

EL GNEIS NOVILLO Y ROCAS METAMORFICAS ASOCIADAS EN LOS CAÑONES DEL NOVILLO Y DE LA PEREGRINA, AREA DE CIUDAD VICTORIA, TAMAULIPAS

*Fernando Ortega-Gutiérrez**

RESUMEN

El Gneis Novillo precámbrico consiste en el Cañón del Novillo al poniente de Ciudad Victoria, Tamaulipas, de ortogneis gabroide-anortositico, mientras que en el cercano Cañón de La Peregrina aflora también paragneis cuarzo-feldespático con algunas capas de mármol. El contacto premetamórfico entre las dos secuencias parece ser intrusivo, y el conjunto está en contacto tectónico con el Esquisto Granjeno paleozoico, que en el Cañón del Novillo consiste de esquisto de albita, rocas verdes, serpentinita y metacaliza. Cuerpos ígneos básicos y graníticos, deformados y algo recrystalizados, intrusionan al Gneis Novillo y probablemente a los esquistos.

Los gneises tienen un bandeamiento generalmente paralelo a la foliación regional (N52°W, 75°NE en promedio), la cual es axial tanto a pliegues isoclinales como a mas abiertos cuyos ejes tienen una dirección de N48°W y buzamiento de 28°. Dos fases de deformación posteriores produjeron milonización paralela al bandeamiento gnéisico en las cercanías del contacto del gneis con el Esquisto Granjeno, y el desarrollo de bandas de cataclasis, hasta de más de 100 m de espesor, con un rumbo promedio N40°E e inclinación de 62°SE. Los diques básicos se emplazaron paralelamente a estas últimas.

Las condiciones del metamorfismo del Gneis Novillo se asignaron a la facies de granulita, estimándose, en base a la estabilidad experimental conocida de las asociaciones minerales encontradas en las granulitas básicas, un rango de temperaturas de 700-800° C y de 8-10 kb de presión litostática, en presencia de escasos fluidos acuosos. Una retrogresión posterior, asociada a la cataclasis se verificó en la parte más baja de la facies de esquisto verde. El metamorfismo del Esquisto Granjeno en contraste, se desarrolló a bajas temperaturas y probablemente a elevadas presiones, como lo sugieren sus conjuntos minerales, ocasionalmente con stilpnomelano, y la presencia (reportada) de glaucofano cerca de la serpentinita del Cañón del Novillo.

Se propone un modelo genético de inmiscibilidad líquida, por diferenciación de un magma gabroide-anortositico original, para explicar la formación premetamórfica de las nelsonitas del Gneis Novillo.

ABSTRACT

The Precambrian Novillo Gneiss in Novillo Canyon west of Ciudad Victoria, Tamaulipas, consists of gabbroid-anorthositic orthogneiss, overlain in the nearby Peregrina Canyon by quartz-feldspathic paragneiss with some beds of marble. The pre-metamorphic contact of the two sequences seems to be intrusive, and the entire unit is in tectonic contact with the Paleozoic Granjeno Schist which in Novillo Canyon, consists of albite schist, greenstones, serpentinite and some metalimestone. Igneous mafic and granitic rocks, somewhat deformed and recrystalized, intrude the Novillo Gneiss and probably also the Granjeno Schist.

The gneisses show layering usually parallel to the regional foliation (average N52°W-75°NE), which is axial-plane both to isoclinal and to more open folds, the axes of which trend N48°W and plunge 28°. Two later phases of deformation produced, close to the contact with the Granjeno Schist, mylonitization of the gneiss parallel to compositional layering and, elsewhere, cataclastic bands up to more than 100 m wide, that strike N40°E and dip 62°SE on the average. The mafic igneous dykes follow these bands of cataclasis.

Granulite facies metamorphic conditions are inferred for the Novillo Gneiss, with temperature estimated at 700-800° C and 8-10 kb lithostatic pressure, on the basis of known experimental stabilities of the primary mineral assemblages recorded in the basic granulites. Retrogression, associated with the cataclasis, occurred later in the lowermost part of the greenschist facies. Metamorphism of the Granjeno Schist, on the other hand, occurred at low temperature and probably under high pressure, as suggested by mineral assemblages, sometimes with stilpnomelane, and by the reported presence of glaucophane close to the serpentinite of Novillo Canyon.

A liquid immiscibility model from an original gabbroid-anorthositic magma is proposed to explain the pre-metamorphic genesis of the nelsonites of the Novillo Gneiss.

INTRODUCCION

El presente artículo expone los resultados obtenidos de un reconocimiento geológico del terreno formado por rocas metamórficas, principalmente gneísicas, expuesto en los cañones del Novillo y La Peregrina, al poniente de Ciudad Victoria, Estado

de Tamaulipas (Figura 1). Versa esencialmente sobre una descripción petrográfico-estructural detallada de los gneises y de algunas unidades esquistos, sobre las condiciones de su metamorfismo, y sobre la génesis de las nelsonitas que están íntimamente relacionadas con las rocas gnéisicas.

Los trabajos de campo se desarrollaron a lo largo del cauce del Arroyo del Novillo, desde el rancho conocido como El Asbesto hasta donde dicho arroyo corta el contacto fallado entre los gneises y los esquistos, unos 1,200 m al norponiente del

* Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México 20, D. F.

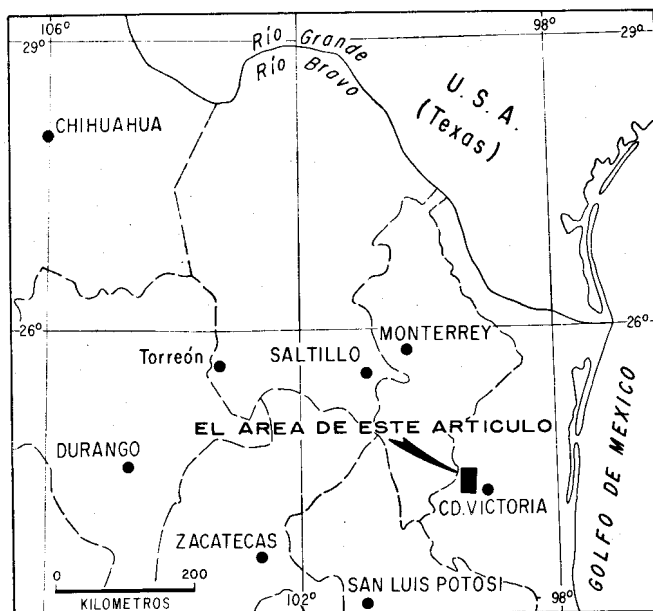


Figura 1.—Localización del área estudiada.

rancho El Gavilán (Figura 2). Algunas secciones auxiliares se estudiaron a lo largo de los arroyos de Los Alamos y de Las Latas. En el Cañón de La Peregrina sólo se examinaron, en forma breve, los gneises que afloran entre el rancho Vicente Guerrero y el de La Joya.

El estudio petrográfico se basó en el examen de 50 secciones delgadas, mientras que las conclusiones tectónicas son el resultado del análisis de unas 200 mediciones de la foliación, lineación y rumbo de contactos y de algunos cuerpos intrusivos.

La presente investigación se desarrolló como parte de un proyecto de colaboración, entre el Consejo de Recursos Minerales de la Secretaría del Patrimonio Nacional y el Instituto de Geología. Se agradece a la dirección de ambas instituciones la oportunidad y el apoyo brindados para la realización de este estudio. En los trabajos de campo se contó con la valiosa y entusiasta colaboración del M. en C. Rolando de la Llata, del Instituto de Geología. El Dr. Zoltan de Cserna, gentilmente hizo la revisión crítica del manuscrito.

INVESTIGACIONES PREVIAS

El Anticlinorio de Huizachal-Peregrina ha sido objeto de numerosos estudios (Heim, 1940; Carrillo-Bravo, 1959, 1961; Fries *et al.*, 1962; Fries y Rincón-Orta, 1965; Denison *et al.*, 1970; de Cserna *et al.*, 1977) que se enfocaron, principalmente, sobre los aspectos estratigráficos, geocronométricos y tectónicos de la región mencionada, sin profundizar ni en la petrología ni en la estructura de las unidades cristalinas que forman el núcleo del anticlinorio. En los artículos mencionados establecieron una columna geológica, que comprende formaciones metamórficas del Precámbrico Superior y posiblemente del Paleozoico inferior, así como no metamórficas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

Las relaciones estructurales entre estas secuencias también se estudiaron con cierto detalle y, salvo la relación entre los gneises y los esquistos, las demás se conocían con certeza desde los trabajos de

Carrillo-Bravo (1959-1961) y Fries y colegas (1962). La relación tectónica entre los gneises y los esquistos que afloran en el Cañón del Novillo fue descrita detalladamente por el autor, en un artículo reciente (de Cserna *et al.*, 1977). La edad de los gneises se estableció definitivamente como precámbrica (Fries *et al.*, 1962, 1974; Denison *et al.*, 1970), mientras que la edad radiométrica obtenida del esquisto sugiere para éste una edad paleozoica temprana (de Cserna *et al.*, 1977), o paleozoica tardía (Fries *et al.*, 1962; Denison *et al.*, 1970).

