

NOTA SOBRE MEDIDAS DE GRAVEDAD EN EL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA DE SANTIAGO.

Mateo Dragicevic

Departamento de Geofísica. Universidad de Chile.
Casilla 2777, Santiago, Chile.

RESUMEN

Se presentan los resultados de la realización de varios perfiles de gravedad efectuados en la parte central de la cuenca de Santiago (Lo Prado, Pudahuel, Renca y San Cristóbal). Como conclusión principal, se tiene que en Rinconada Lo Aguirre la anomalía de gravedad es del mismo orden que en la parte central de la cuenca, indicando con ello un espesor sedimentario uniforme en tales zonas o un relleno sedimentario de densidad menor en Rinconada Lo Aguirre que en otros sectores de la cuenca.

El trabajo se basa, principalmente, en interpretaciones llevadas a cabo por alumnos en práctica de geofísica.

ABSTRACT

NOTE ON GRAVITY MEASUREMENTS AT THE CENTRAL ZONE OF THE SANTIAGO BASIN

Several gravity profiles were carried out in the Santiago basin central zone (Lo Prado, Pudahuel, Renca and San Cristóbal). The principal conclusion is referred to Rinconada Lo Aguirre where the gravity anomaly is of the same magnitude than in the basin central part, thus indicating a uniform thickness of the sedimentary deposits in such zones or a relatively low density of La Rinconada deposits.

Results are principally based on interpretations followed by students during geophysical practice work.

1. INTRODUCCION.

Desde 1958 el Departamento de Geofísica ha realizado medidas sísmicas, geoelectricas y gravimétricas en la Cuenca de Santiago. Los propósitos principales han sido:

- 1) Considerar a la Cuenca de Santiago como un laboratorio de geofísica experimental, para la enseñanza de la asignatura a los estudiantes de Geología e Ingeniería.
- 2) Contribuir al mayor conocimiento de la Cuenca, principalmente para complementar estudios de Hidrología e Ingeniería Civil.
- 3) La utilización, como "corrección geológica", del conocimiento de la Geología local aportado por la prospección geofísica en estudios de modelos más elaborados de la corteza terrestre y manto superior en el área del país más controlada por instrumentos geofísicos. (Redes de estaciones sismológicas, extensómetros, etc.).

De las numerosas observaciones ejecutadas, se eligieron para este informe las medidas gravimétricas efectuadas en la franja comprendida entre el túnel de Lo Prado y el Cerro San Cristóbal, área de fácil acceso que permitió controlar rápidamente las mediciones.

2. DESCRIPCION DE PARTE DE LA INFORMACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DE SANTIAGO.

La Cuenca de Santiago, límite norte de la gran depresión longitudinal, es la zona con el mayor número de estudios hidrológicos en el Valle Central. El relleno sedimentario de la cuenca cubre un área de 2360 Km² y los cerros islas un área adicional de 110 Km².

El sondaje más profundo ejecutado en la cuenca alcanza a 432 metros sin cortar el basamento rocoso. Del estudio de este pozo ubicado en Pudahuel Emparón (cit. en Sánchez, 1967) concluye:

- 1) En la zona occidental de la cuenca habría existido una cuenca de ambiente lacustre intermitente.
- 2) Hay tres horizontes con varves glaciales a 154, 260 y 390 metros de profundidad, lo que indica el avance de los hielos hasta la cuenca.
- 3) Hay tres horizontes con cenizas volcánicas 20-40, 123-125 y 225-228 metros, que atestiguan la influencia del vulcanismo.
- 4) En el relleno de la cuenca se han alternado condiciones de climas fríos (glaciales) y cálidos húmedos.

Kausel (1959), por estudios gravimétricos, estima que el espesor de los sedimentos en los alrededores de la ciudad de Santiago es del orden de 400 metros.

Desde 1966 a la fecha (1981), el consumo de agua en Santiago se ha duplicado, siendo el gasto actual de 1.700.000 m³ diarios (20 m³/seg). (Karzulovic, comunicación verbal); 1/3 de esta cantidad proviene de captación de aguas subterráneas, los 2/3 restantes son proporcionados por fuentes superficiales, principalmente el río Maipo.

Hasta 1970 se habían perforado en la cuenca alrededor de 866 pozos, que en conjunto representan aproximadamente 60.000 metros de sondaje. La mayoría tiene una profundidad entre 30 y 110 metros, con un promedio de 69 metros.

Los horizontes productores de agua subterránea se encuentran a profundidades decrecientes de Este a Oeste, 100 a 135 metros en la parte Este y 10 a 20 metros en el extremo Oeste.

La intensa extracción de agua subterránea no ha producido variaciones considerables del nivel freático en las partes alejadas del centro de la ciudad, donde el consumo industrial y agrícola es elevado; en cambio, en el centro de Santiago, se ha observado un continuo descenso del nivel freático, que en algunos casos llega a 1 (metro/año). Este fenómeno ha sido atribuido al mayor consumo y al alejamiento de los centros de recarga, aunque probablemente sea un factor importante el que gran parte del centro de la ciudad se encuentre ubicada en el área de menor espesor sedimentario (Fig. 1 y 2).

