

REVISTA
DE LA
ASOCIACION GEOLOGICA ARGENTINA

Tomo IX

Octubre de 1954

Nº 4

GENESIS DE LOS YACIMIENTOS DE HIERRO DE SIERRA GRANDE ¹

POR JORGE A. VALVANO

RESUMEN

El autor describe brevemente la geología regional de los yacimientos, da las características estructurales del horizonte principal, su asociación lítica, la composición mineralógica y las relaciones texturales de la mena, y analiza extensamente los distintos tópicos relativos a la génesis de los depósitos.

Los yacimientos de hierro de Sierra Grande constituyen la mayor reserva de mineral de hierro de alta ley con que cuenta el país hasta la fecha. Descubiertos hacia 1945 por el señor Manuel R. Novillo, el primer reconocimiento técnico de su importancia se debe a Herrera (1947), confirmado luego por Angelelli (1948). Desde 1949 vienen siendo explorados por la Dirección Nacional de Minería mediante estudios geológicos, geofísicos, la excavación de trincheras y pozos cavados y la perforación de numerosos sondeos con extracción de testigos.

El conocimiento que poseemos actualmente de la geología de los depósitos es la integración de dos esfuerzos concurrentes: el estudio regional y el de detalle. En el primero los datos se deben en su mayor parte a los reconocimientos de Zollner (1951) y a los estudios de de Alba (1954), quien modifica en parte la interpretación de la secuencia estratigráfica; ellos, sumados a los del autor mismo, han permitido identificar las unidades geológicas aflorantes, así como trazar a grandes rasgos sus relaciones estructurales.

La investigación detallada de los yacimientos, de sus continuidades

¹ Este trabajo ha sido extraído de un informe inédito reservado más extenso, producido para la Dirección Nacional de Minería. Su publicación ha sido autorizada por el Ministerio de Industria.

This One



8WDO-ZPL-3D6C

Protegido por derechos de autor

bajo el relleno, la programación y control de la exploración, así como la estimación de reservas de mineral, fué y es la tarea del que esto escribe. Aprovecho la oportunidad para hacer llegar mi agradecimiento a los diversos colaboradores que tuve en distintas épocas, doctores A. Arnolds, J. C. Fernández Lima, H. de la Iglesia, A. Lapidus y R. V. Tezón, que hago extensivo a los doctores F. González Bonorino y J. Villar Fabre, por su colaboración en algunas determinaciones microscópicas. A la gentileza de este último se debe la obtención de las fotomicrografías.

Ubicación. — Los depósitos se encuentran en las cercanías de Sierra Grande, un pequeño poblado del territorio de Río Negro, ubicado a unos 30 km de la costa atlántica (Golfo de San Matías) y distante unos 130 km por camino (ruta nacional n° 3) al SSW de San Antonio Oeste y a unos 140 km de Puerto Madryn.

El llamado "Yacimiento Norte" se halla a unos 7 km por camino, al norte de Sierra Grande; el denominado "Yacimiento Sur" se encuentra a la misma distancia de la localidad mencionada, pero en dirección al Sur; el "Yacimiento Este", descubierto en el curso de la exploración por la D. N. de Minería, está situado a unos 3 km al este del "Yacimiento Sur".

Síntesis geológica. — El relleno moderno (aluvio, eluvio y suelos) cubre extensas áreas en la región, de tal suerte que los afloramientos de las rocas más antiguas suelen aparecer aislados por aquél, desconectados entre sí. Por otra parte, la meteorización medianamente intensa que muestran, en general, la mayoría de ellos, hace que los mismos resulten pobres desde un punto de vista geológico-estructural. En consecuencia, el mapeo geológico es en la zona una tarea ardua y lenta.

Las rocas más antiguas que ocurren en el área son sedimentos arenosos, arenoarcillosos y arcillosos, epimetamorfizados. Son pizarras, generalmente grises hasta negruzcas, metareniscas y cuarcitas rojizas o moradas, que presentan comúnmente fuerte inclinación.

Esta formación, que denominamos Formación Vieja, y que Zollner refirió dubitativamente al precámbrico, ha sido intruída por un plutón de granodiorita (estrictamente se trata de una adamelita, pero hemos preferido el término más usual de granodiorita siguiendo a Johannsen).

Sobre la Formación Vieja se asienta con fuerte discordancia angular un complejo de sedimentos costanero-neríticos, que hemos llamado Complejo Antiguo o Paleozoico, porque tal edad se le ha atribuído por algunos restos fósiles mal conservados. Esta potente serie paleozoica, de más de mil metros de espesor, está integrada por cuarcitas, areniscas, limolitas, lutitas y brechas endógenas; en la zona del Yaci-

miento Sur aparecen, además, pizarras, hornfels, metareniscas y esquistos cuarzo-micáceos, es decir, indicios de un mayor metamorfismo. Fué precisamente en pizarras de este yacimiento donde Tezón halló los citados restos fósiles (moluscos) que según Leanza (comunicación verbal que agradecemos) determinan una fecha entre devónica y carbonífera para el nivel portador.

Es este Complejo Paleozoico la formación portadora de los horizontes ferríferos que, de acuerdo al análisis estructural de Zollner, son tres: dos estratigráficamente inferiores, de menor importancia económica, y uno, estratigráficamente superior, el Horizonte III u Horizonte Ferrífero Principal, el de mayor significación y que está expuesto en los tres yacimientos importantes: "Sur", "Norte" y "Este".

