

## NOTAS SOBRE LA PETROLOGIA DEL COMPLEJO OAXAQUEÑO

### RESUMEN

Se dan los resultados de un reconocimiento geológico de los gneises precámbricos en las cercanías de la ciudad de Oaxaca. Se reconocieron seis variedades litológicas principales de paragneises cuya petrografía se describe, seguida por discusiones acerca de su génesis y las condiciones bajo las cuales fueron metamorfoseadas.

Se concluye que esta parte del Complejo Oaxaqueño, en la extensión más meridional de la Faja Estructural Grenville, se derivó de una secuencia sedimentaria de arcillas, principalmente calcáreas y dolomíticas, con algunos estratos de dolomía y localmente cloríticas. Estas rocas fueron metamorfoseadas bajo las condiciones características de alta presión y temperatura de las facies de granulita, pero una disminución parcial en la presión litostática produjo rocas de grado algo más bajo con cordierita. Las rocas transicionales a las facies de anfibolita, de temperatura más baja, se pudieron haber formado ya sea por polimetamorfismo o por gradientes locales de presión y temperatura durante un solo episodio metamórfico.

### ABSTRACT

The result of a reconnaissance survey of the Precambrian gneisses in the vicinity of Oaxaca City are given. Six principal lithological varieties of paragneiss have been recognized and their petrography is described, followed by discussions of their petrogenesis and the conditions under which they were metamorphosed.

It is concluded that the Oaxaca Complex, the southernmost extension of the Grenville Structural Belt, was derived from a sedimentary sequence of shales and clays, mainly calcareous and dolomitic, containing beds of dolomite, and locally chloritic. These rocks were metamorphosed under

the high temperature and pressure conditions characteristic of the granulite facies but a local decrease in load pressure produced somewhat lower-grade cordierite-bearing rocks. Rocks transitional into the lower temperature amphibolite facies may have been formed either by poly-metamorphism or by local pressure and temperature gradients during a single metamorphic episode.

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo se dan los resultados de un reconocimiento geológico de las rocas precámbricas del área de Oaxaca hecho por los autores en septiembre de 1971. El objeto del reconocimiento fue estudiar las principales variedades litológicas expuestas, y sus relaciones estructurales se consideraron sólo de una manera general. Del examen petrográfico de las rocas ha sido posible obtener varias conclusiones respecto a su posible origen y a las condiciones bajo las cuales fueron metamorfosadas.

### TRABAJOS PREVIOS

Las rocas metamórficas del área de Oaxaca, junto con su extensión septentrional en el Estado de Puebla, fueron descritas primero hacia fines del siglo pasado (Aguilera y Ordóñez, 1893; Buelna *et al.*, 1896; Félix, 1892; Ordóñez, 1904). En la literatura se mencionan brevemente gneises, esquistos micáceos y filitas, conteniendo grafito, piroxena, muscovita y biotita y cortados por diques de pegmatita. Más tarde, Barrera (1946) publicó un trabajo general de la geología de Oaxaca en el cual, además de las obicuas pegmatitas, también menciona capas de mármol.

Un nuevo ímpetu se le dio a la investigación de las rocas metamórficas de Oaxaca, llamadas ahora "Complejo Oaxaqueño", por los trabajos de Fries *et al.*, (1962, 1966, 1973) y Fries y Rincón-Orta (1965) quienes publicaron los resultados de 15 determinaciones radiométricas de edad. Éstas se obtuvieron principalmente de minerales de pegmatitas usando los métodos de plomo-alfa, K-Ar y Rb-Sr, que dieron una edad media de cerca de 880 m. a., es decir, del Precámbrico tardío. (De Cserna, 1971.)

Subsecuentemente, trabajos muy generalizados de la estructura de las rocas precámbricas han sido publicados por Kesler y Heath (1970) y Kesler (1973); y en un reporte inédito por Rast *et al* (1970) se incluye una breve descripción de los gneises de Oaxaca. La extensión más septentrional del "Complejo Oaxaqueño", cerca de la ciudad de Acatlán, es descrita en un trabajo reciente por Ridríguez-Torres (1970).

### ESTRUCTURA GENERAL

En la figura 1 tomada de Fries *et al.* (1972), se muestra la distribución de las rocas precámbricas en la región de Oaxaca. Existe la posibilidad de que una gran masa lenticular de granito post-tectónico aflore en las colinas inmediatamente al oeste de la ciudad de Oaxaca, pero sus límites no se conocen con certeza.

La dirección general de la foliación en los gneises es entre N y NW pero en varios lugares es subhorizontal y el bandeamiento gnésico original ha sido deformado por suaves pliegues posteriores con ejes de rumbo más o menos 45NE. Donde pudieron medirse, los pliegues cilíndricos buzan al NW con ángulos moderados.

La mayor parte de los minerales fechados se obtuvieron de pegmatitas discordantes, tardías o postorogénicas, así que parece correcto decir que el acmé del plegamiento y el metamorfismo que originaron los gneises en esta área tuvo lugar hace unos 1000 m.a., es decir, durante la orogenia Grenvilliana, también conocida localmente como la orogenia Oaxaqueña (De Cserna, 1971). Recientes trabajos isotópicos U-Pb sobre zircones del "Complejo Oaxaqueño" (Anderson y Silver, 1971) dio una edad concordante de  $1080 \pm 50$  m. a., la cual aparentemente fechó una fase mayor de metamorfismo de las facies de granulita.

### LITOLOGÍA DEL COMPLEJO OAXAQUEÑO

La redacción que sigue está basada en los resultados de nuestro reconocimiento geológico y se cree que cubre la mayor parte de los principales tipos de paragneises y granulitas. Los ortogneises asociados serán tratados en una futura publicación.

#### *Gneises de biotita y granate*

##### 1) *Distribución y relaciones de campo*

Parece ser que estas rocas son el tipo más común encontrado en el área, al norte de la ciudad de Oaxaca donde afloran en el camino a Huajuapán y en el camino secundario a Teotitlán. En esta región el bandeamiento gnésico tiene un rumbo N10W inclinado al oeste 50°. Las lineaciones minerales buzan 40° al N40W.

