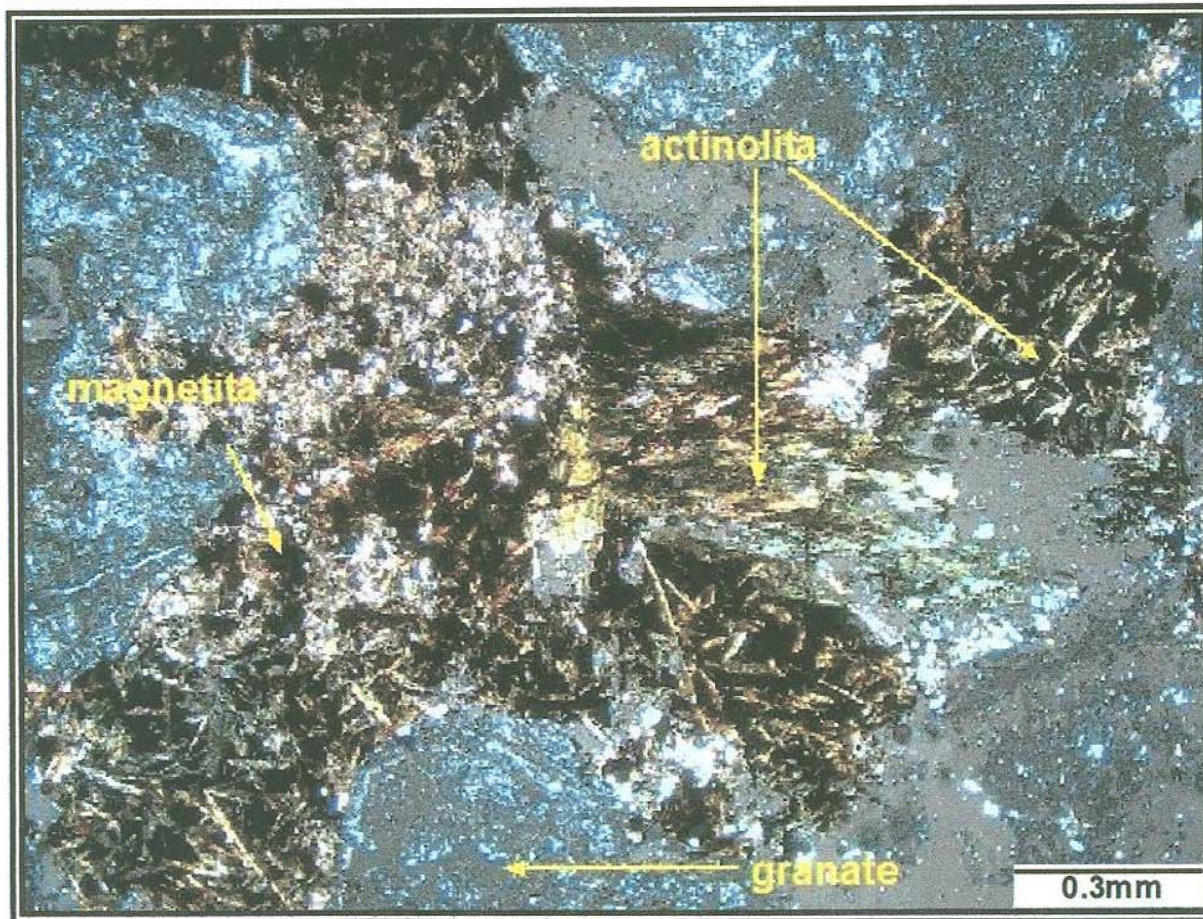


Foto 12.- Microfotografía de la muestra PR03-7 en donde se aprecian cristales de actinolita de aspecto colorido y magnetita color oscuro, relleno de cavidades entre los cristales de granate ligeramente de color azul claro. LP, 4X.

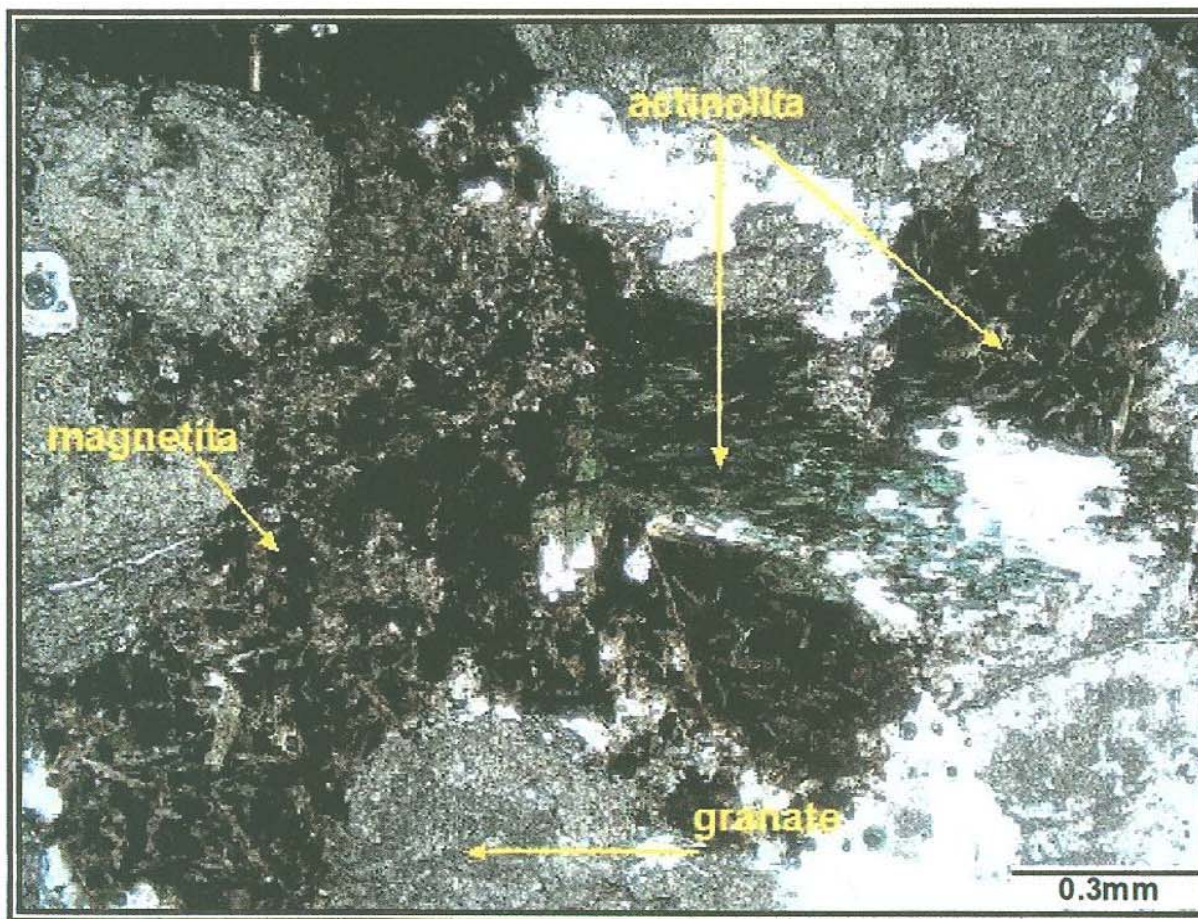


Foto 13.- Microfotografía de la muestra PR03-7 en luz natural, resaltando de mejor manera la presencia de granate y actinolita. LN, 4X.



aproximada de 6 m y se encuentra en contacto con un zona de magnetita masiva (Figura 13B). A diferencia del afloramiento anterior este presenta una mejor exposición y acumulación de los cristales de granate los cuales se observan de color café a café claro, con formas que van desde euهدral a subهدral y tamaños de aproximadamente 5 mm de diámetro. Por otro lado, se observa una moderada – fuerte actinolización por encima de los cristales de granates principalmente, y una mezcla de granate  $\pm$  magnetita en manchas irregulares de hasta 0.50 m de ancho del cuerpo de magnetita (Figura 13B). Así mismo como una etapa posterior se tiene calcita rellenando cavidades y hematita en fracturas.

En lámina delgada presenta una textura granoblástica constituida principalmente por cristales de granate ligeramente zoneados, con formas que van de euهدrales – subهدrales, y tamaños menores a 0.5 mm de diámetro. Su distribución puede alcanzar un 60% del volumen total de la muestra, y regularmente la mayoría de ellos presentan un centro hematizado. Así mismo, por encima o sobrepuestos a estos cristales de granate, se tiene la distribución en gran parte de la lámina cristales fibrosos y aciculares de actinolita (~10%) menores a 0.6 mm de largo. Por otra parte, invadiendo a dichos cristales de granate se observan gránulos de magnetita y hematita, la primera en mayor cantidad que la segunda, principalmente entre los cristales y microfracturas alcanzado solo un 20% del volumen total de la muestra. En menor cantidad se tiene de forma intersticial cristales subهدrales y anهدrales respectivamente de calcita  $\pm$  cuarzo que en conjunto logran estar distribuidos dentro de la muestra en un 10% aproximadamente. Cortando de manera unidireccional a todos estos cristales se encuentran vetillas tardías de cuarzo y hematita  $\pm$  magnetita de 0.02 – 0.05 mm (Foto 14 y 15).

Por otro lado, específicamente en la muestra PR03-25 (Figura 13B) que se encuentra a seis m aproximadamente de la muestra anteriormente descrita, reveló características y constituyentes mineralógicos muy similares, pero con la diferencia que los cristales de granate están distribuidos en un 80% y la magnetita disminuye considerablemente. Es importante mencionar en esta



muestra la cantidad de calcita tardía que se encuentra rellenando fracturas y en ocasiones se observa reemplazando a los bordes de los cristales de granates. Acompañando de forma intersticial, se encuentran cristales anhedrales de cuarzo (Foto 16 y 17), los cuales seguramente corresponden a la alteración retrógrada sobrepuesta a la alteración progradante.

Hacia el suroeste continúa la misma zona con alteración progradante, con una disposición del cuerpo de hierro masivo, respecto a las zonas de granate y piroxeno de la misma manera descrita líneas arriba. Sin embargo, se tienen algunas áreas donde se puede apreciar una relación de  $Px > Gr$ , con cierta frecuencia en la parte centro-suroeste de la zona progradante (Figura 12). En superficie este afloramiento presenta muy cerca a su base un horizonte delgado de ~15 cm de ancho de magnetita masiva, el cual se encuentra en contacto en su parte superior con un horizonte de 40 cm, constituido principalmente por cristales euhedrales – subhedrales de granate grueso de color verde en su mayoría, con tamaños de hasta 6 mm de diámetro. Hacia la parte superior de este pequeño afloramiento se tiene una intercalación de una serie de bandas de 5 a 7 cm de ancho, compuestas de granate grueso intercaladas con bandas de granate fino y piroxeno? de color verde – café, con apariencia de acuñamiento por parte de las bandas de granate grueso, (Figura 14). Por otro lado, también se observan cristales diseminados de color verde oscuro de probable anfíbol (hornblenda, actinolita-tremolita), así como también pequeños cristales de hematita>magnetita diseminados y en pequeñas vetillas. Por último y como una etapa tardía, existen delgadas vetillas menores a 1mm de cuarzo y calcita cortando a todos los cristales anteriormente descritos. Los cristales de piroxenos no se aprecian en muestra de mano, sin embargo las secciones delgadas revelaron su presencia.