La formación ferrífera ha sido plegada en grandes anticlinales y sinclinales, a veces volcados y en ciertos lugares complicados por pliegues de orden superior, y fracturada por fallas, algunas de gran rechazo.

La relación granodiorita-Complejo Paleozoico, tal cual se la observa en el Yacimiento Sur, es desconcertante por una serie de hechos petrológicos y estructurales antagónicos. Tal cual lo decíamos textualmente en nuestra información preliminar (Valvano, 1949) "la geometría del borde granodiorita-complejo no es la que podría esperarse de un contacto intrusivo. En efecto, observado en detalle, es una línea recta; no hay apófisis de la roca ígnea dentro de las rocas del complejo, no hay xenolitos de éstas en el cuerpo ígneo, en fin, no existen ninguno de esos rasgos típicos de un contacto intrusivo. Realmente su observación hace pensar en la existencia de una "noncoformity".

Sin embargo, sorprendentemente, "de acuerdo a la evidencia petrográfica, existe en las rocas del Complejo un metamorfismo esencialmente térmico" (íd. pág. 16). Esta acción metamórfica bien difundida, está típicamente señalada por la presencia abundante de hornfels con porfiroblastos de andalusita, cordierita, actinolita, granate, etc.

Por otra parte, la zona del contacto está marcada por una faja blanquecina, paralela al mismo, de alrededor de una decena de metros de ancho, con límites graduales hacia la granodiorita. En esa faja aflora una roca megascópicamente masiva, y fácilmente arrasada por la erosión, compuesta por granos de cuarzo de variado tamaño, pero que no superan generalmente 1,5-2 mm, dentro de una matrix tizosa, algo untuosa. Bajo el microscopio la matrix se resuelve en un agregado afieltrado de sericita, asociada a cantidades subordinadas de cuarzo muy fino y, en algunos lugares, de turmalina. Los granos de cuarzo presentan una típica estructura cataclástica, con extinción ondulada, fisuración y granulación, y muestran una activa corrosión, por sericita, que rellena también las fisuras.

Los hechos petrológicos y estructurales que hemos citado, especial-

mente el metamorfismo térmico y la zona de deformación, nos llevaron en nuestra información de 1949, a formular la hipótesis de que la granodiorita fuera intrusiva en el Complejo y de que el contacto actual no era uno normal sino un contacto de falla.

Actualmente interpretamos esa faja cuarzo-sericitica como una zona de deformación tectónica por la que circularon luego flúidos hidrotermales que produjeron una intensa sericitización. De tal manera, pues, que no es posible decir con certeza qué rocas componían originalmente esa zona del contacto y tampoco es posible tomar ese borde granodiorita-Complejo como criterio seguro para establecer edad relativa.

Reconocimientos posteriores nos permitieron revisar rápidamente ese contacto en otra localidad (Puesto Alfaro), a varios kilómetros al NE del Yacimiento Sur. Allí, aparentemente, la serie paleozoica se asienta en discordancia (nonconformity) sobre el cuerpo ígneo. Esta es, en el estado actual de nuestros conocimientos, la hipótesis más probable.

Pero en tal supuesto, queda como interrogante el porqué del metamorfismo térmico que exhiben las rocas del Complejo en el Yacimiento Sur. Naturalmente, no pensamos que pueda asignárselo a la intrusión de los diques de pórfiro cuarcífero de la Serie Volcánica, que en contado número afloran en el área del yacimiento citado. Podría, en cambio, explicárselo atribuyéndolo a algún cuerpo ígneo oculto o a un tipo muy "sui generis" de metamorfismo, quizá del tipo de metamorfismo estático de Judd.

Se observan también en el Yacimiento Sur, indicios de hidrotermalismo, representados principalmente, además de la faja de sericitización mencionada, por el relleno de diaclasas y fisuras por cuarzo-clorita y/o pirita y/o granate, pirita-clorita, cuarzo-moscovita-clorita y por una ligera piritización difusa de la mena en ciertos lugares. Este hidrotermalismo sí, podría ser relacionado con el ciclo efusivo de la Serie Volcánica.

Cuerpos de diabasas (a veces filones-capas) afloran en diversos sitios en una posición estratigráfica no bien aclarada aún (pre o post-Complejo paleozoico?).

En discordancia angular marcada se asienta sobre las formaciones precedentemente citadas, una serie de vulcanitas ácidas (coladas de pórfiros cuarcíferos, sus tobas y tufitas) atravesadas por diques de la misma filiación, que hemos denominado Serie Volcánica y a la que asignamos tentativamente una edad jurásica siguiendo a Feruglio. Dentro de ella, en su base, se encuentran, localmente, sedimentos lacustres calcáreo-margosos. La Serie, cuyos afloramientos cubren extensiones muy considerables en la zona (es el elemento más común después de los rellenos modernos) ha sido plegada por una tectónica

moderada en anticlinales y sinclinales muy abiertos, de varios kilómetros de longitud de onda; las fracturas que la afectan son, en general, de poca magnitud. Por un proceso de inversión de relieve, señalado ya por Zollner, son los sinclinales lo que ocupan las culminaciones topográficas (Sierra Grande, Sierra Chara, Sierra del Tunal, Sierra Cancha) y es en las zonas de los anticlinales, arrasados por la erosión, donde aparecen las formaciones preporfíricas.

Hacia el norte y el este de la zona estudiada y especialmente sobre las márgenes del arroyo Salado, se encuentran, en posición subhorizontal, extensos depósitos de calcáreos del Rocanense. Aisladamente y sobre todo hacia el oriente, afloran bancos de coquina del Patagónico, asociados con areniscas rojas en su piso.

