

EXPLORACIONES GEOFISICAS EN EL AREA DE TONGOY

Por

Hans Meinardus B.

C O N T E N I D O

ABSTRACT	207
RESUMEN	207
INTRODUCCION	207
RASGOS FISIOGRAFICOS Y GEOLOGICOS DE LA ZONA	208
TRABAJOS DE TERRENO	208
INTERPRETACION	209
RESULTADOS	211
1) Gravimetria	211
2) Sísmica	211
CONCLUSIONES	214
REFERENCIAS	215

EXPLORACIONES GEOFISICAS EN EL AREA DE TONGOY*

Por

Hans Meinardus B.**

ABSTRACT

Fieldwork, interpretation and conclusions of gravimetric and seismic prospection in the Tongoy area are described. Geological evidence indicates that formerly the Limarí River probably discharged in the Tongoy Bay. The buried river was expected to be a good aquifer for groundwater which was not borne out by investigations. Seismic refraction profiles revealed a refractor with a seismic velocity of 2600 m/s. The refractor, which extends beneath the Pachingo Canyon at a depth of 150 m below sea level, may be attributed to the ancient Limarí river channel.

RESUMEN

Se describe el trabajo de terreno, la interpretación y los resultados de la prospección gravimétrica y sísmica realizada en el área de Tongoy. Los antecedentes geológicos de la zona indicaban que el río Limarí desembocaba antes en la bahía de Tongoy y se esperaba que su antiguo lecho sepultado actualmente bajo sedimentos modernos tendría importancia como conductor de aguas subterráneas. Los perfiles sísmicos de refracción revelaron la existencia de una formación de velocidad de propagación de 2600 m/seg, a una profundidad del orden de 150 m bajo el nivel del mar, que se extiende debajo de la actual quebrada Pachingo y que se atribuye al antiguo lecho del río Limarí.

INTRODUCCION

Muchas bahías de la costa chilena, como la de Talcahuano, Tongoy, Coquimbo y Mejillones presentan el fenómeno de homología geográfica que consiste en la repetición de formas características. Se trata de bahías más o menos profundas, abiertas hacia el Norte; limitadas hacia el Océano por penínsulas constituidas por rocas fundamentales (Precámbrico y/o rocas graníticas) y que están rodeadas por extensas mesetas marinas. Estas homologías se deberían, según la opinión de J. BRUGGEN (1950), a fallas de dirección Norte-Sur entre las cuales subieron algunos bloques como sillas tectónicas que se unieron más tarde al continente gracias a la fuerte sedimentación y solevantamiento posterior. Los cambios de curso de algunos ríos están íntimamente relacionados con esta historia tectónica de la costa. J. BRUGGEN (1950) ya había expresado la idea que el río Limarí desembocaba antiguamente en la bahía Tongoy, opinión que comparten también G. C. TAYLOR (1947) y R. BORGEL (1961).

Con el fin de investigar dichos fenómenos mediante métodos geofísicos, el Instituto de Geofísica y Sismología de la Universidad de Chile realizó un trabajo

*Recibido para su publicación en noviembre de 1961.

**Geofísico del Instituto de Geofísica y Sismología de la Universidad de Chile.

en el área de Tongoy para ubicar este lecho sepultado y para estudiar la profundidad y forma del basamento, como también las características del relleno sedimentario en la zona costanera. El estudio fue financiado en parte por la Compañía Ganadera de Tongoy Ltda., que estaba interesada en problemas relacionados con el agua subterránea en la zona costanera. Se suponía que el lecho sepultado del río Limarí podría servir como importante acuífero.

RASGOS FISIOGRAFICOS Y GEOLOGICOS DE LA ZONA

La zona estudiada está comprendida entre las latitudes $30^{\circ} 15'$ a $30^{\circ} 45'$ y las longitudes $72^{\circ} 45'$ a $72^{\circ} 30'$ (figura 1). Esta área comprende básicamente tres unidades morfológicas:

1. En el Oeste, una cadena montañosa paralela a la costa, los Altos de Talinay, que pertenecen principalmente al complejo precámbrico de rocas metamórficas como gneís, esquistos y filitas.