En lámina delgada la muestra PR03-30 (Figura 14) presenta cristales anhedrales – subhedrales de piroxeno (clinopiroxeno) muy finos, menores a 0.01 mm de diámetro, los cuales se encuentran distribuidos aproximadamente en un 70% dentro del volumen total de la roca; a su vez, intercrecidos con los cristales de piroxeno se tiene la presencia de un 20% de pequeños cristales



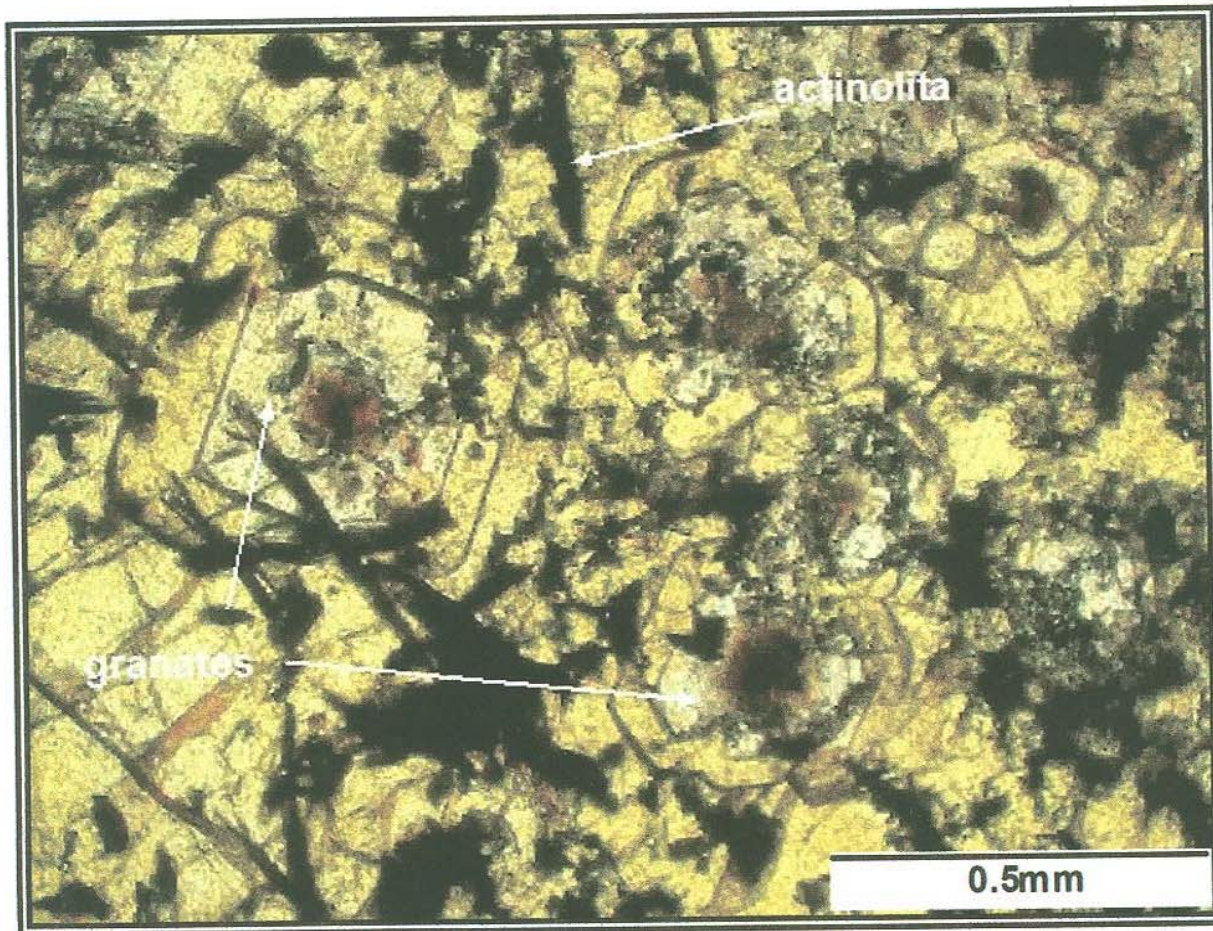


Foto 14.- Microfotografía de la muestra PR03-24 que muestra cristales de granate con centros hematizados y una actinolización sobrepuesta LP, 4X.

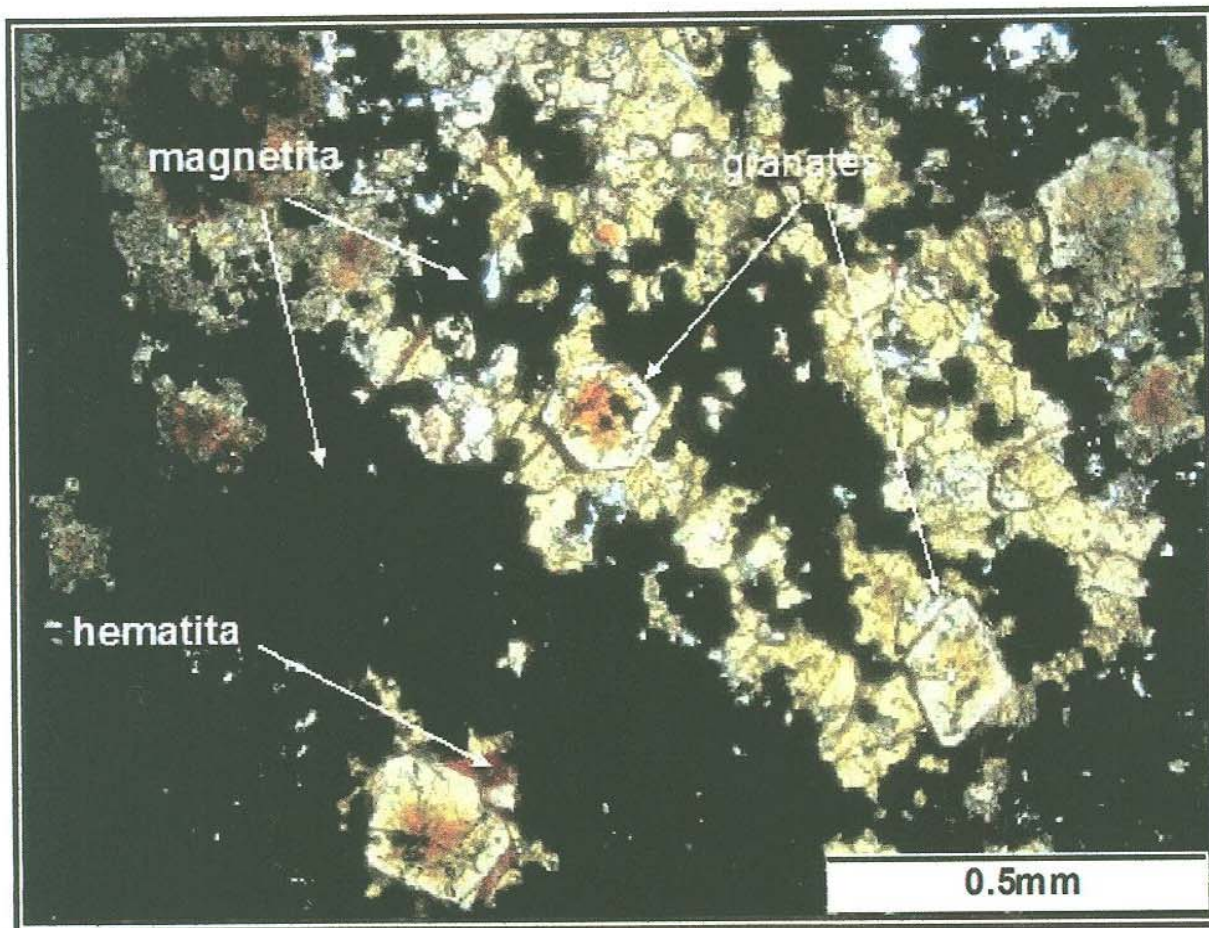


Foto 15.- Microfotografía de la muestra PR03-24, en donde se muestra como la magnetita invade a los cristales de granate con centros hematizados. LP, 4X.



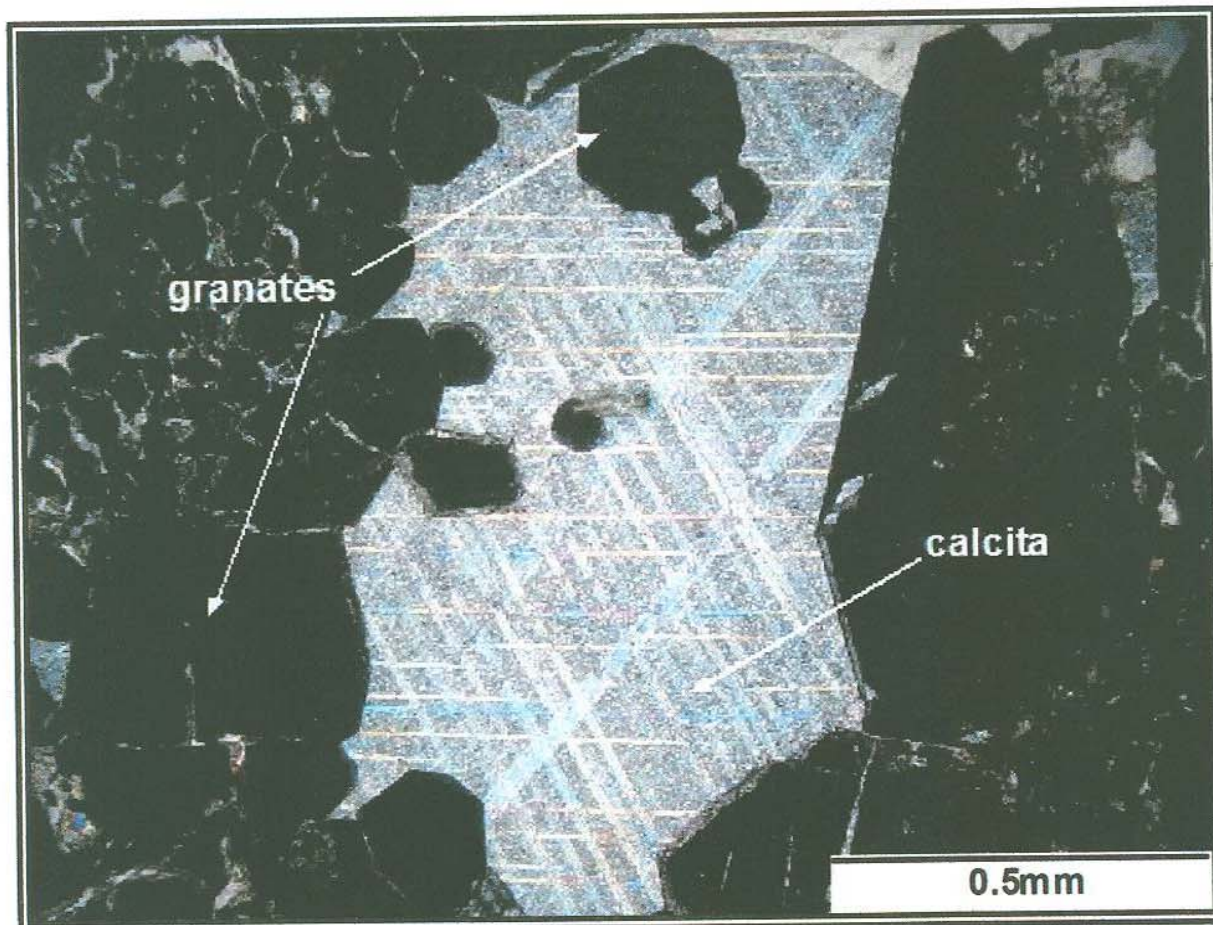


Foto 16.- Microfotografía de la muestra PR03-25 nótese la ausencia de magnetita en la roca y la presencia de calcita tardía relleno los espacios vacíos entre los cristales de granate. LP, 4X.

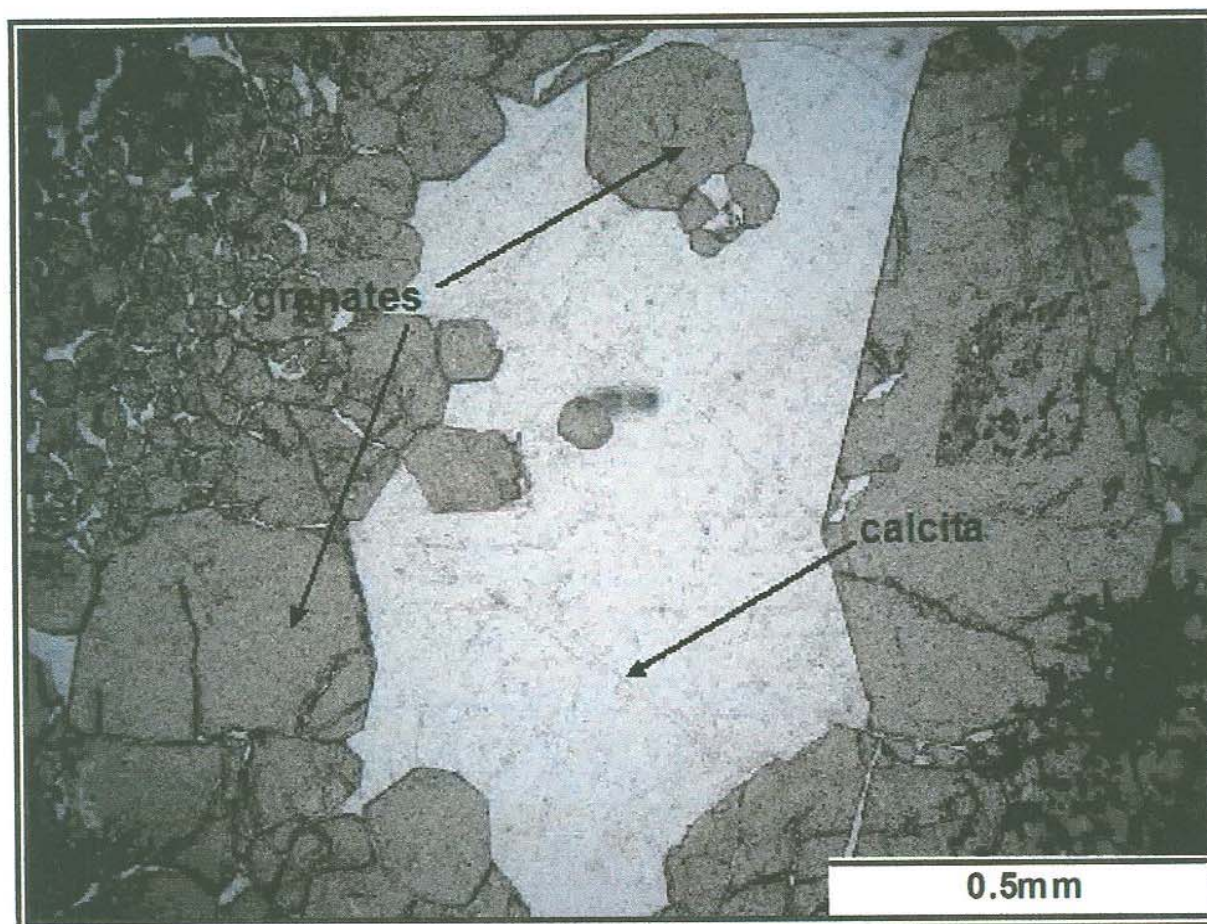


Foto 17.- Microfotografía de la PR03-25 en luz natural, resaltando de mejor manera los cristales de granate. LN, 4x.



subhedrales de granate menores a 0.5 mm, algunos de ellos presentando fracturas rellenas por hematita y por ultimo el 10% restante corresponde a cristales de magnetita con menor proporción de hematita que se encuentran diseminados en la muestra. Como un evento posterior se observan vetillas de cuarzo, cuarzo+calcita y calcita menores a 0.1 mm de ancho cortando a todos los cristales anteriormente descritos (Foto 18).