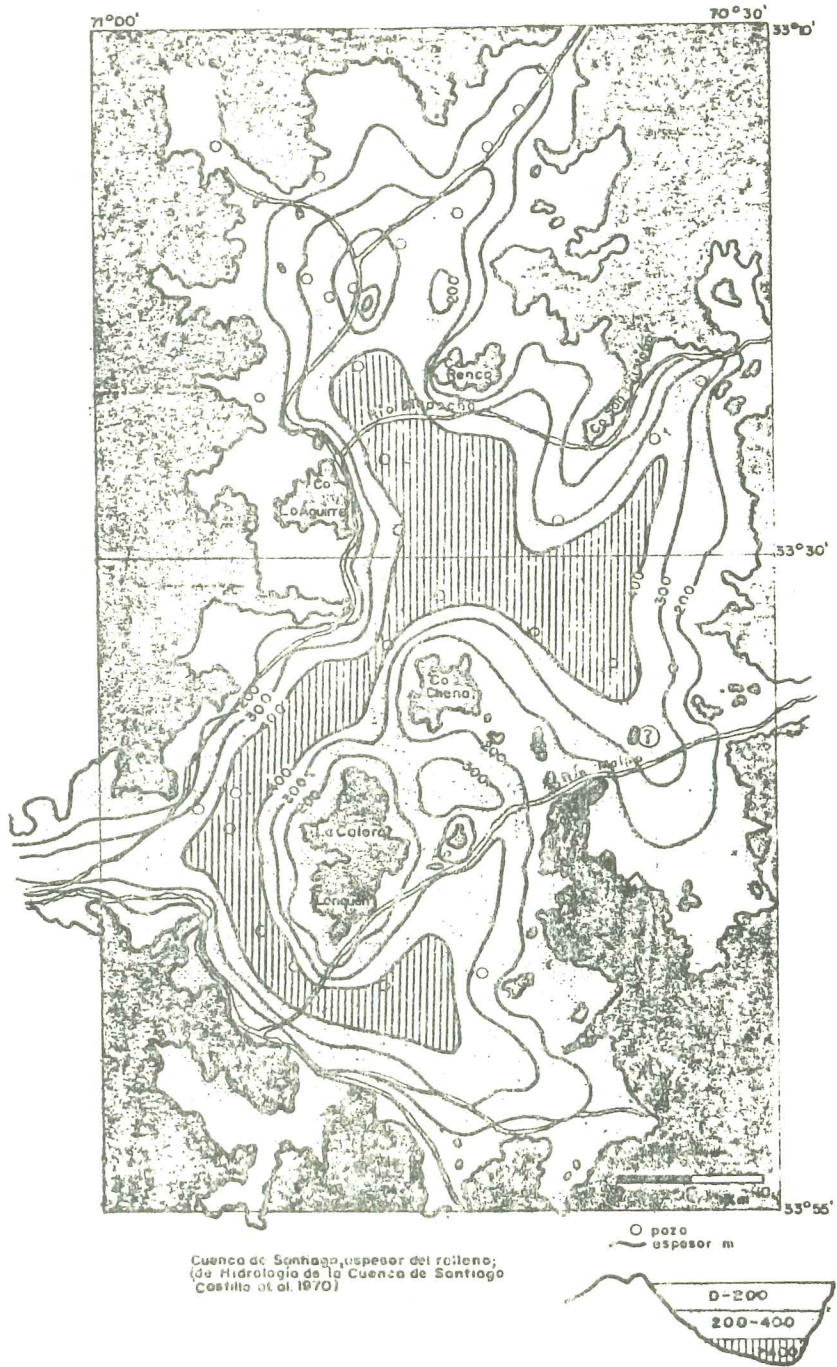


Fig. 1 Espesor del relleno en la Cuenca de Santiago (de Castillo et al., 1970).