## II) Petrografía

Estas rocas son normalmente rayadas o bandeadas y consisten de capas alternantes de faldespato blanco con cuarzo gris azulado y capas de granate rojo oscuro y biotita negra. Se presenta comúnmente grafito en hojuelas visibles.

La microtextura es de gnéica a granoblástica y en sección delgada, la roca consiste de zonas orientadas de biotita café rojizo en hojuelas, dentro de un mosaico félsico formado por cristales tubulares de oligoclasa y cuarzo fuertemente deformado y saturado. La almandita rosada forma pequeños porfiroblastos irregulares que no parecen haber sufrido ninguna rotación importante. Los accesorios comprenden titanomagnetita, apatita y grafito.

### Gneises y granulitas de cordierita

#### I) Distribución y relaciones de campo

Estas rocas afloran en los cortes sobre la Carretera Federal de Oaxaca a Huajuapán entre los kms 149 y 158, es decir unos 10 a 15 kms al WSW de Telixtlahuaca. (Localidades 1 a 3 en la fig. 1.)

En general las lineaciones minerales buzcan al NNW con ángulos de  $18^\circ$  a  $25^\circ$ , pero en una ocasión, existe una inversión completa de este rumbo buzando en este caso al sur. El bandeamiento gnéico tiene un rumbo de N50W con inclinaciones al NE de  $35^\circ$  a  $70^\circ$ . Asociado con migmatización, localmente es común un plegamiento cerrado de cizalleo a pequeña escala y las rocas están cortadas por aplitas delgadas.

Ésta es la roca que está intrusionada por un cuerpo de gneis anortosítico que contiene cuerpos de "nelsonita" —una asociación mineral de apatita, ilmenita y magnetita— (Schmitter, 1970). El contacto entre el gneis anortosítico y el gneis de cordierita es abrupto pero precede al plegamiento ya que la lineación mineral con una dirección NNW corta dicho contacto.

## II) Petrografía

Los especímenes de mano varían de rocas granulíticas con un débil bandeamiento mineral a tipos fuertemente lineados. Los tipos bandeados y rayados son de grano medio y de color gris verdoso oscuro con horizontes de hornblenda verde oscuro y escamas de biotita negra que alternan con

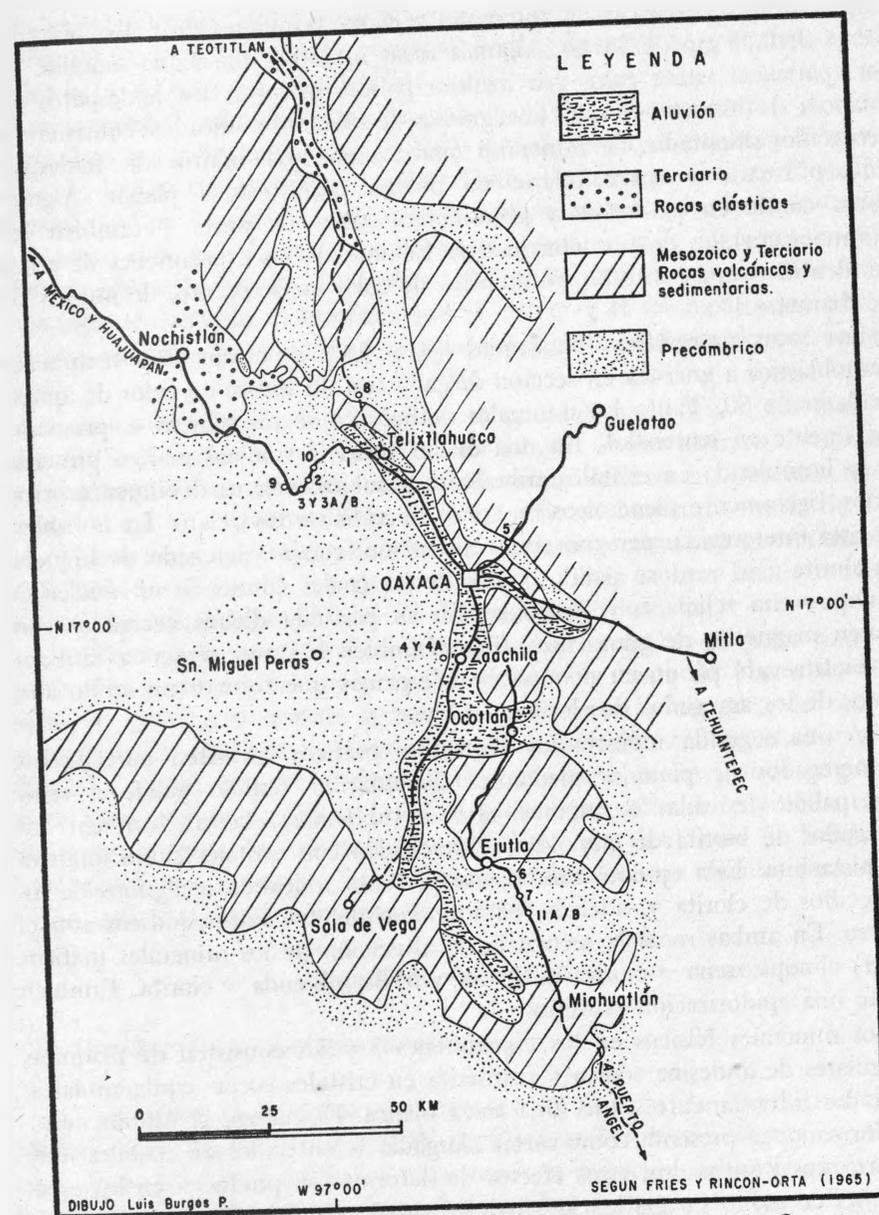


Figura 1. Distribución de las rocas en una parte del Estado de Oaxaca.

capas difusas más ricas en minerales félsicos granulares de color blanco y cerca de 0.75 cm de ancho. Algunas rocas muestran un cuarzo notable por su apariencia vítrea color gris azulado pálido, mientras los feldespatos son blancos de aspecto ceroso. Los gneises fuertemente lineados consisten de lenticillos orientados de minerales máficos en una matriz de feldespato blanco rosado y cuarzo claro; no poseen esquistosidad planar. Algunas rocas contienen pequeños y abundantes cubos de pirita y también son comunes cristales de titanomagnetita. En uno de los especímenes de mano se identificó una inclusión ultramáfica de color verde oscuro, de unos 3 cm de diámetro.