Es importante resaltar que la muestra PR03-29, tomada en la base de este afloramiento, presentó un contenido mayor de cristales subhedrales de piroxeno (clinopiroxenos) distribuidos en un 85% dentro de la muestra, con tamaños del orden de 0.01 mm. Así mismo, se observó una disminución muy marcada en el contenido de cristales anhedral – subhedrales de granate variando en su tamaño de 0.2 – 0.3 mm, encontrándose en una proporción no mayor al 10%. Por otro lado, también se tienen escasos cristales subhedrales de epidota menores a 0.1 mm (~3%) y cristales anhedral de anfíbol de un tamaño aproximado de 0.1 mm. Como un evento tardío se tienen vetillas de cuarzo y cuarzo + calcita menores a 0.1 mm cortando a todos los cristales anteriormente descritos. Acompañando a estos cristales, se tiene la presencia de pequeños cristales anhedral de hematita>magnetita (~2%) diseminados en la muestra o relleno de fracturas (Foto 19).

### **VIII.2.- Alteración retrógrada**

La contraparte de la alteración progradante corresponde a una facie tardía de menor temperatura, probablemente del orden de 250 a 400 °C, constituida por actinolita-tremolita, clorita, epidota, cuarzo, calcita, etc, que se formaron a expensas de los primeros minerales (granate y piroxeno) y los cuales destruyen parcialmente o totalmente al skarn prógrado, Einaudi et al (1981); Meinert (1998).

Esta alteración se hace presente con mayor claridad en casi toda la parte norte y centro del área. Hacia la parte más al norte se observa como los cristales anhedral de actinolita>tremolita son acompañados de finos cristales anhedral de granate de color verde, como una etapa previa formados dentro



del cuerpo de caliza recristalizada. Son acomodados en forma de bandas de 5 – 10 cm de ancho, llegando en ocasiones a acuñarse. Aunque no es claro, dado el fuerte efecto metamórfico, la presencia de estas bandas, podrían indicar un cambio transicional entre el flujo andesítico – dacítico y el cuerpo de caliza recristalizada, (Figura 15A).

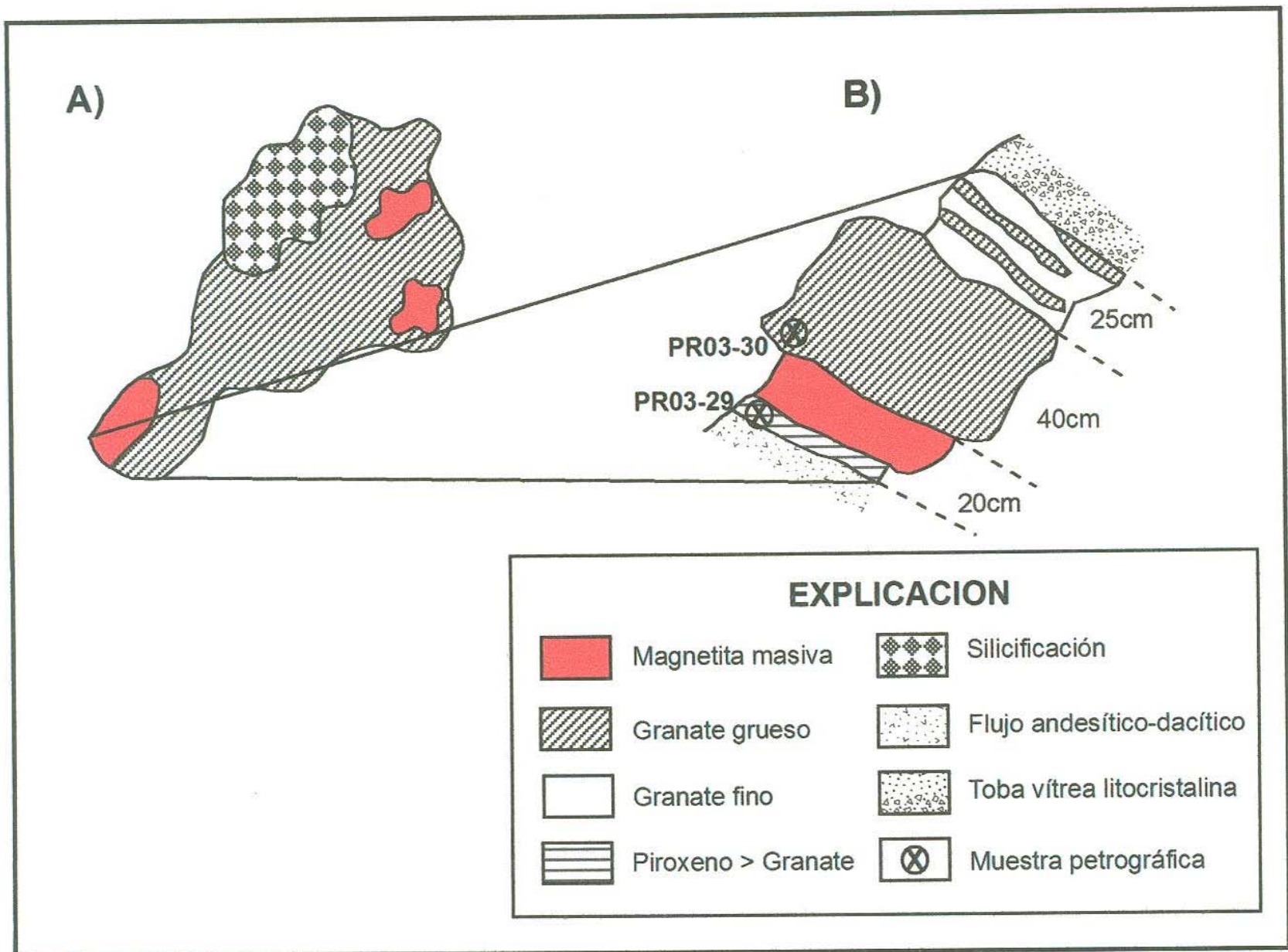
En sección delgada esta roca presenta una textura granoblástica constituida en un 80% por cristales anhedrales – subhedrales de calcita, con tamaños menores a 0.1 mm, con cristales subhedrales de actinolita menores a 0.2 mm de largo alcanzando un 13% del volumen de la roca. Conjuntamente se tiene un 5% de cristales anhedrales – subhedrales menores a 0.3 mm de anfíbol (hornblenda?); así como esporádicos cristales de epidota menores a 0.05 mm distribuidos en un 2% dentro del volumen total. Como un evento tardío se presentan vetillas de calcita, calcita + cuarzo y hematita menores a 0.2 mm de ancho, las cuales cortan a todos los cristales (Foto 20).

Siguiendo con la alteración retrógrada, pero un poco más al sur del afloramiento anteriormente descrito, se encuentra un cuerpo de magnetita masivo con una mezcla de cristales subhedrales de actinolita>tremolita y esporádicos cristales anhedrales de granate muy fino de color verde (Figura 15).

En lámina delgada esta roca presenta una textura granoblástica más o menos fina, constituida principalmente por cristales anhedrales de magnetita distribuidos en un 70% aproximadamente, presentando en sus bordes hematita producto de alteración de la magnetita; así mismo, acompañando a estos cristales se tiene un 20% de cristales subhedrales de actinolita>tremolita menores de 1 mm, con escasos cristales de hornblenda y penina menores a 1 y 0.5 mm respectivamente en menos del 10% del volumen total de la roca.

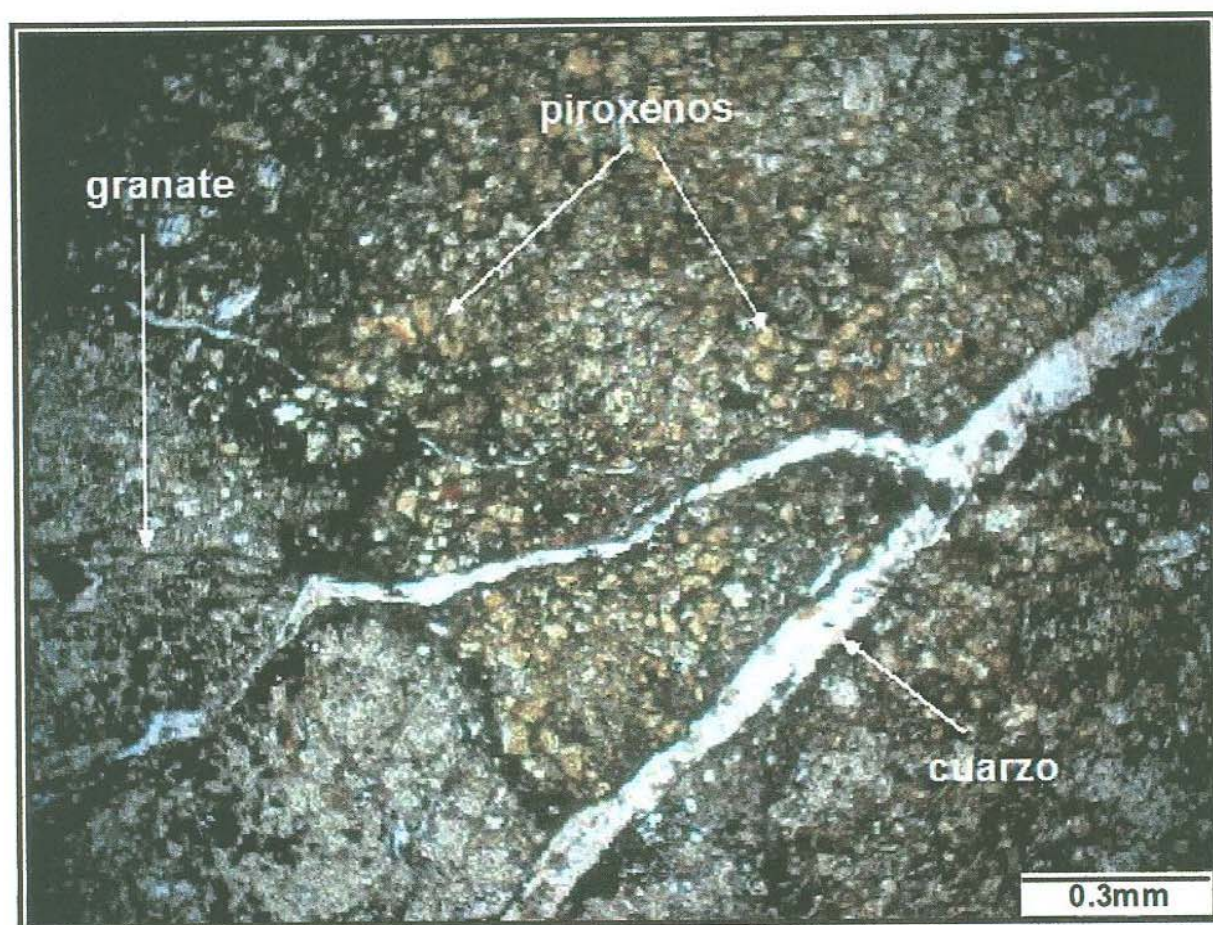
Por último de forma intersticial se encuentran pequeños cristales anhedrales de cuarzo menores a 0.03 mm. La mayoría de estos cristales se encuentran total o parcialmente impregnados por hematita, la cual en ocasiones logra enmascararlos. (Fotos 21 y 22).