PETROGRAFIA

Las rocas cristalinas expuestas en los cañones del Novillo y La Peregrina consisten, en orden de antigüedad, de gneises, esquistos y rocas intrusivas; a estas últimas solo se las observó intrusionando a los gneises. Una zona de milonitización y cataclasis separa a los gneises de los esquistos. A continuación se describen las unidades litológicas mencionadas que están incluidas en el Gneis Novillo (Fries y Rincón-Orta, 1956, p. 100) y Esquisto Granjeno (Carrillo-Bravo, 1961, p. 7-9).

Gneis Novillo

Este nombre fue propuesto por Fries y Rincón-Orta (*op. cit.*) para los gneises bandeados en capas alternantes claras y oscuras, con abundante granate, que afloran en el Cañón del Novillo. La presencia de estas rocas se conoce desde los estudios de Girty (1926), pero su petrología nunca se trató a detalle.

En el Cañón del Novillo los gneises tienen una estructura que varía de bandeada a masiva, aunque predomina la primera. Las bandas están formadas por capas alternantes claras y oscuras; las claras son feldespáticas o cuarzo-feldespáticas, mientras que las oscuras son ricas en piroxena y granate. La escala del bandeamiento es del orden de centímetros y son raras las bandas con espesores mayores de 1.0 m. Llama la atención la continuidad tanto del espesor como del rumbo de las bandas, ya que éstas pueden seguirse a lo largo de algunos afloramientos por decenas de metros, sin que varíe su espesor o su dirección. Ciertos horizontes máficos se reconocieron en forma continua a lo largo de casi todos los afloramientos gnéisicos del Cañón del Novillo, es decir, por más de 4 km. Localmente, la continuidad del bandeamiento es interrumpida por intensos pliegues mesoscópicos de gran amplitud y estilo similar. Además, con frecuencia, los gneises son cortados por zonas transversales de cataclasis, que llegan a borrar completamente su bandeamiento. Estas zonas, por lo general, están acompañadas por diques máficos de textura porfídica, que también fueron afectados periféricamente por la cataclasis. Las partes centrales de los diques más gruesos pueden incluso no presentar deformación.

Cerca del contacto tectónico entre los gneises y los esquistos, particularmente en el Arroyo de Las Latas, los gneises están milonitizados, con una dirección de la foliación milonítica subparalela al bandeamiento y también a la dirección del contacto esquisto-gneis. Sin embargo, entre el gneis y el esquisto generalmente está interpuesto un cuerpo granítico deformado y de espesor variable que intrusio-

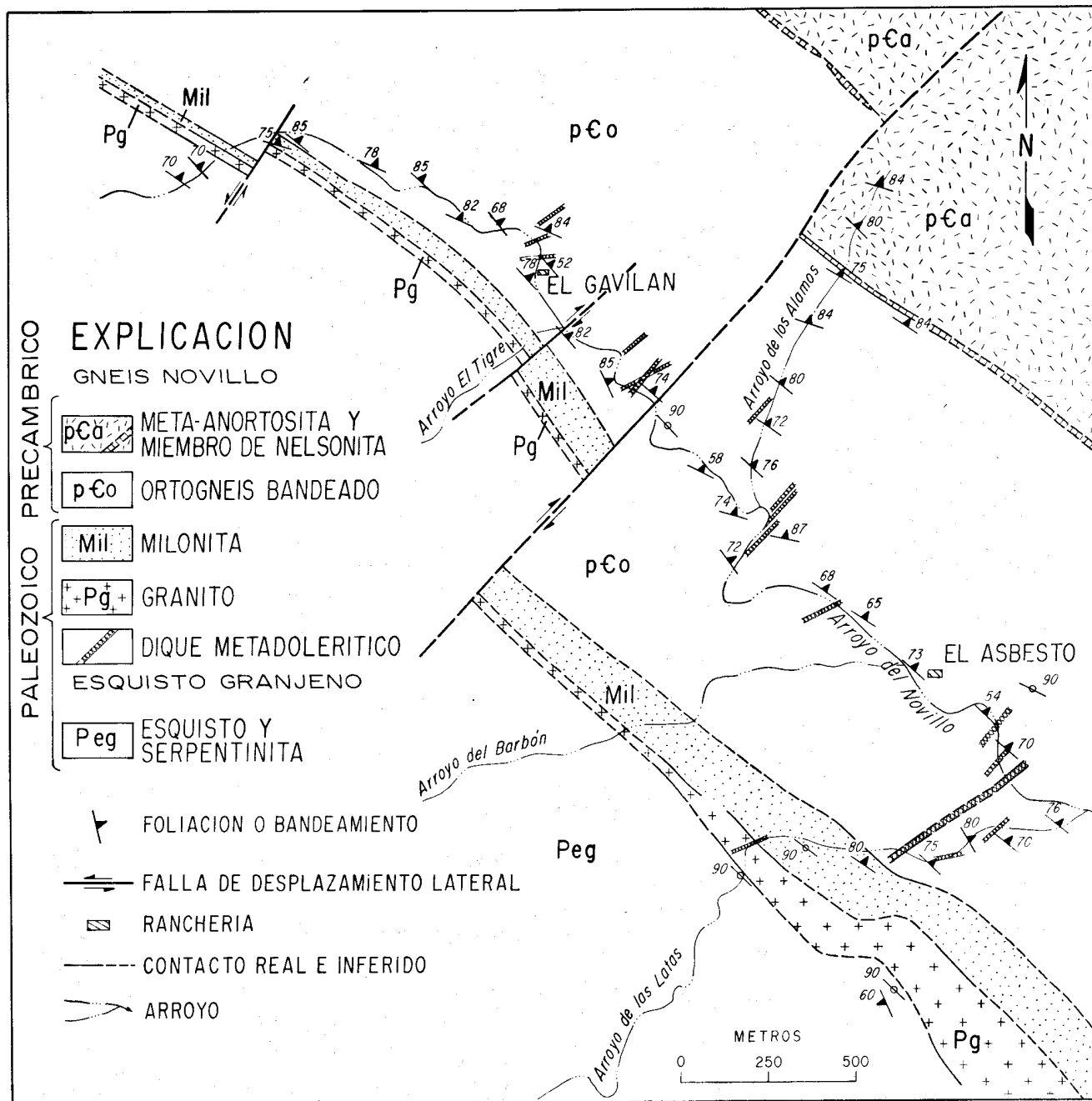


Figura 2.—Mapa geológico del Gneis Novillo y rocas metamórficas asociadas en el Cañon del Novillo.

na al gneis y, según observaron Fries y Rincón-Orta (1965, p. 100), también intrusiona al esquistoso.

Los gneises en el Cañon de La Peregrina no presentan contrastes litológicos muy marcados, ya que el bandeamiento composicional está menos desarrollado. Las rocas que predominan son gneises cuarzo-feldespáticos de color claro que, al igual que en el Cañon del Novillo, son intrusionados por los diques máficos deformados.

Los gneises en su localidad-tipo se subdividieron en tres unidades litológicas, cuya distribución esquemática se muestra en la Figura 2 y que en orden estructural ascendente se describen a continuación:

Ortogneis bandeado.—Estas rocas forman los afloramientos del Arroyo del Novillo, desde unos 2 km río abajo del rancho El Asbesto hasta su con-

tacto tectónico con los esquistos, al norponiente del rancho El Gavilán. Las bandas oscuras consisten de granulitas básicas que presentan las siguientes asociaciones minerales: *plagioclasa-granate-cuarzo-clinopiroxena-ortoclasa*, *plagioclasa-granate-cuarzo-clinopiroxena-bastita-ortoclasa*, *plagioclasa-granate-cuarzo-clinopiroxena-bastita*, *plagioclasa-clinopiroxena-bastita-cuarzo* y *plagioclasa-bastita-cuarzo*.

Todas estas asociaciones presentan como accesorios más comunes la ilmenita y la apatita, a veces en cantidades considerables. Con menor frecuencia aparecen el rutilo, la biotita, la hornblenda café y algunos sulfuros metálicos. La bastita en las asociaciones mencionadas se presume que reemplazó como pseudomorfo a la ortopiroxena original, la cual se formó en equilibrio con los demás minerales.

Las características petrográficas más notables de estas granulitas básicas son su índice de color tan elevado, su granularidad extremadamente fina y la abundancia de apatita e ilmenita/magnetita diseminadas. También son notables las coronas de granate, que frecuentemente rodean a los minerales máficos o a las plagioclasas (Figura 3) definiendo típicas texturas de reacción.

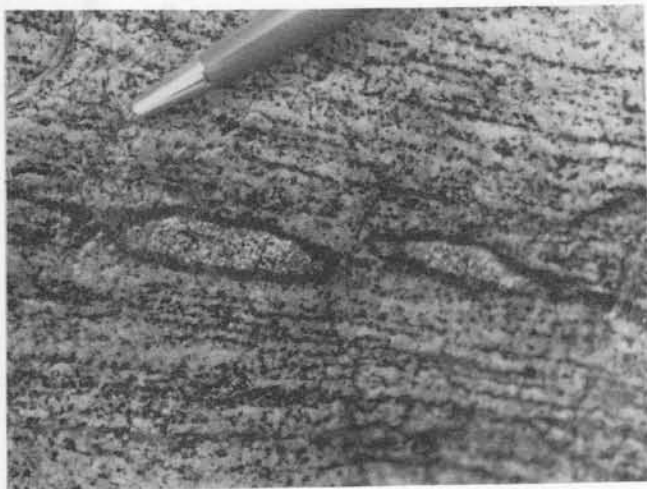


Figura 3.—Coronas de granate circundando agregados de piroxena y plagioclasa. Cañón del Novillo en la confluencia de los arroyos del Novillo y de Las Latas.