2. A continuación se extiende hacia el Este una planicie fluvio-marina de forma alargada en dirección Norte-Sur.

3. El límite occidental de esta planicie lo constituye una serranía que empieza por el cerro San José en el Sur, para terminar en el cerro La Viñeta en el Norte. En su mayor parte pertenecen al batolito de rocas graníticas de edad mesozoica. El cerro Guanaquero y las rocas que afloran cerca del borde de la terraza superior entre las quebradas Salina y Salinita pertenecen también al batolito e indican que gran parte del basamento de los sedimentos fluvio-marinos debe pertenecer a estas rocas graníticas. El Mapa Geológico de Chile a Escala 1 : 1.000.000 del Instituto de Investigaciones Geológicas (1960), indica, además, afloramientos menores del Jurásico (rocas volcánicas con algunas intercalaciones sedimentarias) en la zona, como se muestra en la figura 1.

La planicie fluvio-marina de Tongoy se acuña hacia el Sur y se inclina con una pequeña pendiente hacia la costa, donde se evidencian varias terrazas. Está cortada por una serie de quebradas, siendo las principales las de Pachingo, Salina, Salinita, Camarones y Romeral. Los sedimentos del Plioceno que forman la mayor parte de esta planicie incluyen gravas, arenas y arcillas fluviales semi-consolidadas en forma de lentes. Entre estos sedimentos se intercalan areniscas y arcillas marinas fosilíferas. Los sedimentos del Pleistoceno superior y los sedimentos recientes comprenden las gravas y arenas no consolidadas en los cursos inferiores de las quebradas mayores, y los depósitos costaneros en la terraza inferior de la bahía Tongoy.

TRABAJOS DE TERRENO

Durante los meses de junio y julio de 1961 se hicieron dos excursiones geofísicas a la región para la recopilación de datos. Primero se levantó un perfil gravimétrico en la playa entre Puerto Aldea y Tongoy para obtener una información general sobre la forma del basamento. De acuerdo con los resultados de este estudio, se concentró el trabajo sísmico en la zona drenada por la quebrada Pachingo. Para conocer la profundidad del basamento en los alrededores del pueblo Tongoy se levantó un perfil sísmico entre la quebrada Salinita y

el estero Tongoy. También se levantó un perfil sísmico paralelo al río Limarí, con el fin de establecer la posibilidad de comunicación entre este río y la quebrada Pachingo. Para conocer la velocidad de propagación de las ondas elásticas en el basamento metamórfico se hizo un disparo en la terraza de abrasión al Norte de Puerto Aldea. El perfil gravimétrico tiene una extensión de 12 km y los perfiles sísmicos suman un largo total de 20 km.

Las medidas gravimétricas se ejecutaron con un gravímetro WORDEN de constante instrumental 0,4905 miligales por división. La cota de los puntos extremos se midió con altímetro, estando los demás puntos al nivel del mar. El espaciamiento entre las estaciones es 160 m y se midió con el cuentamillas del vehículo.

El trabajo sísmico se efectuó con un camión de la United Geophysical Company, que posee un equipo de refracción de 12 canales. Para el registro se empleó una cámara de la Electro-Technical Laboratories, cuyo sistema de marcar el tiempo es controlado por un cristal. El instante de disparo se registró en algunos casos mediante un geófono de pozo, en otros, mediante el registro de una traza de la cámara comunicada con la caja del disparador por radio o por línea telefónica.