Finalmente, los “rodados tehuelches” y los rellenos modernos compuestos por material aluvial, eluvial y delgadas capas de suelos, completan la columna estratigráfica.

El Horizonte Ferrífero Principal. — La longitud total de los afloramientos del Horizonte Ferrífero en los tres yacimientos citados, alcanza casi los ocho kilómetros. Los espesores son también considerables; en el grupo “Sur”-“Este” se notan los espesores mayores, que llegan a superar los quince metros, y que generalmente oscilan entre 8 y 12 metros en el “Este” y 10 a 12 metros en el “Sur”. El Horizonte en este grupo “Sur”-“Este” encierra comúnmente algunas intercalaciones estériles de areniscas, generalmente una o dos, de poco espesor, desde 0,20-0,30 m hasta alrededor de 1,50 m, que lo dividen así en varios bancos, por lo común dos o tres. En el yacimiento “Norte”, en cambio, el Horizonte está constituido por un solo banco, con un espesor oscilante entre 4 y 6 metros.

Si bien el Horizonte es continuo por distancias grandes del orden de los kilómetros, los bancos individuales que lo integran pueden acuñar. En los bordes de la cuenca (Loma del Guacho, por ejemplo) los estratos ferríferos se convierten en verdaderas lentes.

Los sedimentos típicamente asociados con el Horizonte ferrífero son areniscas grauváquicas, de color gris-verdoso, bandeadas a menudo por láminas blanquecinas (cuarcíferas); se trata de areniscas finas-limolitas con clastos de cuarzo sumergidos en una abundante base de clorita y sericita. A veces estas areniscas se hacen cuarcíticas, pero conservando siempre el color gris-verdoso, en ocasiones casi negruzco. En otras oportunidades se convierten en verdaderas pizarras. En superficie, por meteorización, toman colores rojizos o pardos. En el yacimiento Sur, frecuentemente las bandas más arcillosas de estas rocas se han convertido en hornfelds con porfiroblastos de andalusita, cordierita, actinolita, etc.

El techo y el piso inmediato del Horizonte está formado generalmente por una limolita clorítica, con un espesor de 1-1,50 m a menudo granatífera en el yacimiento Sur. El pasaje a la mena suele ser gradual pero rápido (0,20-0,50 m).

La mena. — La mena ferrífera presenta en los afloramientos, megascópicamente, características muy similares en los tres yacimientos: un color negruzco, polvo rojizo, peso relativamente alto (densidad alrededor de 4,5), dureza mediana y por lo común algo de magnetismo (a veces muy fuerte).

La textura es oolítica fina en el Yacimiento Norte. En el Sur y Este es comúnmente, granosa fina (0,05-0,1 mm), salvo en el extremo meridional del Yacimiento Sur, donde el mineral posee grano bastante más grueso de hasta 1-2 mm (recristalización). Ocasionalmente, en la parte norte de este mismo yacimiento, se encuentran muestras con textura oolítica similar a la de la mena del Yacimiento Norte, pero en partes bastante modificada por recristalización.

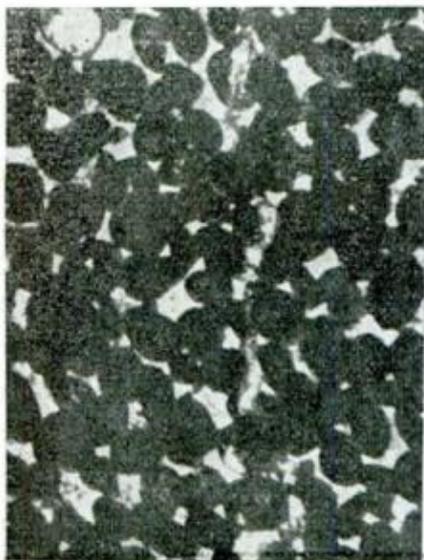
El estudio de cortes pulidos y delgados de la mena demuestra que los minerales opacos que la integran son *magnetita* y *hematita* (especularita y martita); como accesorio en ciertos lugares del Yacimiento Sur, aparece *pirita*. Los minerales transparentes están representados predominantemente por una *clorita ferrífera* que, en los lugares en que la hemos podido determinar (Yacimiento Sur), pertenece al grupo de la *turingita* con $n_D > 1,64-1,65$ (variando en distintas muestras). En los otros yacimientos las muestras proceden aún de la zona de oxidación, particularmente profunda (40-50 m) en esta región de clima semiárido con alternancia de períodos secos y húmedos, y donde el reemplazo de la clorita por "limonita" es tan amplio que impide una determinación segura de aquélla.

El accesorio transparente más importante es, por mucho, *apatita* (a veces *lazulita* en el Yacimiento Sur); le sigue el cuarzo (y moscovita y granate en el yacimiento citado).

Las cantidades relativas de magnetita y hematita (especularita y martita) varían bastante de un lugar a otro de un mismo yacimiento.

La estructura de la mena del Yacimiento Sur podría quizá describirse como hipidiomórfica granular, si en esos términos no estuviese involucrado un origen ígneo; en algunas partes de los cortes microscópicos la magnetita (y/o specularita) muestra contornos idiomórficos contra turingita y en otras zonas del mismo corte es la clorita la automórfica y los óxidos opacos de hierros se adaptan a los bordes cristalinos de aquélla. Los cristales de magnetita (y/o specularita) aparecen aglomerados en una manera que recuerda la estructura "en cadena" (chain structure) de Sampson (1932).