Otra clase de bandas melanocráticas de esta unidad pueden transgredir el bandeamiento (Figura 4) y delatar así su origen ígneo intrusivo anterior al metamorfismo. Tales bandas contienen, ocasionalmente, inclusiones del gneis encajonante y, como se puede observar en la Figura 4, algunos de estos cuerpos granulíticos cortan unidades gneísicas previamente afectadas por pliegues de tipo isoclinal. Una muestra representativa colectada en el rancho El Asbesto dio la siguiente mineralogía: *granate-clinopiroxena-cuarzo-apatita-microclina pertitica-plagioclasa-opacos*.

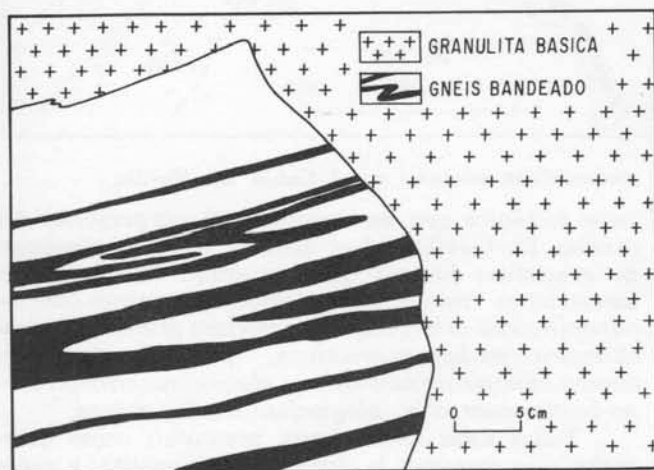


Figura 4.—Dique básico granulítico intrusionando gneis bandeado previamente plegado. Cañón del Novillo y de Los Alamos.

Además de estos minerales primarios, la roca contiene abundante anfíbola asbestiforme que reem-

plazó parcial o totalmente a la clinopiroxena.

Las bandas claras son de dos tipos: feldespáticas y cuarzo-feldespáticas. Las primeras contienen abundante granate y su composición global es la de un gneis anortositico, en tanto que las segundas consisten de leucogranitos (alaskitas) gneísicos que, por presentar en algunas ocasiones inclusiones del gneis feldespático, se les infiere un origen posterior y magmático. Las muestras representativas de las unidades feldespáticas, que se colectaron en la confluencia de los arroyos del Novillo y de Las Latas, contuvieron las siguientes asociaciones minerales: *andesina - granate - clinopiroxena-ilmenita-cuarzo y granate-clinopiroxena-bastita-cuarzo-rutilo*.

Los minerales formados por retrogresión metamórfica pertenecen a diferentes generaciones; abundan la serpentina, la sericita, la sausruta y, en menor proporción, la clorita, la calcita y la esfena. Texturalmente es muy significativa la íntima asociación y aún el intercrecimiento simplectítico del cuarzo, el granate y el rutilo; la importancia petrogenética de estas texturas se abordará con cierta amplitud en el capítulo sobre metamorfismo.

Como es de esperar, existen diversas variedades de rocas intermedias en su contenido de minerales máficos y félsicos, entre las que destaca un gneis diorítico cuyos componentes máficos y félsicos se encuentran segregados en lentes de varios centímetros de largo. Los lentes máficos contienen abundante granate, pero destacan también el rutilo y la ilmenita, que suele formar la parte central de los lenticillos. Esta unidad diorítica aflora en el Arroyo de Los Alamos y también cerca del contacto del Gneis Novillo con el Esquisto Granjeno, al norponiente del rancho El Gavilán y sobre el Arroyo de Las Latas.

Nelsonita.—Cuerpos lenticulares alargados en el sentido de la foliación de apatita-ilmenita/magnetita, rutilo-ilmenita/magnetita y apatita-ilmenita/magnetita-rutilo se localizaron sobre el Arroyo de Los Alamos y en sus alrededores, justo en el contacto del gneis bandeado con una meta-anortosita. La nelsonita contiene algunas veces inclusiones de la meta-anortosita o muestra sus contactos interdigitados con ésta. Las nelsonitas observadas tienen espesores máximos de unos 40 cm pero, generalmente, les acompañan bandas de meta-anortosita hasta de 1.0 m de espesor, con numerosos lenticillos de nelsonita de rutilo. Una de estas nelsonitas examinada al microscopio muestra una textura granoblástica homogénea, de 1 mm de tamaño medio de grano, en la que la apatita (38%) anhedral se encuentra incluida dentro de una masa continua de cristales de ilmenita (60%). El rutilo está como grandes inclusiones en la masa de ilmenita y a su vez contiene inclusiones alargadas de un mineral opaco, posiblemente magnetita. Además de estos minerales se localizó algo de hematita secundaria en los contactos de algunas apatitas con la ilmenita, así como varios pseudomorfos sericíticos a partir de un mineral probablemente aluminoso. Un análisis químico parcial de esta muestra se presenta en la Tabla 1.

Meta-anortosita.—Esta roca aflora en la cabeza del Arroyo de Los Alamos. Tiene una estructura masiva o ligeramente foliada y en algunas partes contiene varias inclusiones de gneis básico alterado,

rico en ilmenita/magnetita. La estructura masiva se ve frecuentemente cortada por zonas de intensa cataclasis, formando incluso brechas intrusivas de forma irregular. Al microscopio la roca consiste esencialmente de andesina-labradorita, escasos granates, ilmenita/magnetita y un poco de rutilo. Sin embargo, la sausrutización de la meta-anortosita es generalmente avanzada, incluso al extremo de haberse formado rocas de epidota-cuarzo-albita-apatita-ilmenita/magnetita. Las capas ocasionales de granulita básica dentro de la meta-anortosita tienen la siguiente asociación mineral: *clinopiroxena-bastita-ilmenita-apatita-cuarzo*.

Tabla 1.—Análisis químico parcial de una nelsonita.

TiO ₂	33.15%
FeO*	30.03
CaO	19.85
P ₂ O ₅	16.20
F	0.55
Cl	0.08
	99.86%

Analista: Ing. Alberto Obregón

Calculado como hierro total

Norma calculada: Apatita 37%, Ilmenita 63%

Paragneis.—En el Cañón de La Peregrina, las unidades antes descritas están cubiertas por gneises cuarzo-feldespatícos de granate y grafito, con lentes y bandas intercaladas de mármol y granulitas básicas intrusivas. Esta secuencia gneílica es fuertemente cataclástica y, además, muestra frecuentes pegmatitas feldespatícas ricas en granate, que atraviesan el bandeamiento de los gneises. Las asociaciones identificadas en los gneises cuarzo-feldespatícos son las siguientes: *cuarzo-microclina pertítica-biotita (cloritizada)*, *cuarzo-plagioclasa sódica-granate-rutilo-grafito*, *cuarzo-plagioclasa-feldespato potásico-granate-rutilo-grafito* y *cuarzo-pertita-granate-hornblenda*.

Una muestra de los mármoles, expuestos como angostas bandas con algunas inclusiones gneílicas, contiene la siguiente asociación mineral: *carbonato-flogopita*. El carbonato muestra una apariencia sucia, debido probablemente a exsolución finamente dividida de dolomita; la flogopita está intensamente deformada por la cataclasis que, en forma general, afectó a los gneises de esta secuencia.

Gneises cataclásticos.—Todas las unidades gneílicas descritas muestran cataclasis en mayor o menor grado. Los gneises propiamente cataclásticos afloran tanto en el Cañón del Novillo como de La Peregrina. Sus afloramientos presentan un aspecto brechoide y masivo, aunque el bandeamiento original de los gneises es observable todavía como estructura reliquia y solo ocasionalmente se pierde por completo, como se observa en las zonas milonitizadas. Microscópicamente, en estas rocas predominan los minerales de retrogresión metamórfica, como son: epidota/clinozoisita, sericita, cuarzo, calcita y clorita. La plagioclasa y los minerales opacos son los que más frecuentemente se han conservado como porfiroclastos entre la pasta cataclástica muchas veces recrystalizada. Algunas de las muestras contienen bandas microscópicas de filonita, formadas exclusivamente por minerales micáceos bien cristalizados,

que alternan con bandas cuarzo-feldespatícas finamente granuladas. Esta estructura da a la roca un aspecto típicamente milonítico. Verdaderas milonitas bandeadas y casi sin porfiroclastos (ultramilonitas) se localizaron en el Arroyo de Las Latas, cerca del contacto tectónico con el Esquisto Granjeno (de Cserna *et al.*, 1977).

Una variedad cataclástica, intermedia entre las cataclásitas gneílicas y las milonitas, se presenta como augenesquisto en bandas de varios metros de espesor. Los "ojos" de esta roca consisten de agregados feldespatícos incluidos en una matriz milonítica recrystalizada de clorita y epidota. Debido a que los "ojos" porfiroclásticos presentan, además, abundante ilmenita y apatita, se deduce que la roca original fue parte de los ortogneises máficos de ilmenita y apatita.