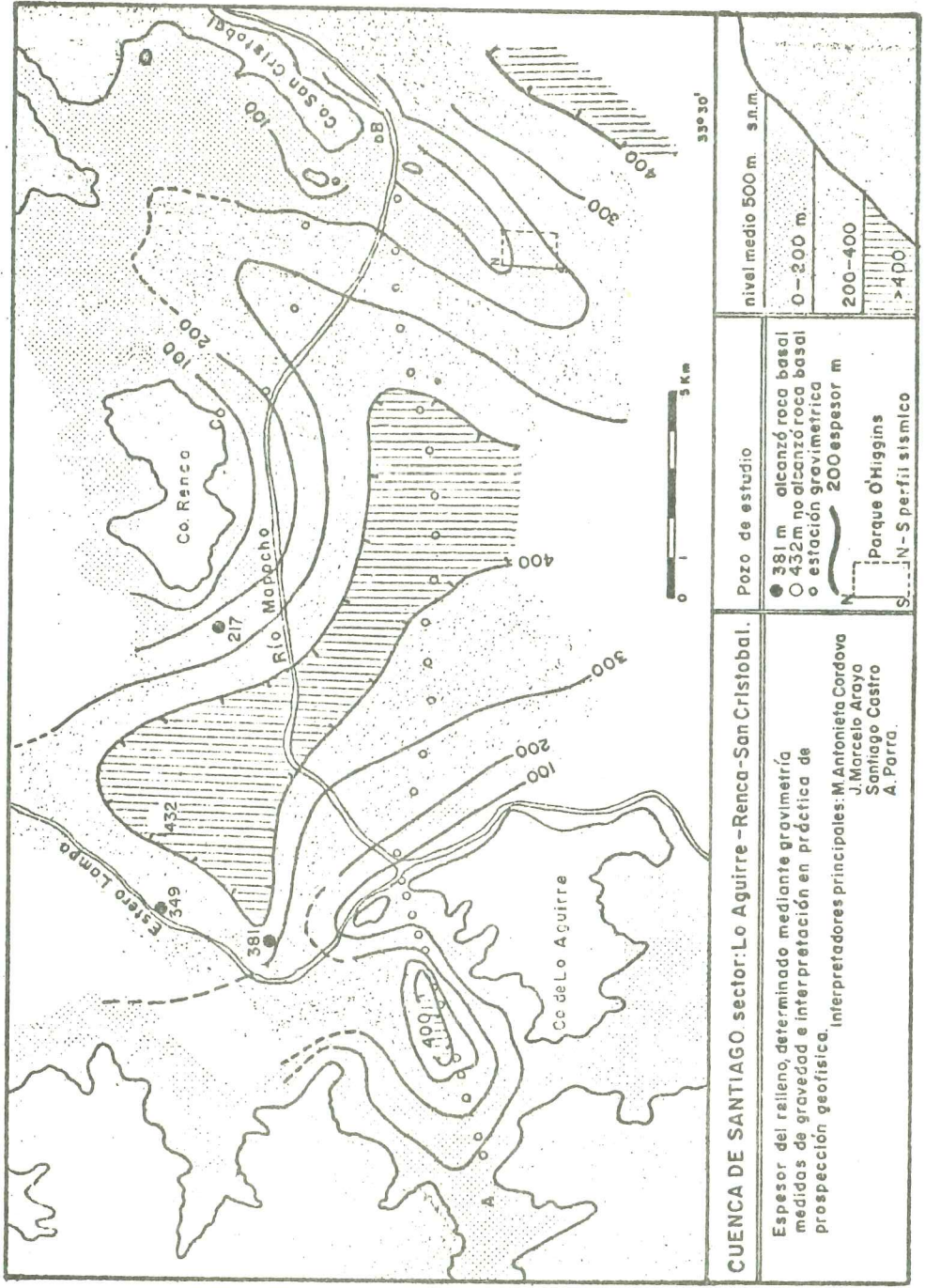


Fig. 2 Esesor del relleno en la Cuenca de Santiago (sector Lo Aguirre - Renca - San Cristóbal) determinado por estudios gravimétricos.

El coeficiente de rendimiento específico, o cantidad de agua que pueden ceder los sedimentos es del orden del 10%, en las áreas de espesores mayores, estimándose que estas regiones cubren una superficie de 1400 Km² (Castillo et al. 1970). Suponiendo un espesor promedio de los sedimentos de 150 metros (aproximación por defecto y a ojo del autor), se tendría que la cantidad de agua almacenada en la cuenca es de $(1400 \cdot 10^6 \cdot 0.1 \cdot 150) \text{ m}^3 = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$, es decir, el consumo de Santiago (doméstico e industrial) durante 33 años.

3. MEDIDAS.

Las medidas de gravedad se tomaron con un gravímetro Worden (facilitado por ENAP) y un Lacoste Romberg G 411 del Departamento de Geofísica. La continua repetición de observaciones, ejecutadas por distintos grupos de alumnos, dieron por resultado series de observaciones con errores probables muy bajos; los circuitos gravimétricos recorridos en menos de dos horas permitieron un control más que adecuado de la deriva instrumental, resultando una calidad de las observaciones gravimétricas superior a la necesaria para este tipo de reconocimiento. No ocurrió lo mismo en la determinación de la elevación de las estaciones; a pesar del uso de altímetro Paulin de precisión, del establecimiento de una estación registradora de precisión (barógrafo) y de la continua repetición de observaciones, fue difícil obtener errores menores que uno o dos metros en la determinación de la elevación de las estaciones. Las discrepancias entre observadores o grupo de observadores fueron frecuentes, debido probablemente a que gran parte de las medidas se hacían en horas de mayor cambio de presión (alrededor del mediodía), al manejo personal, paralaje, etc.

Mediante el odómetro del vehículo se determinaron las distancias entre las estaciones, controlándose su ubicación en las cartas 1:50.000 del I.G.M. (Instituto Geográfico Militar). No fue necesario emplear un método más preciso, ya que el objeto del reconocimiento gravimétrico no era el estudio de detalles menores, cuestión casi imposible empleando nivelación barométrica.

4. REDUCCION DE OBSERVACIONES Y METODO DE CALCULO.

La reducción de observaciones gravimétricas se ejecutaron en la forma usual:

- Corrección combinada aire-libre-Bouguer = 0.2208 mgal/m (correspondiente a una densidad superficial de 2.1 gr/cm³).
- Corrección de latitud = 0.75 mgal/Km (paralelo de referencia 33°30').
- Corrección topográfica: mediante plantilla y tabla de Hammer.