Las rocas granulíticas bandeadas (3 y 3A) muestran una textura de granoblástica a gneílica en sección delgada con un índice de color de aproximadamente 50. Tanto los minerales máficos como los félsicos se presentan claramente en lenticillos. En una de las rocas el mineral máfico principal es la hornblenda en cristales anhedrales y subprismáticos débilmente orientados, ligeramente pleocroicos en tonos de café verdoso claro. La hornblenda está intercrecida, pero no como alteración, con un agregado de hojuelas de clorita azul verdoso pálido, varias de las cuales contienen un núcleo de clinopiroxena relictas muy corroída. En su periferia dichos agregados contienen magnetita de grano muy fino. También hay una pequeña cantidad de biotita café pálido en pequeñísimas escamas que forman un anillo alrededor de los agregados de clorita.

En una segunda muestra los lenticillos máficos consisten enteramente de agregados de peninita pleocroica de amarillo verdoso pálido a verde azul pálido derivadas de algunas raras hornblendas relictas. También hay agregados de biotita de grano fino intercrecida con cristales subprismáticos de pistachita. Esta epidota también se presenta rodeando a algunos de los lenticillos de clorita y, además, en intercrecimientos mirmequíticos con el cuarzo. En ambas rocas la secuencia de alteración de los minerales máficos es: a) clinopiroxena → clorita → biotita, y b) hornblenda → clorita. También existe una epidotización posterior.

Los minerales félsicos en los especímenes 3 y 3A consisten de plaquitas irregulares de andesina sódica y cordierita en cristales cortos equigranulares, alterados intensamente a una fina mica blanca. El cuarzo, el último mineral formado, se presenta como sartas alargadas y lenticillos de cristales muy deformados y suturados; estos efectos de deformación producen en los especímenes de mano su apariencia vítrea gris azulosa pálida.

Los minerales accesorios comprenden pirita muy abundante en pequeños cubos y cristales irregulares, hasta el 3% de titanomagnetita y apatita en

cristales subidiomórficos hasta de 0.5 mm de longitud. Tanto la pirita como la titanomagnetita a menudo muestran bordes de epidota granular o, en último caso, de eseno de grano fino.

Las variedades más intensamente gneílicas (1) muestran cataclasis incipiente. Los lenticillos máficos hasta de 5 mm de longitud consisten de agregados de biotita de grano fino (pleocroismo: amarillo pálido-amarillo-café) rodeando anfíbolos relictas que han sido completamente pseudomorfoseadas por goetita café rojizo oscuro y hematita, granates raros incoloros y cristales irregulares de epidota. La biotita también se presenta en zonas de muy finos intercrecimientos diablasticos con el cuarzo y el feldespato que están, a su vez, rodeados por clorita verde pálido y epidota o biotita de grano más grueso.

Los minerales félsicos comprenden un mosaico de grano fino (0.25 mm — 0.5 mm) de andesina y cordierita (mucho de esta última alterada a sericita) con una pequeña cantidad de cuarzo intersticial deformado. Los minerales accesorios son apatita, en cristales subidiomórficos abundantes hasta de 1.5 mm de longitud, y cristales alterados de titanomagnetita que generalmente están incluidos dentro de agregados de biotita. Toda la roca contiene también mucha mica blanca intersticial de grano fino y calcita.

Asociadas con los gneises existen bandas de leucogranulita de grano fino (2) que consisten de cordierita y plaquillas anhedrales hasta de 1 mm de diámetro, de cristales finamente gemelados de andesina y un poco de cuarzo intersticial. La cordierita muestra algo de gemelación polisintética y está alterada a sericita fina, y marginalmente y a lo largo de los planos de gemelación a cristales de epidota (?). Los prismas angostos de pistachita también forman agregados en forma de abanico hasta de 1 mm de longitud, intercrecidos con muscovita fina; se encuentran asimismo cristales pequeños y bien definidos de titanomagnetita alterada.

#### *Granulitas charnoquíticas*

##### *1) Distribución y relaciones de campo*

Las granulitas charnoquíticas afloran en el camino de Zaachila a San Miguel Peras, unos 15 kms al SSW de Oaxaca (Nº 4 en la figura 1). Son aquí de carácter migmatítico y muestran una foliación subhorizontal. Las lineaciones minerales, en los planos de foliación, tienen un rumbo de N40W. El plegamiento es isoclinal y probablemente producido por cizalleo o flujo.

Las rocas charnoquíticas parecen graduar a gneises de biotita granatíferos

y gneises de biotita y piroxena, los cuales, más hacia el oeste, están cortados por pegmatitas discordantes de alanita que han sido fechadas en 940 m.a. (Fries *et al.*, 1962).

## II) Petrografía

Las rocas son granulitas de grano fino a medio, de color gris verdoso que muestran un débil bandeamiento. Los minerales félsicos tienen una apariencia vítrea verde pálido característica. La piritita se presenta abundante en pequeños parches.

Se examinaron dos secciones delgadas con algún detalle. Ambas muestran una textura granoblástica, lineación débil y un índice de color de cerca de 40.

