

**GRAVIMETRIA DEL VALLE DE MANEADERO-CHAPULTEPEC,
ENSENADA, B.C., CON APLICACION A LA GEOHIDROLOGIA**

**GRAVIMETRY OF THE MANEADERO-CHAPULTEPEC VALLEY,
ENSENADA, B.C., WITH APPLICATION TO GEOHYDROLOGY**

Arturo Cruz Falcón ¹
Rogelio Vázquez González ²

¹ Secretaría de Marina
Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada, B.C.
Vicente Guerrero 133-Altos, Fracc. Bahía
Ensenada, Baja California, México

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
División Ciencias de la Tierra
Apartado Postal 2732
Ensenada, Baja California, México

Cruz Falcón, A. y Vázquez González, R. Gravimetría del Valle de Maneadero-Chapultepec, Ensenada, B.C., con aplicación a la geohidrología. Gravimetry of the Maneadero-Chapultepec Valley, Ensenada, B.C., with application to geohydrology. *Ciencias Marinas*, 15(4):21-38, 1989.

RESUMEN

Se realizó un estudio gravimétrico en el Valle de Maneadero-Chapultepec, utilizando un total de 250 estaciones. Se estimó la profundidad al basamento en toda el área, con la anomalía residual obtenida considerando al regional como un plano inclinado, y un contraste de densidad de $0.6\text{gr}/\text{cm}^3$. Se aplicó la fórmula para la estimación de la gravedad en un punto sobre una capa horizontal de extensión infinita. Las estimaciones concuerdan con los resultados obtenidos por el modelaje directo de estructuras bidimensionales e inversión de datos, y coinciden aproximadamente con las calculadas anteriormente, en la parte sur del área de estudio, por Pohle (1977) y Fabriol *et al.* (1982). Se hace un cálculo de la capacidad de almacenamiento de agua de la cuenca, por diferencia de volúmenes, asignando una porosidad promedio de 15% al paquete sedimentario y una profundidad media de 6.5m al nivel freático del área.

ABSTRACT

A gravimetric study was made in the valley of Maneadero-Chapultepec, using a total of 250 stations. The depth to the basement was estimated in all the area, with the residual anomaly obtained by considering the regional as an inclined plane and a density contrast of $0.6\text{gr}/\text{cm}^3$. The formula for the estimation of gravity in a point above a horizontal layer of infinite extension was applied. The estimations agree with the results obtained from the direct modelling of two-dimensional structures and inversion of data, and coincide approximately with the calculations made before, to the south of the study area, by Pohle (1977) and Fabriol *et al.* (1982). The capacity of water storage of the basin was calculated by volume difference, assigning an average porosity of 15% to the sedimentary package and an average depth of 6.5m to the phreatic level of the area.

INTRODUCCION

La región de Ensenada, B.C., presenta varios escurrimientos fluviales superficiales, siendo todos ellos intermitentes, dentro de los que destacan el Arroyo Ensenada que atraviesa el Puerto de Ensenada en dirección NE-SO, el Arroyo San Miguel al norte de Ensenada, el Arroyo El Gallo hacia el sur, el Arroyo San Carlos que atraviesa el Valle de Maneadero de este a oeste, el Arroyo El Zorrillo y Las Animas al sur del Valle de Maneadero, B.C. (Fig. 1). El aprovechamiento más importante de estos arroyos es la captación de agua del Arroyo Ensenada por medio de la presa Emilio López Zamora, con una capacidad útil de cuatro millones de metros cúbicos, sin embargo, son las aguas subterráneas las que satisfacen el abastecimiento en la región, explotándose actualmente el acuífero de la zona de Ensenada y de Maneadero-Chapultepec; habiendo provocado, según datos proporcionados por la SARH (en SEDUE, 1980), que el acuífero de la región se encuentre sobreexplotado, ya que ha crecido la demanda por parte de la población, motivando descensos continuos del nivel estático y por consecuencia intrusión salina en los pozos cercanos a la costa, incluso algunos pozos se han clausurado debido a la contaminación por sales.

Se hace importante que las autoridades establezcan medidas para evitar la contaminación de los acuíferos, provocada principalmente por su sobreexplotación, así como realizar estudios geohidrológicos y geofísicos de los acuíferos conocidos, para conocer el potencial acuífero de la región, detectar contaminación por intrusión salina, y localizar nuevas zonas de explotación.

OBJETIVOS

Estimar la profundidad al basamento rocoso y calcular la capacidad de almacenamiento de agua de la cuenca del Valle de Maneadero-Chapultepec.

