

INTERPRETACION GEOFISICA Y GEOLOGICA DEL VALLE DE YPCARAI (PARAGUAY) Y SU FORMACION

JAMES M. DEGRAFF, RAFAEL FRANCO y DELIO ORUE

B-2G  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NAT  
BIBLIOTECA  
DPTO. DE GEOLOGIA

Resumen

El Valle de Ypacaraí, ubicado a unos 35 km al este de Asunción, Paraguay, es un valle rectilíneo con un ancho de 6 a 10 km que se extiende en dirección N 30° sobre una distancia de 70 km. Un estudio geofísico y geológico se realizó en el área de dicho valle, principalmente para verificar la validez de las hipótesis tectónicas propuestas para su formación. El trabajo geológico consistió en observaciones regionales y en un muestreo para la determinación de densidades para las rocas del área, en tanto que el estudio geofísico consistente en gravimetría y magnetometría se llevó a cabo a lo largo de una línea que atraviesa el valle mencionado. Aparte de la presentación de una síntesis y una reinterpretación de la geología del área, los resultados más importantes de este trabajo son: 1) la observación de que en la zona ubicada al Oeste del Valle de Ypacaraí predominan fallas normales de dirección norte-sur; 2) el descubrimiento en la misma zona de dos fallas probablemente normales y de dirección norte-sur cuyos lados occidentales habrán descendido 925 m y 1125 m como máximo con respecto a sus lados orientales; y 3) la conclusión de que el borde oriental del valle no está asociado genéticamente con una falla de rechazo vertical y de dirección noroeste. Después de rechazar las hipótesis tectónicas previamente mencionadas para su formación, se propone que el Valle de Ypacaraí habría evolucionado por erosión selectiva a lo largo de una falla de cizallamiento de sentido dextrógiro que correría actualmente a lo largo del valle.

Introducción

Desde el año 1950, cuando Harrington efectuó el primer estudio geológico regional del Paraguay oriental, el rasgo topográfico conocido como el Valle de Ypacaraí ha llamado la atención de varios geólogos. Este valle se extiende aproximadamente en dirección N 30°O, abarcando 70 km desde Paraguari en el Sur hasta Villa Hayes en el Norte, y variando su ancho entre 6 y 10 km (figs. 1, 2). Además, la pendiente que constituye el borde occidental de dicho valle al SE de Villa Hayes continúa más

Abstract

The Ypacaraí Valley, located about 35 km east of Asunción, Paraguay, is a rectilinear valley having a width of 6 to 10 km which extends a distance of 70 km in a N 30° W direction. A geophysical and geologic study was carried out in the area of this valley mainly to decide if one of the tectonic hypotheses already proposed for its formation comes close to the truth. The geologic work consisted in regional observations and sampling for the determination of densities for the rocks of the area, whereas the geophysical study, consisting in gravimetry and magnetometry, was carried out along a line which crossed the valley in question. Apart from the presentation of a synthesis and reinterpretation of the geology of the area, the most important results of this work are: 1) the observation that north-south striking normal faults predominate in the area situated west of the Ypacaraí Valley; 2) the detection in the same area of two probable north-south striking normal faults whose western sides have dropped with respect to their eastern sides up to 925m and 1125m; and 3) the conclusion that the eastern border of the valley is not genetically associated with a NNW striking dip-slip fault. After rejecting the tectonic hypotheses previously mentioned for its formation, it is proposed that the Ypacaraí Valley has evolved from selective erosion along a right lateral strike-slip fault which today would run along the length of the valley.

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
BIBLIOTECA  
DPTO. DE GEOLOGIA

al NO sobre una distancia de 18 km hasta Benjamín Aceval. En las cartas topográficas de la zona se nota que la forma del valle no es simétrica, pues si bien el borde occidental incluyendo el trecho al noroeste de Villa Hayes es relativamente recto y regular, el borde oriental es algo sinuoso e irregular, especialmente en las cercanías de Paraguari. Además, se nota que por lo general las elevaciones máximas del flanco oriental de dicho valle sobrepasan en 50 a 100 m a las del flanco occidental (fig. 4).

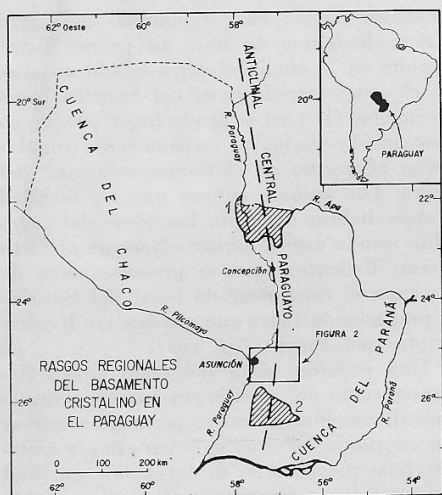


Fig. 1.— Mapa de los rasgos regionales del basamento cristalino en el Paraguay. Área 1: rocas cristalinas del Precámbrico en el norte y rocas cabonáticas de la Serie Itapucumí. Área 2: rocas cristalinas del Precámbrico en el sur. Los límites son aproximados.

La forma llamativa del Valle de Ypacaraí, es decir muy alargada en dirección noreste y relativamente recta, fue interpretado por Harrington (1950, 1956, 1972) como un graben comprendido entre dos fallas paralelas que corrian todo a lo largo de los bordes actuales de dicho valle desde Paraguari hasta Villa Hayes. En cambio Putzer (1962) prefiere pensar que a lo largo del Valle de Ypacaraí y cerca de sus bordes se extienden dos fallas en forma escalonada con buzamiento fuerte al SO de modo que el bloque sudoccidental de cada falla se ha hundido con respecto al bloque nororiental. También Putzer indica la posibilidad de que al noroeste del valle en cuestión existan otras fallas paralelas y del mismo sentido. En general los estudios posteriores han apoyado a la hipótesis de Harrington o la de Putzer, o una variante de ellas, pero sin poder comprobar cuál de las dos se acerca más a la realidad.

Hacia fines de 1979 se llevó a cabo un estudio gravimétrico y magnetométrico, tomando estaciones distribuidas a lo largo de la Ruta 2 desde San Lorenzo hasta un poco después de Eusebio Ayala de modo que la línea geofísica cruza algo perpendicularmente el Valle de Ypacaraí (fig. 2). Este estudio tiene como objeto verificar la validez de las interpretaciones de Harrington y de Putzer, de acuerdo a los nuevos datos obte-

nidos. Otro objetivo de este estudio es ubicar mejor las principales fallas existentes en la zona aledaña al Valle de Ypacaraí y calcular el desplazamiento vertical de cada una. Como una ayuda indispensable para la interpretación de los datos geofísicos, se efectuó también un estudio geológico del Valle de Ypacaraí desde Areguá en el norte hasta Paraguari en el Sur, cuyo objetivo era ajustar los datos geofísicos a la realidad geológica en lo posible.

### Síntesis geológica

Se presentarán no sólo los antecedentes geológicos referentes a la zona en estudio, sino también algunos nuevos datos obtenidos. Los datos nuevos y una revisión detenida de los antecedentes hacen necesario modificar en cierta manera la geología de la zona.

En el Paraguay oriental el anticlinal central paraguayo (Putzer, 1962) sería una dorsal alargada con dirección norte-sur, ubicada inmediatamente al este del río Paraguay y caracterizada por rocas del Precámbrico y posiblemente también del Paleozoico inferior, aflorantes o existentes a poca profundidad (fig. 1). La dorsal quedaría manifiesta en el norte por las rocas precámbricas y las rocas principalmente calcáreas de la Serie Itapucumí (Paleozoico inferior?) aflorantes en la zona ubicada inmediatamente al sur del río Apa, y en el sur por otro conjunto de rocas precámbricas aflorantes en la zona de Caapucú-San Miguel. En cuanto a las rocas precámbricas tanto del norte como del sur, se las suelen dividir en dos grupos: un conjunto de rocas metamórficas, en su mayor parte de origen sedimentario, que es más antiguo, y otro más reciente de rocas ígneas (granitos, pórfidos, aplitas y pegmatitas) que habrá intruido en parte el conjunto metamórfico. La dorsal constituida por dichas rocas dividiría geológicamente al Paraguay en dos sectores. Al este, los estratos paleozoicos y mesozoicos buzan ligeramente hacia la cuenca del Paraná, y al oeste se tiene la cuenca del Chaco rellena por sedimentos paleozoicos, mesozoicos y también cenozoicos. Sin embargo, cabe señalar que Harrington (1956) difiere de la opinión de Putzer y también de Eckel (1959), pues piensa que las dos zonas de rocas precámbricas aflorantes ya mencionadas representarían dos dorsales separadas por una subcuenca ubicada en las cercanías de Concepción.

### Rocas pre-silúricas

La zona del presente trabajo se halla en el medio del propuesto anticlinal central paraguayo y un poco al norte de la zona de rocas precámbricas aflorantes en el sur (fig. 1). Se tienen dos o posiblemente tres zonas menores donde aflora el basamento de rocas precámbricas y/o silúricas (fig. 2).

En la base de la pendiente que forma el borde oriental del Valle de Ypacaraí aflora en San Bernardino un granito descrito por Harrington (1950, 1956), Eckel (1959) y Putzer (1962). Este se extiende aproximadamente sobre un kilómetro a lo largo de la costa del lago Ypacaraí, y según Harrington (1950) sería una intrusión múltiple por tener una fase rosada y otra grisácea. El hallazgo de un angosto dique (0,20 m de espesor) de roca granítica y de grano fino, cortando en dirección noreste el granito ya conocido en San Bernardino, apoya esta idea. Este conjunto granítico, que pertenece al Precámbrico superior, según una datación de 786 m.a. (Putzer, 1975), está sobrepuesto por las capas casi horizontales y más inferiores del Silúrico en el Paraguay.