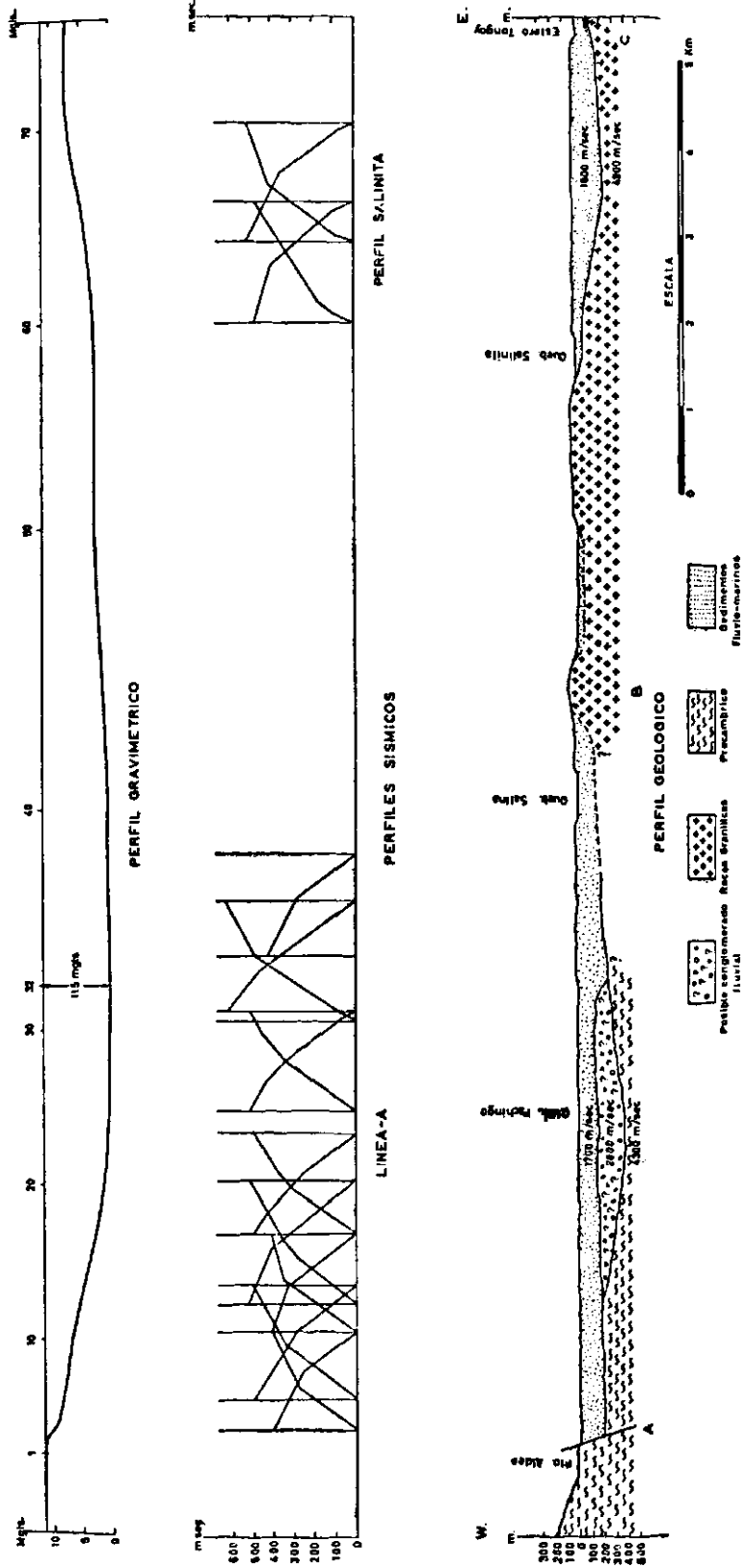
En la línea larga, paralela a la playa (Línea A), se traslaparon los perfiles en un 50%; en las demás líneas se juntaron los perfiles, coincidiendo el geófono extremo de un perfil con el del siguiente. De acuerdo con las profundidades que se esperaban se adoptó un espaciamiento de 100 m entre geófonos colocados en línea recta, disparando en algunos casos en el primer geófono, en otros a 100 m de distancia. Se disparó en los dos extremos de cada perfil. La carga de 4 a 5 kg de amón gelatina de 60% de fuerza se colocó en pozos de 1,80 a 3,00 m de profundidad. Estos pozos se excavaron con barreta y pala. Cuando las circunstancias lo permitían se hacían disparos en el agua, lo que simplificaba el trabajo de terreno y mejoraba considerablemente la calidad del registro obtenido. El estacado de los perfiles se levantó con plancheta y la nivelación se hizo con altímetro.