En ambas rocas, la diopsida es el mineral máfico predominante, en cristales frescos, verde pálido, anhedrales y subhedrales de 0.5 mm a 1 mm de tamaño, algunos de los cuales tienen un fuerte fracturamiento paralelo a [100]. La uralitización está confinada a escasos bordes angostos y discontinuos de algunas anfíbolos. La hiperstena forma cristales anhedrales algo corroídos y su familiar pleocroísmo de rosa a verde pálido con una uralitización parcial; en los extremos de su crucero se ha desarrollado un borde angosto de anfíbola uralítica azul-verdoso. La hornblenda está presente en el espécimen 4, pero no en el 4A. Forma cristales frescos anhedrales con pleocroísmo X = verde amarillento, Y = verde olivo claro, Z = verde olivo, que parcialmente rodea los cristales de piroxena, aunque no se forma de éstos. La diopsida y la hornblenda aparentemente están en equilibrio estable, pero la hiperstena es probablemente metaestable. En las muestras examinadas las proporciones relativas de los minerales máficos son aproximadamente como siguen, Do:Hy, 60:40 y Do:Ho:Hy, 50:30:20. La biotita se presenta en escasas y pequeñas hojuelas pleocroicas de amarillo pálido a café rojizo intercrecidas en parte con cuarzo de grano fino, pero no es de importancia.

El mineral félsico predominante es la andesina sódica (Ab 60-64) en plaquillas anhedrales, la mayor parte de las cuales tienen gemelación bien definida de los tipos de la albita y albita-periclina combinados, aunque puede ser cataclástica una gemelación parcial en cristales con zoneamiento oscilatorio pobremente desarrollado (Cannon, 1966). Hay cuarzo en cantidades mucho menores, el cual forma plaquillas intersticiales y deformadas.

La titanomagnetita de estas rocas comprende de 5 a 10% en cristales subhedrales y anhedrales hasta de 0.3 mm de diámetro que están comúnmente rodeados por biotita fina café rojizo o, menos frecuentemente, por anfíbola uralítica. Algo de la titanomagnetita está intercrecida con pleonasto verde, y

otra poca incluye intercrecimientos marginales de piritita. Las inclusiones esqueléticas "grille" en algunas hornblendas y piroxenas o en las interfases entre la plagioclasa y la hiperstena son también probablemente de titanomagnetita. La apatita es accesoria en dos generaciones, como prismas delgados en los minerales félsicos y en cristales mayores, más bien redondeados, subidiomórficos, asociada con los minerales máficos. También hay un poco de granate accesorio.

## III) Nomenclatura

El nombre de charnoquita se le dio originalmente a un granito de hiperstena cerca de Madrás, India, que subsecuentemente se extendió a unas "Series Charnoquíticas" co-magmáticas de rocas de hiperstena (Holland, 1893, 1900). Desde entonces numerosos autores han usado el nombre de charnoquita de manera diferente para una serie de rocas de linaje tanto ígneo como metamórfico (véase un resumen en Parras, 1958) cuyo único criterio diagnóstico fue la presencia de hiperstena y ciertas características estructurales y texturales distintivas. Puesto que las rocas de Oaxaca tienen estas características, pero son diferentes en muchos aspectos del tipo original de roca de Holland, se denominan granulitas charnoquíticas, a la manera de Gevers y Dunne (1942), sin que el término posea ninguna secuencia genética particular.

### *Gneises de diopsida y biotita*

#### I) *Distribución y relaciones de campo*

Se localizaron gneises de diopsida y biotita esencialmente iguales en dos puntos separados: cerca del km 15.5 de la carretera de Oaxaca a Guelatao, y en el km 67 sobre la carretera de Oaxaca a Miahuatlán (5 y 6 en la figura 1). Los primeros se presentan justos al oeste del contacto fallado entre los gneises y las cataclasitas graníticas que forman la Sierra de Juárez. Muestran una fuerte foliación con rumbo N30W inclinada al N unos 80°, aunque también parece haber una segunda foliación E-W asociada a una feldspatización potásica posterior.

Los otros afloramientos son las primeras rocas gnéissicas que se ven en el camino de Ejutla a Miahuatlán. Muestran un bandeamiento bien definido al N58E, inclinado hacia el oeste unos 25°, pero también hay microplegues que buzan 10° hacia el sur. Son comunes venas plegadas y lentes de material pegmatítico, así como diques discordantes de pegmatita que contienen grandes cristales de biotita negra y minerales radiactivos.

## II) Petrografía

Los gneises son rocas de grano grueso a medio, ricas en hojuelas de biotita negra en sus planos de foliación. Intercrecidas con las micas aparecen cristales de piroxena verde oscuro y minerales félsicos blancos y de hábito granular.

La microtextura de las rocas (5 y 6) es fuertemente gnéisica. La biotita forma hasta el 35% de las secciones examinadas en forma de trenes orientados de hojuelas con una longitud promedio de 0.75 mm. El pleocroísmo es muy distintivo: X = amarillo pálido, Y = naranja, Z = rojo pardo o X = amarillo pardo pálido, Z = café rojizo claro. La diopsida se presenta en plaquitas anhedrales de color verde muy pálido, bastante corroídas, de 0.75 mm a 1 mm de tamaño que contienen inclusiones de magnetita finamente dividida. Ha sido sólo ligeramente reemplazada por hornblenda uralítica verde olivo. Aunque los cristales de biotita rodean parcialmente a las piroxenas, aquéllas no se forman de éstas y ambos minerales parecen en general contemporáneos. Los minerales félsicos comprenden grandes (<2 mm) cristales tabulares de plagioclasa (oligoclasa cálcica, andesina sódica) pobremente gemelados y asociados con cantidades menores de cuarzo deformado, el cual se presenta intersticialmente, intercrecido con cristales pequeños de epidota y a lo largo de los planos de crucero de la biotita. En un espécimen (6) también hay algunas plaquillas de criptopertita sombreada.

Los minerales accesorios son pequeñas cantidades de titanomagnetita, apatita y raros granates.

### *Gneises y granulitas cuarzo-feldespáticas*

#### I) *Distribución y relaciones de campo*

Las rocas cuarzo-feldespáticas se presentan en todas las áreas precámbricas de la región de Oaxaca en bandas y lentes distintivos dentro de las rocas gnéisicas en general. Rara vez forman cuerpos de alguna significación.

Como ejemplo se describirán dos afloramientos: uno en la carretera Oaxaca-Huajuapán (localidad 3), y el otro cerca del km 69 en la carretera a Miahuatlán (localidad 7).