Al noreste de Paraguarí y en la base de la pendiente que forma el borde oriental del Valle de Ypacaraí precisamente en su terminación meridional, aflora un conjunto plegado de rocas sedimentarias y metamórficas no divididas en un triángulo formado por los cerros Cristo Redentor, Mbatoví y Santo Tomás. Las rocas del Cerro Cristo Redentor fueron descritas primero por Harrington (1950, 1956) como arenisca lutítica pasando hacia arriba a varvita, asignando a estas sedimentitas una edad pérmica. Debido al aspecto plegado del conjunto y su posición topográficamente inferior a la de las rocas silúricas en la zona, postuló que la falla oriental de su propuesto graben de Ypacaraí existiría entre el cerro Cristo Redentor y el más grande Cerro Jhú, situado a un kilómetro al sudeste del primero. Karpoff (1965) reafirma el origen glacial de las rocas de cerro Cristo Redentor, las agrupa dentro de su "Serie Escobar" de origen glacial, pero les asigna una edad precámbrica tardía hasta infra-cámbrica. Cabe señalar que Putzer (1962) también describe para la base occidental del cerro Cristo Redentor un conjunto de cuarcitas claras y pizarras guijarrosas oscuras del Precámbrico inferior según él, cuyos estratos se dirigen a N 45° E con un buzamiento de 80° SE. No obstante, es perfectamente claro que Putzer no está

hablando de la base occidental del cerro Cristo Redentor de hoy, en primer lugar porque en la cima del cerro citado no aflora el conglomerado basal del Silúrico como menciona él, y en segundo lugar porque su descripción litológica no concuerda con las rocas aflorantes en el flanco occidental del cerro. Los autores opinan que en realidad Putzer habría descrito las rocas del cerro Jhú, siendo éste el único adyacente al cerro Cristo Redentor, que sí presenta cerca de su cima el conglomerado basal del Silúrico suprayaciendo rocas que pueden ser las descritas por Putzer (*op. cit.*).

Una revisión tanto del cerro Cristo Redentor como del cerrillo sin nombre ubicado inmediatamente al oeste, permitió observar un conjunto de rocas sedimentarias y metamórficas plegadas en forma de un sinclinal aparentemente simétrico, cuyo eje casi horizontal se dirige al N 25° E y que coincide aproximadamente con el medio del cerro Cristo Redentor. Las rocas sedimentarias descritas por Harrington (1950, 1956) afloran en el flanco oriental del cerro Cristo Redentor a lo largo del camino Paraguarí-Pirebebuy, en tanto que en su flanco occidental y también en el cerrillo ya mencionado, se observan rocas metamórficas hornofélsicas generalmente oscuras que eran originalmente rocas sedimentarias de grano bastante fino y con laminación fina (metallutita). Podría explicarse la asociación íntima en esta zona de rocas sedimentarias y metamórficas con el descubrimiento de que las rocas del cerro Cristo Redentor se hallan intruidas por una riolita porfirítica (análisis macroscópico) de color claro. Las rocas metamórficas de esta zona serían productos de metamorfismo de contacto localizado alrededor de por lo menos una intrusión félsica. Esta interpretación concuerda con que las rocas metamórficas no exhiben clivaje ni esquistosidad.

A cuatro kilómetros al noreste del cerro Cristo Redentor siguiendo el camino hacia Piribebuy, se nota en la base del cerro Mbatoví un conjunto no muy bien expuesto de rocas sedimentarias y metamórficas similares a las del cerro Cristo Redentor. Estas rocas también se hallan intruidas por una riolita porfirítica (análisis macroscópico) de color claro y probablemente por otras rocas ígneas. Lo importante aquí es que todas estas rocas están sobrepuestas discordante y casi horizontalmente por el conglomerado basal del Silúrico inferior en el Paraguay, confirmando una edad pre-silúrica para ellas

y también para las rocas del cerro Cristo Redentor si se acepta que éstas son correlacionables a las anteriores. La probabilidad de que Putzer (1962) haya encontrado una serie metamórfica sobrepuesta por el conglomerado basal del Silúrico en el flanco occidental del cerro Jhú (cerro Cristo Redentor según él) indicaría también para ella una edad presilúrica.

A cuatro kilómetros al noreste de Paraguari en el cerro Santo Tomás, una intrusión de essexita ( $132 \pm 10$  m.a., Comte y Hasui, 1971) corta los estratos basales y casi horizontales del Silúrico que suprayacen un conjunto sedimentario y metamórfico de edad pre-silúrica. Aquí Putzer (1962) encontró en la base del cerro citado cantos sueltos de pizarra guijarrosa que sería equivalente a las rocas aflorantes en la base del cerro Jhú (cerro Cristo Redentor según él). Karpoff (1965) describe las rocas aflorantes en la salida oriental de Escobar en el camino a Sapucaí como lutitas rojizas y areniscas de grano fino plegadas, y las considera de origen glacial por contener cantos dotados de estrías glaciales. Reuniéndolos en su "Serie Escobar" y la que desaparece al norte bajo el conglomerado basal del Silúrico en el cerro Santo Tomás.

Hacia el borde occidental del Valle de Ipacaraí y a 4,5 km al sudeste del pueblo de Ipacaraí, existen 4 ó 5 pequeñas intrusiones de riolita porfirítica que actualmente se elevan hasta 50 m sobre el fondo del valle como cerros de forma redondeada (Eckel, 1959). Las rocas encajantes originalmente sedimentarias han sido convertidas localmente en brecha y metamorfoseadas por las intrusiones no datadas, y consisten actualmente en rocas hornfelsicas oscuras con fina laminación relicta y con menos frecuencia en cuarcita blancuzca. Si bien Eckel (1959) tentativamente asignó dichas rocas al Permo-carbonífero, Putzer (1962) las consideró silúricas y Karpoff (1965) las incluyó en su "Serie Escobar" de edad precámbrica superior hasta infra-cámbrica. La edad más probable sería la de Karpoff, teniendo en cuenta lo que se ve al noreste de Paraguari. Sin embargo, se ha preferido asignarles una edad pre-silúrica por no contar con datos más específicos.

Por lo tanto, se piensa que debería aceptarse la existencia de un conjunto plegado de lutitas y areniscas posiblemente de origen glacial ("Serie Escobar") que infrayace discordantemente los estratos basales y casi horizontales del Silúrico inferior. También

se debe mencionar que la serie en su mayor parte sedimentaria se halla intruida y localmente metamorfoseada por riolitas porfíricas en por lo menos tres lugares y también por otras rocas ígneas. La "Serie Escobar" descansaría, donde existe, sobre las rocas cristalinas más antiguas, como las aflorantes en San Bernardino.

#### Rocas silúricas y más recientes

Después de la deposición y plegamiento de los estratos pre-silúricos y las intrusiones de rocas félsicas, la totalidad fue erosionada formando así una paleosuperficie. Durante el Silúrico inferior (Llandoveryano) hubo una transgresión que depositó las rocas silúricas aflorando principalmente al este del Valle de Ipacaraí (fig. 2).

Los estratos inferiores buzan de  $2^\circ$  a  $3^\circ$  al este-noreste hacia la Cuenca del Paraná (Harrington, 1956) y descansan con marcada discordancia sobre la mencionada paleosuperficie. Wolfart (1961) fue el primero en reconocer para el Silúrico del Paraguay oriental de 1000 m a 1200 m de espesor, al que divide en dos unidades (fig. 3). La inferior, considerada de origen continental y de edad silúrica u ordovícica, es una secuencia clástica de 700 m a 820 m de espesor, dominada por areniscas arcólicas con estratificación cruzada cuya granulometría decrece a partir de un conglomerado basal. En cambio, la unidad superior es marina y de edad llandoveryana por su contenido fósil, y consiste en 310 m a 370 m de areniscas de grano fino a mediano con intercalaciones de lutita arcillosa y limosa. La Lutita Vargas Pena resulta ser una "intercalación" de lutita arcillosa que por haber adquirido un espesor considerable (de 10 m a 20 m) ha servido como un estrato guía en el Silúrico paraguayo. Harrington (1972) postula una edad silúrica para la unidad inferior (su Grupo Caacupé) y considera que la misma es de origen marino somero con la excepción del conglomerado basal que sería de origen fluvial (fig. 3). Más al este, hacia la parte central de la Cuenca del Paraná, el Silúrico se halla superpuesto discordantemente por estratos gondwánicos que también buzan ligeramente al este (Putzer, 1962; Harrington, 1972; Eckel, 1959; Wolfart, 1961).