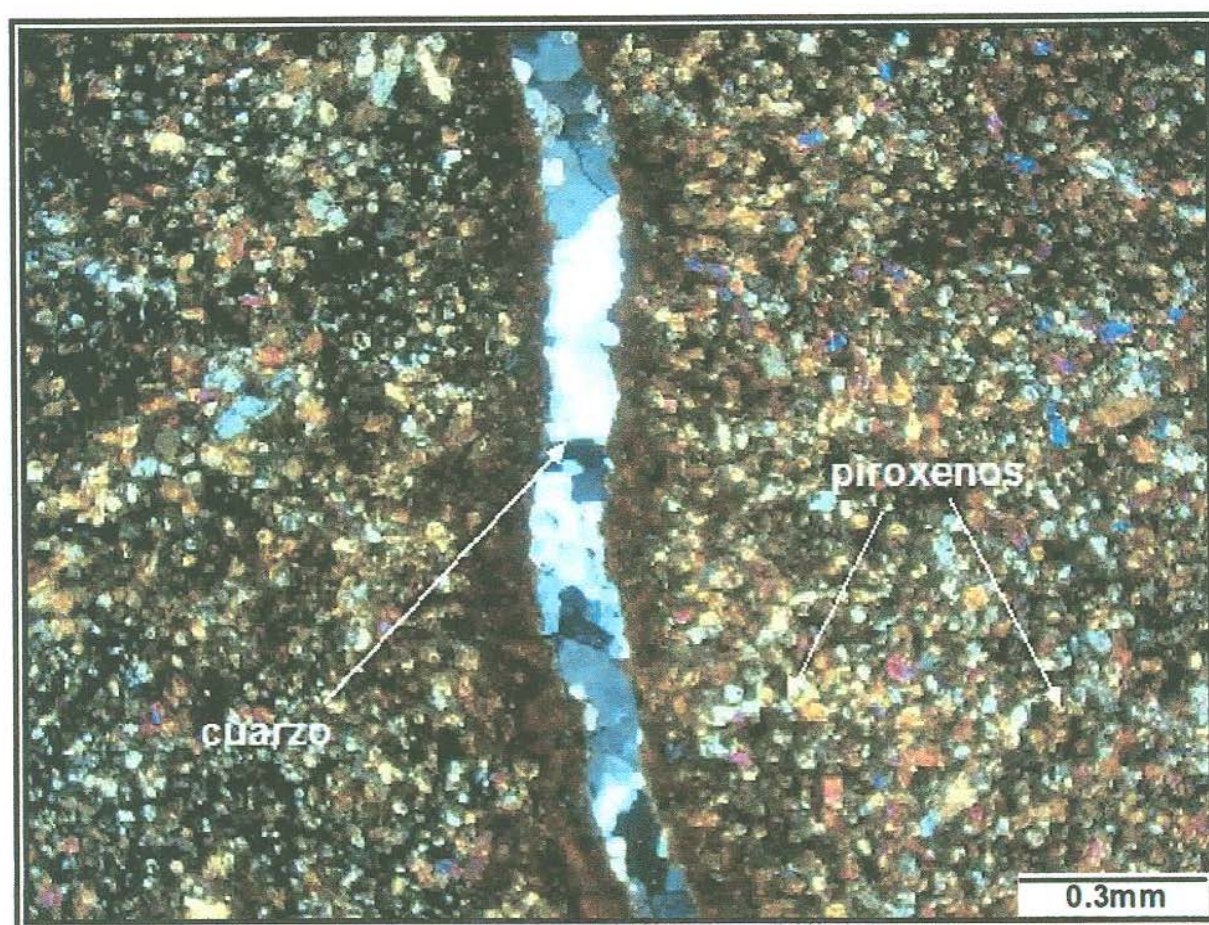


**Figura 14.-** Distribución de las muestras de la zona Px>Gr en donde la muestra PR03-30 está constituida por cristales de piroxeno intercrecidos con cristales de granate y la muestra PR03-29 constituida por cristales de piroxeno, representadas por una sección A) en planta y un mayor detalle en la sección B) transversal.



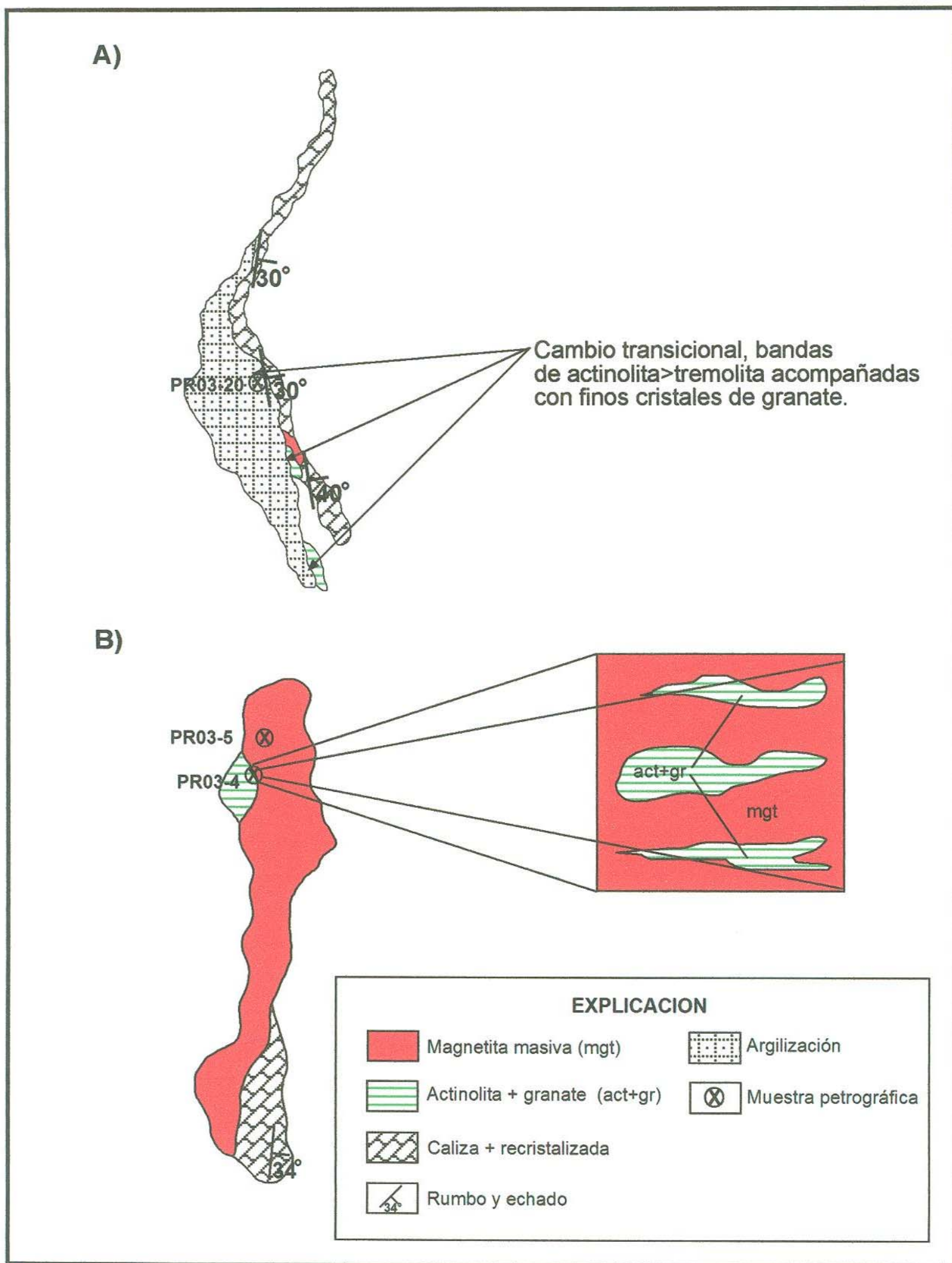


**Foto 18.-** Microfotografía de la muestra PR03-30 en la cual se muestran cristales de granate intercreciendo con cristales de piroxeno (clinopiroxeno) los cuales a su vez son cortados por vetillas tardías de cuarzo LP, 4X.



**Foto 19.-** Microfotografía de la muestra PR03-29 la cual muestra cristales de piroxenos cortados por una vetilla tardía de cuarzo LP, 4X.





**Figura 15.-** A) Sección en planta que muestra la ubicación de la zona transicional. B) sección en planta en donde se aprecia como los cristales de actinolita + granate son mezclados con el cuerpo masivo de magnetita.



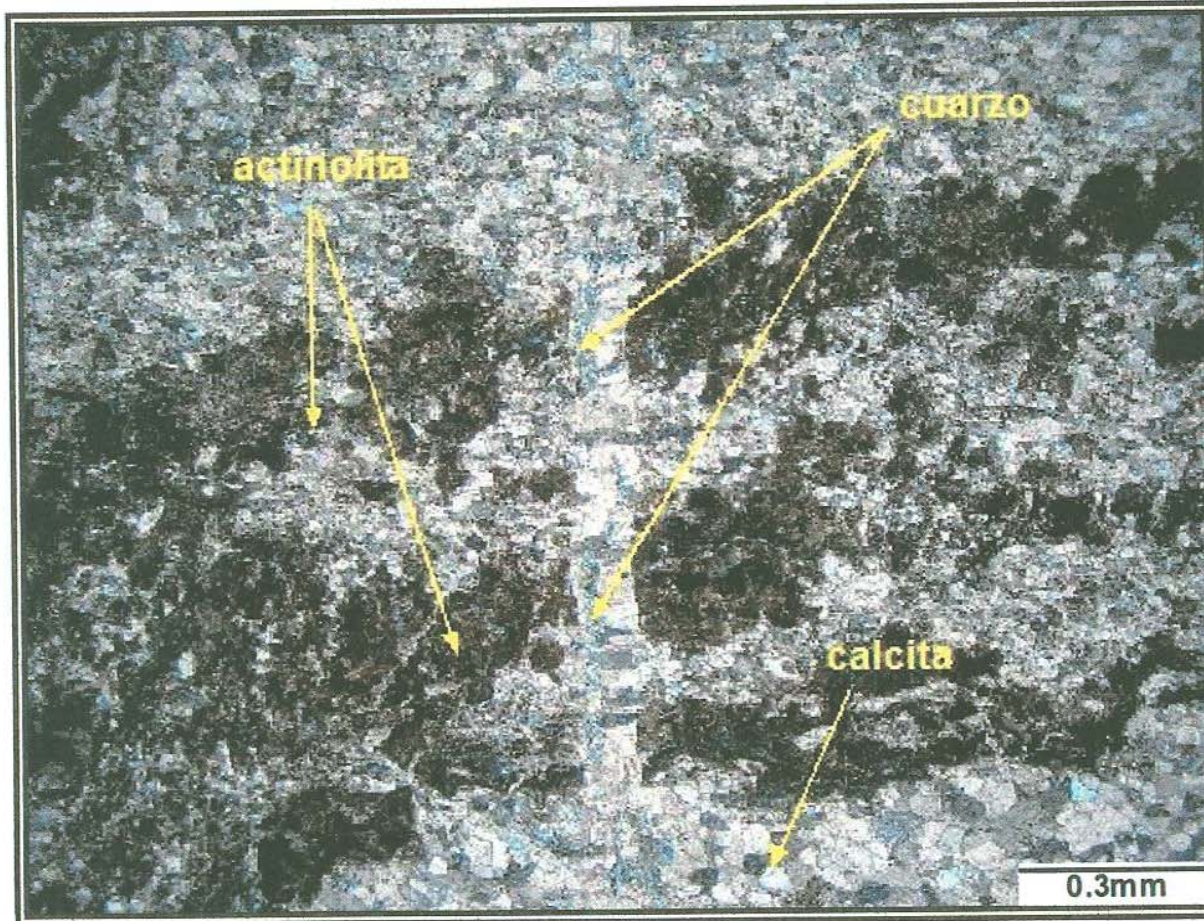


Foto 20.- Microfotografía de la muestra PR03-20 la cual muestra un aparente bandeamiento constituido por cristales de actinolita y anfíbol (probablemente hornblenda?) dentro de una caliza mas o menos recristalizada. A su vez son acompañados por un evento tardío donde se encuentra una vetilla de calcita>cuarzo que corta a todos los cristales anteriormente mencionados. LP, 4X.