INTERPRETACION

En los sismogramas sólo se identificaron las primeras llegadas de las perturbaciones elásticas del subsuelo que corresponden a las ondas sísmicas longitudinales. En la construcción de los gráficos tiempo-distancia se observó el estricto cumplimiento de los tres principios fundamentales: de reciprocidad, de paralelismo, y de coincidencia del tiempo de intersección. Para la determinación de velocidades, manteos y profundidades de las capas se postuló que la velocidad es constante en cada capa y que éstas son limitadas por superficies planas. En estas condiciones, el gráfico tiempo-distancia se compone de una serie de rectas, cada una de las cuales corresponde a un refractor bien determinado. Mediante la ecuación de la recta correspondiente al refractor de orden "n" se calculó su espesor h_n en un extremo A, usando la fórmula de Adachi:

$$t_{n+1,0} = \sum_{i=1}^n \frac{h_{ii}}{V_i} (\cos \alpha_i + \cos \beta_i) + \frac{R}{V_n}$$

ESTRUCTURA DE LA COSTA ENTRE
PUERTO ALDEA Y TONGOVY
FIG. 2



- $t_{n,i,i,i}$: tiempo de propagación de la onda hasta el punto $x = R$.
 V_i : velocidad de propagación de la onda en la capa i .
 V_{an} : velocidad aparente medida en la dirección de A a B para la onda que viaja en la capa n .
 R : Distancia arbitraria a lo largo del perfil.
 α_i, β_i : ángulos que forman los rayos que viajan en la capa i con la vertical; se obtienen de la ley de las velocidades aparentes y de la aplicación repetida de la ley de Snellius.

Para una parte de la línea A se empleó un método de interpretación basado en la curva de las intersecciones que permite un mayor detalle en el mapeo del contacto.

En un caso de una estructura más complicada que el modelo simple de capas planas se empleó un método de aproximaciones sucesivas que consiste en hacer calzar el gráfico tiempo-distancia teórico de una supuesta configuración del subsuelo con el correspondiente obtenido en el terreno.

RESULTADOS

1) Gravimetría:

En la reducción de las medidas gravimétricas se tomó como plano datum el nivel del mar, simplificándose así considerablemente los cálculos; la corrección por latitud es la única que se aplica. La estación 1 se encuentra sobre el basamento metamórfico de la terraza de abrasión que se extiende al N. de Puerto Aldea. Las estaciones 77 y 78 se ubicaron en el faldeo de la península de Tongoy. El efecto regional de la gravedad se descontó linealmente y se obtuvo la anomalía de Bouguer, que se presenta en la figura 2. La pendiente de esta curva es más acentuada en el extremo Oeste que en el Este. Su valor máximo de 11,5 miligales se encuentra alrededor del punto 32, frente a la quebrada Pachingo, donde se tiene la mayor profundidad del basamento. Asimilando el paquete de sedimentos a una plancha de extensión infinita, lo que es perfectamente lícito, dada la gran extensión de la anomalía en relación a su magnitud se obtiene mediante la fórmula de Bouguer y para un contraste de densidades de $0,6 \text{ g/cm}^3$ un espesor máximo de 460 m para el conjunto sedimentario.

El hecho que en el perfil gravimétrico no aparezca la influencia del afloramiento de rocas graníticas que se muestra en el corte geológico se debe a que estas dos líneas no coinciden. La línea gravimétrica se encuentra en esta zona a dos km de distancia de tales afloramientos del batolito, lo que significa que éste no se prolonga en forma de cordón subterráneo hasta la línea de playa sino que se trata más bien de un stock aislado en forma de isla.

2) Sísmica:

La línea A (figura 2) está ubicada en el lado occidental de la bahía Tongoy y es aproximadamente paralela a la línea de la playa de dirección Este-Oeste. Comienza cerca de la quebrada Salina, cruza el estero de la quebrada Pachingo y termina frente al pueblo de Puerto Aldea. Consta de ocho perfiles: los del extremo oriental se encuentran sobre la primera terraza de 20 m de altura, los demás se extienden por la playa, prácticamente al nivel del mar.

		LINEA-A (m/sec)	PERFIL SALINITA (m/sec)	PERFILES QUEB. PACHINGO (m/sec)	LINEA-B Y PERFIL GALANAQUIS (m/sec)	PERFIL LIMARI (m/sec)	PERFIL PTO. ALDEA (m/sec)
V ₁	VELOCIDADES SUPERFICIALES	1100	960±70	—	1000 y 520	1000 ± 100	—
V ₂	SEDIMENTOS POCO CONSOLIDADOS	1690±60	1820 ± 130	1850 ± 150	2040 ± 160	—	—
V ₃	SEDIMENTOS CONSOLIDADOS	2670 ± 140	—	2560 ± 80	2800	2510 ± 240	—
V ₄	VELOCIDADES DEL BASAMENTO	4270 ± 280	4910 ± 300	—	5600±40	4700 ± 450	5030 ± 410