El Silúrico también aflora inmediatamente al sudoeste del Valle de Ypacaraí en una franja angosta de 2 a 3 km de ancho,

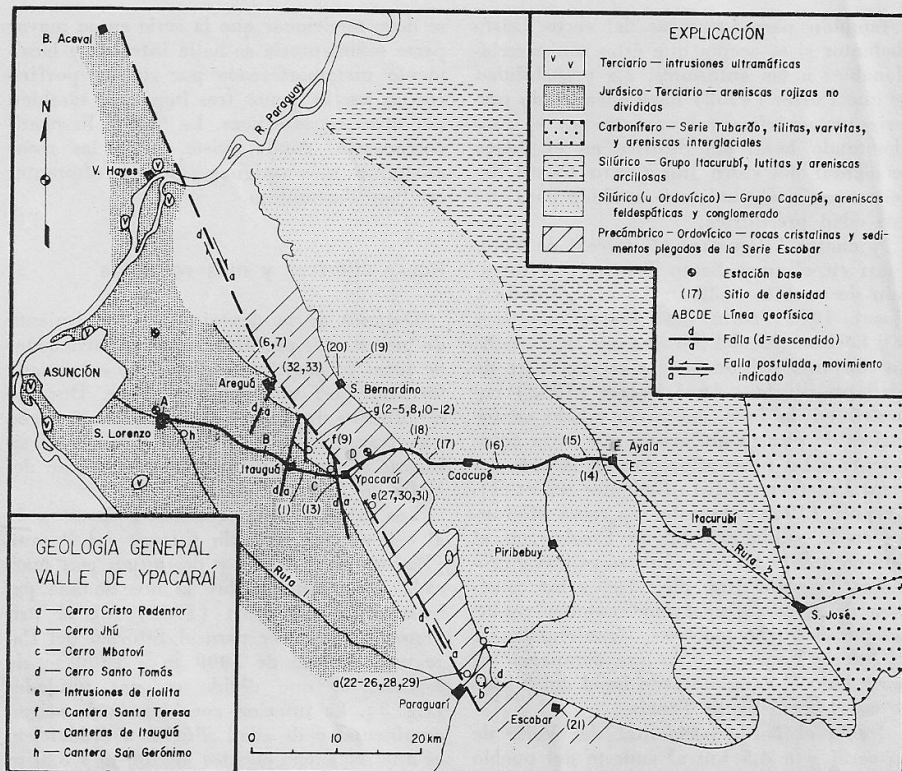


Fig. 2. — Mapa de la geología general alrededor del Valle de Ypacarái. El valle se extiende desde Paraguarí hasta Villa Hayes, y corresponde a la zona de rocas más antiguas (Precámbrico-Ordovícico). Los sedimentos relativamente recientes que ocupan el valle y otras regiones han sido omitidos por motivos de simplificación. Nótese que al oeste del Valle de Ypacarái la angosta franja de rocas silúricas se halla segmentada, debido a movimientos verticales de fallas de dirección norte-sur. A pesar de la simbología usada, dicha franja contiene rocas del Grupo Caacupé más hacia el noreste y rocas del Grupo Itacurubí más hacia el suroeste.

que corre desde Paraguarí en el sur hasta unos pocos kilómetros al noroeste de Areguá con dirección paralela a la del valle adyacente (fig. 2). Aquí es bien conocida la Cantera Santa Teresa (anteriormente Cantera Vargas Peña) donde se observa la Lutita Vargas Peña infrayacida por la Arenisca Eusebio Ayala (Putzer, 1962). Sin embargo Harrington (1972) opina que todas las unidades del Silúrico paraguayo están representadas en esta franja, opinión que se comparte. Se ha encontrado en las numerosas canteras ubicadas aproximadamente a 3 km al noreste de Itauguá la Lutita Vargas Peña suprayacida por la Arenisca Cerro Perro e infrayacida primero por la Arenisca Eusebio Ayala y luego por la Arenisca Caacupé.

Más hacia el sudoeste de la franja de rocas silúricas y estratigráficamente encima, descansan estratos consistentes en arenisca rojiza de grano mediano a fino y con estratificación pobre, que Harrington (1950, 1956) consideró como la Arenisca Misiones. Si dicha arenisca es en realidad la de Misiones, tendría una edad jurásica (Anónimo, 1975) o quizás jurásica-cretácica (Palmieri, comunicación personal). Aún más hacia el sudoeste en las proximidades de Asunción se tienen otras areniscas rojizas no bien consolidadas, algunas de las cuales han proporcionado mamíferos fósiles del Plioceno-Pleistoceno (Putzer, 1962), mientras que otras son aparentemente de edad post-eocena por contener cantos de rocas ígneas parecidas a otras rocas aflorantes y datadas en  $46 \pm 3$  m.a. (Comte y Hasui, 1971).

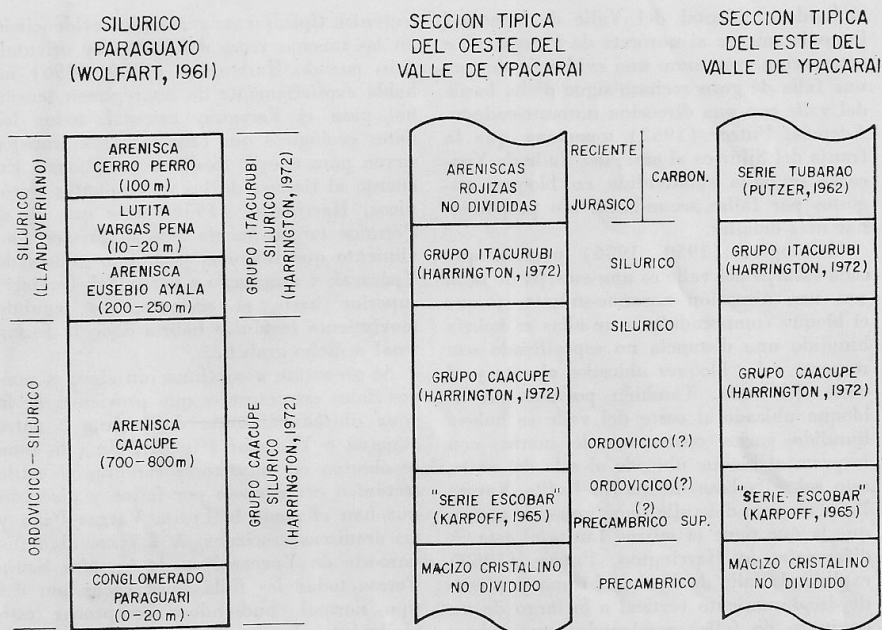


Fig. 3.—Izquierda: Divisiones del Silúrico paraguayo según Wolfart (1961), con algunas modificaciones de Harrington (1972). Derecha: Secciones estratigráficas típicas del oeste y del este del Valle de Ypacaraí.

Como ejemplo de las últimas rocas mencionadas deben citarse las rocas expuestas en la cantera San Gerónimo (Miraglia, 1965) ubicada a 3,5 km al este-sudeste de San Lorenzo. Aquí una arenisca rojiza con cemento arcilloso ha sido intruida por un enjambre de diques angostos (hasta 1 m de ancho) con un rumbo general de 50° y un buzamiento casi vertical. La roca de los diques ahora muy meteorizada era aparentemente de composición máfica y de grano fino. Los diques han afectado en cierta medida a la arenisca, que además de ser metamorfoseada localmente hasta cuarcita presenta una estructura columnar también de origen metamórfico.

**Estructura silúrica y post-silúrica**

A primera vista la estructura a través del Valle de Ypacaraí es simple. Al este del valle los estratos silúricos reposan discordantemente sobre el basamento pre-silúrico y buzanan ligeramente al este-noreste hacia la

Cuenca del Paraná. Si bien dichos estratos se hallan intruidos en algunos lugares por diques máficos de edad jurásica-cretácica y con direcciones principalmente al noroeste (Putzer, 1962), por lo general no presentan complicaciones estructurales como pliegues o fallas de gran rechazo. Los mismos estratos terminan al oeste en el borde del Valle de Ypacaraí formando aquí un escarpe, y luego se los encuentran de nuevo al oeste del valle donde forman otro escarpe de menos altura.

Sin embargo al oeste del Valle de Ypacaraí los estratos silúricos han sido afectados tectónicamente de manera que presentan en general un rumbo hacia el noroeste con un buzamiento de 25 a 35 al sudoeste (Harrington, 1950, 1956; Eckel, 1959; Putzer, 1962; Escobar, 1980). También en la Cantera Santa Teresa las rocas silúricas se hallan localmente brechificadas y contorsionadas por efectos tectónicos (Harrington, 1950, 1956). Tanto Harrington (1950, 1956) como Putzer (1962) mencionan la brechificación y silificación de las rocas formando

el borde occidental del Valle de Ypacaraí inmediatamente al noroeste de Paraguari, e interpretan esto como una evidencia de que una falla de gran rechazo sigue dicho borde del valle con una dirección noroeste-sudeste. Además, Putzer (1962) menciona que la franja del Silúrico al oeste del Valle de Ypacaraí se halla subdividida en bloques angostos por fallas secundarias sin proporcionar más detalles.

Harrington (1950, 1956) postula que cada escarpa del valle es una escarpa de falla con una dirección noroeste-sudeste, y que el bloque comprendido entre ellas se habría hundido una distancia no especificada con respecto a los bloques ubicados al este y al oeste del valle. También postula que el bloque ubicado al oeste del valle se habría hundido varios centenares de metros con respecto al bloque ubicado al este del valle, esto sobre la base de que la Lutita Vargas Peña al oeste del valle tiene una cota menor que la que tiene la misma Lutita al este. A diferencia de Harrington, Putzer (1962) explica el Valle de Ypacaraí como producto de desplazamiento vertical a lo largo de un conjunto de fallas escalonadas que tienen un rumbo de  $10^\circ$  norte- $20^\circ$  oeste y un buzamiento fuerte hacia el oeste, y cuyos techos ubicados al oeste de cada falla se han hundido con respecto a sus pisos. Si bien postula dos fallas principales asociadas con los escarpes ya mencionados del valle, admite también la posibilidad de que por fuera del valle hacia el oeste existan otras fallas paralelas. Al igual que Harrington, Putzer cree que la Lutita Vargas Peña aflorante al oeste del Valle de Ypacaraí se ha hundido con respecto a su continuación al este del valle, y calcula en unos 600 m su desplazamiento vertical a través de dicho valle.