La martitización es un proceso casi diríamos universal en la mag-



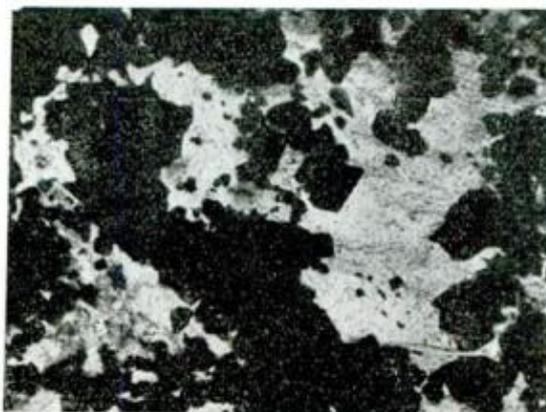
1



2



3



4

- 1, Mena oolítica con cemento apatítico — X14, sin analizador. — Procedencia : Yacimiento Norte ;
2, El mismo corte de la foto n° 1. — X91, sin analizador — ; 3, Metacristales de hematita sobre una base de granos de magnetita parcialmente martitizados. Gris claro : hematita ; gris oscuro : magnetita — X152, sin analizador. — Procedencia : Yacimiento Sur, perforación A-10,49 ; 4, Mena magnetítico-turingítica. Negro : magnetita ; gris : turingita. X70, sin analizador. Procedencia : Yacimiento Sur, perforación G2,110 metros.

netita de la mena de este Yacimiento Sur; ella se ha producido según los planos de clivaje de la magnetita dando a veces típicas estructuras "seudo-Widmanstaetten". El proceso no está restringido sólo a la zona de la superficie y poca profundidad, sino que se lo encuentra también en las perforaciones más profundas.

Aunque martita es la variedad de hematita más abundante en este yacimiento, especularita también aparece como componente de la mena en muchos lugares, en forma de los típicos cristales tabulares o aciculares, generalmente muy finos, a lo sumo de 0,5-0,6 mm de largo por 0,1-0,2 mm de ancho, siendo a veces agujillas de apenas 0,003 mm por 0,01 mm. Se los encuentra generalmente como metacristales sobre una base de granos de magnetita parcialmente martitizados. Sólo en casos excepcionales hematita y magnetita tienen relaciones dudosas (mutual boundaries).

Las oolitas del Yacimiento Norte poseen un diámetro de alrededor de 0,3 mm. Presentan comúnmente una zona nuclear integrada por una clorita ferrífera (?) y otra cortical de especularita, magnetita y martita. La clorita aparece en un agregado afieltrado fibroso y muy reemplazado por "limonita". La zona cortical de óxidos de hierro ocupa generalmente la mitad del radio de la oolita; en otras oportunidades el reemplazo de la clorita ha sido total y aun en otros, excepcionalmente, esa zona cortical es apenas una película sumamente delgada. Muchas veces la hematita de la zona cortical ha seguido creciendo de tal manera de oficiar de cemento a la par que ha oscurecido la textura. En otros casos el cemento es fosfático (apatita).

Los cristales de especularita, de la zona cortical son sustituidos parcialmente por la magnetita, en un reemplazo centrífugo. El intercrecimiento magnetita-hematita en esa zona cortical es, a menudo, muy íntimo y las áreas libres de cada mineral tan reducidas (a veces del orden del micrón) que su interpretación "per se" resultaría difícil.

Hay casos de muestras que presentan un magnetismo fuerte y que, sin embargo, al microscopio y con objetivos comunes, se presentan compuestas exclusivamente por hematita. Con inmersión en aceite (X340 fué el máximo que pudimos conseguir con los medios disponibles) se observa que la hematita presenta en ciertas áreas una coloración apenas más oscura y que las áreas "oscuras" y las "normales" tienen entre sí una relación de intercrecimiento muy fino y complejo. El color de las áreas "oscuras" es como el de la magnetita, pero de un tono muy pálido. Según Cooke (1936) el color de magnetita "varía perceptiblemente y es aparentemente una función de las otras sustancias presentes en solución sólida". Esta puede ser una explicación del hecho observado.

La estructura "de cebolla", es decir, la alternancia de capas clorí-

ticas con capas de óxidos de hierro, es más bien rara; cuando aparece es grosera y dada por la alternancia de tres o cuatro capas a lo sumo. De manera que la mayoría de las oolitas resultarían en la terminología de Cayeux "falsas oolitas".

La "limonita" es evidentemente supergénica; se presenta en agregados escamosos muy finos, comúnmente en la parte periférica de las oolitas, reemplazando a hematita, o sustituyendo al cemento cuando es hematítico o, en el interior de las oolitas, reemplazando a la clorita. Es siempre escasa.

Génesis. — A nuestro juicio, la teoría del origen sedimentario de los depósitos está ampliamente probada y es la única explicación compatible con los hechos observados, v. g.: la continuidad de los Horizontes por distancias muy grandes del orden de los kilómetros en concordancia con la estructura de las rocas del techo y piso, la textura de la mena (oolitas), su homogeneidad, sencillez y similitud composicional en los tres yacimientos y, sobre todo, la ausencia absoluta de minerales, texturas o rasgos estructurales que indiquen un origen ígneo.

La mena es, sin duda, el resultado de una precipitación original en la cuenca de sedimentación y de posteriores cambios diagenéticos y metamórficos.

No estamos tan seguros con respecto a los detalles de su historia genética. No poseemos aún suficientes datos petrográficos y estructurales, particularmente de los yacimientos Norte y Este, como para hacer consideraciones sedimentológicas con certeza.