ESTUDIO GRAVIMETRICO

Características geológicas

La zona presenta dos rasgos topográficos importantes; en su parte norte sobresale el

INTRODUCTION

There are several intermittent surface streams in the region of Ensenada, Baja California, Mexico, among which are the Arroyo Ensenada which crosses Ensenada in a NE-SW direction, Arroyo San Miguel to the north of Ensenada, Arroyo El Gallo towards the south, Arroyo San Carlos which passes through the Maneadero Valley from east to west, Arroyo El Zorrillo and Arroyo Las Animas to the south of Maneadero Valley, B.C. (Fig. 1). Water is harnessed from the Arroyo Ensenada through the Emilio López Zamora dam, with a useful capacity of four million cubic metres. However, it is the subterranean waters which meet the area's water supply. The aquifer of the Ensenada and Maneadero-Chapultepec zone is at present being exploited, to the extent of being over-exploited according to data provided by SARH (in SEDUE, 1980). The demand for water by the population has increased causing a continuous decrease in the static level and, consequently, the intrusion of salts in wells close to the coast. Some wells have even been closed due to the contamination by salts.

It is imperative that the authorities take steps to ensure that aquifers do not become contaminated, mainly due to overexploitation. Geohydrological and geophysical studies of known aquifers should also be carried out in order to know the region's water potential, detect the contamination by salts and locate new zones which could be exploited.

OBJECTIVES

The main objectives of this study are to estimate the depth to the rocky basement and to calculate the water storage capacity of the basin of the Maneadero-Chapultepec Valley.

GRAVIMETRIC STUDY

Geological characteristics

The region has two important topographic features. In the northern part, the "scarp" of the Arroyo San Carlos stands out, with an approximate E-W direction and maximum slope of 30m. It is known as the Arroyo San Carlos "Fault" (Secretaría de Marina, 1974). In the extreme southwest lies