PERFIL GRAVIMETRICO LO PRADO - SANTA LUCIA

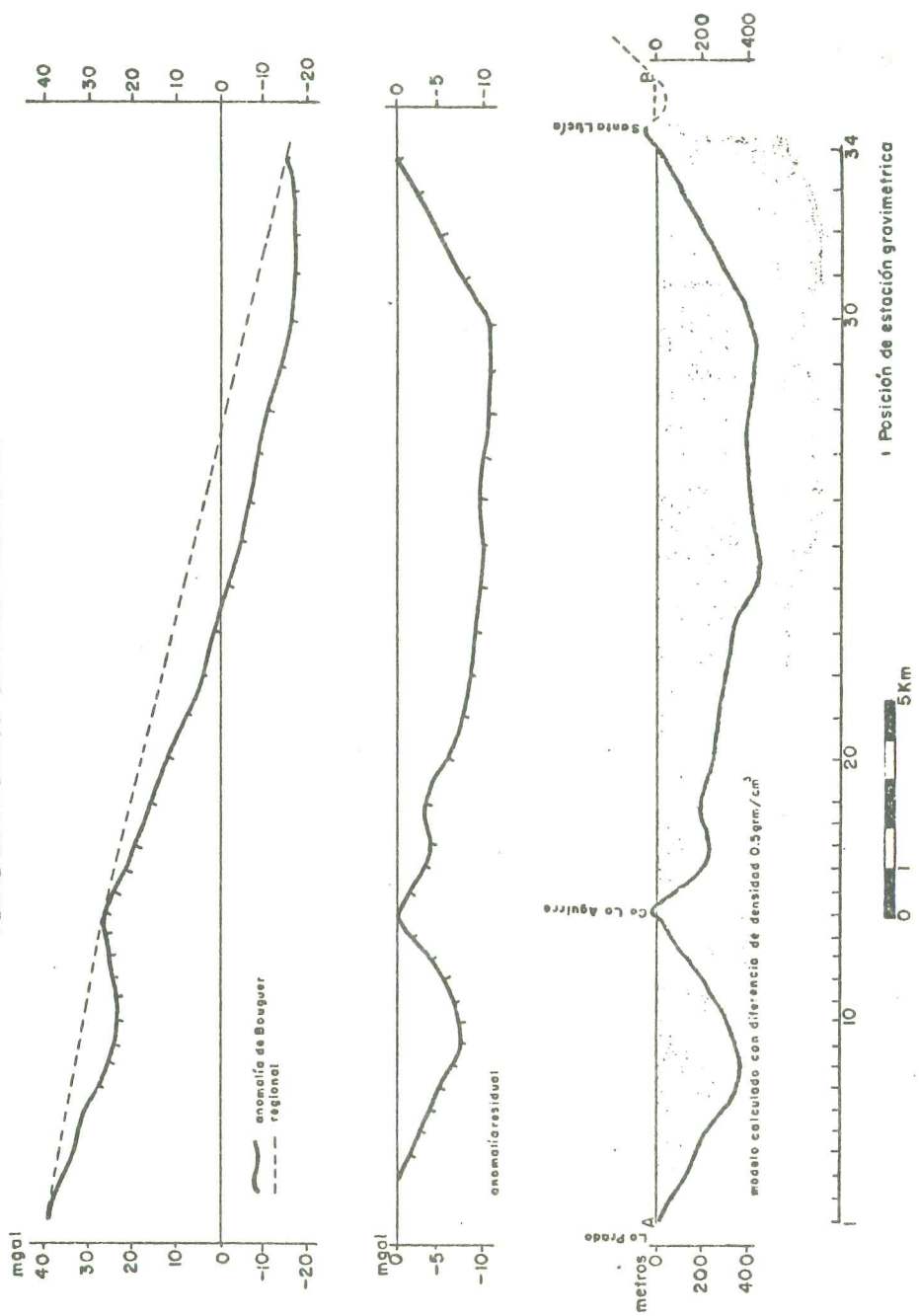


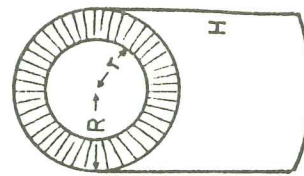
Fig. 3 Anomalías de gravedad en el Perfil Lo Prado - Santa Lucía y modelo calculado con $|\Delta\rho| = 0.5 \text{ gm/cm}^3$.

TABLA 1. Efecto gravitacional de cada uno de los "sectores" de anillos cilíndricos
 coaxiales (A-I) de espesor \bar{H} en un punto central.

$$g = 2\pi k\rho(R-r+\sqrt{(\bar{H})^2+r^2}-\sqrt{(\bar{H})^2+R^2})$$

 Densidad = $\rho=1$ gr/cm³

Compartim. metros	A 4	P 4	C 6	A+B+C 6	D 8	E 8	F 10	G 12	H 14	I 16
$\frac{F_{Gaal}}{100}$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$	$\bar{H}(m)$
0	0-1	0-4	0-7	0-11	0-18	0-33	0-49	0-69	0-130	0-196
1	1-2	4-7	7-13	1-22	18-32	33-53	49-85	69-120	130-224	196-339
2	2-3	7-11	13-17	2-4	32-41	53-70	85-112	120-157	224-291	339-438
3	3-4	11-14	17-20	4-5	41-50	70-84	112-133	157-185	291-344	438-518
4	4-6	14-17	20-23	5-7	50-57	84-96	133-149	185-209	344-390	518-588
5	6-8	17-20	23-26	7-8	57-64	96-107	149-166	209-232	390-432	588-651
6	8-12	20-25	26-29	8-10	64-70	107-117	166-181	232-252	432-470	651-708
7	12-17	25-29	29-33	10-12	30-36	117-126	181-196	252-272	470-505	708-761
8	17-25	29-33	33-36	12-13	36-82	126-136	196-209	272-289	505-538	761-811
9	25-53	33-40	36-39	13-15	82-88	136-144	209-222	289-308	538-570	811-857
10		20-385	26-56	8-25	64-120	107-189	166-285	232-389	432-773	
20			56-97	25-46	120-180	189-265	285-386	389-513		
30			97-173	46-76	180-256	265-338	386-478	513-618		
40			173-441	76-123	256-365	338-421	478-571	618-716		
50				123-225	365-553	421-517	571-666	716-808		
60				225-721	553-1000	517-634	666-767	808-893		
70						634-785	767-876	893-980		
80						785-994	876-990			