Las milonitas están formadas por agregados criptocristalinos calcitizados que definen un bandeamiento fino, apenas interrumpido por algunos microporfiroclastos de feldespato.

Origen del Gneis Novillo.—De los datos petrográficos expuestos, así como de las relaciones de campo, se concluye que los gneises que afloran en el Cañón del Novillo son ortogneises formados inicialmente de un cuerpo gabroide-anortosítico, con sus productos de diferenciación extrema, tales como los gneises alaskíticos (leucocráticos) y las nelsonitas. Las granulitas básicas, que cortan al bandeamiento, parecen representar una generación posterior de intrusivos básicos, que se emplazaron entre rocas previamente deformadas, pero antes del metamorfismo principal.

En contraste con la secuencia expuesta en el Cañón del Novillo, los gneises en el Cañón de La Peregrina, con sus mármoles intercalados y sus rocas ricas en cuarzo y grafito son, con toda seguridad, de origen sedimentario y composición psamítica y calcárea.

El contacto entre los ortogneises y los paragneises parece ser intrusivo y está expuesto unos 500 m al norponiente del rancho La Joya, en un lugar denominado Poza del Granjeno. El contacto está bien marcado por la presencia de una hornblendita, con plagioclasa sausrutizada y rutilo como accesorios. La hornblenda al microscopio muestra un pleocroismo café-naranja, que refleja su alto contenido de titanio y, consecuentemente, la alta temperatura de su cristalización.

Existe, sin embargo, un intervalo en el que los ortogneises básicos alternan con capas metasedimentarias de gneis cuarzo-feldespatíco de granate o grafito las cuales, además, están intrusionadas por los diques y diquestratos de granulita máfica. Las capas en esta localidad tienen un rumbo promedio oriente-poniente e inclinación fuerte hacia el norte.

Esquisto Granjeno

Aunque el objeto principal de esta investigación fue el estudio detallado del Gneis Novillo, también se tomaron algunas muestras de la secuencia esquistosa, que contiene además rocas verdes, metacalizas y serpentinitas, para conocer algo de su petrografía y metamorfismo.

Esquisto.—Los esquistos afloran en la parte occidental del Cañón del Novillo siguiendo un rumbo aproximado al norponiente, en posición estruc-

tural cercana a la vertical y en contacto tectónico contra los gneises anteriormente descritos. Carrillo-Bravo (1961, p. 7-9) denominó a esta secuencia como Esquisto Granjeno, a partir de sus afloramientos en el Cañón de La Peregrina.

En el área estudiada la unidad más característica es un esquisto micáceo con abundantes porfidoblastos de albita negra. Posee una foliación bien marcada, definida por la orientación preferente de la mica blanca y de la clorita. El cuarzo forma agregados lenticulares, dispuestos paralelamente a la foliación, la cual se encuentra desviada alrededor de los porfidoblastos de albita. El color oscuro de este último mineral, que en los afloramientos puede confundirse con el granate, se debe a la gran cantidad de material carbonoso que lleva como inclusiones. Los minerales accesorios más notables de esta unidad, además de la materia carbonosa mencionada, son la turmalina y la esfena. Dos periodos de deformación son registrados en esta unidad por la existencia de micropliegues asimétricos en cuyas charnelas las micas están dobladas.

Serpentinita.—Las serpentinitas forman cuerpos alargados en el sentido de la foliación y sus contactos contra el esquisto son casi verticales. En el camino hacia la mina El Tigre, la serpentinita se encuentra enclavada entre rocas verdes de estructura semimasiva. Los afloramientos de serpentinita estudiados en la localidad conocida como El Cinco, sobre este mismo camino, muestran en su estructura una serie de pliegues angulares muy cerrados (Figura 5), definidos por bandas alternantes de colores verde claro y verde oscuro. Esta estructura puede corresponder al bandeamiento original magmático de una antigua peridotita. Se estudiaron dos ejemplares bajo el microscopio petrográfico. Uno de ellos consiste de serpentina y material opaco finamente dividido, posiblemente magnetita. La serpentinita corresponde a dos variedades; una es aparentemente crisotilo y la otra bastita. Ambos minerales se encuentran como pseudomorfos reemplazando respectivamente al olivino y a la ortopiroxena. Se trata, por lo tanto, de una *harzburgita* totalmente serpentinizada.

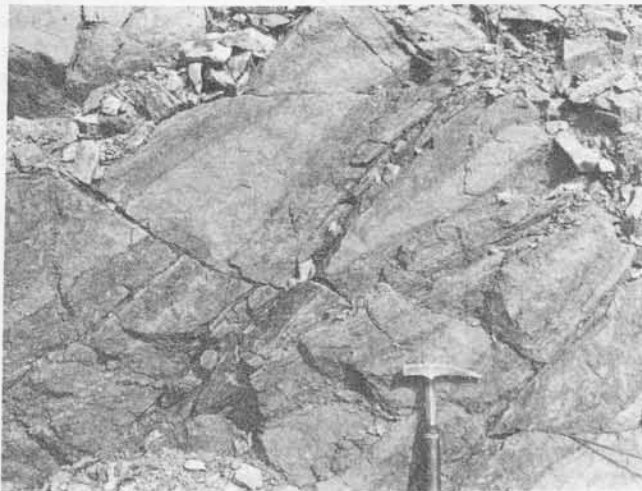


Figura 5.—Pliegues de tipo chevron en la serpentinita. Cañón del Novillo, en la localidad El Cinco, sobre el camino a la mina de El Tigre.

El segundo ejemplar no está totalmente serpentinizado, ya que contiene abundante clinopiroxena aparte de la serpentina; además, presenta zonas y vetillas formadas por intercrecimientos de clorita y zoisita? o hidrogrosularita? que sustituyen también parcial o totalmente a la clinopiroxena. Dichos minerales se hallan dentro de una matriz de serpentinita isotrópica (serpofita), que resultó posiblemente de la alteración del olivino original. A esta roca se le puede denominar como una *wherlita* parcialmente serpentinizada.

Las partes externas de los cuerpos de serpentinita están alteradas metasomáticamente: un ejemplar tomado cerca de la mina El Tigre está constituido exclusivamente por carbonato (aparentemente magnesita) y algo de cuarzo.

Roca verde.—Estas rocas se encuentran asociadas íntimamente con las serpentinitas y también como horizontes aislados entre los esquistos pelíticos. Las variedades asociadas a las serpentinitas tienen texturas de grano más grueso y posiblemente se trate de metagabros y/o metadiabasas. En lámina delgada, una de estas rocas consiste de agregados blastogranulares de albita y epidota en una fina matriz de clorita y actinolita acicular. También hay calcita, de introducción posterior, a lo largo de microfracturas de dirección oblicua y paralela a la foliación, la cual está definida por la orientación preferente de la clorita y pequeños prismas de epidota.

Otro grupo de rocas verdes intercalado entre los esquistos pelíticos se observó en la secuencia esquistosa cerca del contacto con el Gneis Novillo, entre los arroyos de Las Latas y de Burrominos. En el primer arroyo hay dos tipos de roca verde, uno de carácter tobáceo con abundante stilpnomelano y otro de aspecto más masivo. Los minerales principales en ambas clases de rocas son albita, epidota, clorita, actinolita y cuarzo. Como accesorios se aprecian la mica blanca y la esfena, en tanto que la calcita rellena microvetillas de introducción posterior.

Metacaliza.—Cerca de la mina El Tigre se localizaron algunas capas calcáreas entre esquistos albiticos, con rumbo norte-sur y con fuerte inclinación hacia el poniente. Dos muestras examinadas al microscopio consistieron de carbonato y escasas cantidades de tremolita, clorita y octaedros de magnetita. Su textura varía de cataclástica a milonítica y afecta por igual al carbonato y a la tremolita. La clorita, en cambio, forma halos alrededor de la magnetita por lo que debe ser posterior a la cataclasis.

Rocas intrusivas

Los gneises en el Cañón del Novillo están intrusivos por diques básicos semideformados, y por un cuerpo granítico también deformado, que sigue aproximadamente el contacto entre los gneises y los esquistos. En la sección que se recorrió del Cañón de La Peregrina, desde el rancho Vicente Guerrero a la Poza del Granjeno, únicamente se reconocieron los diques básicos. El dique granítico del Cañón del Novillo intrusión claramente a los gneises, ya que, además de mostrar contactos nítidos contra el gneis, tiene xenolitos de este último. La relación intrusiva del granito contra los esquistos

tos, en cambio, no pudo demostrarse en las localidades estudiadas; no obstante, Fries y Rincón-Orta (1965 p. 100) mencionaron la presencia de xenolitos de esquistos dentro del granito, por lo que su carácter intrusivo posterior al contacto tectónico entre el gneis y el esquistos es probable. Por otra parte, como el granito también muestra cataclasis intensa y una débil foliación paralela a la dirección del contacto, parece posible que los movimientos tectónicos continuaron a lo largo de la falla de contacto aún después del emplazamiento del granito.