En el primer punto las rocas cuarzo-feldespáticas aparecen interbandeadas con gneises de hornblenda y cordierita (3A, véase p. 33). En el segundo afloramiento están contenidas en gneises granatíferos de biotita bandeados con un rumbo N18E y una inclinación al W de aproximadamente 15°. En esta localidad parece existir un sinforme cuyo núcleo lo forman gneises de biotita y los flancos, separados unos 100 m, por rocas granatíferas.

La roca cuarzo-feldespática dentro de los gneises de cordierita tiene una fuerte apariencia gnéisica lenticular en los ejemplares de mano (3B). Los lentecillos, de unos 3 mm de ancho, están formados por cuarzo vidrioso y minerales máficos de color verde oscuro en una matriz de feldespato blanco rosáceo. Una sección delgada presenta agregados granoblásticos de grano fino (0.4 mm) de oligoclasa turbia, bien gemelada y cuarzo que contiene agregados lenticulares e irregulares de escamas de biotita café pálido y pista-chita. Todo esto está intersectado por lentecillas paralelas y sartas de cuarzo deformado.

El segundo espécimen (7) también muestra una fuerte textura de gnéisica a cataclástica y contiene lentes irregulares y "ojos" fracturados de granate rojo parduzco en una matriz blanco grisácea, de grano más fino, la cual está compuesta de feldespatos blancos lenticulares que contienen trenes orientados de diminutas escamas de biotita café. La microtextura es gnéisico-porfiroblástica y en sección delgada muestra granates hasta de 5 mm de tamaño con inclusiones de cuarzo y también en forma de agregados lenticulares de pequeños cristales redondeados paralelos a la lineación. Los granates están enclavados en un fino mosaico granoblástico (~1.0 mm) hecho de plaquitas irregulares de mesopertita y micropertita fina en venas (tipo "string") en el cual, pequeñas escamas de biotita (0.5 mm) forman trenes curvilíneos. La biotita es pleocroica en X = amarillo pálido, Y = naranja, Z = rojo pardo. También hay algunos cristales tabulares de oligoclasa finamente gemelada y cuarzo posterior en formas internas suturadas, venas orientadas y lentecillos. En las interfases granate-feldespato varias de las micropertitas exhiben un borde de exsolución de plagioclasa sódica clara.

Los minerales accesorios son abundantes, comprenden pequeños prismas de circón con puntas redondeadas, titanomagnetita y rutilo, este último en inclusiones subidiomórficas en los granates o dentro de los minerales félsicos.

La secuencia de cristalización en esta roca es: accesorios-granate-biotita micropertita-cuarzo.

### *Mármoles y granulitas de calcosilicatos*

Tales rocas son comunes en toda el área de Oaxaca, donde representan un rasgo distintivo de sus terrenos gnéisicos precámbricos. La división entre los mármoles y las granulitas de calcosilicatos se considera a un contenido del 50% de calcosilicatos, pero existe desde luego una transición completa entre ambos grupos.

### I) Distribución y relaciones de campo

Se han reconocido en varias localidades mármoles impuros y granulitas de calcosilicatos asociados. Se presentan en el camino de tierra de Telixtlahuaca a Teotitlán (8), entre los kms 134 y 148 del camino Huajuapán-Oaxaca (9 y 10) y cerca del km 71 de la carretera Oaxaca-Miahuatlán (11). Sin duda alguna, hay muchas más de estas bandas y lentes de mármol que podrán reconocerse durante el mapeo geológico del área.

En la primera localidad, se presentan como una banda concordante de mármol entre gneises granatíferos de biotita rayados, localmente ricos en grafito con un rumbo N25W y una inclinación de 35° al oeste. El bandeamiento en ocasiones convergente de los gneises sugiere un plegamiento cerrado casi isoclinal. Los mármoles mismos muestran un bandeamiento mineral difuso y en algunos lugares contiene numerosos enclaves de gneis. Su mobilización e intrusión local es pues evidente por mecanismos de flujo plástico.

En el camino a Huajuapán los mármoles y rocas asociadas afloran dentro de la zona de gneises y granulitas de cordierita. Aquí también son muy comunes las inclusiones de gneises y granulitas de calcosilicatos por lo que los mármoles muestran claramente su relación local intrusiva con los gneises circundantes. El bandeamiento en los gneises lleva un rumbo N13W, pero es de N40W en los mármoles aunque varía ampliamente. Ambos tipos de roca son intersectados por gruesas vetas de pegmatitas discordantes.

Es muy probable que los mármoles expuestos en el camino a Huajuapán y aquéllos al norte de Telixtlahuaca representen la misma capa fracturada y separada por plegamiento y flujo.

Las rocas de calcosilicatos un poco al sur de Ejutla forman el cierre de un pliegue recumbente que aparentemente buza 10° al N18E y contiene una fuerte foliación axial. El núcleo del pliegue está formado por granulita pegmatítica de calcosilicatos que localmente intrusionan a los gneises circundantes.

## II) Petrografía

### a) Mármoles

Consisten de un agregado de grano grueso a medio de calcita de color blanco crema, 26 a 40% de serpentina verde amarillenta en cristales bien redondeados hasta de 3 mm de tamaño, y pequeñas cantidades de mica café muy pálido (8). Las secciones delgadas muestran una textura típica

de mosaico; los cristales de calcita exhiben bandas de gemelación por deslizamiento y bandas de exsolución posiblemente de dolomita, mientras la mica tiene las propiedades de la flogopita. El grafito es un mineral accesorio común en pequeñas y numerosas escamas o agregados intersticiales de gránulos diminutos hasta de 0.5 mm de longitud. Un accesorio adicional es el granate (grosularita?). En ninguna de las secciones examinadas se observaron cristales relictos dentro de los agregados de serpentina, pero éstos se derivaron posiblemente de la forsterita original.

### b) Granulitas y gneises de calcosilicatos

Las granulitas son rocas masivas gris verdoso pálido, de grano fino a medio que algunas veces muestran un bandeamiento incipiente. Los sulfuros visibles son muy comunes.