Por otra parte, como lo han señalado muy acertadamente Huber y Garrels (1953), este problema del origen de los yacimientos de hierro sedimentario del mundo, tiene todavía muchos aspectos no solucionados satisfactoriamente. Así, las características de los terrenos de los cuales se derivó el hierro, las condiciones de meteorización bajo las cuales se liberó de las rocas madres, la manera de su transporte, si en suspensión coloidal o en solución verdadera, el porqué de los grandes espesores de minerales ferríferos prácticamente libres de clásticos, son otros tantos temas de controversia.

Sin embargo, en los últimos tiempos, trabajos como los de Alling (1947), James (1951) y Guild (1953), se suman a las ya clásicas publicaciones de Cayeux, Hayes y Hallimond, para permitir visualizar con mayor claridad muchos de los tópicos de la cuestión. Cuestión que de todos modos, pensamos, en cierta manera como Guild, puede concretarse a la dilucidación de las condiciones que favorezcan el aporte a la cuenca de cantidades de hierro relativamente más altas que las normales y que, sobre todo, en la cuenca misma, impidan o reduzcan a un mínimo la deposición de clásticos y la precipitación de los carbo-

atos de calcio y magnesio, con el resultado de un aumento considerable en la proporción de hierro, sílice y alúmina, en los productos finales de la sedimentación.

En el estado actual de nuestros conocimientos sobre el tema, podemos pensar en grandes ríos, de voluminoso caudal, y con perfiles de escaso gradiente, muy cercanos al nivel de base, drenando áreas lateríticas y posiblemente libres o casi exentas de carbonatos.

La presencia de lateritas supondría un clima tropical o subtropical, con temperaturas relativamente altas y alternancia de estaciones secas y húmedas, con la producción de residuos ricos en hierro y alúmina. El requerimiento de una escasez o ausencia de carbonatos es consecuencia, de acuerdo a las investigaciones de Huber y Garrels (*op cit.*), de la necesidad de contar con un pH normal o bajo para poder acarrear cantidades adecuadas de hierro en solución verdadera, bajo las condiciones comunes de Eh (potencial de oxidación).

Por otra parte, los conocidos cálculos de Gruner (1922) para el Amazonas, abonan la hipótesis de que el solo aporte de ríos de gran caudal, aun llevando diluciones extremadamente pequeñas de hierro, del orden de las tres partes por millón, pueden dar lugar a la formación de grandes depósitos ferríferos, si la deposición se cumple a lo largo de algunos centenares de miles de años en un área restringida.

El material terrígeno que proporcionaban las áreas madres en los tiempos de formación de la mena, era el producto de un ciclo erosivo en etapa madura avanzada de evolución, donde la alteración química predominaba sobre la erosión mecánica.

En tales condiciones, los ríos debían llevar escasa carga de clásticos y abundante material terrígeno ferrífero, tanto en suspensión coloidal como en solución verdadera. Esos colectores volcaban sus aguas sobre mares poco profundos, donde por mezcla con las aguas marinas se producía la deposición, consecuencia de la precipitación química así como de la floculación de los hidrosoles y coloides, y no exclusivamente de esta última, como lo postularan Moore y Maynard (1929).

Se han propuesto en la literatura "cuencas trampa" para eliminar la carga de clásticos (Huber y Garrels (*loc. cit.*), pero en nuestro orden de ideas nos parecen, en general, improbables y completamente innecesarias por otra parte, puesto que, como hemos dicho, esa carga debió ser exigua o no existir prácticamente.

La asociación de la mena con areniscas grauváquicas finas, limolitas o pizarras y, más lejos estratigráficamente hablando, con ortocuarcitas blancas, está señalando esa etapa madura de erosión de las áreas madres. Desde el punto de vista de la interpretación tectónico-sedimentológica, esa paragénesis de sedimentos indicaría que la cuenca de deposición pasaba de ser un área estable (ortocuarcitas) a una en

vías de rápido hundimiento (areniscas grauváquicas, pizarras, limolitas), para pasar otra vez a estable (mena ferrífera).

Con respecto a las condiciones en la cuenca de sedimentación, parece inevitable el requerimiento de un ambiente restringido, aislado, al menos parcialmente, de la circulación del mar abierto. Y esto así, por cuanto son necesarias condiciones de deposición tales que, como hemos apuntado antes, inhiban la precipitación de los carbonatos de calcio y magnesio, usualmente muy abundantes en los precipitados marinos, y siempre tan preponderantes sobre los de hierro, sílice y alúmina que los enmascaran en los productos de una sedimentación marina normal.

Krumbein y Garrels (1952) han demostrado experimentalmente que para impedir la precipitación de los carbonatos el pH del sistema debe mantenerse en, o por debajo de 7,8, punto que han llamado "barrera de los carbonatos" (carbonate fence).

Por otra parte se sabe que, normalmente, el pH de las aguas marinas es de alrededor de 8. De manera que la necesidad de una cuenca de circulación restringida se hace bien aparente, si pensamos que un mecanismo sencillo y lógico para disminuir esa alcalinidad y mantenerla en o por debajo de la "barrera de los carbonatos", está en el aporte de grandes volúmenes de agua fluvial con pH alrededor de 7 (o quizá menos en algunas épocas) volcándose sobre cantidades limitadas de agua marina; y que la única manera de contar con una cantidad limitada de ésta, es postular una cuenca aislada o al menos, de circulación restringida.