Microscópicamente, las rocas graníticas consisten de cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa en proporciones aproximadamente iguales. Su mineral máfico es la biotita, parcial o totalmente cloritizada. La roca puede clasificarse como granito o granodiorita de biotita deformada. Los minerales de alteración incluyen la sericita, sausruta, clorita y la esfena. Los accesorios primarios son la apatita y pequeños cristales eudrales de zircón. El origen de esta roca es indudablemente magmático intrusivo.

Los diques máficos, que afloran por docenas, intrusionan no solamente al Gneis Novillo cortando su foliación casi perpendicularmente, sino que afectan también al granito descrito anteriormente, como puede apreciarse sobre el Arroyo de Las Latas, cerca del contacto tectónico entre el gneis y el esquistos. Su textura es frecuentemente porfídica, con un espesor que varía desde unas decenas de centímetros hasta un máximo observado de 30 m. Salvo contadas excepciones, el rumbo de estos diques es constante hacia el noreste, con una fuerte inclinación hacia el sureste. Por lo general, llevan el mismo rumbo y se encuentran en íntima asociación con un sistema de bandas cataclásticas que interceptan la foliación del gneis. Es frecuente encontrar concentraciones visibles de sulfuros dentro y fuera de los diques. Los bordes de las intrusiones muestran una angosta zona de textura afanítica que sugiere enfriamiento súbito y, consecuentemente, un emplazamiento cercano a la superficie. Es común, sin embargo, que esta textura afanítica tenga una foliación intensa de origen aparentemente cataclástico y que puede penetrar totalmente a los diques más delgados. En cambio, las partes centrales de los diques más gruesos no tienen deformación visible y conservaron intacta su textura porfídica.

Una muestra de esta roca, examinada al microscopio, consiste de los siguientes minerales de origen primario o magmático: *plagioclasa-biotita-cuarzo* y *opacos*.

Una ligera alteración metamórfica originó biotita café verdoso a partir de la biotita primaria de color café, y sausruta a partir de la plagioclasa. La textura porfídica se debe a la presencia de fenocristales de andesina/labradorita, por lo que la roca puede clasificarse como un pórfido andesítico de biotita débilmente metamorfoseado.

ESTRUCTURA DEL GNEIS NOVILLO

Los elementos estructurales más notables en el Gneis Novillo son su bandeamiento y su foliación, que mantienen una disposición generalmente paralela; además, con frecuencia se pueden observar micropliegues en varios estilos, así como zonas de cataclasis y milonitización. Los elementos lineales, tales como ejes de micropliegues y lineación de

minerales, son extremadamente escasos en el área estudiada.

Bandeamiento.—Esta estructura es tan clara que simula estratificación primaria, ya sea de posible origen sedimentario o magmático. La escala del bandeamiento es muy variable; en algunas de las unidades granatíferas es milimétrica y está definida por la concentración variable del granate, la plagioclasa y otros minerales máficos. Normalmente, sin embargo, las bandas son de varios centímetros o decenas de centímetros y ocasionalmente llegan a alcanzar de uno a muchos metros de espesor. El bandeamiento es principalmente composicional, es decir, está formado por la alternancia de capas o láminas leucocráticas, mesocráticas y melanocráticas, cuyos contactos pueden ser bruscos o transicionales con predominio de los primeros. El rumbo y espesor de las bandas son, en general, notablemente constantes, a excepción de aquellas localidades afectadas por cataclasis intensa o concentración anómala de micropliegues. La naturaleza transpuesta del bandeamiento, sin embargo, se manifiesta en las charnelas de los micropliegues isoclinales, donde las bandas composicionales son cortadas por una foliación paralela a la dirección del plano axial de estos pliegues.

Foliación.—Esta estructura se hace visible únicamente en las zonas axiales de los micropliegues, los cuales, por ser frecuentemente de tipo isoclinal y gran amplitud, hacen que foliación y bandeamiento coincidan a lo largo de sus extendidos flancos.

La posición estructural media de la foliación en el Cañón del Novillo es de N52°W con inclinación de 75° hacia el nororiente; este valor se calculó como promedio de unas 80 mediciones tomadas de los afloramientos. La cifra es muy constante y aunque el rango de variación en el rumbo de la foliación cubra alrededor de 90°, los valores extremos están casi siempre relacionados con las zonas posteriores de deformación cataclástica.

El análisis estereográfico de 82 mediciones de la foliación (Figura 6) ilustra con claridad la fuerte concentración de la inclinación hacia el nororiente, pero al mismo tiempo, define tenuemente un círculo máximo cuyo eje beta tiene una posición estimada de N30°E con buzamiento de 80°; esto sugiere que la foliación y el bandeamiento gneísico están plegados por estructuras secundarias de eje casi vertical. Debido a que en los afloramientos no se observaron microestructuras con esas características geométricas, se infiere que las dimensiones de estos pliegues son considerables y de perfil suave, es decir, figuran grandes ondulaciones con la dirección de sus ejes sub-paralela a la inclinación de la foliación.

Pliegues.—No obstante que se ha descrito al bandeamiento como una estructura de continuidad notable, existen diversas áreas donde los afloramientos muestran abundantes micropliegues en diferentes estilos, que pueden corresponder a uno o varios episodios de deformación plástica. El estilo más característico (Figura 4) es el de tipo isoclinal de gran amplitud, modificado por atenuación extrema de sus flancos y engrosamiento del área de la charnela. Existen además estilos de plegamiento con atenuación o engrosamiento mínimos y de geometría más abierta, pero que, a pesar de todo, manifiestan

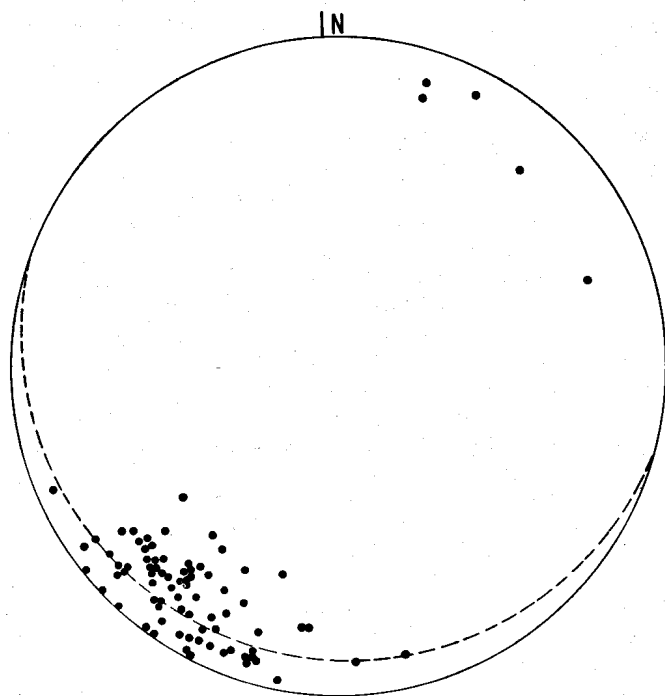


Figura 6.—Proyección estereográfica de igual área mostrando 82 polos de la foliación del Gneis Novillo, medida en el Cañón del Novillo.

foliación axial penetrante. Este hecho permite suponer que, aún considerando las diferencias geométricas entre los estilos mencionados, ambos pertenecen a la misma época de deformación, puesto que comparten la misma foliación axial. La dirección axial del plegamiento principal es difícil de determinar debido, principalmente, a la extrema escasez de micropliegues o lineaciones asociadas. Afortunadamente, bajo el rancho El Gavilán, sobre el lecho del Arroyo del Novillo, existen abundantes pliegues a diferente escala donde pudo determinarse la dirección axial de los pliegues isoclinales, cuya posición resultó ser de $N48^{\circ}W$ con buzamiento de 28° . Otras localidades con buenos afloramientos de micropliegues pueden estudiarse en el lecho del Arroyo del Novillo, bajo el rancho El Asbesto y en las cercanías del rancho La Salitrera.

El estudio de estos pliegues, aunque escasos, es de suma importancia porque permite inferir las relaciones cronológicas relativas entre las diversas unidades litológicas del Gneis Novillo. Por ejemplo, la Figura 4 ilustra un cuerpo de granulita básica transgrediendo no solo el bandeamiento gneísico sino también estructuras plegadas, que obviamente se formaron en una época muy anterior a la intrusión básica. Por otra parte, el hecho de que estos mismos cuerpos intrusivos están granulitizados, implica que el metamorfismo culminó después de su emplazamiento. En otros afloramientos fue posible incluso reconocer movilización de los materiales menos refractarios, de composición cuarzo-feldespática, siguiendo una dirección paralela u oblicua al rumbo de la foliación principal. Esta movilización puede atribuirse a fenómenos incipientes de anatexis en presencia de escasos fluidos acuosos.

Foliación milonítica.—Existen estrechas bandas dentro del gneis caracterizadas por una deformación intensa que se manifiesta por el desarrollo de milonitas, ultramilonitas, blastomilonitas y protomiloni-

tas. El rumbo de estas bandas es paralelo a la foliación del gneis, pero su foliación tiende más a la verticalidad. Las zonas de milonitización más importantes se localizan sobre el Arroyo de Las Latas, cerca del contacto con el esquisto, mientras que en las secciones del Arroyo del Novillo y del Cañón de La Peregrina predominan las cataclasitas sin estructuras orientadas, y solo aparecen algunas bandas de augengneis protomilonítico, a veces con lineación intensa.