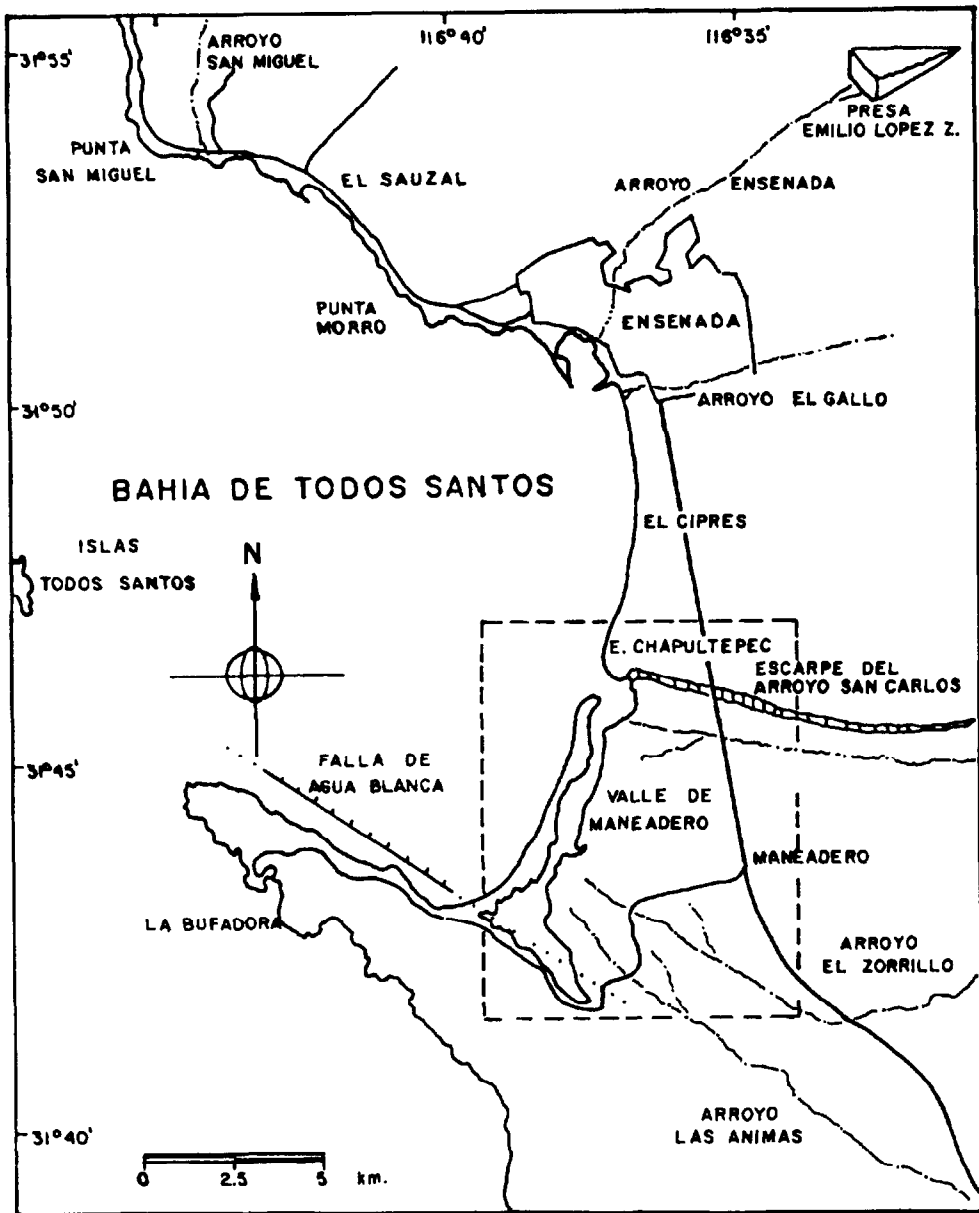


Figura 1. Localización del área de estudio. Se muestran los centros de población y los principales escurrimientos fluviales.

Figure 1. Location of the study area. The centres of population and main streams are shown.

"escarpe" del Arroyo San Carlos, con rumbo casi E-O y desnivel máximo de 30m, el cual es conocido como "Falla" del Arroyo San Carlos

the region's most important structure, known as the Agua Blanca Fault, with a N50°E direction (Fig. 1).

(Secretaría de Marina, 1974); y al extremo SO se extiende la prominencia estructural más importante de la región, conocida como Falla de Agua Blanca, con rumbo N 50° E (Fig. 1).

Existen rocas prebatolíticas volcánicas del Mesozoico en casi toda el área, constituidas principalmente por brechas de dacita y andesita, dacita tufacea, riolita, brechas andesíticas y esquistos; rocas batolíticas, básicamente rocas graníticas del Cretácico compuestas principalmente por tonalita y granodiorita, que afloran como intrusivos sólo en algunas partes; y rocas postbatolíticas sedimentarias que existen en la formación Rosario del Cretácico Superior, la cual cubre a la formación Alisitos (Pohle, 1977). La formación Rosario consiste de una variedad de clastos sedimentarios que va de conglomerados a lutitas. Los materiales que conforman el valle son depósitos fluviales, aluviales y de playa (Fig. 2).

Levantamiento gravimétrico

Se realizó un levantamiento gravimétrico con un total de 250 estaciones, al sur del Puerto de Ensenada, B.C., en la zona conocida como Valle de Maneadero-Chapultepec (Fig. 3). Se cubrió un área de 51km², que junto a un levantamiento previo (Vázquez-González, 1980) se alcanzó alrededor de los 80km². Se utilizó el gravímetro La Coste y Romberg Modelo G#599, el cual permite una precisión en las lecturas de ± 0.01 miligales. Todas las estaciones gravimétricas fueron referidas a la estación perteneciente a la red latinoamericana de estaciones de gravedad absoluta, localizada en el monumento a Hidalgo, ubicado entre las calles Ruíz, Uribe y Ryerson de la ciudad de Ensenada.

Procesamiento de datos

Se hicieron las correcciones a los datos del levantamiento gravimétrico, siguiendo las especificaciones del manual del gravímetro, se corrigió por deriva, latitud, elevación (aire libre y Bouguer), y topografía. Se utilizaron densidades de 1.8gr/cm³ para el sedimento seco superficial, 1.97gr/cm³ para el aluvión saturado, y 2.57gr/cm³ para el basamento (Cruz-Falcón, 1986). Se elaboró una rejilla con los datos; luego se obtuvo el plano de anomalía de Bouguer; y posteriormente el