La microtextura es granoblástica a gnéisica y en sección delgada (9) muestran plaquillas anhedrales, incoloras o verde muy pálido de diopsida ( $Z \wedge C = 35^\circ$ ) de 0.5 a 1 mm de diámetro y con fracturas pronunciadas paralelas a [100], asociadas con agregados lenticulares de cristales irregulares intersticiales de escapolita. El resto de la roca consiste de un mosaico de grano fino de cuarzo deformado y una pequeña cantidad de microclina. Cerca del 5% de la roca lo forman cristales subidiomórficos y redondeados de esfero café rosáceo pálido; también hay prismas orientados y alargados de apatita, y pequeños agregados irregulares de zoisita. Este tipo de roca es particularmente rico en minerales opacos, pirita y abundante pirrotita asociada e intercrecida con pequeñas escamas de calcopirita. Las diopsiditas de grano medio son comunes y consisten totalmente de diopsida verde pálido con inclusiones redondeadas y dispersas de muscovita; están asociadas con las granulitas de calcosilicatos o como inclusiones en los mármoles (10).

Los gneises de calcosilicatos al sur de Ejutla muestran un pronunciado bandeamiento producido por horizontes alternantes de minerales félsicos y máficos (11A), pero están asociados, sin embargo, con granulitas gris verde pálido y débil foliación (11B).

Los gneises bandeados contienen asociaciones minerales de diopsida-escapolita-esfena sin feldespatos, pero en la granulita predomina la escapolita y el lugar de la diopsida lo toman cristales de actinolita verde pálido que en gran parte han sido reemplazados por agregados finos de clorita, calcita y clinzoisita. En la sección delgada que se examinó de granulita, cerca del 50% consiste de grandes laminillas suturadas de cuarzo deformado. El acce-

sorio más abundante es en todos los casos el esfeno en color rosa pardo y en forma de cristales redondeados, con embahiamientos.

#### ORIGEN DE LOS GNEISES Y GRANULITAS DE OAXACA

No se reconocieron características sedimentarias relictas en las rocas examinadas del Complejo Oaxaqueño, así que su posible origen sólo puede determinarse en virtud de sus asociaciones mineralógicas y litológicas. Las rocas más problemáticas son las granulitas charnoquíticas. Las relaciones de campo, tales como la presencia de mármoles intercalados y metasamitas, sugieren un posible origen metasedimentario, pero además presentan indudables similitudes mineralógicas con las charnoquitas del sur de India, las cuales son consideradas metaígneas (por ejemplo, Howie, 1955). Sin trabajos posteriores más detallados este problema no puede resolverse en el área de Oaxaca, sin embargo, la roca sedimentaria original podría ser una lutita calcárea. Los sedimentos más arcillosos y menos calcáreos podrían producir los gneises de piroxena y biotita.

Los abundantes gneises granatíferos de biotita se formaron probablemente de arcillas calcáreas, localmente ferruginosas; el grafito a menudo presente es un indicador seguro de un ambiente sedimentario porque representa ya sea material carbonoso o carbonatos fósiles.

Las rocas de cordierita deben haberse formado de sedimentos impuros con alto contenido de magnesio pero bajo de hierro, posiblemente de una arcilla o arenisca clorítica. La cordierita ha podido sintentizarse a partir de grauvacas (Winkler, 1965), pero en vista de que los gneises contienen mármoles interstratificados esa asociación litológica original parece poco probable.

Las granulitas cuarzo-feldespáticas casi con toda certeza representan horizontes de arcosas y areniscas impuras intercaladas en la secuencia arcillosa. Las pequeñas cantidades de biotita y granate se derivaron probablemente de impurezas como magnetita y sericita. La abundante presencia en estas rocas de rutilos y circones redondeados sugieren su origen detrítico en las areniscas.

Los mármoles de serpentina se formaron sin duda alguna de carbonatos impuros; pero más que representantes de una caliza metamorfoseada con impurezas diseminadas, es más factible que las rocas fueran originalmente dolomías sedimentarias que sufrieron una de-dolomitización. Los óxidos de calcio y magnesio resultantes de este proceso se combinaron con las impurezas silícicas para formar silicatos de calcio y magnesio (cf. Faust, 1949),

pero la disociación no se completó quizás debido a la ausencia de suficiente sílica reactiva.

N. Rast (citado por De Cserna, 1971) sugirió que algunos de los mármoles expuestos a lo largo del camino Huajuapán-Oaxaca fueron carbonatitas, pero no existe ninguna evidencia en favor de esta interpretación. Las relaciones de campo y la mineralogía indican que son sencillamente mármoles movilizados e intrusionados que a menudo se presentan en terrenos metamórficos similares (por ejemplo Garson, 1955).

Las granulitas de escapolita y diopsida posiblemente representan calizas impuras o margas que fueron permeadas durante el metamorfismo por fluidos volátiles, ricos en cloro y bióxido de carbono. La escapolita es un verdadero mineral metamórfico ya que no se observan relaciones transicionales con la plagioclasa. Es evidente una relativa riqueza en titanio ya que el esfeno se presenta como un accesorio muy abundante en estas rocas. Las diopsiditas casi monominerálicas pueden ser el resultado de segregación metamórfica o haberse formado a partir de una marga dolomítica.

Un rasgo distintivo de las granulitas de calcosilicatos es la presencia de abundante pirrotita asociada con pequeñas cantidades de calcopirita. No obstante la movilización y la redistribución de material durante el metamorfismo regional, la presencia de sulfuros de cobre y hierro es fuertemente sugestiva de una deposición singenética bajo condiciones anaeróbicas en aguas regularmente someras.

Las características geoquímicas notables del Complejo Oaxaqueño incluyen su relativa riqueza en calcio, magnesio y hierro además de los <sup>abundantes</sup> silicio y aluminio. Las psamitas y las pelitas son raras y el aspecto general fue el de una gruesa secuencia de arcillas principalmente calcáreas y dolomíticas que en algunas partes contenían capas de dolomía y localmente fueron cloríticas. Lo anterior concuerda bien con el concepto de que el Complejo Oaxaqueño representa el límite conocido más meridional de la Faja Estructural Grenville (Fries *et al.*, 1962; Kesler and Heath, 1970; De Cserna, 1971).

#### CONDICIONES DEL METAMORFISMO

Las asociaciones minerales en los principales tipos de roca sirven para indicar las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se formaron, así como sus facies metamórficas.