El desarrollo de estas estructuras es definitivamente posterior al de la foliación gneísica, ya que la milonitización fue acompañada por un metamorfismo retrógrado de grado bajo, en tanto que la foliación gneísica se formó en condiciones de presión y temperatura correspondientes a la facies de granulita, como se discutirá más adelante.

Zonas de cataclasis.—Las estructuras más recientes en el Gneis Novillo, sin considerar diaclasas y fracturas, las forman numerosas zonas de cataclasis cuyo espesor puede variar desde unos centímetros hasta cientos de metros. Su rumbo medio (10 mediciones) es de $N40^{\circ}E$, con una inclinación predominante de $62^{\circ}SE$. Los diques andesíticos se emplazaron en una dirección paralela y en íntima asociación con estas zonas de cataclasis. El rumbo medio de los diques (12 mediciones) es de $N52^{\circ}E$, con una inclinación de $72^{\circ}SE$. En ninguna de las localidades estudiadas se pudo demostrar el que estos diques o zonas de cataclasis afectaran al esquisto; sin embargo, el contacto esquisto-gneis aparentemente está bastante desplazado por movimientos laterales dextrales asociados a la cataclasis (Figura 2). Esta misma dirección de desplazamiento relativo pudo notarse, a menor escala y directamente, en los afloramientos del gneis.

ESTRUCTURA DEL ESQUISTO GRANJENO

Los esquistos muestran como estructura más importante una foliación, cuyo rumbo es subparalelo al de la foliación en los gneises; se diferencia de ésta solo por su mayor variabilidad y por el predominio de la inclinación hacia el surponiente en las localidades examinadas. El rumbo de la esquistosidad varía de WNW a NNE con inclinación, por lo general, cercana a la vertical. Otras estructuras, de origen posterior a la foliación principal, incluyen micro-ondulaciones, pliegues mesoscópicos y zonas dúctiles de cizalleo. Algunos de estos pliegues secundarios tienen un plano axial vertical siendo horizontal la posición de sus ejes. En el camino a la mina El Tigre, los primeros afloramientos sobre la serpentinita muestran pliegues de tipo *chevron* (Figura 5), definidos por un bandeamiento reliquio, posiblemente resultado de la transformación metamórfica de una alternancia original de capas de dunita (color verde claro) y harzburgita (color verde oscuro). Al plano axial de estas estructuras se le determinó un rumbo de $N60^{\circ}W$ con una inclinación de $75^{\circ}NE$. También se apreció en esta misma localidad lineación en la serpentinita, con una dirección aparentemente paralela a la dirección axial de los pliegues mencionados. La dirección precisa no pudo determinarse.

El rumbo general del contacto esquisto-gneis, aunque oscurecido por la presencia intermedia del granito cataclástico, es de $N60^{\circ}-70^{\circ}W$ y su posición es prácticamente vertical.

METAMORFISMO DEL GNEIS NOVILLO

Las asociaciones primarias de minerales descritas de los gneises, aún frente a la ausencia de ortopiroxena, pueden clasificarse, sin duda alguna, dentro de la facies de granulita. Las bases para esta afirmación las constituyen diferentes criterios mineralógicos y texturales, tomados ya sea individual o conjuntamente, y que se mencionan a continuación:

- (1).—La presencia común de *bastita* en pseudomorfos prismáticos, posiblemente reemplazando a la ortopiroxena.
- (2).—La existencia predominante de paragénesis minerales anhidras, tales como cuarzo-feldespatoclinopiroxena-rutilo; feldespatogranate-rutilo.
- (3).—La presencia generalizada del granate, independientemente de la composición de los gneises.
- (4).—La ocurrencia común del rutilo en masas y cristales macroscópicos.
- (5).—El carácter fuertemente pertítico del feldespato alcalino.
- (6).—El color café-naranja de la anfibola de la hornblendita, colectada en el Cañón de La Peregrina.
- (7).—Las texturas típicamente granulíticas (granoblásticas de grano fino).
- (8).—La asociación simplectítica del cuarzo y el granate en algunos de los gneises del Cañón del Novillo; esta textura sugiere reacción total de la plagioclasa en asociación con la ortopiroxena (De Waard, 1965, 1967).
- (9).—El color frecuentemente azulado del cuarzo de los gneises graníticos.
- (10).—La ausencia total de muscovita, excluyendo aquella que se produjo por retrogresión posterior.

Estas evidencias son suficientes para demostrar que los gneises del Cañón del Novillo han pasado por una etapa de metamorfismo de la facies de granulita, tal y como lo sugirieron, por vez primera, Fries y Rincón-Orta (1965, p. 101). Denison y colegas (1970), en cambio, sostienen (p. 11) que el Gneis Novillo se encuentra en la facies de transición granulita-anfibolita, tomando como base la presencia de hornblenda y biotita en estas rocas. Mientras que esto pudiera ser efectivo en otras localidades no estudiadas por el presente autor, la presencia eventual de hornblenda y biotita en las localidades estudiadas no demuestra necesariamente una transición de la facies de granulita a la de anfibolita. La estabilidad de los mencionados minerales *normalmente* invade las condiciones de presión y temperatura de la facies de granulita, donde se les puede encontrar en perfecto equilibrio textural con la hiperstena, el mineral índice de esa facies. Es así, que la biotita y la hornblenda están indefectiblemente presentes dentro de las granulitas de prácticamente todas las áreas clásicas del mundo (Turner, 1968, p. 328-336; Deer *et al.*, 1963, p. 306). Las características ópticas que adquieren estos minerales en la facies de granulita se deben a la ad-

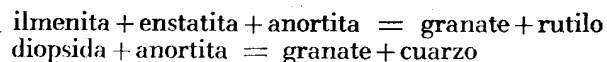
misión anormalmente alta de titanio en su molécula, lo que imprime un color rojizo a la biotita y café-rojizo a la hornblenda. Estas propiedades se manifiestan claramente en las pocas hornblendas y biotitas que se encontraron en las muestras estudiadas del Gneis Novillo. La presencia "anómala" de estos minerales en casi todas las granulitas del mundo llevaron a Fyfe y colegas (1958, p. 232-235) a proponer la subdivisión de la facies de granulita en las subfacies de granulita de hornblenda y granulita de piroxena, subfacies que posteriormente De Waard (1967, p. 211) propuso elevar a la categoría de facies. Sin embargo, esa misma imposibilidad de encontrar terrenos granulíticos totalmente anhidros de extensión regional llevó a muchos autores (Mueller y Saxena 1977, p. 198; Banno *et al.*, 1964, p. 411-412; Manna y Sen 1974, p. 215) a abandonar estos conceptos y aún el mismo Turner, coautor de la propuesta subdivisión de la facies de granulita, introdujo (1968, p. 186) la facies de transición anfibolita-granulita para reemplazar a la subfacies de granulita de hornblenda.

Por otra parte, Green y Ringwood (1967), en base de otros criterios, subdividieron la facies de granulita en las subfacies de alta, media y baja presión, caracterizando mineralógicamente cada una de ellas como sigue: en la clase química básica la asociación *plagioclasa-olivino* es estable a baja presión, la de *plagioclasa-ortopiroxena* a presión media, y la de *clinopiroxena-granate* a presión alta. En la clase química pelítica las asociaciones de baja, media y alta presión son respectivamente: *almandita-cordierita*, *almandita-cordierita magnesiana* y *almandita* solamente. En esta clase química la cianita puede tomar el lugar de la sillimanita en las subfacies de más alta presión.

Tomando en cuenta la anterior subdivisión, el Gneis Novillo indudablemente pertenece a las subfacies de media o alta presión de la facies de granulita, si se considera la frecuente asociación del granate y la clinopiroxena, así como de la plagioclasa con la hiperstena (*bastita*). Esta afirmación también la corroboran la ausencia aparente de la cordierita en los paragneises granatíferos del Cañón de La Peregrina y de wollastonita en los mármoles de esta misma región, ya que estos minerales son más frecuentes en terrenos metamórficos de baja presión.

LAS CONDICIONES FISICAS DEL METAMORFISMO DEL GNEIS NOVILLO

La íntima asociación, frecuentemente simplectítica, del granate con el cuarzo y aún con el rutilo, implica texturalmente la inestabilidad de la plagioclasa en contacto con las piroxenas y la ilmenita, minerales que simultáneamente reaccionaron para generar el granate. Las siguientes ecuaciones generalizadas pueden representar esta transformación metamórfica:



donde los miembros de la derecha representan una reducción volumétrica calculada del 9% y 7%, respectivamente, con respecto al volumen que ocupan los miembros de la izquierda. A temperatura cons-

tante, esta reducción del volumen implica que una presión creciente estabilizó los minerales a la derecha de cada ecuación a expensas de los minerales de la izquierda. Una disminución de la temperatura a presión constante, sin embargo, produciría el mismo efecto de desplazar las reacciones hacia la derecha. En el caso del Cañón del Novillo, donde los granates de los gneises carecen de zoneamiento composicional (C. Ramírez, 1977, comunicación personal), el modelo más adecuado para explicar la aparición del granate en las rocas gabroides es, aparentemente, el de la presión creciente, ya que a niveles corticales esta variable no afecta sino en mínima parte la solubilidad de la molécula de piropero en el granate, solubilidad que es básicamente una función de la temperatura. Una disminución de ésta lo suficientemente lenta para permitir el desarrollo de las reacciones mencionadas, en cambio, hubiera ocasionado un zoneamiento retrógrado (que no se observa) de la relación Fe/Mg en la composición de los granates una vez formados.