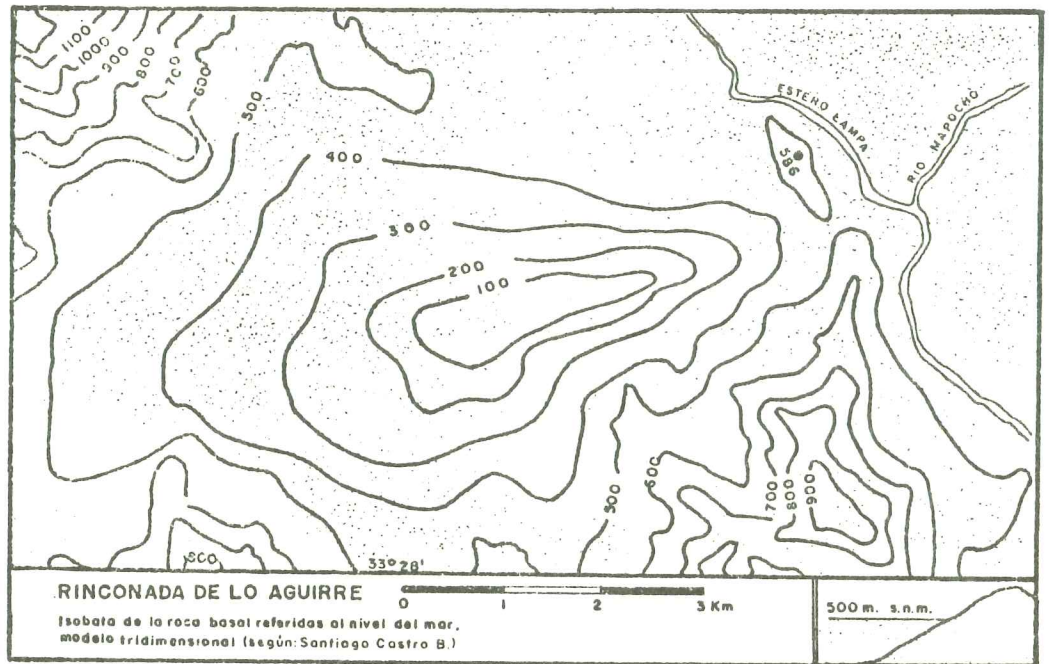


Fig. 4 Modelo tridimensional del Sector Rinconada Lo Aguirre. Isobatas del basamento referidas al nivel del mar (según Santiago Castro).

El cálculo del perfil teórico bidimensional, Figs. 3 y 5 se hizo mediante plantilla de Integración gráfica (Hubbert, 1948) y en la estimación tridimensional (Figs. 2 y 4) se empleó una plantilla basada en el mismo principio que el usado en la corrección topográfica. La plantilla de material transparente consiste en una serie de círculos concéntricos con líneas radiales que lo divide en sectores (Fig. 6); el centro de la plantilla es colocado sobre el punto donde se desea calcular el efecto gravitacional. Apareciendo el espesor medio \bar{H} de cada sector, la Tabla I da el efecto gravitacional del sector en función de \bar{H} . Sumado el efecto gravitacional de los distintos sectores, se tiene el efecto gravitacional total en el punto central.

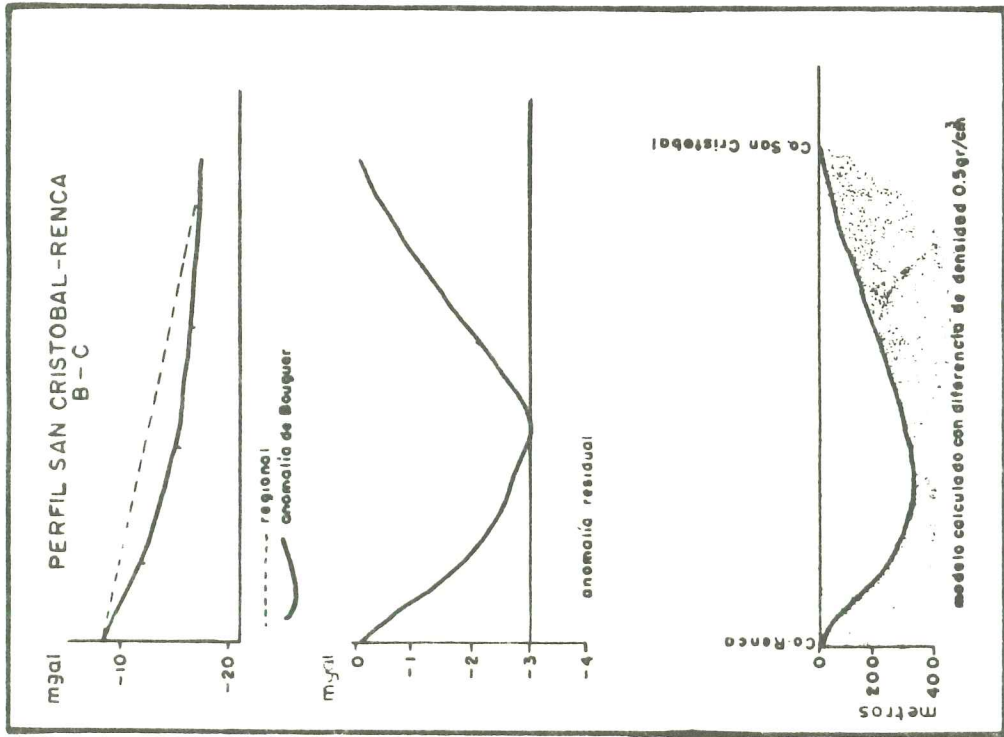


Fig. 5 Anomalías de gravedad en el Perfil San Cristóbal - Renca y modelo calculado con $|\Delta\rho| = 0.5 \text{ gm/cm}^3$.