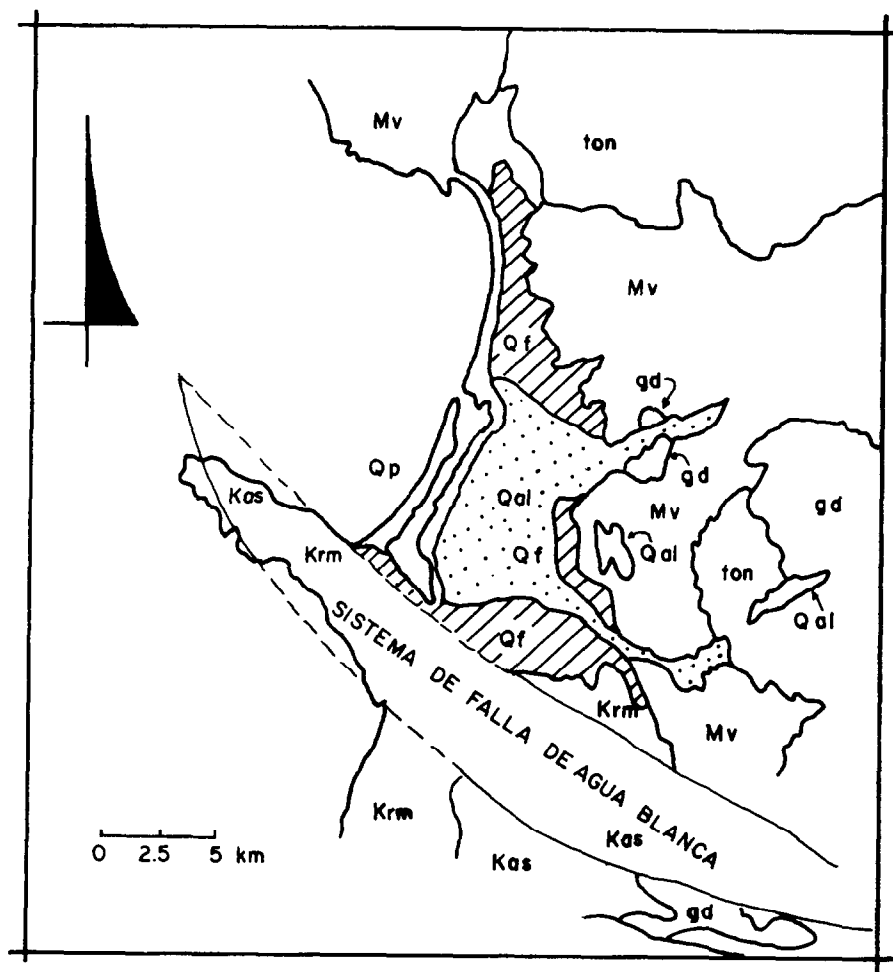
There are prebatholithic volcanic rocks of the Mesozoic throughout most of the area, made up mainly of breccias of dacite and andesite, tuffaceous dacite, rhyolite, andesitic and schistic breccias; batholithic rocks, basically granitic rocks of the Cretaceous mainly composed of tonalite and granodiorite, which outcrop as intrusive only in some parts, and sedimentary postbatholithic rocks which are found in the Rosarito Formation of the Upper Cretaceous, which covers the Alisitos Formation (Pohle, 1977). The Rosarito Formation consists of a variety of sedimentary clasts, from conglomerates to lutites. The materials which make up the valley are fluvial, alluvial and beach deposits (Fig. 2).

Gravimetric survey

A gravimetric survey was carried out using a total of 250 stations in the Maneadero-Chapultepec Valley to the south of Ensenada, B.C. (Fig. 3). An area of 51km² was covered, which, together with a previous survey (Vázquez-González, 1980), made a total of nearly 80km². A La Coste and Romberg gravimeter (model G#599) was used, which has a reading accuracy of ± 0.01 milligals. All the gravimetric stations were referred to the station of the Latin American network of absolute gravity stations, located at the Hidalgo monument between the streets of Ruíz, Uribe and Ryerson in Ensenada.

Data processing

The data of the gravimetric study were corrected for drift, latitude, elevation (free-air and Bouguer) and topography, following the specifications of the gravimeter manual. Densities of 1.8gr/cm³ were used for the dry surface sediment, 1.97gr/cm³ for the saturated alluvium and 2.57gr/cm³ for the basement (Cruz-Falcón, 1986). A grid was elaborated from the data, then the Bouguer anomaly map and subsequently the residual anomaly map were obtained (Fig. 4). In order to obtain the residual, the regional was considered as an inclined plane using the regional gravity map of Phillips (1975), having calculated a gradient of -0.34 milligals/km towards the north from the stations which are located in the extreme south of the study area (Fig. 2). The Bouguer anomaly values were normalized to



Mv Kas	PRE-BATOLITICO (META-VOLCANICO, FORM. ALISITDS)				
ton gd	BATOLITICO (TONALITA, GRANODIORITA)				
Krm	POST-BATOLITICO (FORM. ROSARIO)				
<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tbody> <tr> <td>Qal</td> <td>Qp</td> </tr> <tr> <td>Qf</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Qal	Qp	Qf		CUATERNARIO (ALUVIAL, FLUVIAL, PLAYA)
Qal	Qp				
Qf					

Figura 2. Principales rasgos geológicos de la región de Ensenada. Tomado de Allen *et al.* (1960).
Figure 2. Main geological features of the Ensenada region. Taken from Allen *et al.* (1960).