Las granulitas charnoquíticas contienen la asociación: hiperstena-diopsida ± hornblenda-andesina-cuarzo.

Es importante recalcar que la hornblenda verde pardusco es una fase estable que puede coexistir con las piroxenas y debe considerarse por lo tanto como un mineral tipomórfico. Dicha asociación es muy característica de las facies de granulita en muchas partes del mundo y fue primero utilizada como base para separar las subfacies de granulita de hornblenda (Fyfe, Turner y Verhoogen, 1958). En la actualidad, sin embargo, siguiendo a Lambert (1965) y Fyfe y Turner (1966), la tendencia es a no reconocer esta subfacie sino simplemente regresar al concepto antiguo de facies. Una ligera disminución en la temperatura, por abajo del máximo atribuible al metamorfismo de las facies de granulita, es probablemente la responsable de la presencia de la hornblenda, con la presión del vapor de agua permaneciendo constante.

La asociación estable diopsida-andesina-biotita caracteriza a un segundo grupo de rocas en el área de Oaxaca. La biotita es una variedad café rojiza característica, probablemente rica en titanio y hierro y es similar a la que se ha encontrado asociada con las rocas en facies de granulita. En este sentido, Hsu (1955) sugirió que aquellas rocas que contengan dicha asociación podrían ser el producto de una "granulitización húmeda", o sea que una fase fluida hidratada conteniendo potasio podría coexistir a altas temperaturas con típicas piroxenas anhidras. Hsu propuso la subfacie de granulita de biotita que es aproximadamente igual a la subfacie anterior de granulita de hornblenda por lo que las rocas de Oaxaca podrían asignarse a estas subfacies.

Los gneises granatífero de biotita parecen pertenecer a las rocas típicas de las facies de anfibolita formadas bajo condiciones moderadas de presión y temperatura, pero de igual manera podrían ser tipos retrogresivos derivados de gneises de más alto grado.

Los gneises y granulitas de cordierita son de un interés poco común. La cordierita con la andesina y el cuarzo parecen haber estado originalmente en equilibrio con la hornblenda y la clinopiroxena, aunque luego las rocas hayan sido extensamente alteradas. La presencia de cordierita indica condiciones de presión más bajas que las normalmente asociadas tanto a las facies de anfibolita como de granulita, por lo que pueden representar una transición a las facies de hornfels de piroxena, generalmente asociadas al metamorfismo térmico.

Las asociaciones minerales en las granulitas cuarzo feldespáticas son estables a través de un amplio rango de presiones y temperaturas, por lo tanto no son buenos indicadores de las condiciones del metamorfismo. Las rocas calcáreas, en cambio, son más significativas. La asociación mineral típica

en las granulitas de calcosilicatos es: diopsida-escapolita-cuarzo-esfeno. Es característica de las condiciones de las facies de granulita pero, cuando el lugar de la diopsida lo toma la actinolita, probablemente debido a un metamorfismo retrogresivo, hay una transición a las facies de anfibolita. La asociación calcita-forsterita representa la asociación mineral original en los mármoles de serpentina, también característica de las facies de granulita, pero es significativo que ni la wollastonita ni la grosularita se hayan observado en estas rocas.

En resumen, parece que la mayor parte de las rocas del Complejo Oaxaqueño se formó bajo condiciones de alta temperatura y presiones moderadamente elevadas, características de las facies de granulita. Una disminución local en la presión litostática, posiblemente asociada a una migmatización tardío-cinemática, produjo las rocas de cordierita, mientras los abundantes gneises de biotita se formaron al disminuir más generalmente las temperaturas del metamorfismo. La presión del vapor de agua se mantuvo moderadamente elevada. La coexistencia de piritita y pirrotita en algunas de las granulitas de calcosilicatos sugiere una temperatura de formación de cerca de 800°C a 5000 bars (Kullerud y Yoder, 1959) pero, desde luego, si la presión del vapor de agua es igual a la presión total, la temperatura sería mucho más baja.

Las relaciones cronológicas entre las rocas típicas de las facies de granulita y los otros grupos, permanecen hasta el presente como un problema sin resolver. Si el Complejo Oaxaqueño es polimetamórfico las charnoquitas granulíticas en particular podrían representar relictos retrabajados de un ciclo metamórfico más antiguo, tal como se ha inferido para el cinturón orogénico Mozambique en África Oriental (por ejemplo Vail, 1965). Por otra parte, las relaciones observadas podrían atribuirse a gradientes locales de la temperatura y de la presión durante un solo episodio metamórfico, es decir, tendríamos una especie de zoneamiento térmico con las granulitas "secas" cerca de la fuente térmica, cubiertas por un manto "húmedo" de gneises de hornblenda y biotita, este último producto de la expulsión de potasio, silicio y agua. Tal explicación se ha dado para aclarar las relaciones entre las rocas en facies de granulita y anfibolita en el Escudo Canadiense (Eade *et al.*, 1966).

En el área estudiada la primera de las dos alternativas parece más viable. Existen frecuentes evidencias de plegamientos reiterados complejos y diaforesis, así que es probable que la orogenia Grenvilliana (o Oaxaqueña) haya sido polimetamórfica.