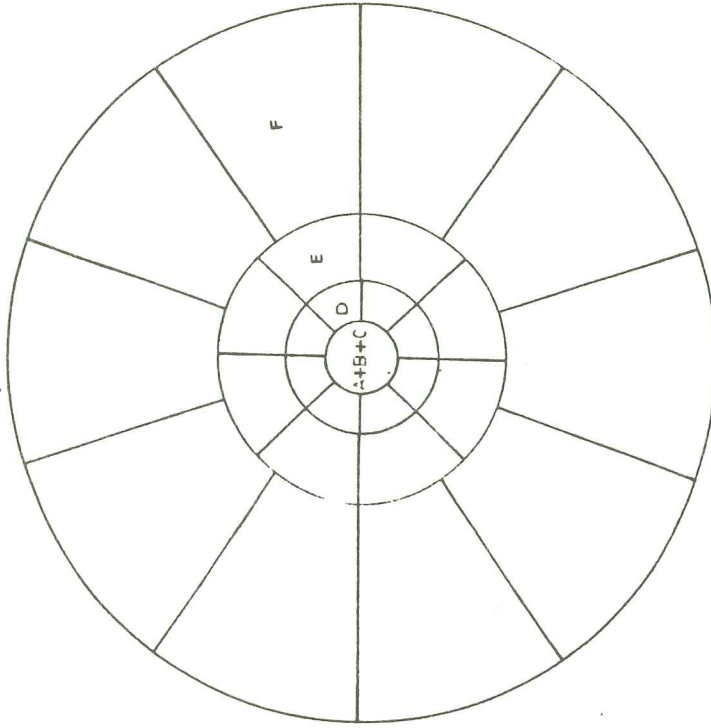


Fig. 6 Esquema de la plantilla empleada para las estimaciones tridimensionales expuestas en las Figs. 2 y 4.

La estimación del tamaño de los anillos se hizo mediante algunos tanteos de manera que, sin ser estos demasiado pequeños, asegurara una precisión adecuada; se utilizó la fórmula de la atracción gravitacional de un anillo cilíndrico, sobre un punto ubicado en el centro de su cara plana: $g=2\pi K\rho(R-r+\sqrt{H^2+r^2} - \sqrt{H^2+R^2})$.

Este método que parece lento y laborioso, resultó rápido, fácil, de precisión aceptable y recomendable por su flexibilidad.

5. RESULTADOS.

1) La depresión del basamento en el sector de Rinconada de Lo Aguirre es del mismo orden que en el centro de la cuenca (Fig. 3), resultado no esperado, ya que siempre se la consideró como un área rodeada de cerros con basamento poco profundo. Podría disminuirse el espesor calculado para los sedimentos aumentando el contraste de densidades, aunque el valor de 0.5 gr/cm^3 utilizado, es ya bastante elevado. Aumentarlo significaría un sector con relleno sedimentario de baja densidad (cenizas volcánicas, piedra pómez), distinto al resto de la cuenca. Se supone en estos casos que la densidad de la roca basal en La Rinconada no varía notablemente.

La posible presencia de estratos sedimentarios potentes de baja densidad, tendría que ser tomada en cuenta en estudios de ingeniería antisísmica, si se considera la probable expansión de la ciudad hacia esa área.

Hay una diferencia entre las interpretaciones gravimétricas de las Figs. 2 y 4; en esta última, la parte N.E. se encuentra cerrada o desconectada del resto de la cuenca, en cambio, en la Fig. 2, aparece abierta o unida a la cuenca principal. Desde el punto de vista gravimétrico, ambas interpretaciones serían equivalentes, ya que por dificultades de terreno no se observaron puntos en la franja que va desde el Cerro Amapola (586 m) y la saliente del cordón occidental. Se deja este sector para un futuro ejercicio geofísico.

2) La barrera interpuesta por la prolongación subterránea del cordón San Cristóbal-Santa Lucía, que divide el sector Norte del Sur de la cuenca (Fig. 2), ha sido estudiada detalladamente por Kausel (1959) y comprobada una decena de veces en ejercicios de práctica de geofísica, no porque se tuviera dudas sobre las anteriores interpretaciones, sino porque es un área de rápido acceso y cuyo centro se ubica casi en la misma Escuela de Ingeniería. No se incluyen esas observaciones en este informe.

Aprovechando la remodelación del Parque O'Higgins, se ejecutaron dos disparos sísmicos de refracción (Figs. 7a y 7b) con una distancia relativa de 1000 metros (Sanhueza, 1969). Se aprecia que los resultados concuerdan con la interpretación gravimétrica, aunque no debiera ser así. La poca diferencia entre las velocidades aparentes sugiere un basamento con pendiente menor a un grado; en cambio, la gravimetría entrega una pendiente de 5 grados. Se impone una revisión de la información sísmica. La alta velocidad de las capas intermedias, 1750 m/seg y 2650 m/seg, sugiere un aumento de la densidad con la profundidad, que es de esperar. La diferencia de densidad usada en la interpretación ($|\Delta\rho| = 0.5 \text{ gr/cm}^3$) podría ser un tanto elevada. Una disminución del contraste de densidad en un 20% ($|\Delta\rho| = 0.4 \text{ gr/cm}^3$), provocaría un aumento del espesor calculado en un 25%.