Se ha propuesto por algunos autores que emanaciones volcánicas podrían haber efectuado o ayudado en esta acidificación, pero ellas están completamente descartadas en Sierra Grande, ya que no existen evidencias de vulcanismo dentro de los tiempos ferríferos.

Esa restricción en la circulación de las aguas marinas pudo haberse cumplido por la existencia de barras submarinas de origen tectónico (rising swells), como lo postula Guild, o a la manera de las "barred basins" de Woolnough, como supone James, o quizá simplemente a las particulares configuraciones del fondo submarino y a la dirección de las corrientes, con la formación de áreas relativamente aisladas de la circulación normal (dead spaces) tal como lo imagina Hallimond (1925).

En cuanto se refiere específicamente a los procesos formativos de la mena en la cuenca de sedimentación, debemos para dilucidarlos, considerar en primer término al mineral del Yacimiento Norte, ya que el metamorfismo que exhiben las rocas del Complejo en el Yacimiento Sur, nos inhibe de tomar a las estructuras de la mena de ese depósito como primarias.

El estudio microscópico revela que en el Yacimiento Norte la secuencia de deposición fué, en general, la siguiente: 1) clorita ferrífera; 2) hematita; 3) magnetita y 4) martita.

Queda así establecida la sucesión de cambios composicionales que debieron operarse en las aguas madres durante el lapso de formación de la mena. La sedimentación ferrífera consistió, pues, en una facies silicatal; luego se produjo la deposición de los óxidos, caracterizada por la alternancia de ambientes oxidantes y reductores.

Consideramos a la clorita ferrífera como el resultado de una reacción química original, producida debido a las concentraciones relativas de SiO_2 , Al_2O_3 , FeO y Fe_2O_3 que existían en la cuenca. La controversia que existe sobre el origen de las cloritas ferríferas no nos parece razonable, ya que si bien en algunos depósitos la clorita es autigénica, como piensan Cayeux y Deverin para el caso de los minerales oolíticos de Francia y de los Alpes Suizos, ello no excluye el hecho de que en otros yacimientos la clorita sea el resultado de una reacción química original, como es la idea de Hallimond para la mena del Jurásico de Inglaterra y como creemos que es el caso en Sierra Grande.

En cuanto a las condiciones que favorecieron la formación de las oolitas cloríticas, nos adherimos, en cierta manera, a las ideas de Hallimond, es decir, agitación suave y continua por efecto de ola en un ambiente saturado con el mineral que formaba las oolitas, efectuándose el crecimiento de ellas por deposición química hasta alcanzar un tamaño límite, en que el aumento de peso por deposición era equilibrado por la erosión mecánica. De esta manera quedaría explicada una de las características más notables de las oolitas, v. g.: su sorprendente uniformidad de tamaño.

Otra característica de importancia de las oolitas de Sierra Grande, y que Cayeux ya señalara en las oolitas francesas, es que ellas no se han deformado ni aplastado al acomodarse unas contra otras, sino que aun estando en íntimo contacto, han conservado perfectamente sus contornos, es decir, que se han comportado a la manera de bolillas rígidas. Esto se ha interpretado como un indicio de que, al menos en el momento de su sedimentación, las oolitas no estaban en estado coloidal.

Localmente debió existir una deposición alternante de la clorita y de los óxidos de hierro, que se tradujo en la "estructura de cebolla" que muestran algunas oolitas.

Luego de esa sedimentación predominantemente clorítica, debe haberse producido, como hemos dicho, la deposición de los óxidos de hierro de la zona cortical de las oolitas. Pensamos que esa hematita y magnetita fueron introducidas durante la diagénesis de las oolitas: quizá,

al menos en parte, como el resultado de un reemplazo halmirolítico.

Suponemos, pues, que en una cierta época de los tiempos ferríferos, las aguas que impregnaban las oolitas en el fondo submarino se sobresaturaron con hematita. Ella, en consecuencia, desplazó a los cristales cloríticos de la zona más externa de las oolitas y penetró también en su interior, en un reemplazo parcial y automórfico. Más tarde, las condiciones se hicieron tales que favorecieron la formación de magnetita. Se operó entonces la sustitución parcial de la hematita por la magnetita; ella se realizó de una manera poco común en los reemplazos, verbigracia: el reemplazo centrífugo, y que es, sin embargo, el tipo que debe esperarse, como bien lo ha explicado Gruner (1926), ya que en la reducción de la hematita, el mecanismo más probable es la remoción del oxígeno, y de tal suerte la magnetita debe crecer desde el interior de los granos hematíticos, debido a la difusión y migración de los átomos de oxígeno hacia los bordes de los cristales de óxido férrico.

Siguientemente, en una recurrencia de las condiciones predominantemente oxidantes, se produjo la martitización, de una manera casi completa.

La presencia de magnetita en el interior de las oolitas demuestra una vez más que su formación es posible a baja temperatura, hecho que, por otra parte, ha sido señalado hace ya más de una década por Brown (1943). Las condiciones exactas de su formación resultan aún oscuras. Brown (*op. cit.*) indica que en los depósitos sedimentarios la magnetita se formaría "ocasionalmente cuando un medio fuertemente oxidante pasa temporariamente a un estado neutral o reductor". Hallimond (*op. cit.*) considera a las menas magnetíticas de Yorkshire y Northants como tipo intermedio entre las menas chamosíticas normales y los minerales limoníticos del jurásico inglés, y dice que se formarían bajo "special and rather narrow range of conditions". A menudo en la literatura se ha explicado la aparición de la magnetita en este tipo de depósitos, por la acción reductora de la materia orgánica, y así lo hace Krotov (1940), más recientemente Guild (*op. cit.*) y aun Ramdohr (1927), al considerar la aparición de magnetita durante el metamorfismo térmico, opina que la reacción no se debe puramente a un cambio de temperatura sino que el bitumen ya la ha iniciado antes. Pero es interesante señalar que no hemos hallado aún restos fósiles en la mena de Sierra Grande. Además, la presencia de magnetita en las oolitas del Yacimiento Norte no es una curiosidad ni un hecho local, y si bien las cantidades varían de un lugar a otro, siempre se la halla en su composición. De manera que el proceso que le dió origen no puede ser un simple suceso local u ocasional, sino general y continuo por lapsos importantes.