A pesar de sus diferencias, ambos autores estarían de acuerdo en que el Valle de Ypacaraí debe su existencia a desplazamientos verticales a lo largo de fallas normales, y que ellas se originaron en un ambiente tectónico tensional. Putzer (1962) hizo hincapié en que las rocas silúricas y más recientes del Paraguay oriental nunca fueron afectadas regionalmente por tectonismo compresional debido a la ausencia en estas rocas de fallas de empuje de gran rechazo y de pliegues importantes. Según él, dichas rocas han sido afectadas solamente por tectonismo tensional que tuvo lugar desde el Jurásico hasta el Terciario, citando como evidencia de ello las intrusiones alcalinas y de rocas afines de la misma edad, así como el estilo

tectónico típicamente germánico evidenciado en las mismas rocas del Paraguay oriental. Aún cuando Harrington (1950, 1956) no habla explícitamente de un régimen tensional para el Paraguay oriental, todos los datos geológicos que ofrece en sus trabajos sirven para apoyar lo dicho por Putzer. En cuanto al tiempo de los movimientos tectónicos, Harrington (1956) cree que en el Pérmico tardío habría sido el primer movimiento que inició el propuesto graben de Ypacaraí, y que luego a partir del Terciario superior hasta el reciente, un segundo movimiento tectónico habría dado la forma final a dicho graben.

Se presentan a continuación algunos nuevos datos estructurales que provienen de la zona ubicada al norte de la ruta 2 entre Itauguá e Ypacaraí (fig. 2). En esta zona se observa en numerosas canteras el estilo tectónico evidenciado por fallas y diaclasas que han afectado la Lutita Vargas Peña y las areniscas asociadas. A 2,5 km al oeste-noroeste de Ypacaraí en la Cantera Santa Teresa todas las fallas observadas son del tipo normal, pudiéndose comprobar esto fácilmente observando la secuencia estratigráfica actualmente bien expuesta, así como las estrías tan comunes en los planos de falla. En esta cantera las fallas y diaclasas asociadas exhiben direcciones principales que son norte-sur, norte-noreste-sudoeste, y este-noreste-oeste-sudoeste. Sin embargo, las tres fallas de mayor rechazo pertenecen al grupo de fracturas con dirección N-S y presentan desplazamientos verticales de 1 a 2 m. Dos de estas tres fallas tienen su lado oriental hundido, siendo el caso opuesto para la tercera. En otra cantera ubicada a 800 m al noroeste de la Cantera Santa Teresa, las direcciones principales de las fracturas siguen siendo las mismas que las ya mencionadas. Aquí la única falla observada se dirige al norte con un buzamiento casi vertical, y tiene su lado oriental desplazado verticalmente hacia abajo en 2 a 3 m. A 2 km más hacia el noroeste la Lutita Vargas Peña se manifiesta otra vez en varias canteras ubicadas aproximadamente a 3 km al noreste de Itauguá. Las diaclasas observadas en estas canteras tienen direcciones variando en su mayor parte entre norte y noroeste, pero la única falla, encontrada en la Cantera Villeta, se dirige a  $N 3^\circ E$  con un buzamiento casi vertical. Esta falla ha desplazado la Lutita Vargas Peña ( $R = N 73^\circ O$ ,  $B = 30^\circ S O$ ) en sentido diestro sobre una distancia de 280 m, lo cual indicaría un

descenso del lado occidental en 150 m si todo el movimiento fuera vertical. En fin, al oeste del Valle de Ypacaraí en las cercanías de Itauguá e Ypacaraí, todas las fallas observadas por los autores subscriptos son normales. Además, si bien se observan varias direcciones de diaclasas, todas las fallas de mayor rechazo se dirigen hacia el norte y tienen buzamientos variando entre  $65^\circ$  y  $90^\circ$ .

### Metodología

El estudio geofísico consiste en dos partes: un estudio gravimétrico y uno magnetométrico complementario. El estudio gravimétrico se llevó a cabo a lo largo de la ruta 2 desde San Lorenzo hasta un poco más allá de Eusebio Ayala; se tomaron como estaciones geofísicas primarias los puntos de nivel establecidos por el Instituto Geográfico Militar (IGM) que se pudieron encontrar en el campo (figs. 2, 4). Las elevaciones sobre el nivel del mar de algunos de estos puntos fueron tomadas de los mapas topográficos (escala 1 : 50.000) de la zona en estudio y tienen una exactitud de  $\pm 0,5$  m. Sin embargo, para la mayoría de los puntos de nivel era posible conseguir del IGM una elevación más precisa cuya exactitud es de  $\pm 0,00005$  m.

Puesto que la distancia entre las estaciones primarias es muy variable, se establecieron también estaciones secundarias de modo que en zonas donde hay anomalías importantes la distancia entre sucesivas estaciones primarias y secundarias es de 0,5 a 1 km en dirección este-oeste, y donde no las hay es de 1 a 3 km (figs. 2, 4). Las elevaciones de estas estaciones secundarias fueron medidas con un microaltímetro (Modelo M-1, American Paulin System), usando el método de circuitos cerrados entre dos estaciones bases. Estas últimas siempre se las escogieron de los mismos puntos de nivel usados como estaciones primarias, y el tiempo transcurrido entre las tomas de las dos bases de un circuito siempre era menos de 100 minutos. Los datos altimétricos fueron corregidos usando una sencilla corrección de deriva, prescindiendo de las correcciones usuales de temperatura y presión atmosférica. A pesar de esto, se estima que las elevaciones calculadas para las estaciones secundarias tienen una exactitud de  $\pm 3$  m. La última cifra es el resultado de pruebas consistentes en medir varias veces en circuitos distintos la elevación de una sola esta-

ción secundaria y luego en analizar estadísticamente los datos resultantes.

Las mediciones de la aceleración de gravedad se realizaron en cada estación primaria y secundaria con un gravímetro geodético (Modelo Worden, Texas Instruments), tomando como base principal la estación 9233-50 establecida por el Interamerican Geodesic Survey en el viejo aeropuerto Presidente Stroessner. Además, se estableció una base secundaria en el punto de nivel E-1-28 ubicado en la intersección de la Ruta 2 con el desvío a San Bernardino (fig. 2). Las estaciones gravimétricas también fueron medidas usando el método de circuitos cerrados entre dos bases, de manera que el tiempo transcurrido entre las dos mediciones de la base o bases nunca excedía 6 horas. Luego, los datos gravimétricos obtenidos en el campo fueron corregidos para los efectos de deriva, elevación (aire libre y Bouguer) y latitud para hallar la gravedad de Bouguer ( $g_B$ ) de cada estación.

Para poder calcular mejor la corrección de elevación fue necesario suplementar los datos de elevación ya mencionados con datos de densidad mediante un muestreo de las unidades geológicas más importantes en la zona. De cada sitio de muestreo (fig. 2) se recolectaron de 4 a 5 muestras frescas y representativas, cuyos valores de peso específico (= densidad en  $\text{gm/cm}^3$ ) fueron medidos y luego promediados para hallar el peso específico medio de la roca de dicho sitio. En la práctica, este procedimiento se repitió dos veces para las muestras de cada sitio, la primera vez después de 30 días de secamiento al aire para dar un peso específico "seco", y la segunda vez después de 5 días de sumersión en agua para dar un peso específico "mojado". El peso específico en situ de las rocas muestreadas debe comprenderse entre estos dos extremos (cuadro 1). Sin embargo, en el cálculo de la corrección de elevación se han usado los pesos específicos "mojados" por ser los más representativos del estado de las rocas en la zona.

Usando las ecuaciones usuales junto con los datos de elevación y densidad descriptos arriba, se ha calculado para cada estación una corrección de elevación compuesta que resulta de haber usado dos valores distintos de densidad media para las rocas halladas debajo de y arriba de los 100 m de elevación respectivamente. Este procedimiento fue seguido porque según los datos geológicos disponibles, las rocas halladas por debajo de dicha elevación consisten princi-



CUADRO 1.—Valores medios del peso específico para las rocas de la zona del Valle de Ypacarai