Las condiciones mínimas de presión y temperatura a que fueron generados los gneises estudiados pueden aproximarse, tomando como base los datos experimentales de Ringwood y Green (1966). La aproximación, sin embargo, es cruda, debido a que no se tiene un criterio adecuado para estimar la temperatura a que se verificó el metamorfismo, así como tampoco la composición química precisa de la roca. Estos dos parámetros, entonces tienen que asumirse sobre una base geológicamente razonable.

La temperatura del metamorfismo se puede tomar en el intervalo de 700-800°C, valores que son universalmente aceptados como mínimos para la facies de granulita (Winkler, 1974, p. 260; Turner, 1968, p. 366, figs. 8-6; Miyashiro, 1973, p. 90, figs. 3-12). En cuanto a la composición química de la roca, que también tiene influencia sobre la estabilidad de los minerales, puede estimarse de la mineralogía actual de la roca, si se acepta una actividad metasomática mínima durante el metamorfismo. La composición mineralógica de la roca, antes de la aparición del granate, consistió, según las ecuaciones definidas arriba, de plagioclasa, piroxenas e ilmenita. Esto proporciona una composición basáltico-toleítica, equivalente a la que utilizaron Ringwood y Green para definir el campo de estabilidad experimental de las granulitas de granate (*op. cit.* p. 393, fig. 3). Extrapolando estos datos para las temperaturas supuestas de 700-800°C, la presión mínima que actuó durante el metamorfismo del Gneis Novillo queda definida en el intervalo de 8-10 Kb, que equivalen a una profundidad bajo la superficie terrestre de 30-36 km.

Es importante aclarar que estos datos fueron estimados para la época de metamorfismo máximo que afectó a los gneises, ya que es obvio que dada su gran antigüedad, han sufrido diversas etapas de tectonismo acompañadas a veces por metamorfismo retrógrado de grado muy bajo. Esta retrogresión es penetrante, es decir, afectó a todo el volumen estudiado de la roca, aunque de una manera irregular y selectiva. La intensidad varía en función primordial del grado de cataclasis y de otros factores no determinados.

El grado máximo que alcanzó el metamorfismo seguramente se verificó en condiciones anhidras; de

otra manera la roca hubiera sido afectada por anatexis y migmatización, especialmente la fracción paragneísa que es abundante en rocas de composición granítica. La presencia de algunas pegmatitas pequeñas e irregulares en los gneises del Cañón de La Peregrina, puede reflejar una proporción mínima de fluidos en el sistema durante el metamorfismo.

El efecto principal de la retrogresión fue la total serpentización de la ortopiroxena, la cual quedó reemplazada por pseudomorfos de bastita, donde sólo se conservó la traza del crucero prismático de la ortopiroxena. En las zonas de cataclasis menos intensa, el granate, la plagioclasa, la clinopiroxena, la ilmenita y el rutilo casi no fueron afectados por la retrogresión, pero si fueron reemplazados totalmente por minerales de bajo grado como la clorita, la sericita, la epidota, la calcita, la esfena, y el leucoceno en las áreas de mayor deformación cataclástica. Este grupo de minerales junto con la serpentina, definen asociaciones típicas de la parte más baja de la facies de esquisto verde, determinando así el estado actual polimetamórfico del Gneis Novillo.

METAMORFISMO DEL ESQUISTO GRANJENO

Los esquistos y rocas asociadas estudiados en el Cañón del Novillo presentan conjuntos minerales de metamorfismo regional estables a temperaturas bajas y presiones altas de los fluidos acuosos.

Las rocas pelíticas muestran la asociación mineral típica de la subfacies clorita-albita de la facies de esquisto verde: *clorita-mica blanca-cuarzo-albita*.

Igualmente, las rocas verdes asociadas presentan las paragénesis típicas de los grados inferiores del metamorfismo regional: *clorita-albita-epidota-calcita-cuarzo-actinolita* y *clorita-albita-epidota-cuarzo-stilpnomelano* mientras que las rocas ultrabásicas estudiadas solo contienen como minerales metamórficos el crisotilo, la clorita y el talco; las rocas calcáreas, la calcita, la clorita, la tremolita y la magnetita. Todos estos minerales también son índice del metamorfismo regional de bajo grado.

La presencia de stilpnomelano en una de las muestras examinadas, así como de glaucofano (E. Schmitter, 1976, comunicación personal) en las rocas asociadas a las serpentinitas del Cañón del Novillo, demuestran, sin embargo, que el régimen metamórfico fue de alta presión y baja temperatura, aproximándose al tipo glaucofanítico en la clasificación de las series de facies de Miyashiro (1961). En vista de la importancia que tiene para la interpretación tectónica de una área un régimen metamórfico como el mencionado, ya que podría indicar la presencia de una paleozona de subducción (Coleman, 1972; Dewey y Bird, 1970; Ernest, 1970), sería de gran interés ampliar la investigación geológica y petrológica del Esquisto Granjeno, que solo se trató superficialmente en el presente artículo.

GENESIS DE LAS NELSONITAS DEL GNEIS NOVILLO

A las asociaciones de apatita y óxidos ferrotitaníferos íntimamente relacionados con terrenos precámbricos granulíticos y anortositas del tipo masivo, se les dio el nombre de nelsonitas (Watson y Taber, 1913) en su localidad original del Estado de

Virginia, E. U. A. y posteriormente, en el sur-oriental de Canadá. En México se han mencionado tres localidades con nelsonitas (Schmitter-Villada, 1970, p. 167): Pluma Hidalgo y Huitzo en el Estado de Oaxaca y la presente localidad en el Cañón del Novillo. No obstante, sólo en el yacimiento de Pluma Hidalgo se menciona explícitamente su asociación con anortosita (Paulson, 1964). Pero, como se vio para el Cañón del Novillo y por estudios hechos en la región de Huitzo por el presente autor, también estas nelsonitas están acompañadas por cuernos masivos de meta-anortosita y rocas metamórficas de alto grado, que las hace comparables entre sí y con los lugares mencionados de Virginia y Canadá.

Las hipótesis más diversas se han propuesto para explicar el origen de las nelsonitas, pero las que más atención han recibido son las magmáticas y las hidrotermales. Entre las primeras, una escuela (Bateman, 1951) considera a la cristalización fraccionada como el proceso de la diferenciación magmática causante de la consolidación de minerales residuales ricos en hierro, a partir de un magma de composición gabroide. Por otro lado, Philpotts (1967) ha dado gran apoyo experimental a la hipótesis de que las nelsonitas resultan de la cristalización de un líquido inmisible en coexistencia con otro de composición diorítica y generados por diferenciación de un magma también gabroide.

Las nelsonitas clásicas del Estado de Virginia (Ross, 1941), así como la nelsonita mexicana de Pluma Hidalgo (Paulson, 1964), han sido explicadas como resultado de la acción hidrotermal metasomática sobre rocas previamente consolidadas, asignando a los fluidos ricos en fósforo, titanio y hierro un origen magmático. Stanton (1972, p. 384) sin embargo, cree que los procesos hidrotermales no parecen haber "contribuido significativamente" a la formación de los depósitos nelsoníticos.

Modelo genético propuesto.—Para el caso del Cañón del Novillo, donde las nelsonitas se encuentran como capas y lentes alargados concordantes dentro de la secuencia ortogneisica gabroide-anortosítica, el modelo que se propone es el magmático por inmiscibilidad, con modificaciones debidas al intenso metamorfismo a que estuvieron sujetas posteriormente. Más específicamente, las nelsonitas del Gneis Novillo y por extensión las de Huitzo y Pluma Hidalgo, parecen ser el producto de la diferenciación de un magma gabroide-anortosítico en cuyas etapas finales de cristalización ocurrió la inmiscibilidad, separándose dos fracciones líquidas, una granítica (actualmente el gneis alaskítico) y otra nelsonítica. El metamorfismo subsecuente, a presión elevada y en la facies de granulita, originó el rutilo por reacción de la ilmenita con la plagioclasa y la piroxena.

Discusión.—Desde principio de este siglo (Grieg, 1927) se sabía que la inmiscibilidad magmática era sólo posible dentro de ciertos rangos de composición química extremadamente ricos en sílice en asociación con otros ricos en calcio, magnesio y hierro. Sin embargo, la observación de que el curso de la diferenciación normal de los magmas basálticos conduce a la separación efectiva de la sílice y los óxidos mencionados, determinó que de hecho se descartara la teoría de la inmiscibilidad, para

explicar, por ejemplo la frecuente asociación de gabros y granófiros en diversas localidades; pero, recientemente, no sólo en rocas terrestres (Gelinas *et al.*, 1976, De, 1974), sino también en rocas lunares (Roedder y Weiblen, 1970) se describieron ejemplos reales de inmiscibilidad por diferenciación de un magma de composición básica.

Asimismo, existen varios trabajos experimentales en sistemas de afinidad basáltica (McBirney y Nakamura, 1974; Visser y Van Groos, 1976) que ampliamente han demostrado la separación de dos fracciones líquidas inmiscibles, respectivamente ricas en hierro, en sílice y álcalis.