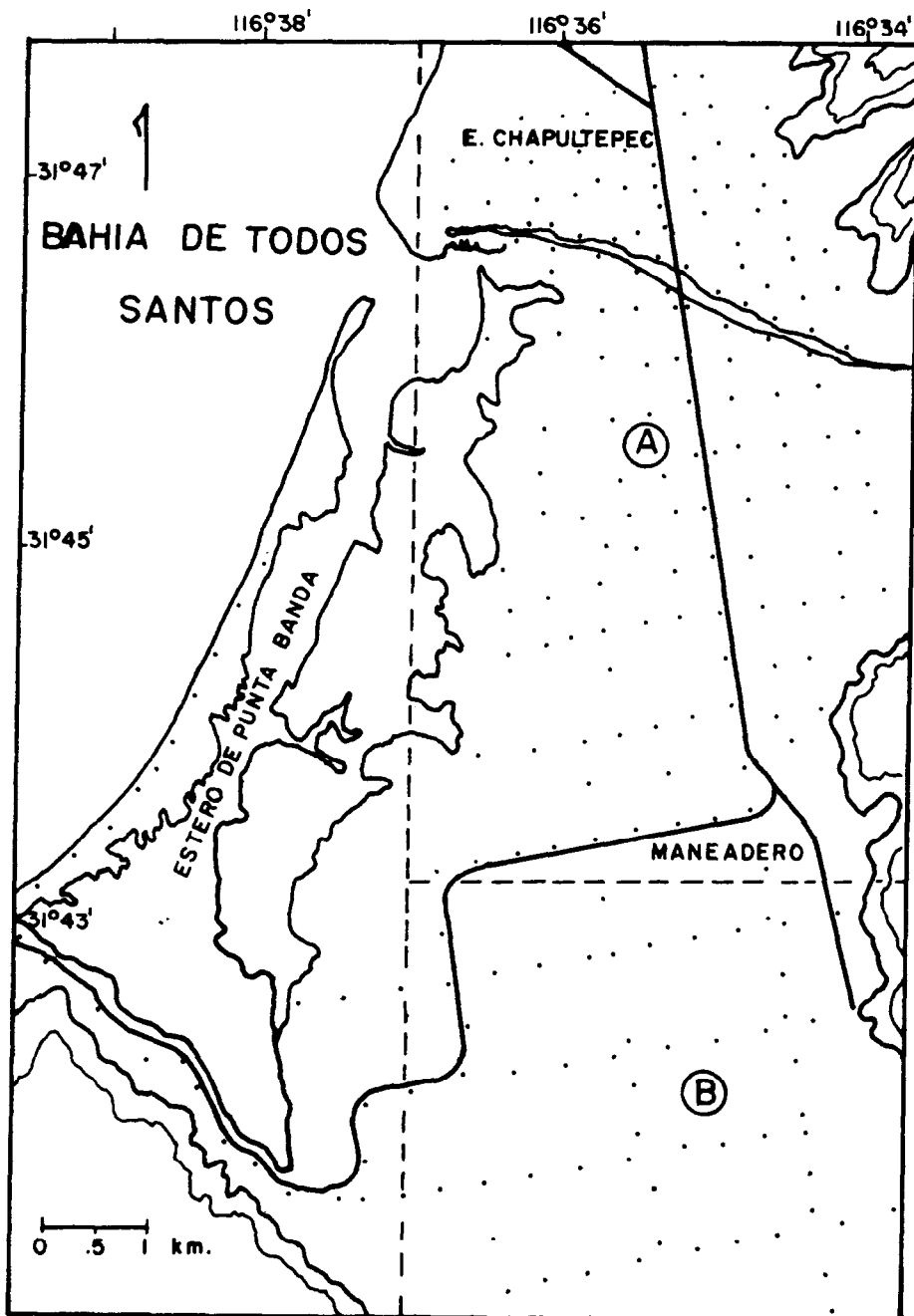


Figura 3. Area de estudio Maneadero-Chapultepec. A) Area de estudio inicial. B) Datos de Vázquez-González (1980). A + B) Area escogida para hacer la estimación de la capacidad de la cuenca, 66km².