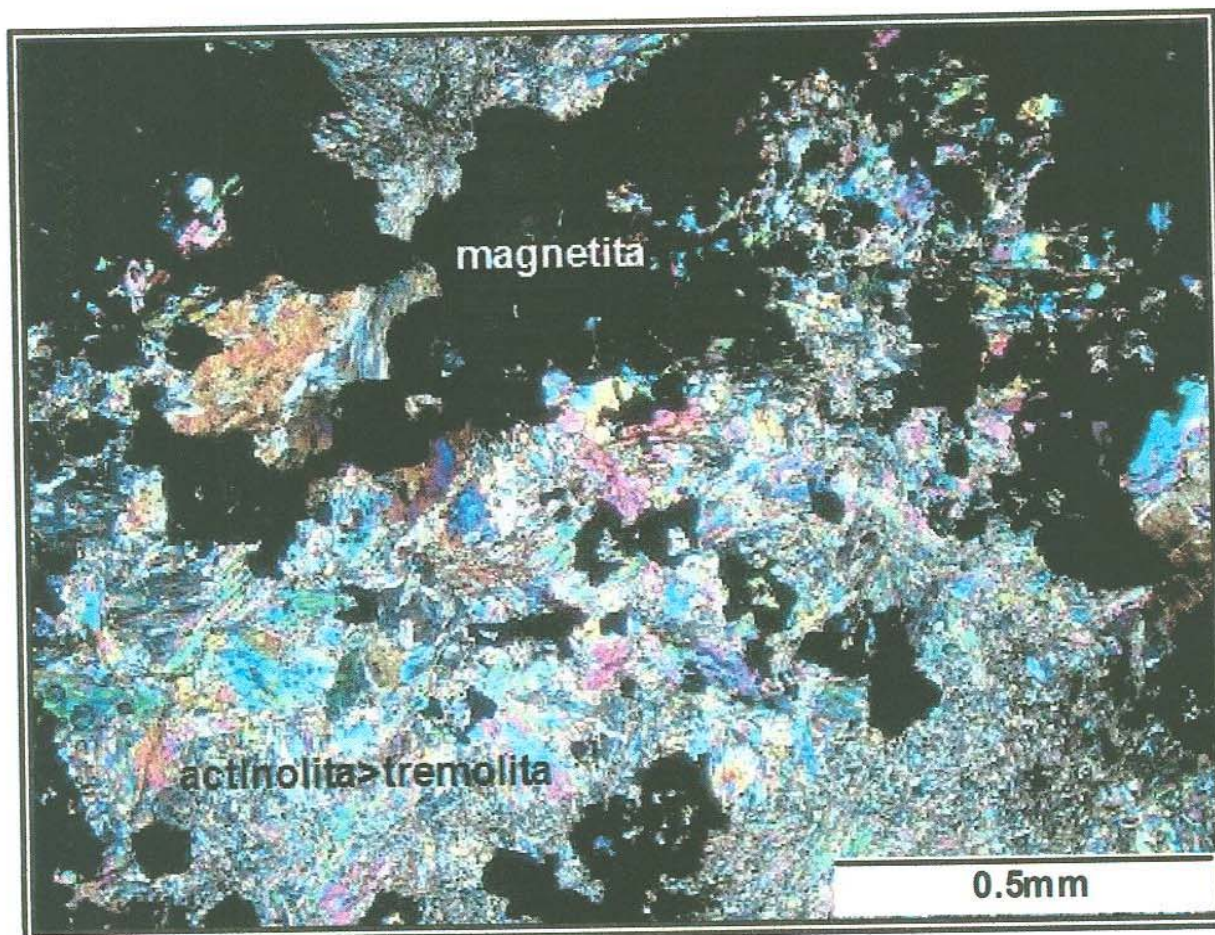


Foto 21.- Microfotografía de la muestra PR03-4 en donde se observa una mezcla de cristales de magnetita y actinolita>tremolita. LP, 4x.

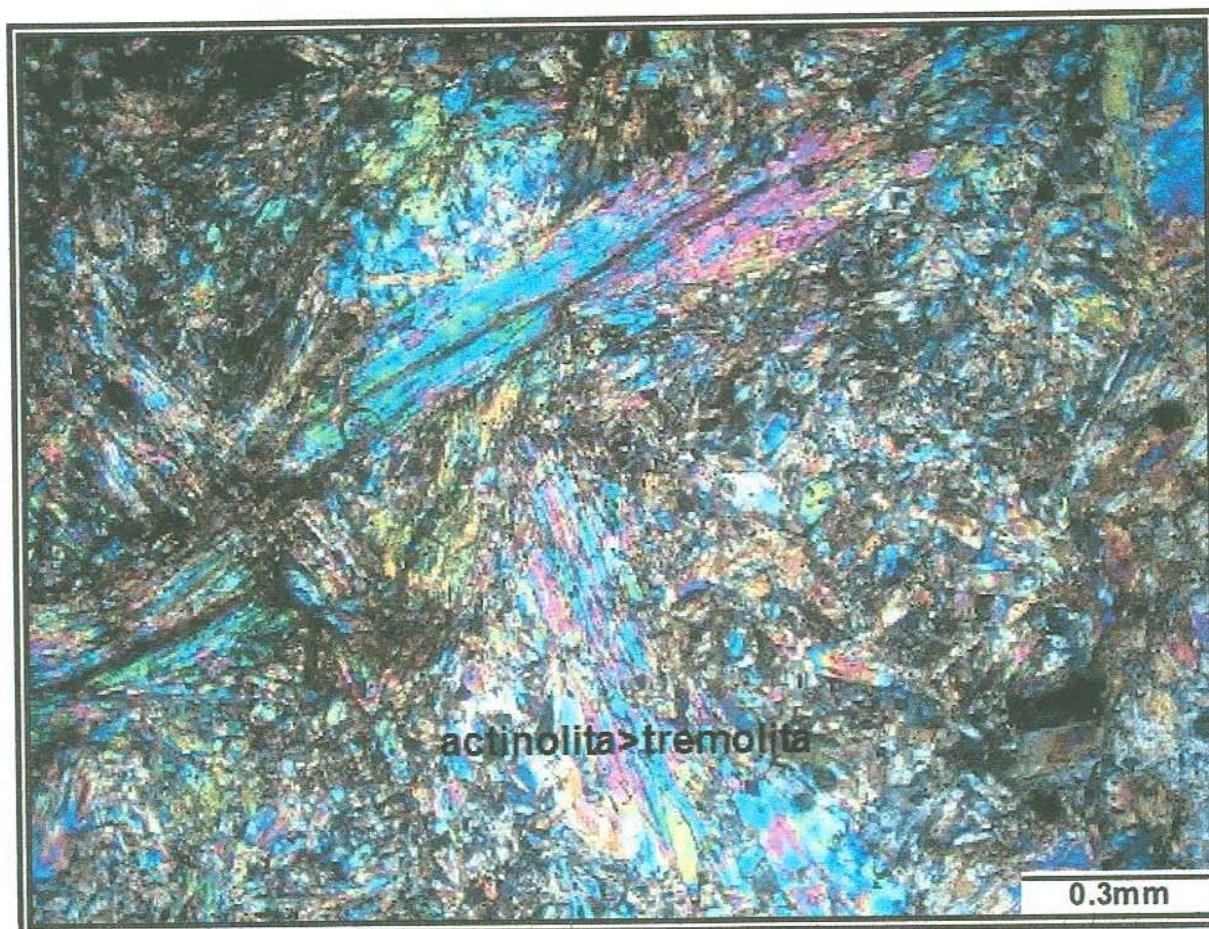


Foto 22.- Microfotografía de la muestra PR03-4 en la cual se aprecian solo cristales de actinolita>tremolita. LP, 10x.



Por ultimo en la parte centro del área se presenta una modera actinolización que afecta principalmente a los cristales de granate mostrándose esta por encima de ellos (reemplazándolos), como fue anteriormente descrito dentro del párrafo de Gr>Px.

### **VIII.3.- Mineralización de Hierro**

Los cuerpos mineralizados se encuentran principalmente localizados en las partes bajas del skarn, los cuales se presentan de forma concordante con la unidad de flujo andesítico – dacítico perteneciente a la parte superior del miembro inferior (Figura 7).

Estos cuerpos guardan un paralelismo muy marcado con el cuerpo de calizas recristalizadas teniendo una orientación y echados muy semejantes. La mejor exposición de estos cuerpos masivos de magnetita se da en un cuerpo que se encuentra de manera ininterrumpida en la parte centro – norte del área cartografiada y que llega alcanzar dimensiones promedio de 5 x 40 m, mostrando un acuñamiento hacia la parte sur y norte, observándose en algunos casos solo pequeños cuerpos con dimensiones promedio de 3 x 10 m ó en su defecto solo se alcanzan a apreciar pequeños parches de magnetita dentro de la roca (Figura 12).

Se presentan principalmente como cuerpos masivos de forma irregular reemplazando total o parcialmente al cuerpo de caliza, se acomodan generalmente en las partes bajas del skarn y se alcanzan a observar en algunas ocasiones, vestigios de lo que pudiera ser una estratificación, la cual fue muy bien aprovechada por la mineralización de magnetita para poder penetrar a los horizontes calcáreos y de esta forma reemplazarlos. A su vez también se observa esta mineralización en vetillas con anchos variables de unos cuantos centímetros, como se puede apreciar en las Fotos 23 y 24. De la misma forma se tiene que la mineralización de hierro fue posterior a la biotitización de la unidad de flujo andesítico con biotita, como se puede apreciar en la Foto 2. Además estos cuerpos presentan una ley estimada de 50-70% en contenido de Fe y valores de Au de hasta 1.2 gr/ton (Flores-Vásquez, 2006).

Formación Tarahumara. (Figura 7).

La zona de silicificación se encuentra localizada en la parte más norte dentro del área cartografiada. Tiene una dimensión promedio de 20 x 50 m y es tan penetrativa que borró cualquier vestigio de texturas, estructuras y composición mineralógica previas. Sin embargo, su disposición en superficie





**Foto 23.-** Fotografía que muestra al cuerpo de magnetita con vestigios de lo que probablemente fue la estratificación de los horizontes calcáreos.



**Foto 24.-** Fotografía que muestra una vetilla de magnetita dentro de los horizontes calcáreos recristalizados.



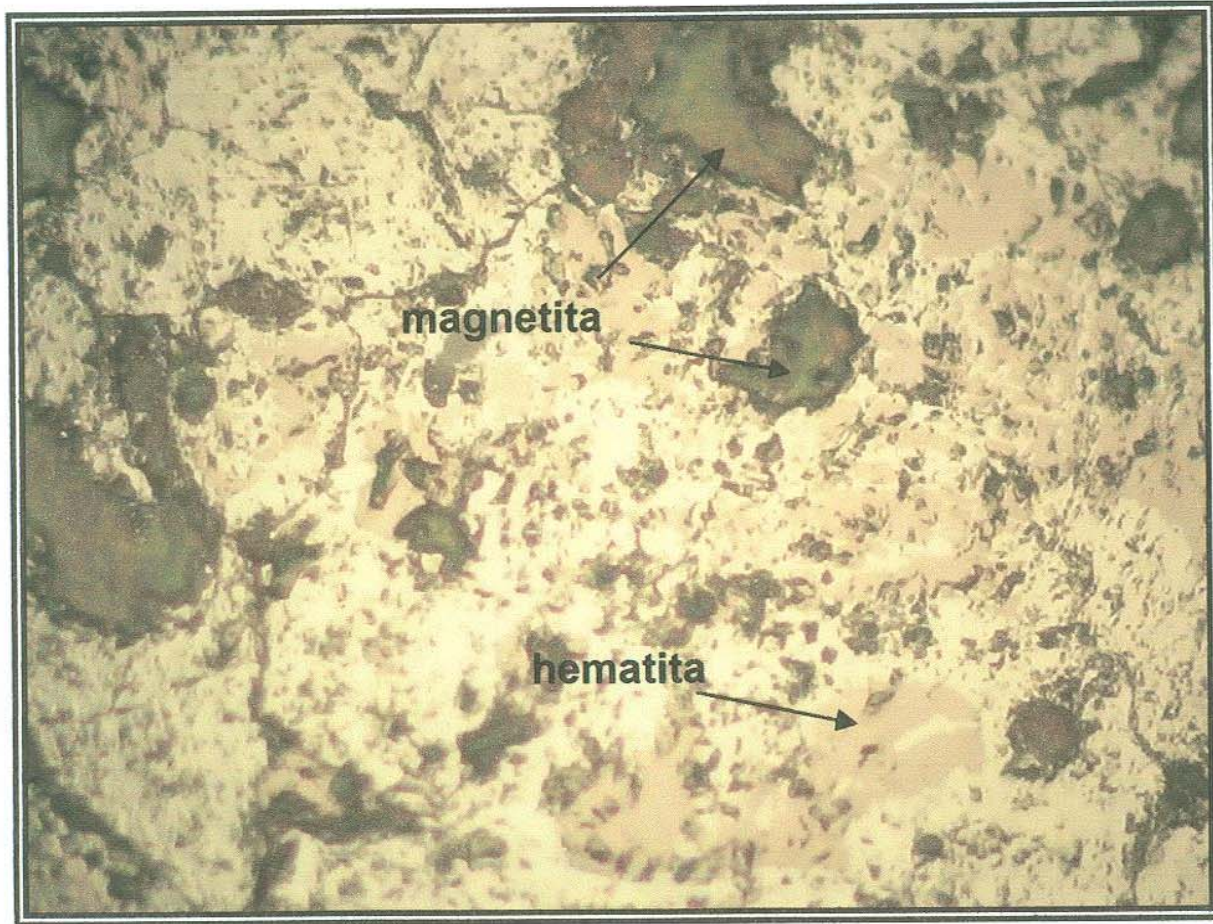


Foto 25.- Microfotografía de la muestra PR03-4, mostrando la presencia de martitización con algunas zonas irregulares de hematita (color crema claro). LN, 20X.