El hecho de que rocas semejantes a las nelsonitas no se hayan descrito de los gabros estratificados de diversas partes del mundo, quizás pueda explicarse como debido a la pequeña presión litostática bajo la cual consolidaron estos cuerpos (500 bars en el caso del intrusivo Skaergaard, McBirney, 1975). En estas condiciones, probablemente, los materiales volátiles (vapor de agua, fluor, cloro y bióxido de carbono) necesarios para la cristalización de la apatita, no pudieron ser retenidos por el magma. A presiones mayores dichos compuestos volátiles pueden ser retenidos y lograr la cristalización tardía de la apatita a la par con los minerales ferrotitaníferos. Estas condiciones de alta presión probablemente actuaron durante la formación de las nelsonitas.

El enriquecimiento extremo del hierro (y presumiblemente del titanio y del fósforo), junto con la concentración final de álcalis y sílice, es un tren de diferenciación característico de ciertas toleitas continentales fraccionadas en condiciones anhidras y altamente reductoras (Carmichael *et al.*, 1974, p. 485). Esta ruta química de diferenciación tiene su ejemplo clásico en el gabro estratificado Skaergaard en Groenlandia, en el que incluso se demostró experimentalmente (McBirney, 1975) inmiscibilidad líquida con la separación de dos líquidos ricos en hierro y fósforo, por un lado, y de sílice y álcalis por el otro. Se puede creer, entonces, que la formación originalmente gabroide-anortosítica del Gneis Novillo haya consolidado siguiendo un tren de diferenciación magmática semejante al de Skaergaard el que, bajo condiciones particulares de composición química, presión y temperatura, simultáneamente originó las nelsonitas y granófiros (actualmente gneis alaskítico) por cristalización de dos líquidos inmiscibles, uno rico en hierro-fósforo-titanio (nelsonita) y otro en sílice-álcalis (granofiro). El rutilo se formó, como se discutió anteriormente, por descomposición de la ilmenita durante el metamorfismo de facies de granulita que posteriormente afectó al Gneis Novillo en la región estudiada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bateman, A. M., 1951, The formation of late magmatic oxide ores: *Econ. Geology*, v. 46, p. 404-426.
- Banno, Schoehel, Tatsumi, Tatsuo, Ogura, Yoshio, y Katsura, Takashi, 1964, Petrographic studies on rocks from the area Lutzow-Holmbukta: *in Antarctic Geology*. Arie R. J. ed., Amsterdam, North-Holland Publ. Co., p. 405-414.

- Carmichael, I. S. E., Turner, F. J., y Verhoogen, John, 1974, *Igneous petrology*: New York, McGraw-Hill, 739 p.
- Carrillo-Bravo, José 1959, Notas sobre el Paleozoico de Ciudad Victoria, Tamaulipas: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros, v. 11, p. 673-681.
- 1961, Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria, Tamps.: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros, v. 13, p. 1-98.
- Coleman, R. G., 1972, Blueschist metamorphism and plate tectonics; Montreal, Internat. Geol. Congr., 24, Rept., sect. 2, p. 19-26.
- Cserna, Zoltan de, Graf, J. L., Jr., y Ortega-Gutiérrez, Fernando, 1977, Alóctono del Paleozoico inferior en la región de Ciudad Victoria, Estado de Tamaulipas: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Revista, v. 1, p. 33-43.
- De, Aniruddha, 1974, Silicate liquid immiscibility in the Deccan Traps and its petrogenic significance: Geol. Soc. America Bull., v. 85, p. 471-474.
- De Waard, Dirk, 1965, The occurrence of garnet in the granulite facies terrane of the Adirondack Highlands: Jour. Petrol., v. 6, p. 165-191.
- 1967, The occurrence of garnet in the granulite-facies terrane of the Adirondack Highlands and elsewhere; an amplification and a reply: Jour. Petrol., v. 8, p. 210-232.
- Deer, W. A., Howie, R. A. y Zussman, James, 1963, *Rock-forming minerals*; London, Longmans, v. 2, 379 p.
- Denison, R. E., Burke, W. H., Jr., Hetherington, E. A., y Otto, J. B., 1940, Basement rock framework of parts of Texas southern New Mexico and northern Mexico: in *The Geologic framework of the Chihuahua Tectonic Belt*: Midland, West Texas Geol. Soc., p. 3-14.
- Dewey, J. F. y Bird, J. M., 1970, Mountain belts and the new global tectonics: Jour. Geophys. Research, v. 75, p. 2625-2647.
- Ernst, W. G., 1970, Tectonic contact between the Franciscan melange and the Great Valley sequence; crustal expression of a late Mesozoic Benioff Zone: Jour. Geophys. Research, v. 75, p. 886-901.
- Fries, Carl, Jr., Schmitter-Villada, Eduardo, Damon, P. E., Livingston, D. E., y Erickson, Rolfe, 1962, Edad de las rocas metamórficas en los Cañones de La Peregrina y de Caballeros, parte centro-occidental de Tamaulipas: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Bol. 64, p. 55-69.
- Fries, Carl, Jr., y Rincón-Orta, César, 1965, Nuevas aportaciones geocronológicas y técnicas empleadas en el Laboratorio de Geocronometría: Univ. Nal. México, Inst. Geología, Bol. 73, p. 57-133.
- Fries, Carl, Jr., Rincón-Orta, César, Silver L. T., McDowell, F. W., Solorio-Munguía, José, Schmitter-Villada, Eduardo, y Cserna, Zoltan de, 1974 (1975), Nuevas aportaciones a la geocronología de la Faja Tectónica Oaxaqueña: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros, v. 26, p. 157-182.
- Fyfe, W. S., Turner, F. J., y Verhoogen, John, 1958, Metamorphic reactions and metamorphic facies: Geol. Soc. America, Mem. 73, 259 p.
- Gelinas, L., Brooks, C., y Trzcieski, W. L., Jr., 1976, Archean variolites-quenched immiscible liquids: Can. Jour. Earth Sci., v. 13, p. 210-230.
- Girty, G. A., 1926, A new area of Carboniferous rocks: Science (E. U. A.), new ser., v. 63, p. 286-287.
- Green, D. H. y Ringwood, A. E., 1967, An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrologic applications: Geochim. et Cosmochim. Acta, v. 3, p. 767-834.
- Grieg, J. W., 1927, Immiscibility in silicate melts: Am. Jour. Sci. ser. 5, v. 13, p. 1-44.
- Heim, Arnold, 1940, The front ranges of Sierra Madre Oriental, Mexico, from Ciudad Victoria to Tamazunchale: Eclog. Geol. Helvetiae, v. 33, p. 313-332.
- Manna, S. S. y Sen, S. K., 1974, Origin of garnet in the basic granulites around Saltora, W. Bengal, India: Contr. Mineral. and Petrol., v. 44, p. 195-218.
- McBirney, A. R., 1975, Differentiation of the Skaergaard intrusion: Nature (Inglaterra), v. 253, p. 691-694.
- McBirney, A. R. y Nakamura, Y., 1974, Immiscibility in late-stage magmas of the Skaergaard intrusion: Carnegie Inst. Washington, Geophys. Lab., Ann. Rept., Year Book 73, p. 348-352.
- Miyashiro, Akiho, 1961, Evolution of metamorphic belts: Jour. Petrol., v. 2, p. 277-311.
- 1973, *Metamorphism and metamorphic belts*: London, George Allen and Unwin Ltd., 492 p.
- Mueller, R. F. y Saxena, S. K., 1977, *Chemical petrology*: New York, Springer Verlag, 394 p.
- Paulson, G. E., 1964, Mineralogy and origin of the titaniferous deposit at Pluma Hidalgo, Oaxaca: Econ. Geology, v. 59, p. 753-767.
- Philpotts, A. R., 1967, Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks: Econ. Geology, v. 62, p. 303-315.
- Ringwood, A. E., y Green, D. H., 1966, An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical implications: Tectonophysics, v. 3, p. 383-427.
- Roedder, Edwin y Weiblen, P. W., 1970, Silicate liquid immiscibility in lunar magmas, evidenced by melt inclusions in lunar rocks: Science (E. U. A.), v. 167, p. 641-644.
- Ross, C. S., 1941, Occurrence and origin of the titanium deposits of Nelson and Amherst counties, Virginia: U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 198, 59 p.
- Schmitter-Villada, Eduardo, 1970, Nelsonita de ilmenita y magnetita de la región de Huitzo, Estado de Oaxaca: México, D. F. Soc. Geol. Mexicana, Libro-guía de la Excursión México-Oaxaca, p. 167-173.
- Stanton, R. L., 1972, *Ore petrology*: New York, McGraw-Hill, 713 p.
- Turner, F. J., 1968, *Metamorphic petrology*: New York, McGraw-Hill 403 p.
- Visser, W. y Van Groos, K. F. A., 1976, Liquid immiscibility in $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$: Nature (Inglaterra), v. 264, p. 426-427.
- Watson, T. L., y Taber, S., 1913, Geology of the titanium and apatite deposit of Virginia: Virginia Geol. Survey Bull., v. III-A, p. 110-155.
- Winkler, H. G. F., 1974, *Petrogenesis of metamorphic rocks*: New York, Springer Verlag, 3rd. ed., 320 p.