n	N	Litología (edad)	Ps $\pm$ e <sub>s</sub>	Ds	Pm $\pm$ e <sub>m</sub>	Dm
1	4	arenisca cuarzosa (JC?)	2,47 $\pm$ 0,07	0,04	2,52 $\pm$ 0,04	0,03
2	5	arenisca micácea (Si)	2,12 $\pm$ 0,04	0,03	2,30 $\pm$ 0,05	0,04
3	5	arenisca cuarzosa (Si)	2,24 $\pm$ 0,01	0,01	2,36 $\pm$ 0,01	0,01
4	5	arenisca limosa micácea (Si)	2,12 $\pm$ 0,09	0,07	2,24 $\pm$ 0,05	0,04
5	5	arenisca limosa micácea (Si)	2,21 $\pm$ 0,07	0,06	2,37 $\pm$ 0,06	0,05
6	5	arenisca limosa micácea (Si)	2,06 $\pm$ 0,09	0,07	2,24 $\pm$ 0,07	0,05
7	4	arenisca micácea (Si)	2,02 $\pm$ 0,09	0,06	2,18 $\pm$ 0,04	0,02
8	5	arenisca micácea (Si)	2,18 $\pm$ 0,06	0,05	2,31 $\pm$ 0,04	0,03
9	4	arenisca cuarzosa (Si)	2,27 $\pm$ 0,09	0,06	2,38 $\pm$ 0,07	0,05
10	5	arenisca feldespática (Sc)	2,48 $\pm$ 0,02	0,01	2,50 $\pm$ 0,02	0,02
11	5	arenisca cuarzosa (Sc)	2,52 $\pm$ 0,02	0,01	2,55 $\pm$ 0,01	0,01
12	5	arenisca feldespática (Sc)	2,22 $\pm$ 0,02	0,01	2,33 $\pm$ 0,01	0,00
13	5	arenisca feldespática (Sc)	2,19 $\pm$ 0,10	0,08	2,31 $\pm$ 0,07	0,06
14	5	arenisca feldespática (Sc)	2,22 $\pm$ 0,11	0,09	2,35 $\pm$ 0,09	0,07
15	4	arenisca cuarzosa (Sc)	2,20 $\pm$ 0,06	0,04	2,32 $\pm$ 0,04	0,02
16	5	arenisca feldespática (Sc)	2,13 $\pm$ 0,02	0,01	2,28 $\pm$ 0,01	0,01
17	4	arenisca feldespática (Sc)	2,31 $\pm$ 0,12	0,07	2,41 $\pm$ 0,10	0,06
18	4	arenisca feldespática (Sc)	2,26 $\pm$ 0,07	0,05	2,37 $\pm$ 0,04	0,03
19	4	arenisca feldespática (Sc)	2,26 $\pm$ 0,05	0,03	2,37 $\pm$ 0,03	0,02
20	5	arenisca feldespática (Sc)	2,32 $\pm$ 0,05	0,04	2,42 $\pm$ 0,03	0,03
21	3	lutita (Ps)	2,24 $\pm$ 0,08	0,03	2,34 $\pm$ 0,51	0,06
22	5	arcosa (Ps)	2,41 $\pm$ 0,09	0,07	2,54 $\pm$ 0,06	0,05
23	5	hornfels (meta-lutita) (Ps)	2,69 $\pm$ 0,02	0,01	2,68 $\pm$ 0,01	0,01
24	5	hornfels (meta-arcosa) (Ps)	2,58 $\pm$ 0,06	0,05	2,64 $\pm$ 0,03	0,03
25	5	hornfels (meta-lutita) (Ps)	2,77 $\pm$ 0,02	0,02	2,78 $\pm$ 0,02	0,02
26	5	hornfels (meta-lutita) (Ps)	2,63 $\pm$ 0,09	0,08	2,67 $\pm$ 0,05	0,04
27	5	arenisca feldespática (Ps)	2,48 $\pm$ 0,12	0,09	2,56 $\pm$ 0,08	0,06
28	4	riolita porfirítica (Ps)	2,60 $\pm$ 0,03	0,02	2,62 $\pm$ 0,02	0,01
29	5	riolita porfirítica (Ps)	2,57 $\pm$ 0,06	0,05	2,62 $\pm$ 0,03	0,03
30	5	riolita porfirítica (Ps)	2,64 $\pm$ 0,02	0,02	2,65 $\pm$ 0,01	0,01
31	5	riolita porfirítica (Ps)	2,67 $\pm$ 0,02	0,01	2,68 $\pm$ 0,01	0,01
32	4	granito (Pc)	2,54 $\pm$ 0,04	0,02	2,56 $\pm$ 0,02	0,01
33	4	granito (Pc)	2,60 $\pm$ 0,02	0,01	2,61 $\pm$ 0,01	0,00
	8	promedio: Gp. Itacurubí (Si)	2,24 $\pm$ 0,01	0,01	2,35 $\pm$ 0,01	0,01
	11	Promedio: Gp. Caacupé (Sc)	2,34 $\pm$ 0,01	0,02	2,40 $\pm$ 0,01	0,01
	19	promedio: Silúrico (Si + Sc)	2,28 $\pm$ 0,01	0,02	2,39 $\pm$ 0,01	0,01
	13	promedio: Serie Escobar y el basamento cristalino (Ps + Pc)	2,63 $\pm$ 0,01	0,02	2,64 $\pm$ 0,01	0,01

n = número del sitio; N = número de muestras recolectadas; Ps  $\pm$  e<sub>s</sub> = promedio del peso específico "seco" con su error probable (95 %); Ds = desviación estándar de los valores del peso específico "seco"; Pm  $\pm$  e<sub>m</sub> = promedio del peso específico "mojado" con su error probable (95 %); Dm = desviación estándar de los valores del peso específico "mojado"; Pc = Precámbrico; Ps = Pre-Silúrico, Serie Escobar; Sc = Silúrico (u Ordovícico), Grupo Caacupé; Si = Silúrico, Grupo Itacurubí; JC = Jurásico-Cenozoico.

palmente en rocas presilúricas con una densidad media de 2,64  $\pm$  0,01 gm/cm<sup>3</sup>, en tanto que por arriba de la misma las rocas pertenecen en su mayor parte al Silúrico y tienen una densidad media de 2,39  $\pm$  0,01 gm/cm<sup>3</sup>. Partiendo de dichos valores de densidad y usando los ya mencionados valores para el error probable en las elevaciones, se calcula que en el peor de los casos los errores probables en la corrección de elevación son de  $\pm$  0,10 y  $\pm$  0,59 miligales para las estaciones primarias y secundarias respectivamente.

La corrección de latitud se efectuó usando la Fórmula Internacional de 1930 para la gravedad del esferoide junto con los valo-

res de latitud de cada estación que fueron tomados de los mapas topográficos de la zona. Dichos valores de latitud pudieron medirse con una precisión de  $\pm$  0,00005°, lo cual se traduce en un error de  $\pm$  0,004 miligales en el valor de g<sub>B</sub> usando la fórmula precitada. Al combinar los errores probables en las correcciones de latitud y elevación, más el error proveniente de otras fuentes (instrumental, de mareas terrestres) calculado en 0,31 miligales, se puede estimar que en este trabajo el error probable total para el valor de g<sub>B</sub> es  $\pm$  0,33 y  $\pm$  0,67 miligales para estaciones primarias y secundarias respectivamente.

Durante el estudio magnetométrico se

aprovechó de las estaciones ya establecidas para el estudio gravimétrico con la adición de dos estaciones más entre Capiatá y San Lorenzo (figs. 2, 4). Como estación base principal se usó el punto de nivel ubicado al lado de la iglesia de San Lorenzo, y como base secundaria el punto de nivel E-1-28 ya mencionado en conexión con el estudio gravimétrico. En cada estación el valor del campo magnético total fue medido con un magnetómetro de precisión de protones (Modelo G-816, Geometrics) con una precisión instrumental de  $\pm 1$  gamma, y otra vez se usó el método de circuitos cerrados entre dos bases de manera que el tiempo transcurrido entre las dos mediciones de la base o bases nunca excedía 2,5 horas. A pesar de que no se efectuó ninguna prueba para confirmarlo, se cree que el error probable en las mediciones magnetométricas es menor de  $\pm 5$  gammas.

### Resultados e interpretación

Las estructuras geológicas que se buscan en este trabajo son de naturaleza regional, pues se quiere detectar y estudiar principalmente fallas de gran rechazo vertical que corran todo a lo largo del Valle de Ypacaraí o al menos sobre distancias menores pero aún apreciables. También son de interés otros tipos de estructuras que produzcan anomalías o gradientes de carácter regional en los datos geofísicos, tales como pliegues, el buzamiento regional de estratos y/o contactos, y la ondulación del contacto entre el basamento y los estratos suprayacentes. En cambio las fallas de poco rechazo vertical, así como otras de gran rechazo que yuxtapongan solamente unidades litológicas de densidad y/o susceptibilidad magnética casi igual, no serían detectables con los métodos geofísicos aquí empleados.

Antes de proceder con la interpretación de los datos geofísicos, será necesario definir bien para la zona las unidades litológicas de mayor tamaño y con homogeneidad interna, que presentan entre sí importantes contrastes de densidad y/o susceptibilidad magnética, pues la configuración de dichas unidades en el subsuelo determinará los rasgos regionales de los datos geofísicos registrados en la superficie. Se considera conveniente agrupar todas las rocas de la zona en dos grupos litológicos que consisten en las rocas pre-silúricas por un lado y las rocas silúricas y más recientes por otro. Esto se justifica

porque el contacto pre-silúrico-silúrico (PsS), que tiene una orientación casi horizontal, aparentemente se extiende sobre distancias de proporciones regionales al tiempo que separa nítidamente dos unidades litológicas de carácter bastante diferente. Por arriba de dicho contacto todas las rocas silúricas y más recientes son sedimentarias, generalmente poco cementadas, y relativamente libres de efectos secundarios. Por lo tanto se considera muy improbable que existan verticalmente u horizontalmente importantes contrastes de densidad y/o susceptibilidad magnética dentro de dichas rocas. Por debajo del mismo contacto las rocas pre-silúricas no son tan homogéneas, presentándose aquí un grupo de rocas sedimentarias bien cementadas, plegadas y en varios lugares metamorfoseadas por intrusiones riolíticas. También es muy probable que las rocas graníticas aflorantes en San Bernardino ocupen volúmenes relativamente grandes en el basamento pre-silúrico. Sea como fuere, es evidente que todas las rocas pre-silúricas tendrían una densidad mayor que la de las rocas silúricas y más recientes. Además, la susceptibilidad magnética prácticamente inexistente en las rocas silúricas y más recientes contrastaría con la de las rocas pre-silúricas de origen ígneo y metamórfico.