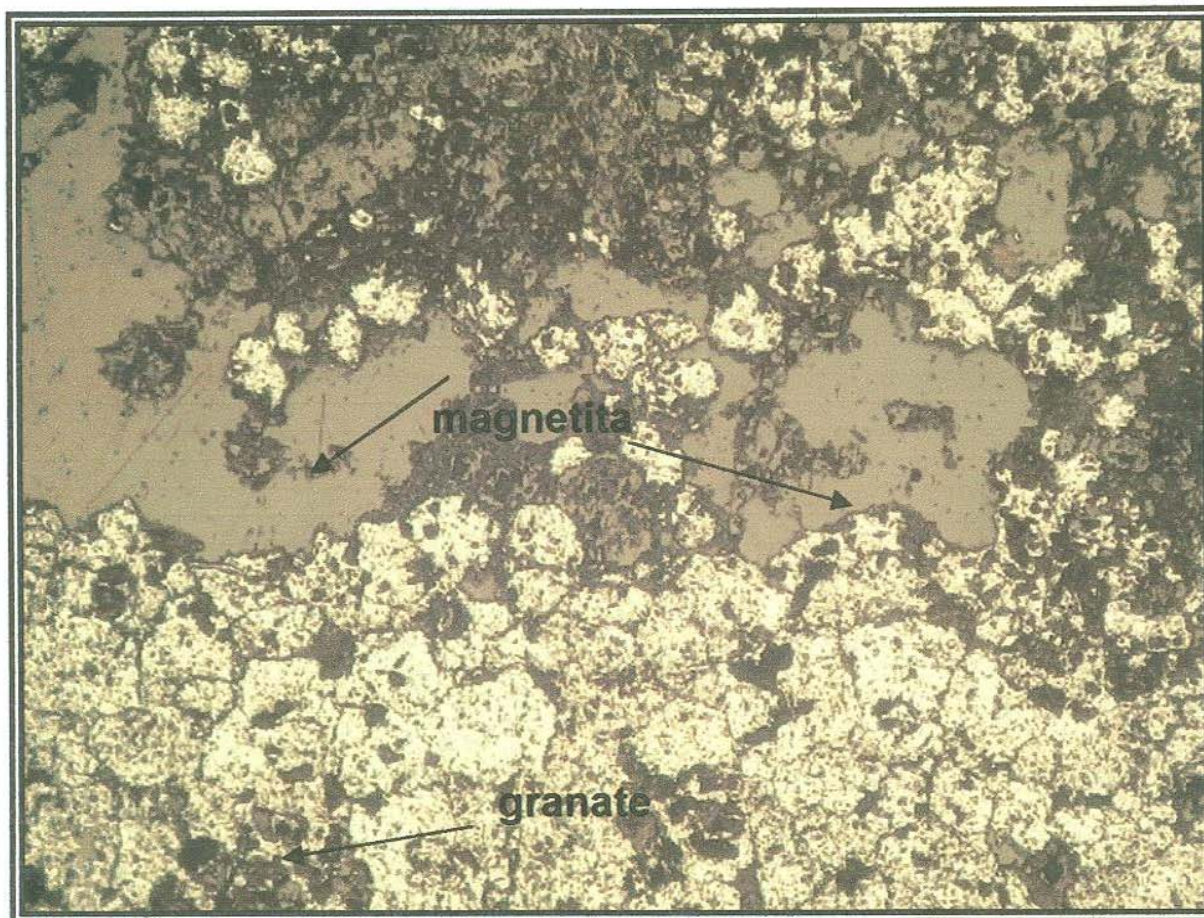


Foto 26.- Microfotografía de la muestra PR03-4, mostrando la presencia de magnetita con delgadas (0.3 mm) bandas irregulares de silicatos. LN, 20X.



parece ubicarla justo en la parte centro de la zona de skarn y la parte superior del miembro inferior. En algunas partes se pueden observar ciertas brechas, al parecer de explosión, con fragmentos de distintos tamaños, angulosos y completamente silicificados, algunos de ellos ligeramente rotados semejando a una "crackel breccia". Asociado a esta silicificación y zonas de brecha, se observan una serie de fracturas con dirección N-S (Figura 16), las cuales podrían corresponder a los conductos de abastecimiento de esta alteración. La localización y distribución de esta alteración, sugiere un evento posterior al skarn, aunque esta observación aún debe de corroborarse. Dentro de la zona de fracturas, se tiene presencia de hematita que le da en partes un tono rojizo a esta zona (Foto 27 y 28).

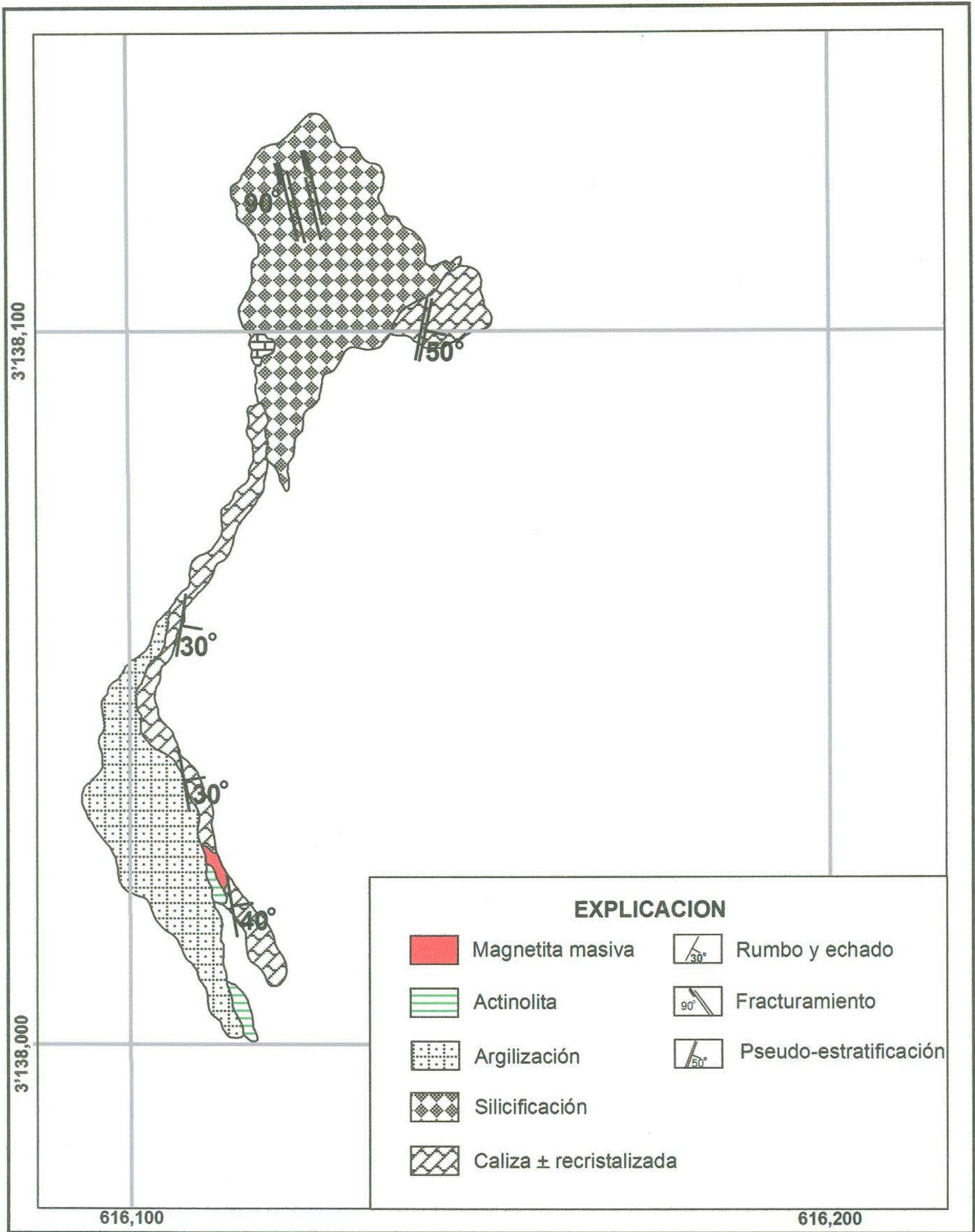
La zona de argilización parece concentrarse solo en la unidad de andesita-dacita, su distribución es irregular y en algunas partes parece haber sido afectado por la alteración retrógrada, lo cual la incluye un poco anterior al skarn y previa posiblemente a la silicificación.



Formación Tarahumara	Miembro Inferior 89 ± 0.8 Ma	Miembro Medio	Miembro Superior 70 ± 0.6 Ma
<b>Batolito Laramídico</b>	58.8 ± 1.3 Ma Metasomatismo biotita +magnetita, brechas de cuarzo-turmalina		
<b>Skarn El Garabato</b>	<b>Mineral</b>	<b>Progradante</b>	<b>Retrógrada</b>
	Granate	—————	
	Piroxeno	—————	
	Actinolita		—————
	Tremolita		—————
	Calcita		—————
	Clorita	—————	—————
	Epidota	—————	—————
	Cuarzo		—————
	Magnetita		—————
<b>Pórfido de cobre Suaqui Verde y Cuatro Hermanos</b>	Hematita		—————
	Silicificación		—————
	Argilización	—————	—————
			?
	57 ± 0.3 Ma 55.7 ± 0.3 Ma		Vetas de Au-Ag

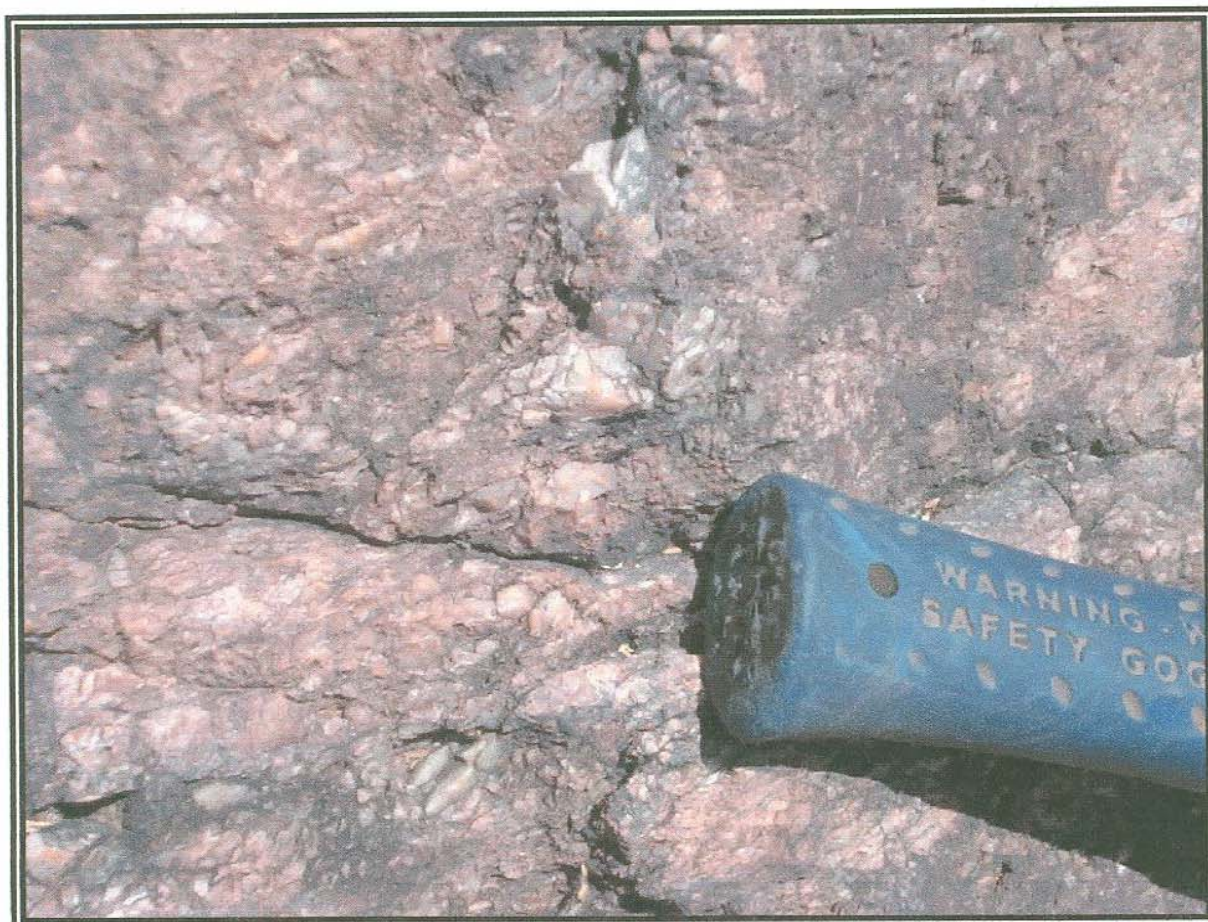
Figura 16.- Secuencia paragenética de las alteraciones progradante y retrógrada del skarn de hierro El Garabato, eventos magmáticos y de alteración sucedidos en la región centro de Sonora. Fechamientos realizados por Barra (2005) y McDowell et.al (2001).