La alternancia de hematita y magnetita y su mutuo desplazamiento, tal como lo hemos observado en las oolitas, son hechos que revelan el delicado equilibrio de condiciones necesarias para la formación de la magnetita, verbigracia: el balance exacto entre las tendencias oxidantes y reductoras, equilibrio que, aparentemente, es alterado en forma fácil en las condiciones comunes de una cuenca de sedimentación.

El cemento actual de las oolitas, ya sea hematítico o fosfático, lo consideramos también como el resultado de un proceso diagenético, probablemente iniciado durante la halmirólisis misma y completado luego durante la etapa metamórfica.

En el Yacimiento Sur la mena debe haber sufrido, muy probablemente, los efectos del metamorfismo que exhiben allí las otras rocas del Complejo Paleozoico. Ese metamorfismo, esencialmente térmico, como ya hemos dicho, habría destruido la estructura oolítica original que sólo se habría conservado como relictos ocasionales en algunos lugares. Esta sería una explicación plausible pero, por supuesto, no definitiva de los hechos observados.

En tal sentido, destaco que la asociación turingita-magnetita indicaría, según las ideas actuales expresadas por James (*loc. cit.*), Hodl (1941), Berg (1944) y aun Sakamoto (*loc. cit.*), un origen metamórfico para tal asociación a partir de una clorita primaria (¿chamosita?). Por otra parte, el estudio textural de la mena señala un origen simultáneo para turingita y magnetita.

Claro que en Sierra Grande no toda la magnetita puede ser considerada como el producto de una reacción metamórfica, sino que una buena parte debe haber estado presente ya en el sedimento original, sea en forma de hematita o de magnetita misma. Y esto así por cuanto en los yacimientos de Turingia y de Bohemia, que pueden considerarse localidades-tipo de la reacción antedicha, la cantidad de magnetita es sólo escasa y muy subordinada con respecto a turingita, mientras que en el Yacimiento Sur de Sierra Grande la proporción del óxido de hierro es generalmente dominante sobre la de turingita, de tal modo que las cantidades totales de magnetita son muy importantes, del orden de los millones de toneladas.

La martitización y la formación de los cristales de hematita (metacristales), que hemos descrito en el estudio microscópico de la mena de este Yacimiento Sur, las vinculamos también al mismo proceso metamórfico, considerándolas consecuencia de condiciones locales hacia la etapa final del mismo.

Que esta martitización no es un proceso de oxidación supergénico está abonado por el hecho de que se lo encuentra también muy por debajo del nivel más profundo de agua freática, y aun suponiendo

que ese nivel estuviese ascendido actualmente, resultaría sorprendente la asociación con pirita perfectamente fresca, siendo que este sulfuro se oxida fácilmente en la zona de oxidación. Además, es conocida la resistencia de la magnetita a la oxidación meteórica, como está probado por su presencia universal en los aluviones y, por otra parte, su producto de alteración normal en la superficie es "limonita"; sólo en casos muy excepcionales se formaría hematita (por ejemplo, en un clima tropical y muy árido), pero aun así sería siempre de la variedad terrosa y no especularita, hechos que ha señalado muy acertadamente Gilbert (1925).

Tampoco puede pensarse que esta martitización sea un proceso hidrotermal posterior, vinculado a intrusiones ígneas, pues no existe asociación con minerales típicos ni los cambios de textura que podrían esperarse. Por otra parte, el proceso es anterior y se diferencia claramente de la ligera piritización que ha sufrido la mena de este yacimiento. A ella sí la consideramos, como ya hemos dicho, uno de los productos del hidrotermalismo cuya presencia hemos señalado en este depósito.

ABSTRACT.—The sedimentary iron-ore deposits of sierra Grande (Río Negro) are Argentina's largest known high-grade ore reserve of this metal.

Iron formation is a thick Paleozoic series of orthoquartzites, sandstones, graywackie sandstones, intraformational breccias, slates, argillites and shales, which rests unconformably on an Old Formation (Precambrian?) of gray slates, meta-sandstones and quartzites, intruded by a granodioritic stock. The preceding formations are overlain by a Volcanic Series composed of quartz-porphiries and their tuffs, of Jurassic (?) age.

So-called "Horizonte Principal", the most important iron-bed, outcrops in three different localities: yacimiento Sur, yacimiento Este and yacimiento Norte, within a few miles from Sierra Grande. Total extension of the outcrops is over 5 miles. Thickness is around 25-40 ft. at "Este" and 30-50 ft. at "Sur" (these figures include some interstratified non-ferriferous sandstones from 1 to 5 ft. thick). At "Norte" the "Horizonte" is a single bed, its thickness ranging from 12 to 20 ft. Though the Horizon is very extensive, single beds may pinch out; at the borders of the basin they become true lenses. Typically associated with the ore are graywackie sandstones (quartz grains scattered over an abundant chloritic "paste"). Immediate top and base of the ore beds are usually formed by a highly chloritic argillite, 3-5 ft. thick (commonly garnetiferous at "Sur").