VALOR MEDIO DE LAS VELOCIDADES Y DESVIACIONES STANDARD - CUADRO 1

Los tres perfiles del extremo Este acusan una primera velocidad de 1.100 m/seg, que corresponde a la capa superficial de sedimentos marinos poco consolidados, exentos de agua. Hacia la profundidad hay un cambio de velocidad a 1.700 m/seg, que pertenece a una unidad que se prolonga hacia Puerto Aldea, formando la capa superficial de los perfiles ubicados en el lado occidental de la quebrada Pachingo. Esta capa corresponde a un sedimento arenoso saturado, puesto que en esta zona se encuentra agua a sólo 2 ó 3 m de profundidad. Debajo de la capa de 1.700 m/seg aparece un refractor de 2.600 m/seg, que se prolonga hacia el Oeste y se acuña fuertemente hacia el Este, como se indica en la figura 2. La forma en que este lente corta el basamento podría corresponder a un antiguo lecho de río. Según su velocidad de propagación de las ondas sísmicas, se trata de un conglomerado o material de aluvio cementado, o de una marga o arenisca. Pero la forma y reducida extensión de este lente y sobre todo el hecho de no haberse encontrado esta formación en el perfil Salinita, excluyen esta última posibilidad. Una velocidad de 2.600 m/seg aparece también en otros dos perfiles de la quebrada Pachingo. En los perfiles Limarí, este orden de velocidad corresponde a un conglomerado fluvial muy cementado y duro, lo que insinúa que el refractor encontrado en la playa y en la quebrada Pachingo sea de la misma naturaleza.

El refractor más profundo detectado en la línea *A* tiene una velocidad de 4.300 ± 300 m/seg y debe corresponder al basamento de la zona. Esta velocidad es más baja que la velocidad del basamento de 5.030 ± 410 m/seg, medida directamente en Puerto Aldea. Se explicaría esta discrepancia por la anisotropía de las rocas metamórficas que se traduce en una variación del comportamiento elástico según la dirección. Se observa en la figura 1 que la línea *A* es perpendicular a la estructura tectónica del bloque de los Altos de Talinay, mientras que el perfil de Puerto Aldea es paralela a ésta.

La pendiente del basamento hacia el Este, como lo revelan los perfiles del extremo de Puerto Aldea, indicaría una falla con un salto de 200 m, que coincide con el escarpe de la terraza de abrasión.

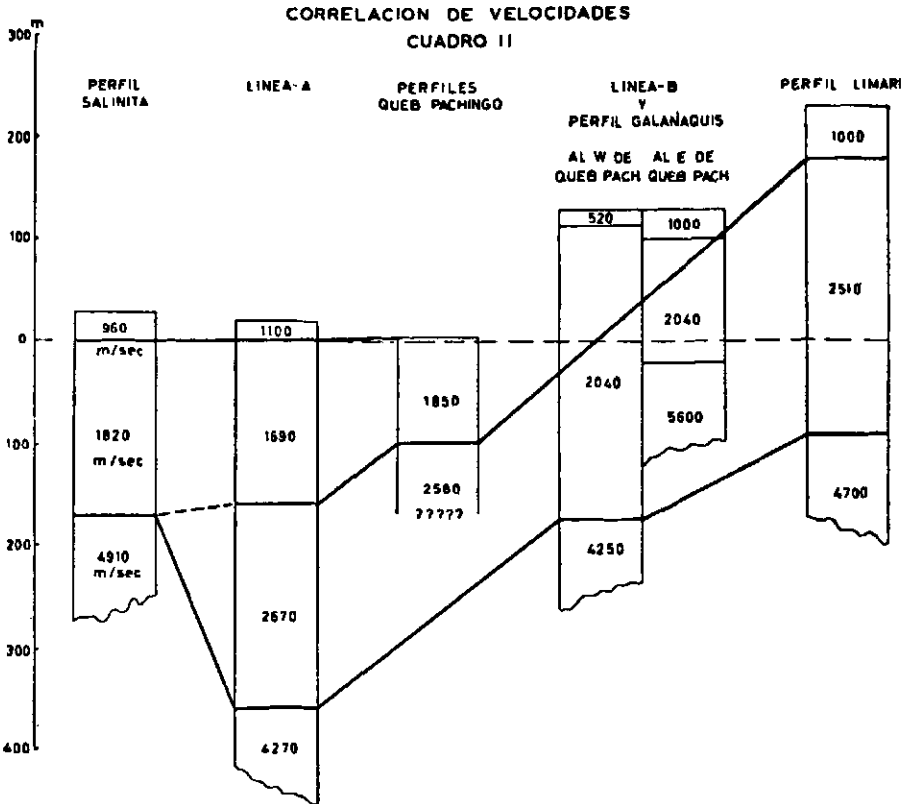
El cuadro 1 resume de una manera esquemática las velocidades medias, correspondientes a los refractores encontrados en los diferentes perfiles. Se ha calculado la desviación de estos valores medios y se encontró una variación máxima de 10%.