## REFERENCIAS

- AGUILERA, J. G. y ORDÓÑEZ, E. (1893) *Datos para la geología de México*. Imprenta y Fotocografía del Cosmos, Tacubaya, D. F., 87 p.
- ANDERSON, T. H. y SILVER, L. T. (1971) Age of granulite metamorphism during the Oaxacan orogeny, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Abstr. with Progr., Boulder Colo. Mtg.*, 3, (7), p. 492.
- BARRERA, T. (1946) Guía geológica de Oaxaca. *Inst. Geol. México, Mem.*
- BUELNA, R. R., ORDÓÑEZ, E. y AGUILERA, J. G. (1896) Itinerarios Geológicos. *Inst. Geol. México*, 4-6, pp. 19-29.
- CANNON, R. T. (1966) Plagioclase zoning and twinning in relation to the metamorphic history of some amphibolites and granulites. *Am. Jour. Sci.*, 264, pp. 526-542.
- DE CSERNA, Z. (1971) Precambrian Sedimentation, tectonics and magmatism in Mexico. *Geol. Rundschau*, 60, pp. 1488-1513.
- EADE, K. E., FAHRIG, W. F. y MAXWELL, J. A. (1966) Composition of crystalline shield rocks and fractionating effects of regional metamorphism. *Nature, London*, 211, pp. 1245-1249.
- FAUST, G. T. (1949) Dedolomitization and its relation to a possible derivation of a magnesium-rich hydrothermal solution. *Am. Mineral.*, 34, pp. 789-823.
- FÉLIX, J. (1899) Übersicht über die Entwicklung der geologischen Formationen in Mexico, nebst einem Anhang über die Höhlenbildungen dieses Landes en *Beiträge zur Geologie und Palaontologie der Republik Mexico*, Felix, J. y Lenk, H., 2 pp. 155-186. Schweizerbart, Stuttgart.
- FRIES, C., SCHMITTER, E. DAMON, P. E. y LIVINGSTON, D. E. (1962) Rocas precámbricas de edad grenvilliana de la parte central de Oaxaca en el sur de México. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geol. Bol.*, 64, 3, pp. 45-53.
- FRIES, C. y RINCÓN-ORTA, C. (1965) Nuevas aportaciones geocronológicas y técnicas empleadas en el laboratorio de geocronometría. *Univ. Nal. Autón. de México. Inst. Geol. Bol.*, 73, 2, 57-133.
- FRIES, C., SCHLAEPFER, C. J. y RINCÓN-ORTA, C. (1966) Nuevos datos geocronológicos del Complejo Oaxaqueño. *Soc. Geol. Mex. Bol.*, 29, pp. 59-66.
- FRIES, C., RINCÓN-ORTA, C., SILVER, L. T., SOLORIO-MUNGUÍA, J., SCHMITTER-VILLADA, E. y DE CSERNA, Z. (1973) Nuevas aportaciones a la geología de la Faja Tectónica Oaxaqueña. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geol. Bol.*, 100, pp. 11-26.
- FYFE, W. S. y TURNER, F. J. (1966) Reappraisal of the metamorphic facies concept. *Contr. Mineral and Petrol.*, 12, pp. 354-364.
- FYFE, W. S., TURNER, F. J. y VERHOOGEN, J. (1958) Metamorphic reactions and metamorphic facies. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 73.
- GARSON, M. S. (1955) Flow phenomena in a limestone on Changanlumi Hill, southern Nyasaland. *Geol. Mag. London*, 92, pp. 155-161.
- GEVERS, T. W. y DUNNE, J. C. (1942) Charnockitic rocks near Port Edward, Alfred County, Natal. *Geol. Soc. S. Africa, Trans.*, 45, pp. 183-214.
- HOLLAND, T. H. (1893) The petrology of Job Charnock's tombstone. *Asiatic Soc. Bengal Journ.*, 62.
- 1900) The charnockite series, a group of Archaen hypersthenic rocks in Peninsular India. *Geol. Survey India Mem.*, 28.
- HOWIE, R. A. (1955) The geochemistry of the charnockite series of Madras, India. *Royal Soc. Edinburgh Trans.*, 62, pp. 725-768.
- Hsu, K. J. (1955) Granulites and mylonites of the region about Cucamonga and San Antonio canyons, San Gabriel Mountains, California. *Univ. California Publ. Geol. Sci.*, 30, pp. 223-352.
- KESLER, S. E. (1973) Basement rock structural trends in southern Mexico. *Geol. Soc. America, Bull.* (in the press).
- KESLER, S. E. y HEATH, S. A. (1970) Structural trends in the southernmost North American Precambrian. *Geol. Soc. America, Bull.*, 81, pp. 2471-2476.
- KULLERUD, G. y YODER, H. S. (1959) Pyrite stability relations in the Fe-S system. *Econ. Geol.*, 54, pp. 533-572.
- LAMBERT, R. St. J. (1965) The metamorphic facies concept. *Mineral Mag., Lond.*, 34, pp. 283-291.
- ORDÓÑEZ, E. (1904) Las rocas arcaicas de México. *Soc. Cient. Antonio Alzate, Mem.*, 22, pp. 315-331.
- PARRAS, K. (1958) On the charnockites in the light of a highly metamorphic rock complex in southwestern Finland. *Comm. Géol. Finlande Bull.*, 181.
- RAST, N., RUIZ-CASTELLANOS, M., ROTHEMBERG L. y ORTEGA-GUTIÉRREZ, F. (1970) Resultados geológicos, estratigráficos y estructurales de un recorrido a lo largo de la Carretera Federal 190: Izúcar de Matamoros, Pue.,

y algunas localidades adyacentes. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geol.*, inédito.

RODRÍGUEZ-TORRES, R. (1970) Geología metamórfica del área de Acatlán, Estado de Puebla. *Soc. Geol. Mex. Libro-Guía de la excursión, México-Oaxaca*, pp. 51-54.

SCHMITTER-VILLADA, E. (1970) Nelsonita de ilmenita y magnetita de la región de Huitzo, Estado de Oaxaca. *Soc. Geol. Mex. Libro-Guía de la excursión, México-Oaxaca*, pp. 167-173.

VAIL, J. R. (1965) An outline of the geochronology of the late-Precambrian formations of eastern central Africa. *Royal Soc. London Proc. Ser. A*, 284, pp. 354-369.

WINKLER, H. G. F. (1965) *Petrogenesis of the metamorphic rocks*, Springer-Verlag, Berlin.

LAS FASES DEL VULCANISMO EN LA REGIÓN  
DE TLANCHINOL (HIDALGO, MÉXICO),  
SEGÚN DATOS PALEOMAGNÉTICOS Y GEOQUÍMICOS

Claude ROBIN \*

Claude BOBIER \*\*

\* Centre de Recherches géodynamiques - La Darse - 06 Ville-franche Sur mer - France -  
Investigador huésped del Instituto de Geología de la UNAM, durante el año 1972.

\*\* Misma dirección en Francia.