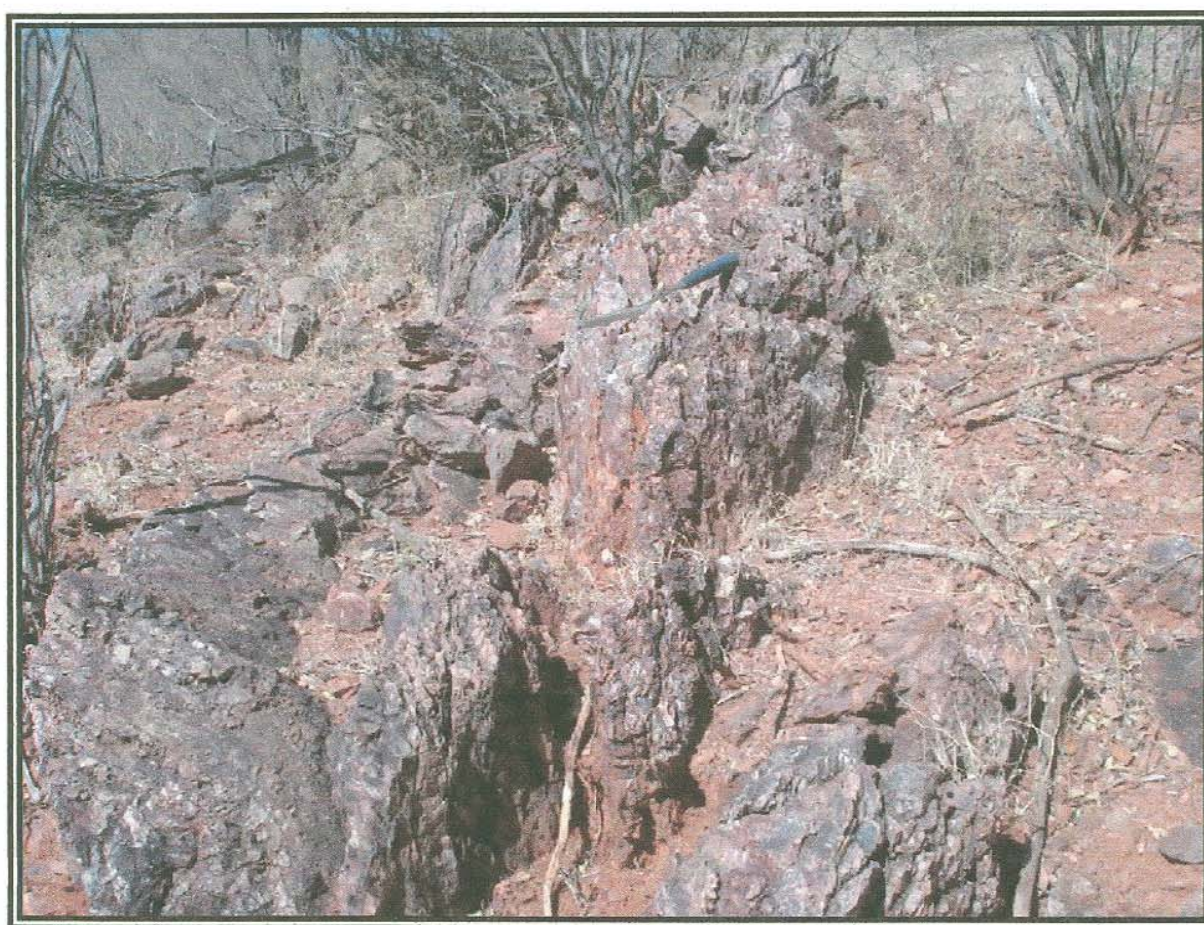


**Figura 17.-** Representación de la alteración hidrotermal constituida por una zona de silicificación y una zona de argilización.





**Foto 27.-** Fotografía de la zona silicificada que muestra el fracturamiento vertical casi norte sur, acompañada de brechamiento heterogéneo.



**Foto 28.-** Fotografía que muestra el brechamiento dentro de la zona de silicificación, semejando una crackel breccia, siguiendo estructuras N-S.



## IX.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El marco tectónico donde se localiza el depósito de hierro El Garabato, en el centro del Estado de Sonora, corresponde a un ambiente del tipo Arco magmático, como ha sido señalado por Flores-Vázquez (2006); Roldán-Quintana (2002); McDowell y Roldán-Quintana (2001) entre otros. Por lo que se puede considerar que este depósito corresponde, desde el punto de vista tectónico a los yacimientos de hierro del tipo cordillerano, asociados a cuerpos intrusivos de composición granodiorítica y cuarzo-monzonítica y raramente a granito como ha sido sugerido por Einaudi et al., (1981) y Meinert, (1992).

El mapeo detallado del skarn El Garabato, el cual es uno de los tantos que se dan en el centro del Estado de Sonora, presenta todas las características de formación de un skarn, los cuales han sido descritos ampliamente en la literatura por Einaudi, et al., (1981); Einaudi, Burt, (1982); Meinert, (1992); Meinert, (1998). En este caso particular, se presenta una serie de eventos muy bien definidos los cuales están representados por una alteración prógrada bien definida constituida principalmente por una zona de Gr>Px, Gr>>Px, Px>Gr y marmolización en todos los casos; con una alteración retrógrada sobreimpuesta constituida principalmente por actinolita>tremolita + calcita que ocupa los espacios vacíos entre los cristales de granate y/o rellenando fracturas y en ocasiones hasta reemplazando los bordes, acompañado de clorita ± epidota que en la mayoría de las veces se encuentra de forma intersticial o en algunos casos reemplazando parcialmente a minerales ferromagnesianos. Así mismo, este último estadio es cortado por una serie de vetillas tardías de cuarzo, calcita y cuarzo + calcita, con una mineralización de hierro introducida entre el término de la alteración prógrada e inicio de la retrógrada (Figura 12).

Dentro del área de estudio no fue posible observar la relación directa que existe entre el cuerpo de skarn respecto al cuerpo intrusivo; sin embargo, la distribución de las zonas metamórficas sugieren que este cuerpo intrusivo pudiese encontrarse muy cerca del horizonte calcáreo en lo que es la parte centro del área estudiada, dado la presencia de las asociaciones mineralógicas de mayor temperatura como son: Gr>Px, Gr>>Px y Px>Gr, que hacen suponer



un mayor suministro de calor en este punto, decreciendo hacia el norte mayormente. Además, la presencia de este intrusivo, que debe ser parte del batolito de Sonora, se encuentra ampliamente distribuido en la región, con afloramientos de esta roca en no más de 6 km a la redonda o hacia el sur, con una profundidad estimada de 60 - 140 m, definida a partir de la estratigrafía del área de estudio. Una distribución de las zonas de asociación mineralógica y probable presencia del intrusivo se da en la Figura 18.

Sin lugar a dudas, el cuerpo de skarn El Garabato ha sido fuerte a moderadamente desplazado de su posición original, por estructuras NW-SE, en partes seccionado tal vez anterior a la formación de las cuencas terciarias, ya que aparentemente este fallamiento es interrumpido por estas estructuras de relleno. Por otro lado, se desconoce su posición en tiempo respecto al pórfido de cobre de Suaqui Verde; sin embargo, relaciones de campo, sugieren que este cuerpo parecería estar mas relacionado a la intrusión del batolito de Sonora en esta región, dado su relación espacial y la fuerte asociación de este tipo de mineralización de hierro regularmente asociado a este escenario geológico. Para El Garabato, el estudio de superficies pulidas no detectaron la presencia de sulfuros y solo fue determinada la presencia del mineral de hierro. Por lo tanto, la descripción de minerales base para los depósitos de El Sapo y Hechal, vienen a confundir la relación genética de este tipo de depósitos en esta zona. Uno esperaría una asociación mas de metales base en el depósito El Sapo, con una relación genética mas cercana al pórfido de cobre de Suaqui Verde, por su disposición espacial; sin embargo, esto no parece tan sencillo de explicar para el skarn El Echal, el cual creemos que su mineralogía, al menos hasta hoy debe de tomarse con mucha reserva.

Lo que si es claro, es que el empujamiento del batolito de Sonora en esta región, debió producir una etapa muy temprana de metasomatismo potásico (biotita + magnetita) previa a la formación del skarn, como es sugerida por la biotitización de la unidad por debajo del skarn El Garabato, la cual ha sido observada en gran parte de la Formación Tarahumara cercanas a estos cuerpos intrusivos.



Por otro lado, y aunque en este estudio no queda claro, aparentemente se tiene una silicificación posterior al skarn; sin embargo no se puede decir lo mismo de la alteración argílica, la cual no se tienen argumentos de campo para definir su presencia en el tiempo. Sin embargo, puede mencionarse que al menos la silicificación podría estar relacionada a la mineralización de Au-Ag en vetas descrita por Flores-Vázquez (2006) en este distrito, la cual podría relacionarse a la etapa de mineralización del pórfido de cobre en esta región del centro de Sonora.



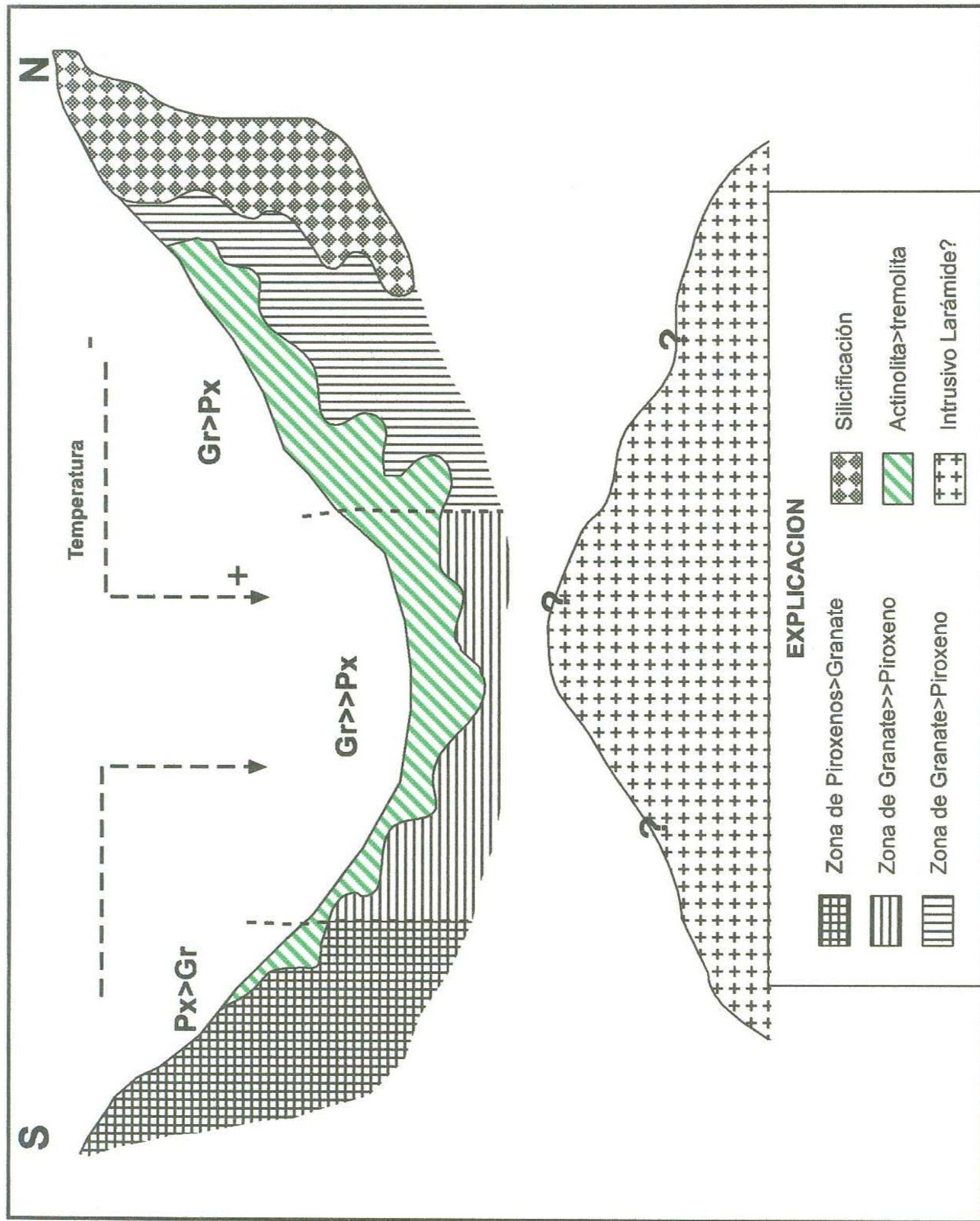


Figura 18.- Sección esquemática longitudinal (N-S) al cuerpo de skam, donde se localiza la distribución de las diferentes zonas de alteración (progradante y retrógrada), con la localización de un cuerpo intrusivo a no más de 200 m del punto más bajo en la sección.