La primera velocidad V_1 , es bastante alta, comparada con el valor común (sólo en los perfiles de la línea *B* se encontró una velocidad menor de 520 m/seg). Esto se debe a la constitución de la capa superficial que está formada por sedimentos marinos, arenas finas con delgadas capas de rodados o mantitos de caliza-conchuela (línea *A*, perfiles de la quebrada Pachingo, perfil Salinita) o sedimentos fluviales, depósitos de pie de monte (perfil Limarí, línea *B*).

El refractor de velocidad V_2 correspondería en el perfil Salinita, en la línea *A* y en los perfiles de la quebrada Pachingo, a sedimentos marinos o fluviales de la zona saturada de aguas subterráneas.

El tercer refractor se atribuye en los dos últimos perfiles al lecho sepultado del río Limarí.

El cuadro II muestra la correlación establecida entre los distintos refractores encontrados. En la línea *B* y en el perfil Galanaquis se encontró la mayor profundidad del basamento en el lado occidental de la quebrada Pachingo en una ancha zona de pie de monte (no se logró detectar la roca fundamental en todos los



disparos). Esto induce a pensar que la falla observada en Puerto Aldea se prolonga por el pie de la cadena de los Altos de Talinay desplazando el basamento a profundidades del orden de los 250 m bajo el nivel del mar. Los refractores 2 y 3 encontrados en estos perfiles muestran variaciones en las velocidades sísmicas como consecuencia de la heterogeneidad de los depósitos de pie de monte. Los perfiles en la zona de Cerrillos, a lo largo del río Limarí, muestran que el basamento se encuentra por lo menos en parte bajo el nivel actual del río Limarí, lo que permitiría la descarga de sus aguas hacia el Norte.

CONCLUSIONES

1. El refractor encontrado en la costa a una profundidad media de 150 m debajo de la quebrada Pachingo corresponde, probablemente, a los depósitos de un antiguo curso del río Limarí.
2. Su velocidad de propagación de 2.600 m/seg hace suponer que se trata de sedimentos fluviales muy cementados del tipo de conglomerado de velocidad de 2.500 m/seg, que constituye las grandes terrazas cortadas por el río Limarí entre las localidades de Cerrillos y Barraza.
3. Debido a la excesiva consolidación de los depósitos de este lecho sepultado, éste no tendría la porosidad requerida para constituir un buen acuífero con una descarga importante hacia la zona costanera.

4. En la línea de la costa se encontró la máxima profundidad del basamento, 360 m en las vecindades de la quebrada Pachingo.
5. El basamento es más profundo en el lado occidental de la quebrada Pachingo que en el oriental, debido posiblemente a hundimientos a lo largo de fallas marginales que siguen por el pie de los Altos de Talinay.
6. El método sísmico de refracción es muy apropiado para estudiar el subsuelo con las características del área de Tongoy.

REFERENCIAS

- BORGEL, REINALDO; 1961. El interfluvio Elqui-Limarí. Descripción morfo-métrica y morfográfica del sector litoral. Instituto de Geografía, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- BRUGGEN, JUAN; 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Imprenta Instituto Geográfico Militar. Santiago de Chile.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS; 1960. Mapa Geológico de Chile, Escala 1 : 1.000.000. Santiago de Chile.
- TAYLOR, GEORGE, C.; 1947. The Tongoy Area. Informe inédito, Santiago de Chile.