In the outcrops the iron ore shows a blackish color and gives a red powder when scratched; it has sp. gr. around 4.5, medium hardness and usually is somewhat magnetic (very strongly in places). Texture is oolitic at "Norte" and fine granular at "Sur"- "Este" (oolitic texture is occasionally found in the northern part of "Sur").

Magnetite and hematite (martite and specularite) are the principal opaque minerals of the ore; pyrite appears as an accessory in certain places of "Sur". A ferriferous chlorite is the dominant non-opaque; where determined ("Sur") it is a thuringite $n \geq 1.64-1.65$. Apatite (lazulite in some places of "Sur") is by far the most abundant non-opaque accessory. It is followed by quartz; muscovite and gar-

net are also important at "Sur". Relative amounts of magnetite and hematite vary widely from place to place even in the same deposit.

At "Sur" ore-texture is such that might be described as hypidiomorphic granular; in some areas of thin-sections magnetite (and/or specularite) are idiomorphic against thuringite and in another places of same section the latter is the automorphic mineral. Magnetite (and/or specularite) grains are grouped together in a peculiar fashion that recalls "chain-structure".

Oolites of "Norte" have a "core-zone" of chlorite and an outer zone of hematite and magnetite. Cement is phosphatic or hematitic. Onion-structure is rare; actually most oolites are Cayeux's "false oolites".

Theory of a sedimentary origin for the ore is taken by the author as sound and well proved, and the only one compatible with observed facts. Ore is thought to be the result of an original precipitation in the basin and of subsequent diagenetic and metamorphic ("Sur") changes. The diverse aspects of the problem are extensively considered.

LISTA DE LOS TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALLING, H., *Diagenesis of the Clinton hematite ores of New York.* — Bull. G. S. A. (1947), 991-1017.
- ANGELELLI, V., *La cuenca ferrífera de Sierra Grande.* — Direc. Gral. F. M., informe inédito, Bs. As. (1948).
- BERG, G., *Vergleichende Petrographische oolithischer Eisenerze.* — *Rechsmat. f. Bodenf. Arch. Lagerstättenforschung*, H. 6, en James (1951).
- BROWN, J., *Supergene magnetite.* — *Econ. Geol.* (1943), 137-148.
- COOKE, S., *Microscopic structure and concentrability of the important iron ores of the United States.* — U. S. Bureau of Mines, Bull. 391 (1936).
- DE ALBA, E., *Descripción geológico-económica de la Hoja 41-J Sierra Grande.* — Informe en preparación, Direc. Nac. de Minería, Bs. As. (1954).
- GILBERT, G., *Some magnetite-hematite relations.* — *Econ. Geol.* (1925), 587-596.
- GRUNER, J., *The origin of sedimentary iron formation.* — *Econ. Geol.* (1922), 407-460.
- GRUNER, J., *Magnetite-martite-hematite.* — *Econ. Geol.* (1926), 375-393.
- GUILD, P., *Iron deposits of the Congonhas district Minas Gerais, Brazil.* — *Econ. Geol.* (1953), 639-676.
- HALLIMOND, A., *Iron Ores: Bedded ores of England and Wales. Petrography and Chemistry.* — Mem. of the Geol. Survey, Special Reports on the Mineral Resources of Great Britain, vol. XXIX (1925).
- HERRERA, A., *La cuenca ferrífera de Sierra Grande.* — Banco de Crédito Industrial Argentino, informe inédito, Bs. As. (1947).
- HOLD, A., *Über Chlorite der Ostalpen.* — *Neues Jahrb. f. Min. Geol. und Pal.* Bd. 77, H. 1 (1941).
- HUBER, N. y GARRELS, R., *Relation of pH and oxidation potential to sedimentary iron ore formation.* — *Econ. Geol.* (1953), 337-357.
- JAMES H., *Iron formation and associated rocks in the iron River District.* — G. S. A., Bull. 62 (1951), 251-266.
- KROTOW, P., *On the occurrences in the Khalilovo iron deposits (Urals, Russia) of magnetite.* — *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de l'U. R. S. S.*, XXVI (1940), 801-803, en Brown (1943).
- KRUMTEIN, W., y GARRELS, R., *Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potential.* — *Jour. Geol.* 1952), 1-33.

- MOORE, E. y MAYNARD, J., *Solution, transportation and precipitation of iron and silica.* — Econ. Geol. (1929), 272-303, 365-402, 506-527.
- RAMDOHR, P., *Die eisenerzlager des Oberharzer (Osteroder) Diabaszuges und ihr Verhalten im Bereich des Brockenkontakts.* — Neues Jahrb. f. Min. Geol. und Pal. LV, B. Bd. (1927), 333-392.
- SAMPSON, E., *Magmatic chromite deposits in Southern Africa.* — Econ. Geol. (1932). 1950.
- SAKAMOTO, T., *The origin of the pre-Cambrian banded iron ores.* — Am. Jour. Sci. 248 (1950), 449-474.
- VALVANO, J. A., *Depósitos ferríferos de Sierra Grande.* — Informe preliminar inédito, D. G. I. Minera., Bs. As., 1949.
- ZOLLNER, W., *Informe geológico económico del yacimiento ferrífero de Sierra Grande.* — Informe inédito, Direc. Nac. de Minería, Bs. As., (1951).

Departamento de Geología Económica.
Dirección Nacional de Minería.