## REFERENCIAS

- Amaya-Martínez, R., Franco, R., González, C., M., Rodríguez V., D. y Zamora, A., G., 1992, Estudio de geología superficial de semidetalle Prospecto "Onavas", Estado de Sonora: (reporte para Petróleos Mexicanos, sin publicar).
- Alencaster, G. de Cserna, 1961b, Fauna fósil de la Formación Santa Clara (Cárnico), del Estado de Sonora, parte III, in Paleontología del Triásico Superior de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, num. 11, 38p.
- Barra, F., Ruiz, J., Valencia, V., Ocho-Landin, L., Chesley, J.T., Zürcher, L., 2005, Larámide porphyry mineralization in northern México: Age constraints from Re-Os Geochronology in Molybdenite. *Economic Geology*, v.100, p. 1605-1616.
- Bartolini-Navarro, C., Damon, P., Shafiqullah, M. and Morales-Montaña, M., 1994, Geochronologic contributions to the Tertiary sedimentary volcanic sequences ("Baucarit Formation") in Sonora, México: *Geofísica Internacional*, v 33., p. 67-77.
- Cochemé, J. J. and Demant, A., 1991, Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico, in *Studies of Sonora Geology*, Geological Society of America Special Paper, num. 254, p. 81-94.
- Consejo de Recursos Minerales, 1992, Monografía Geológico - Minera del Estado de Sonora.
- Damon, P. E. and Bikerman, 1964, Potassium Argon dating post-Laramide plutonic and volcanic rocks with in the Basin and Range Province of the Southeastern Arizona and adjacent areas: XXVIII Inst. Geol. Congr. New Delhi.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., and Clark, K. F., 1983a, Geochronology of the Porphyry Copper Deposits and related mineralization of Mexico, *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1052-1071.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J. y Cochemé, J. J., 1983b, El Batolito Larámide (90-40 Ma); Memoria de la XV Convención Nacional, AIMMGM, A.C., Guadalajara, México, p. 65-95.
- Damon, P. E., 1975, Dating of Mesozoic-Cenozoic metallogenetic provinces with in the Republic of Mexico (1965), Laboratory of Isotope Geochemistry Department of Geosciences, University of Arizona and Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Archivo C.R.N.N.R.; Dirección General.
- Dirección de Fomento Minero y Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, 1993, Carta Geológica Sonora 1:500 000.
- Dumble, E. T., 1900, Notes on the Geology of Sonora, México: *American Institute of Mining Engineers Transactions*, v. 29, p. 122-152.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J, 1981, Skarn Deposits. *Econ. Geol.* 75<sup>th</sup>. Anniversary Volume, USA, p. 317-391.
- Einaudi, M.T., Burt, D.M. 1982. Introduction, terminology, classification, and composition of skarn deposits. *Econ. Geol.*v. 77. p. 745-754.



- Flores-Vásquez, Isidro I., 2001, Brechas de Cuarzo-Turmalina en la porción centro sur del Estado de Sonora, con énfasis en la geología, alteración, mineralización y origen de la brecha La ventana, municipio de Cajeme Sonora: tesis. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 64p.
- Flores-Vásquez, Isidro I., 2006, Magmatismo Cretácico Tardío-Terciario Temprano y condiciones de P-T de emplazamiento para intrusiones relacionadas al pórfido de cobre Suaqui Verde, Centro-Este de Sonora: Tesis de Maestría Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 107p
- Franco-Martínez, R., 1994, Geología del área de Cumuripa, Sonora: Tesis. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 59p.
- Gans, P.B., 1997, Large-Magnitude Oligo-Miocene in Southern Sonora: Implications for the Tectonic Evolution of Northwest Mexico: *Tectonics* v. 16, p. 388-408.
- Gastil, R. G. and Krummenacher, D., 1977, Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino. *Geological Society of America Bulletin*, v 88, p. 189-198.
- Henry, D. C. and Aranda-Gómez, J. J., 1992, The real southern Basin and Range: Mid to late Extensión in México, *Geology*, v. 20, p. 701-704
- INEGI, 1982, Carta Topográfica 1:50,000 H12D14 "Suaqui Grande", Sonora México.
- King, R.E., 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 50, p. 1625-1722.
- Kwak, T.A.P. 1987. W-Sn skarn deposits. Elsevier, New York. 451 p.
- Martínez-Hernández, E., 1984, Palinoestratigrafía de sedimentos en el Estado de Sonora, México, in Celis-Gutiérrez, Malpica-Cruz, R., and Ortlieb, L., eds., *Symposium on Neotectonics and sea level variations in the Gulf of California area*, Abstracts volume, p. 43-44.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R. and González-Carlos, M., 1994, The Tarahumara Formation – A neglected component of the Larámide Magmatic Arc, II International Symposium on the Cenozoic tectonics and volcanism in Mexico Abstract. UGM Annual Meeting Puerto Vallarta, Jalisco, México. November 7-11.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana J. and Amaya-Martínez R., 1997, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v, 109, No., 10, p. 1349-1360.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J and Connelly, J. N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism; *Geological Society of America Bulletin*, v, 113, No. 4, p. 521-531.
- Meinert, L.D. 1998. A review of skarns that contain gold. In D.R.Lentz Editor: *Mineralized intrusions-related skarns systems*. Short course vol 26. Mineralogical Association of Canadá. P. 359-414.



- Meinert, L.D. 1992. Skarns and skarn deposits. *Geosc. Canadá*. Vol. 19, No. 4. p. 919-949.
- Menicucci, S. 1975, Reconnaissance géologique et minière de la region entre Hermosillo et le Rio Yaqui (Sonora Central Mexique), Thèse de Doctorat, Université Scientifique et Medicale de Grenoble, Francia.
- Morales-Montaña, M., Bartolini-Navarro, C., Damon, P. E., and Shafiqullah, M., 1990, K-Ar dating, stratigraphy, and extensional deformation of Sierra Lista Blanca, Central Sonora, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with programs*, v. 22, num. 7, p. A364.
- Morales-Montaña. M., Bartolini-Navarro, C., Damon, P. E. and Shafiqullah, M., 1991, Geology and geochronology of the Sierra Lista Blanca, central Sonora, México: Progress report, *Bol. Depto. Geología, UNISON*, v.8, num.1, p. 1-5.
- Mora-Álvarez, G., 1993, Relaciones estratigráficas y geocronológicas entre las unidades volcánicas de la Sierra Santa Ursula, en Sonora, y el magmatismo de la región del Golfo de California, *in* Delgado, L. A., and Martín-Barajas, A., eds., contribuciones a la tectónica del occidente de México: *Unión Geofísica Mexicana Monografía*, núm. 1, p. 123-145.
- Obregón, A.L., and Arriaga, A.F., 1991. Coal in Sonora, México in Pérez -Segura E., and Jacques-Ayala C., eds., *Studies of Sonora Geology: Geological society of America Special Paper 354*.
- Paz-Moreno, F., A., 1992, Le Volcanisme Mio-Plio-Quaternaire de L'état de Sonora (Nord-Ouest du Mexique): Evolution Spatiale et Chronologique; Implications Pétrogénétiques. Thèse Docteur en Sciences, Marseille, Université Aix-Marseille III, Marsella, Francia de Droit, A139, 212p.
- Pérez-Segura, E., 2006, Estudio Metalogenético de los yacimientos de Ni-Co (Cu-Zn) de la Esperanza, Sonora central: Caracterización de los depósitos y relaciones con el magmatismo Laramídico. Tesis Doctor en Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Querétaro, 213p.
- Pérez-Segura, E., 1985, Carta Metalogenética de Sonora 1: 250,000 , Una interpretación de la metalogenia de Sonora: *Gobierno del Estado de Sonora y Energéticos*, Publicación 7, p.10-13
- Rangin, C., 1977. Tectónicas sobrepuestas en Sonora septentrional. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, revista*, vol. 1, No. 1, p. 44-47.
- Roldán-Quintana, J., 2002. Caracterización geológico-geoquímica y evolución del arco magmático Mesozoico-Terciario entre San Carlos y Maycoba, sur de Sonora, Doctorado en Ciencias (Geología), México D.F. p 180
- Roldán-Quintana, J., 1979, Geología y Yacimientos del Distrito de San Felipe, Sonora *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, v.3, num. 2, p.97-115.
- Stewart J. H. and Roldán-Quintana, J., 1991, Upper Triassic Barranca Group; Nonmarine and Shallow-Marine Rift-Basin of Northwestern Mexico, *in: Studies of Sonora Geology, Special Paper 254, GSA*, p. 19-36.



- Stewart, J.H., and Roldán-Quintana, J., 1994, Map showing late Cenozoic extensional tilt patterns and associated structures in Sonora and adjacent areas, Mexico: Miscellaneous Field Studies Map MF-2238, U.S. Geological Survey, Reston, VA, United States, 1 sheet.
- Wilson, I. F. y Rocha, V. S., 1946, Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara municipio de San Javier, Estado de Sonora: Comité Directivo para la investigación de recursos minerales México, Bol. 9, 108 p.
- Zürcher, L., 2002, Regional Setting and Magmatic Evolution of Larámide Porphyry Copper Systems in Western Mexico: Ph.D. thesis unpublished, The University of Arizona, Tucson, Arizona, 427p.



ANEXO

Análisis petrográfico



MUESTRA	UBICACION	TEXTURA	MINERALOGIA	ALTERACION	CLASIFICACION	OBSERVACIONES	ESTUDIO
PR03-1	Miembro medio, unidad inferior.	Piroclástica ligeramente fluidal.	Cristales de plagioclasa, hornblenda, cuarzo y magnetita	Débil-moderada silicificación y una débil cloritización a penina	Toba vítrea litocristalina	Presencia de espículas de vidrio y esferulitos producto de la desvitrificación de la roca.	Petrográfico
PR03-2	Miembro medio, unidad media	Porfídica con variante a poiquilítica, fluidal y glomeroporfídica,	Fenocristales de oligoclasa-andesina, hornblenda, actinolita, esfena? y magnetita.	Moderada cloritización a penina ± epidotización y una débil silicificación	Andesita porfídica fluidal	—	Petrográfico
PR03-4	Skarn, mineralización de hierro	Granoblástica fina.	Cristales de magnetita, tremolita, actinolita, hornblenda y cuarzo	Moderada-intensa hematita y una débil cloritización a penina.	Mena de magnetita	—	Petrográfico y Minerográfico
PR03-5	Skarn	Granoblástica fina.	Cristales de magnetita, tremolita, cuarzo y calcita	Moderada hematita	Mena de magnetita	—	Petrográfico y Minerográfico
PR03-6	Miembro inferior, unidad superior	Porfídica a fluidal	Cristales de plagioclasa, cuarzo, tremolita y arcillas?	Intensa silicificación, débil argilización	Flujo andesítico-dacítico	Muestra tomada en la zona de argilización	Petrográfico y Minerográfico
PR03-7	Skarn, zona de gr > px, alteración progradante	Granoblástica fina.	Cristales de granate finos, actinolita-tremolita hornblenda, cuarzo, y magnetita .	Débil cloritización	Granatita fina	—	Petrográfico
PR03-8	Skarn, zona de mármol	Granoblástica	Cristales de calcita, actinolita, piroxeno, epidota y magnetita.	—	Mármol	Macroscópicamente se observan fenocristales de granate intercrecidos.	Petrográfico



MUESTRA	UBICACION
PR03-20	Skarn, alteración retrograda
PR03-21	Miembro inferior, unidad superior
PR03-22	Miembro inferior, unidad media
PR03-23	Miembro inferior, unidad superior
PR03-24	Skarn, zona de gr > px, alteración progradante
PR03-25	Skarn, zona de gr > px, alteración progradante

MUESTRA	UBICACION	TEXTURA	MINERALOGIA	ALTERACION	CLASIFICACION	OBSERVACIONES	ESTUDIO
PR03-9	Skarn	Granoblástica	Cristales de calcita, tremolita-actinolita y magnetita	Débil hematita	Caliza recristalizada	—	Petrográfico
PR03-10	Skarn, mineralización de hierro	Granoblástica	Cristales de magnetita, actinolita-tremolita y calcita	Débil hematita	Mena de magnetita	—	Mineragráfico
PR03-11	Skarn	Granoblástica	Cristales de granate, actinolita-tremolita y magnetita.	—	Granatita fina	Muestra tomada entre el cuerpo de magnetita y zona de granates.	Petrográfico y Mineragráfico
PR03-12	Skarn	Granoblástica	Cristales de calcita, epidota, muscovita.	Débil hematita	Caliza recristalizada	—	Petrográfico
PR03-13	Miembro medio, unidad inferior.	Piroclástica con variante a traquítica, semifluidal y porfídica	Cristales de plagioclasa, hornblenda y epidota	Débil-moderada silificación y una débil cloritización a penina	Toba vítrea litocristalina	Presencia de espículas de vidrio y esferulitos producto de la desvitrificación de la roca.	Petrográfico
PR03-15	Skarn	Granoblástica	Cristales de magnetita, actinolita-tremolita y calcita.	Débil hematita	Mena de magnetita	—	Petrográfico y Mineragráfico
PR03-17	Skarn	Granoblástica	Cristales de calcita, actinolita-tremolita, epidota y magnetita.	—	Caliza recristalizada	—	Petrográfico
PR03-18	Miembro inferior, unidad superior	Porfídica con sutil flujo	Cristales de plagioclasa, cuarzo magnetita	Moderada silificación, débil hematita.	Flujo andesítico-dacítico	—	Petrográfico
PR03-19	Skarn	Granoblástica	Cristales de calcita granate, epidota y magnetita.	Débil hematita	Caliza recristalizada	—	Petrográfico