Los datos de densidad presentados en el cuadro 1 apoyan la división artificial de las rocas de la zona en dos grupos cuyo borde común es el contacto PsS. De los valores ya dados para la densidad de las rocas pre-silúricas ( $2,64 \pm 0,01$  gm/cm<sup>3</sup>) y las rocas silúricas y más recientes ( $2,39 \pm 0,01$  gm/cm<sup>3</sup>), se calcula un contraste de densidad de  $0,25$  gm/cm<sup>3</sup>. Resulta que dicho contraste de densidad a través del contacto PsS es significativo en el nivel de confianza de 99,9 %, lo cual otorga al contacto citado un rango importante en la zona. Además se nota que el mismo contraste de densidad, que representa la variación entre los dos grupos de rocas, sobrepasa por más que un factor de 20 la desviación standard en los valores de densidad de cualquier grupo, que representa su variación interna. Esto demuestra con respecto a la densidad la relativa homogeneidad existente dentro de cada grupo de rocas, e indica de nuevo la importancia del contraste de densidad existente entre los dos grupos.

De acuerdo a lo dicho se tiene que el contacto PsS es el principal y quizás único contacto en la zona de extensión regional, a través del cual existen importantes contras-

tes de densidad y tal vez de susceptibilidad magnética. Por lo tanto cualquier irregularidad en dicho contacto producirá una correspondiente variación en los datos geofísicos registrados a lo largo del recorrido. A continuación se limitan los modelos interpretativos principalmente a los que hacen uso de algún tipo de deformación o irregularidad en el contacto PsS, tales como un buzamiento regional, ondulaciones y fallas de gran rechazo vertical.

### Gravimetría

Los datos de  $g_B$  obtenidos a lo largo de la ruta 2 son presentados gráficamente en el perfil de la figura 4, después de habérselos proyectado a una línea de orientación este-oeste. Para facilitar el desarrollo de la siguiente interpretación, el perfil gravimétrico ha sido dividido del oeste al este en cuatro segmentos (AB, BC, CD y DE) a ser analizados por separado.

Uno de los rasgos regionales más llamativos de los datos de  $g_B$  se observa mejor en el segmento DE. Aquí el perfil gravimétrico tiene la forma de una superficie relativa-

mente plana que presenta un pequeño gradiente de 0,345 miligal/km al este, según cálculos basados en el método de cuadrados mínimos. Teniendo en cuenta que los estratos silúricos en la zona correspondiente al segmento DE buzaban ligeramente al NE, es lógico interpretar el gradiente observado como el resultado de un buzamiento regional del contacto PsS en la misma dirección. Dicho buzamiento regional puede ser calculado con buena aproximación para ángulos pequeños usando el método de Nettleton (1976) junto con el valor ya dado para el gradiente de  $g_B$  y el valor del contraste de densidad ( $0,25 \text{ gm/cm}^3$ ) a través del contacto PsS. Así se obtiene para dicho contacto un buzamiento aparente de  $1,9^\circ \text{ E}$ . El término "buzamiento aparente" se prefiere usar en este caso porque debería existir un ángulo de  $30^\circ$  a  $40^\circ$  entre la dirección este-oeste del perfil gravimétrico y la dirección del buzamiento del contacto PsS, que según toda probabilidad es igual a la dirección  $N 50^\circ-60^\circ \text{ E}$  para el buzamiento de los estratos silúricos (Putzer, 1962; Harrington, 1972). Sobre la base de esto último se puede calcular para el contacto PsS un buzamiento verdadero aproximado de  $2,3^\circ$  en

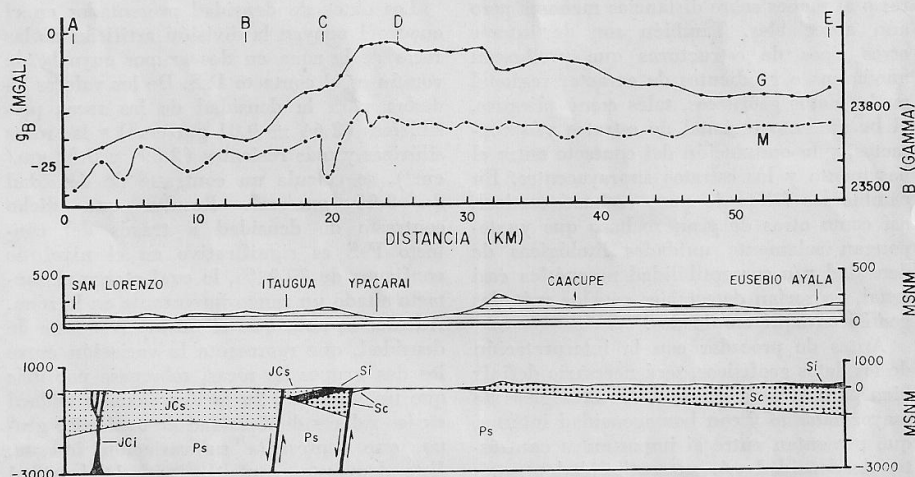


Fig. 4. — Arriba: Perfil gravimétrico (G) y perfil magnético (M) proyectados en una línea de dirección este-oeste. Las letras A, B, C, D y E corresponden a las mismas de la figura 2. Medio: Perfil topográfico correspondiente a la línea geofísica, con exageración vertical de 4. Abajo: Sección geológica correspondiente a la línea geofísica, con exageración vertical de 2. Ps = rocas pre-silúricas no divididas, Sc = rocas silúricas (u Ordovicianas) del Grupo Caacupé, Si = rocas silúricas del Grupo Itacurubí, JCs = sedimentos del Jurásico al Cenozoico no divididos, JCi = intrusiones máficas o ultramáficas del Jurásico al Cenozoico no divididas. A pesar del acuíñamiento y la desaparición indicados para las rocas silúricas un poco al oeste del Valle de Ypacarái, se considera probable que dichas rocas se extiendan más al oeste hasta el área de Asunción.

dirección de N 50°-60° E. Sin embargo, hasta contar con datos más detallados se cree prudente decir por el momento que el contacto PsS buzará aproximadamente 2° en la misma dirección. Cabe destacar que dicho valor para el buzamiento del contacto PsS coincide muy bien con el valor de 2° a 3° al este-noreste dado por Harrington (1956) para el buzamiento de los estratos silúricos en la región.

En el mismo segmento DE los datos de  $g_B$  manifiestan algunas pequeñas variaciones superpuestas aparentemente al azar en el gradiente regional ya interpretado. La mayor de estas está ubicada entre los puntos 31 y 36 del perfil y tiene una excursión total de unos 4 miligales. Si bien la naturaleza regional del presente trabajo no permite una interpretación exacta de dichas variaciones, se ofrecen a continuación algunas explicaciones cualitativas. Una explicación basada en el contraste de densidad a través del contacto PsS consiste en que las pequeñas variaciones de  $g_B$  en el segmento DE se deberían a pequeñas ondulaciones de dicho contacto, o sea a una especie de paleotopografía pre-silúrica. Otra explicación también razonable atribuiría las variaciones de  $g_B$  a cambios de litología y a los correspondientes contrastes de densidad dentro del conjunto pre-silúrico. Todavía hay una tercera explicación consistente en que el contacto PsS haya sido desplazado por fallas de rechazo vertical relativamente pequeño, dando lugar a las pequeñas variaciones observadas en  $g_B$ . Si bien los autores suscriptos prefieren la primera de estas tres explicaciones, no debe rechazarse la posibilidad de que alguna combinación de ellas se acerque más a la verdad. La interpretación final de las pequeñas variaciones de  $g_B$  en el segmento DE se deja para un estudio más detallado en el futuro.

En el perfil gravimétrico se observa que el nivel de referencia manifestado en el segmento DE como un gradiente regional, cae abruptamente al oeste en dos escalones (los segmentos CD y BC) hasta alcanzar otro nivel inferior en el segmento AB. Este nuevo nivel no es tan nítido como el del segmento DE porque está compuesto de dos partes. Primero, en la parte oriental del segmento AB los datos de  $g_B$  muestran un gradiente de 0,396 miligal/km al este que es muy parecido tanto en magnitud como en sentido al gradiente regional observado en el segmento DE. Así parecería que el contacto PsS existe en el subsuelo correspondiente a

esta parte del segmento AB, inclinándose ligeramente al este. Usando el mismo método y el mismo valor del contraste de densidad utilizados antes, el valor del gradiente dado arriba se traduce de nuevo en un buzamiento aparente de 2° E para el contacto PsS. Sin embargo la última aseveración se considera algo especulativa porque el gradiente interpretado arriba se basa sólo en cuatro puntos del perfil. Luego en la parte occidental del segmento AB se observa que los datos de  $g_B$  aparentemente van disminuyendo al oeste. No se ofrecen explicaciones para este fenómeno debido a la escasez de datos gravimétricos en esta parte del segmento.

Ahora la interpretación se centra en un análisis de los datos gravimétricos de los segmentos BC y CD, donde los ya mencionados escalones en el perfil gravimétrico consisten en caídas relativamente abruptas de 12 y 10 miligales respectivamente. Sobre la base de lo antes expresado de que los cambios de  $g_B$  en la zona reflejarían correspondientes deformaciones del contacto PsS, lo más razonable es interpretar cada escalón como el resultado de una falla que habrá desplazado verticalmente el contacto PsS presumiblemente existente en el subsuelo. Además el hecho de que cada escalón cae al oeste indica que el bloque occidental de cada falla postulada se habrá hundido respecto al bloque oriental. Si bien pueden ofrecerse otras explicaciones teóricamente válidas para los escalones observados en el perfil gravimétrico, se piensa que la explicación dada concuerda bien con los datos geológicos existentes para la zona en cuestión, que se extiende desde el medio del Valle de Ypacarái hasta un poco al oeste de Itauguá.