Q) PERFIL SISMICO DE REFRACCION
PARQUE O'HIGGINS

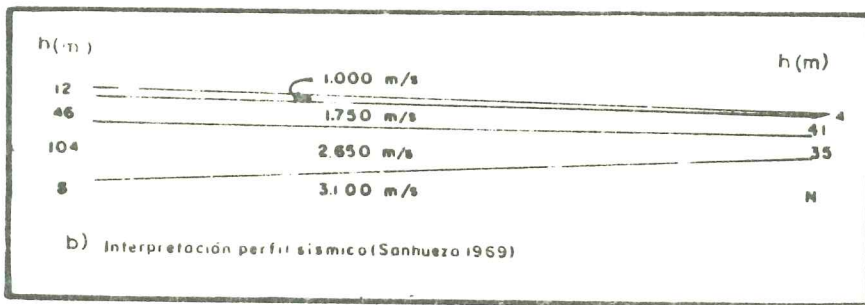
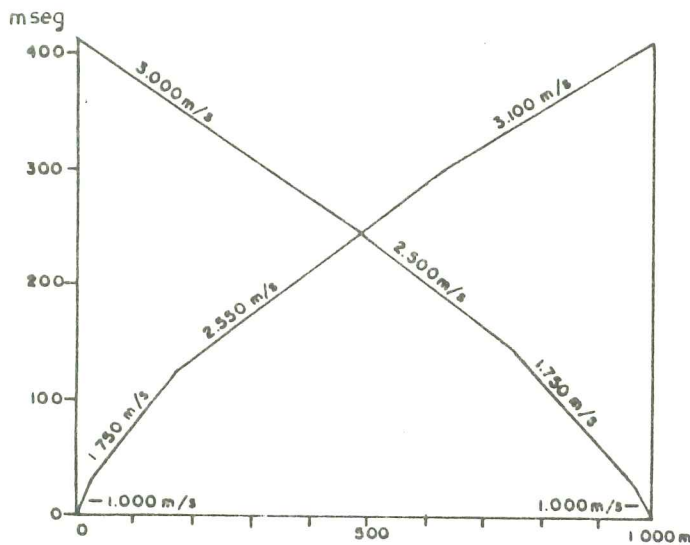


Fig. 7 a) Curvas camino-tiempo correspondientes a dos disparos en perfil sísmico de refracción -Parque O'Higgins.
b) Interpretación perfil sísmico. Espesor de los estratos y velocidad de propagación de las ondas sísmicas longitudinales.

3) Las curvas isobatas, isopacas y perfiles gravimétricos, calculados con densidad uniforme para toda el área, reflejan los rasgos mayores de basamento. Estudios gravimétricos más detallados en el área comprendida entre los Cerros Santa Lucía y San Cristóbal, presentan anomalías locales debidas principalmente a variaciones de densidad entre las rocas basales (el sector vecino al Cerro Santa Lucía tendría densidad mayor). Un estudio detallado requiere un levantamiento gravimétrico con apoyo topográfico, especialmente nivelación geométrica (de 2° o 3er. orden es suficiente). Más interesante es el sector indicado con (?), ubicado a 5 Km al NE del Cerro Los Ratones (Fig. 1). Puede apreciarse que entre las curvas de espesores 300 y 400 metros aparece un afloramiento de las rocas basales (Cerro Las Cabras, 736 m), mostrando una vez más que la topografía subterránea de la roca basal de la cuenca de Santiago es muy irregular. Está demás decir que el plano base del año 1970 representa en buena forma las variaciones mayores de la topografía subterránea.

4) Son numerosos los ejercicios de geofísica, principalmente de sísmica de refracción, efectuados en áreas pequeñas y de escasa penetración (fundaciones de edificios y otros). Trabajos más generales (Hidrología, por ejemplo), tomados como práctica de geofísica, son de relativo alto costo, y casi no es posible llevarlos a cabo en áreas pobladas debido a la necesidad de perforaciones y al uso de explosivos. El método eléctrico de resistividad presenta en este caso dificultades menores; en cambio, para los reconocimientos generales y a veces en estudios de detalles, la ventaja de la gravimetría es clara.

Suponiendo medidas tomadas en un área de espesor sedimentario cercano al valor máximo para Santiago (400 metros) y una muy sencilla distribución de estratos (Fig. 8), en las Figs. 9a y 9b se compara el método sísmico de refracción con el método de resistividad.

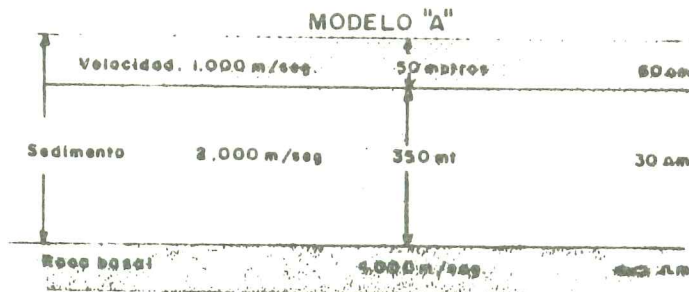
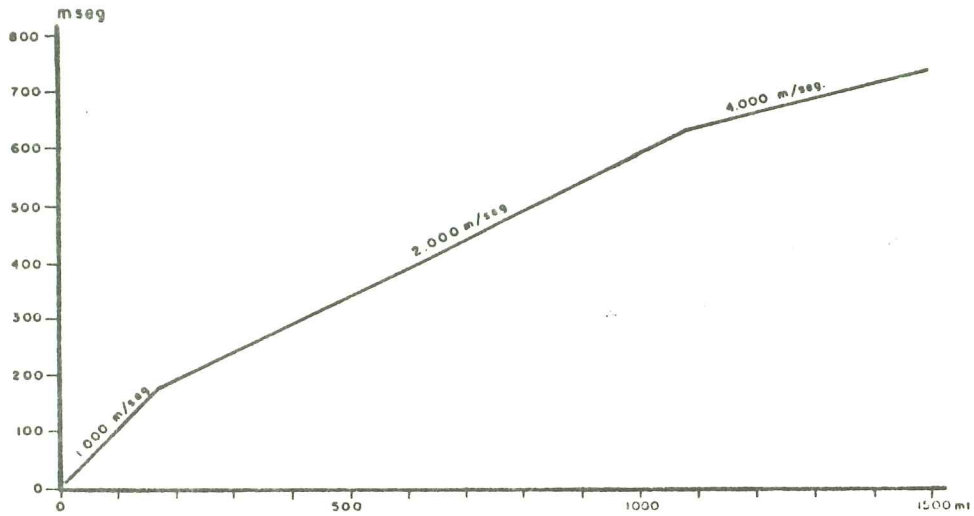


Fig. 8 Modelo de distribución de estratos, con características de propagación de ondas y de resistividad señaladas, efectuado para estudiar la conveniencia de uno u otro método de exploración geofísica.

a) PERFIL SISMICO DEL MODELO "A"



b) PERFIL ELECTRICO (Schlumberger) DEL MODELO "A"

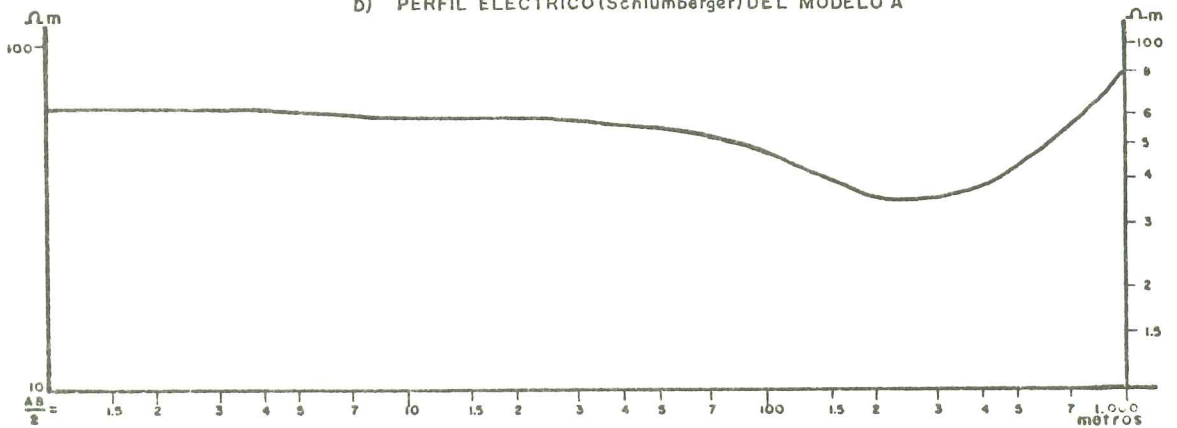


Fig. 9 a) Perfil sísmico del modelo "A". En sismología de refracción, para cubrir la distancia de 1500 m, generalmente se debe hacer explotar una carga de dinamita superior a 5 Kg.

b) Perfil eléctrico (Schlumberger) del modelo "A". El perfil eléctrico exigiría un tendido de cables (AB) del orden de 2000 m para asegurar el registro en la rama ascendente final.

Cada método de exploración mide diferentes propiedades físicas del medio considerado, y la utilización de dos o más sistemas de prospección para una misma área provee una poderosa combinación de herramientas de exploración.

La ventaja de usar uno u otro método depende de muchos factores y su discusión abultaría mucho esta nota.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- CASTILLO O., FALCON E., VALENZUELA M., 1970: "Hidrología de la Cuenca de Santiago", Instituto de Investigaciones Geológicas, Publ. especial N°3, 46 p., 21 mapas.
- DRAGICEVIC M., 1970: Carta gravimétrica de América del Sur e interpretación de las anomalías de gravedad de Chile Central, Depto. de Geofísica, Univ. de Chile, Publ. N° 93, 42 p.
- HUBBERT M., 1948: A line-Integral Method of Computing the gravimetric effects of two-dimensional masses. Geophysics, Vol. 13, N° 2, pp. 215-225.
- KARZULOVIC J., 1957-58: "Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la Cuenca de Santiago", Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Univ. de Chile, Vol. 14-15, pp. 5-120.
- KAUSEL E., 1959: Estudio gravimétrico en la Cuenca de Santiago". Memoria Escuela de Ingeniería, Univ. de Chile, 104 p.
- SANCHEZ A., 1967: "Control estratigráfico en sondajes eléctricos en Cuenca de Santiago". Memoria Escuela de Geología, Univ. de Chile, 147 p.
- SANHUEZA P., 1969: "Instalación de una red de acelerógrafos en Chile". Memoria Escuela de Ingeniería, Univ. de Chile, 101 p.