Antes de interpretar los datos gravimétricos de los segmentos BC y CD, fue necesario restarles el gradiente regional observado en los segmentos DE y AB. Luego los datos resultantes fueron interpretados principalmente sobre la base de los dos modelos de falla dados por Nettleton (1976). Como contraste de densidad a través de las dos fallas postuladas se ha usado nuevamente el valor de 0,25 gm/cm<sup>3</sup>, porque una falla que desplaza verticalmente el contacto PsS en el sentido antes indicado yuxtapondría rocas silúricas al oeste de la falla contra rocas pre-silúricas al este. Así entre otras cosas se han calculado rechazos verticales de 1125 m y 925 m para las fallas propuestas para los segmentos BC y CD respectivamente.

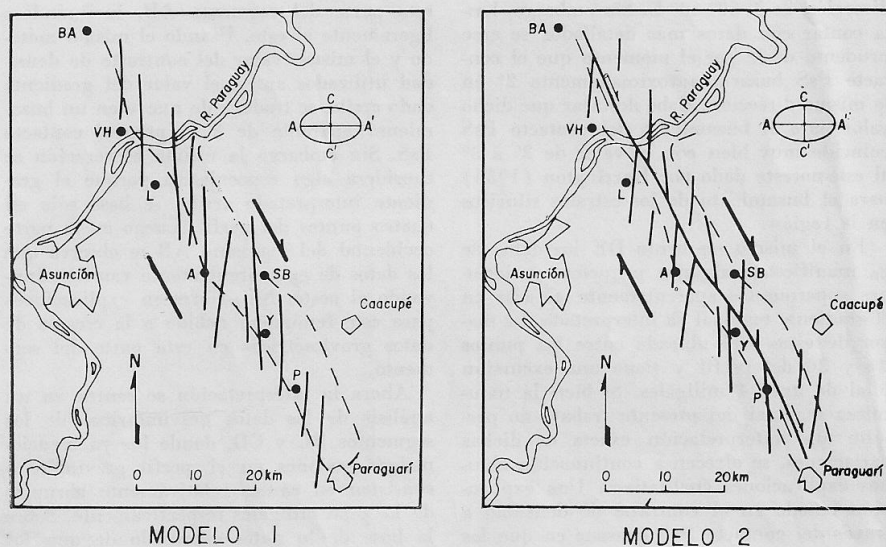


Fig. 5. — Modelos explicativos del origen del Valle de Ypacarai. Los elipses indicados son elipses de deformación, debido al cople indicado por las flechas gruesas. BA = Benjamín Aceval, VH = Villa Hayes, L = Limpio, A = Areguá, SB = San Bernardino, Y = Ypacarai, P = Pirayú. En cada modelo las fallas son ilustrativas, y no representan necesariamente fallas reales. *Modelo 1*: El valle se originó por la erosión de las rocas afectadas por un sistema de fallas distribuidas en échelon. *Modelo 2*: El valle se originó por la erosión de las rocas afectadas por una falla de cizallamiento.

te. Sin embargo si por alguna razón el contraste de densidad a través de dichas fallas fuera mayor (por ejemplo de  $0,35 \text{ gm/cm}^3$ ), sus rechazos verticales tendrían que ser menores (por ejemplo de 800 m y 660 m respectivamente) para poder explicar cuantitativamente los datos gravimétricos disponibles. Por el mismo motivo, si existiera más que un contraste de densidad a través de las fallas postuladas, sería necesario reducir en cierta medida los rechazos verticales dados arriba. Los autores suscriptos, por considerar muy posible la última situación, aceptan los valores dados para el rechazo vertical como razonables pero también como valores máximos, y opinan que dichos valores probablemente tendrán que ser reducidos algo a la luz de datos geológicos más específicos.

Todos los cálculos geofísicos ya mencionados y otros de menor importancia son ilustrados gráficamente en la sección geológica de la figura 4, que se ofrece como un modelo interpretativo para la zona en estudio. No obstante dicha sección no se basa

solamente sobre las interpretaciones geofísicas, sino también tiene en cuenta los datos geológicos resumidos anteriormente. Por ejemplo, la ubicación del punto de medio rechazo y el rechazo vertical de cada falla indicada en la sección quedan determinados por los datos gravimétricos, el contraste de densidad usado, y el modelo de falla escogido para la interpretación. También el buzamiento del contacto PsS se conforma a los cálculos geofísicos en los lugares apropiados. En cambio, el sentido y la magnitud del buzamiento de las fallas indicadas en la sección geológica se basan tanto sobre datos geofísicos como en datos geológicos. Los datos geofísicos juntamente con la secuencia geológica aceptada indican que el bloque occidental de cada falla descendió con respecto al bloque oriental, en tanto que los datos geológicos muestran que las fallas aflorantes al oeste del Valle de Ypacarai son del tipo normal y buzan fuertemente. La combinación de estos datos exige que las fallas postuladas en la sección de la figura 4 bucen al oeste con ángulos relativamente grandes.

### Magnetometría

Los datos del campo magnético total (B) graficados en el perfil de la figura 4 serán analizados cualitativamente usando otra vez la división del perfil en cuatro partes provenientes del análisis gravimétrico. Debe recordarse que en general los datos magnéticos serán menos capaces que los datos gravimétricos de reflejar deformaciones en el contacto PsS por las siguientes razones. En primer lugar, tanto el conjunto pre-silúrico como el conjunto silúrico hasta más reciente se hallan intruidos localmente por rocas riolíticas y rocas máficas respectivamente, las cuales constituyen para cada conjunto posibles fuentes de anomalías magnéticas. Dichas anomalías que nada tienen que ver con el contacto PsS podrían confundirse con anomalías provenientes de este contacto si las hay. En segundo lugar, a pesar de lo dicho anteriormente referente al probable contraste de susceptibilidad magnética a través del contacto PsS, es casi seguro de que en algunos lugares dicho contacto separa rocas sedimentarias pre-silúricas de rocas sedimentarias silúricas y más recientes, cuyas propiedades magnéticas serían casi iguales. De ser así no existiría una diferencia en el comportamiento magnético de dichas rocas, haciéndolo difícil detectar con el método magnético el contacto PsS o cualquier deformación en él. El análisis presentado a continuación se basa sobre la relativa importancia del contacto PsS, pero también tiene en cuenta las posibles complicaciones antes mencionadas.

Los datos magnéticos del segmento DE se asemejan mucho a los datos gravimétricos correspondientes, y por eso se les puede aplicar esencialmente la misma interpretación dada en el caso gravimétrico. En dicho segmento el perfil magnético tiene nuevamente la forma de una superficie relativamente plana, pero a diferencia del perfil gravimétrico el magnético prácticamente no tiene un gradiente regional. La interpretación más adecuada del perfil magnético en cuestión consiste otra vez en que el contacto PsS en el subsuelo al este del Valle de Ypacarái es relativamente plano y que no existen importantes cambios de susceptibilidad magnética dentro del conjunto pre-silúrico. Las variaciones relativamente pequeñas (de 70 gammas) en los datos magnéticos sobre distancias de varios kilómetros indicarían solamente pequeñas ondulaciones del contacto PsS o cambios locales de la sus-

ceptibilidad magnética en el conjunto pre-silúrico.

En el segmento CD y en la parte más oriental del segmento BC se observa la única anomalía magnética de consecuencia registrada en este estudio. Dicha anomalía sirve como límite entre dos regiones de carácter magnético completamente diferente, pues al este de ella el perfil magnético es poco variable y no tiene gradiente, en tanto que al oeste el perfil es muy variable en algunos lugares y tiene un gradiente pronunciado hasta el oeste. Esto hace pensar que la anomalía magnética mencionada estaría asociada tal vez con una falla que dividiría la zona en estudio en dos regiones de carácter geológico diferente. Esta hipótesis parece confirmarse al tener en cuenta la estrecha asociación espacial entre la anomalía magnética del segmento CD y la anomalía gravimétrica del mismo ya interpretada como una falla. También sería posible explicar la anomalía magnética como el efecto de una intrusión ígnea o de una mineralización magnética. De ser así, debe recordarse que estos fenómenos geológicos a menudo aprovechan de una falla para su emplazamiento. Por lo tanto la anomalía magnética del segmento CD parece confirmar directa o indirectamente la existencia de la falla postulada sobre la base de la anomalía gravimétrica del mismo segmento.

En los segmentos AB y BC, menos la parte más oriental del último, los datos magnéticos presentan un gradiente regional de 11 gamma/km al oeste. Aunque el significado de dicho gradiente no es muy claro, puede indicar un aumento gradual hacia el oeste de la profundidad hasta el basamento pre-silúrico. En los mismos segmentos se observa también que en su parte oriental existe poca variación en los datos magnéticos, en tanto que en su parte occidental existen algunas variaciones no bien definidas. Parecería que estas variaciones magnéticas tendrían como origen un grupo de diques como los que afloran al este de San Lorenzo, o posiblemente un cuerpo ígneo más grande del que se habrían provenido dichos diques. Con datos magnéticos adicionales será posible confirmar o rechazar la última aseveración.

### Discusión

Las interpretaciones presentadas en la sección anterior y resumidas gráficamente

en la figura 4 hacen necesario modificar las ideas previas de la estructura del Valle de Ypacaraí. Comenzando con el segmento DE, la interpretación geofísica concuerda con lo postulado por Harrington y Putzer en, que los estratos silúricos buzcan ligeramente al ENE hacia la Cuenca del Paraná. En cambio la falla postulada como la causa del escarpe oriental del Valle de Ypacaraí no recibe apoyo alguno de los perfiles geofísicos, que al cruzar el escarpe mencionado no evidencian anomalías atribuibles a fallas. Según se mencionó antes, la caída de 4 miligales hacia el este registrada por el estudio gravimétrico entre los puntos 31 y 32 debe ser interpretada como una ondulación en el contacto PsS o como un cambio de densidad dentro del conjunto pre-silúrico. Si se la interpretara como una falla, contra la opinión firme de los presentes autores, dicha caída interpretada según el método usado antes indicaría una falla cuyo lado oriental habría descendido unos 380 m. Lo interesante es que ni esta falla concordaría con la falla postulada previamente, porque la última tendría su lado occidental hundido. Así los datos geofísicos refutan la idea de que una falla con su lado occidental hundido correría en dirección NNO-SSE a lo largo del escarpe oriental del Valle de Ypacaraí. Por eso tiene que rechazarse también la hipótesis de que el Valle de Ypacaraí se habría originado como un graben.

A diferencia del segmento DE, los segmentos BC y CD correspondientes a la zona ubicada al oeste del medio del Valle de Ypacaraí proporcionan amplia evidencia gravimétrica para las dos fallas ya postuladas, cuyos lados occidentales habrán descendido con respecto a sus lados orientales en 1125 m y 925 m respectivamente. Además, la anomalía magnética estrechamente asociada con la anomalía gravimétrica en el segmento CD aparentemente constituye evidencia adicional de la falla propuesta para dicho segmento. Cabe destacar que la última falla mencionada, que estaría ubicada exactamente en el borde occidental del Valle de Ypacaraí, no puede ser la falla postulada por Harrington para dicho borde porque ésta tendría su lado oriental hundido. En cambio la falla propuesta para el segmento CD así como la del segmento BC parecen confirmar en parte las ideas de Putzer, es decir, que una falla con su lado occidental hundido una distancia considerable existe en el borde occidental del Valle de Ypacaraí cerca de Ypacaraí, y que otra falla muy parecida en todos los

aspectos existe más al sudoeste del valle (figs. 2, 4).

A pesar de lo dicho, la hipótesis de Putzer de que el Valle de Ypacaraí se habría originado como el resultado de un conjunto de fallas escalonadas con rumbos al nor-noroeste no encaja bien con los datos geológicos y geofísicos presentados aquí. Si hubiera una falla o un grupo de fallas con dicha dirección que hubiera controlado la evolución del valle, se esperaría ver en la zona algunas fallas menores o diaclasas paralelas y antiparalelas que estarían asociadas genética y espacialmente con las fallas principales. En lugar de esto, se observan al oeste del Valle de Ypacaraí solamente fallas normales con una dirección norte-sur que buzcan con gran ángulo tanto al este como al oeste. Si bien no ha sido posible especificar el rumbo de las fallas detectadas en los segmentos BC y CD con una sola línea geofísica, lo dicho anteriormente hace pensar que ellas tendrían un rumbo norte-sur y que serían las fallas patrones de las fallas observadas en el terreno. Por lo tanto se propone aquí que el Valle de Ypacaraí no se habrá originado a causa de fallas de rechazo vertical con rumbos al noroeste como sugiere Putzer, porque de acuerdo a los datos geológicos y geofísicos las principales fallas de rechazo vertical en la zona de Ypacaraí e Itauguá se dirigen en dirección norte-sur.

Lo expresado últimamente equivale a decir que el Valle de Ypacaraí no se habrá originado a causa de estructuras formadas por un sistema de fuerzas tensionales dirigidas en una dirección ENE-OSO, o sea, perpendicular a la dirección del valle. Por eso si se quiere proponer para el valle un origen en parte tectónico, se debería recurrir a una mecánica de compresión o cuplas de fuerza. Sin embargo debido a las características de la región, la última se estima como más apropiada.

Sobre la base de toda la evidencia geológica y geofísica ahora conocida, se propone que la formación del Valle de Ypacaraí se habría iniciado con el establecimiento o la reactivación de una cupla de fuerzas de sentido dextral, cuyo eje coincidiría con el del valle actual. El subsecuente desarrollo del valle puede explicarse según los dos modelos presentados en la figura 5. En el primer modelo la cupla habría originado un sistema de fallas normales de dirección norte-sur y distribuidas en échelon a lo largo de su eje. Luego una erosión selectiva habría atacado más rápido la franja de rocas afectadas por

dicho sistema de fallas, para dar lugar al Valle de Ypacaraí en su forma actual. Según el segundo modelo, la cupla habría originado o reactivado una falla de cizallamiento que correría a lo largo del valle en cuestión, originando también un sistema de fallas igual al postulado en el primer modelo pero ahora de importancia secundaria. Nuevamente una erosión selectiva habrá labrado el Valle de Ypacaraí, dejando como sus bordes dos escarpes de línea de falla. Si se postula que el eje de la cupla propuesto buzara ligeramente hacia el nornoroeste, ambos modelos serían capaces de explicar también el descenso de las rocas ubicadas al sudoeste del valle con respecto a las rocas del otro lado, así como el descenso del lado occidental con respecto al oriental observado en las fallas normales de mayor rechazo entre Itauguá e Ypacaraí. En otros términos, la zona ubicada al sudoeste del Valle de Ypacaraí se habría deslizado hacia el nornoroeste al tiempo que habría descendido un poco con respecto a la zona ubicada al noreste del valle.

Los autores suscriptos prefieren el segundo modelo al primero principalmente porque los considerables rechazos verticales calculados para las fallas normales de probable dirección norte-sur en las cercanías de Ypacaraí e Itauguá hacen sospechar que la cupla causante también habría originado o reactivado una falla de cizallamiento de desplazamiento muy considerable. Además la

terminación abrupta del borde oriental del Valle de Ypacaraí cerca de Villa Hayes y la continuación de su borde occidental más al nornoroeste del mismo pueblo sobre una distancia de 18 km pueden haber resultado del desplazamiento en sentido dextral de la falla de cizallamiento postulada.

El resultado de este trabajo ha sido por lo tanto el descubrimiento de numerosos hechos geológicos que no encajaban con algunos de los conceptos previamente sostenidos para la zona alrededor del Valle de Ypacaraí. Es por ello que, se considera muy necesario efectuar en el futuro estudios detallados tanto geológicos como geofísicos para definir mejor la estructura de la zona en cuestión y también para discernir entre los dos modelos presentados, el de mayor validez.

#### Agradecimiento

Los autores quieren expresar su profundo agradecimiento al Ejército de los Estados Unidos de América, a la Anschutz Corporation y al Instituto de Ciencias Básicas de la Universidad Nacional de Asunción, por los equipos y los materiales proporcionados para la realización de este trabajo. También se agradece a Kevin McAllister, B. S., por su cooperación en los trabajos de campo y a la Licenciada Alejandra Escobar de DeGraff por su importante ayuda en la redacción del informe.

#### Lista de trabajos citados en el texto

- Comte, D. e Y. Hasui, 1971. *Geochronology of eastern Paraguay by the potassium-argon method*; Rev. Brasileira Geosci., 1 (1): 33-42. São Paulo.
- Eckel, E. B., 1959. *Geology and mineral resources of Paraguay, a reconnaissance*; U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 327. : 1-110. Washington, D.C.
- Escobar, A., 1980. *Contribución al conocimiento de los invertebrados marinos de la Lutita Vargas Peña (Silúrico inferior de las zonas de Ypacaraí e Itauguá, Paraguay Oriental)*; Tesis no publicada, Univ. Nac. de Asunción, Instituto de Ciencias Básicas, San Lorenzo, Paraguay. 55 págs.
- Harrington, H. J., 1950. *Geología del Paraguay Oriental*; Univ. de Buenos Aires, Fac. de Cienc. Exact. Fís. y Nat., Contrib. Cient., Serie E, Geología 1: 1-82.
- 1956. *Paraguay*; en Jenks (ed.), Handbook of South American Geology, U.S.G.S. Memoir 65: 103-114. Washington, D.C.
- 1972. *Silurian of Paraguay*; en Berry, W.B.N. y Boucot, A. J. (ed.), Correlation of the South American Silurian Rocks. : 41-50.
- Karppoff, R., 1965. *Stratigraphie - observations géologiques au Sud-Est d'Asunción (Paraguay)*. C. R. Acad. Sc. París. 20 de diciembre, Grupo 9. : 5558-5560.
- Miraglia, L., 1965. *Vulcanismo post-pliocénico del Paraguay*. Rev. Soc. Cient. del Paraguay, 7 : 1-52. Asunción.
- Nettleton, L. L., 1976. *Gravity and magnetics in oil prospecting*. McGraw-Hill, Inc. : 464. Nueva York.
- Palmieri, J. H., 1973. *El complejo alcalino de Sapukai (Paraguay Oriental)*. Tesis doctoral, Univ. de Salamanca, Fac. de Cien., Dpto. de Cristalografía y Mineralogía. :318. España.



- Putzer, H., 1975. *Paraguay*. Fairbridge, R. W. (ed.), The Encyclopedia of World Regional Geology, & Sons, Inc.  
Part 1: Western Hemisphere (Including Antarctica and Australia), 8 : 419-426. John Wiley  
Wolfart, R., 1961. *Stratigraphie und Fauna des älteren Paläozoikums (Silur, Devon) in Paraguay*.  
Geol. Jhrb, 78 : 29-102. Hannover.  
Anónimo, 1975. *Cuenca del Plata - Estudio para su planificación y desarrollo - República del Paraguay - Proyecto Aquidabán - Desarrollo de la región nororiental.* : 197. OEA.

Recibido: 3 de julio, 1981.

RAFAEL FRANCO  
JAMES M. DEGRAFF  
DELIO ORUE  
Universidad Nacional de Asunción  
Instituto de Ciencias Básicas  
San Lorenzo - Paraguay.