Figure 3. Maneadero-Chapultepec study area. A) Initial study area. B) Data from Vázquez-González (1980). A + B) Area chosen for the estimation of the capacity of the basin, 66km².

plano de anomalía residual (Fig. 4). Para la obtención del residual, se consideró al regional como un plano inclinado utilizando el mapa de gravedad regional de Phillips (1975), habiendo calculado un gradiente de -0.34 miligales/km hacia el norte, a partir de las estaciones que se encuentran ubicadas en el extremo sur del área de estudio (Fig. 2). Los valores de anomalía de Bouguer se normalizaron con un valor de anomalía residual en una estación donde anteriormente se calculó la profundidad al basamento con resistividad eléctrica y gravimetría; se trata de la estación gravimétrica No. 42 (Vázquez-González, 1980; Fabriol *et al.*, 1982), cuyo valor es de -26.25 miligales. Debido a que ellos utilizaron $2.67\text{gr}/\text{cm}^3$ para la corrección topográfica, siendo lo más apropiado $1.8\text{gr}/\text{cm}^3$ que fue estimado por medio de perfiles de densidad (Cruz-Falcón, 1986), siguiendo la técnica de Nettleton (1976), el valor de anomalía para esa misma estación viene a ser -25.52 miligales, habiéndose calculado ahí una profundidad al basamento de 200m. Con el nuevo valor de anomalía para este punto, el valor que se ajusta para el cálculo del residual, se obtiene restando -20.49 miligales a toda la anomalía de Bouguer.

Estimación de la profundidad al basamento

La estimación de la profundidad al basamento, se llevó a cabo utilizando la fórmula para el cálculo de la gravedad en un punto sobre una capa horizontal de extensión infinita (Carmichael y Henry, 1977):

$$\Delta_h (\text{m}) = [(\Delta_g / 1000) / (2\pi * G * \Delta_p)] / 100$$

donde:

- Δ_h = profundidad en metros,
- Δ_r = anomalía residual,
- G = constante de gravitación universal
(6.67×10^{-8}),
- Δ_p = contraste de densidad.

Se aplicó esta fórmula a cada punto de la rejilla de anomalía residual, y se obtuvo el plano de profundidad al basamento (Fig. 5). Se utilizaron dos perfiles de anomalía residual (Fig. 4), para modelaje directo empleando la expresión de Morris y Sultzbach (1977);

the residual anomaly value of gravimetric station No. 42, where the depth to the basement with electric resistivity and gravimetry had already been calculated (Vázquez-González, 1980; Fabriol *et al.*, 1982), of -26.25 milligals. Since they used $2.67\text{gr}/\text{cm}^3$ for the topographic correction, $1.8\text{gr}/\text{cm}^3$ being the most appropriate which was estimated by means of density profiles (Cruz-Falcón, 1986) following Nettleton's (1976) technique, the anomaly value for this station is -25.52 milligals, having calculated a depth to the basement of 200m there. With the new anomaly value for this point, the value which is adjusted for the calculation of the residual is obtained by subtracting -20.49 milligals to all the Bouguer anomaly.

Estimation of the depth to the basement

In order to estimate the depth to the basement, the formula for the estimation of gravity in a point above a horizontal layer of infinite extension (Carmichael and Henry, 1977) was used:

$$\Delta_h (\text{m}) = [(\Delta_g / 1000) / (2\pi * G * \Delta_p)] / 100$$

where:

- Δ_h = depth in metres,
- Δ_r = residual anomaly,
- G = universal constant of gravity
(6.67×10^{-8}),
- Δ_p = density contrast.

This formula was applied to each point of the residual anomaly grid and the depth to the basement map was obtained (Fig. 5). Two residual anomaly profiles were used (Fig. 4) for direct modelling using Morris and Sultzbach's (1977) expression, direct modelling using Talwani and Landisman's (1959) algorithm and data inversion, which reinforced the initial calculations.

Estimation of the capacity of the basin

The "delimited" area of 66km^2 covered by alluvium (Fig. 3 A+B), where most of the perforations for the extraction of water can be found, was taken in order to estimate the capacity of the basin. It is a coastal aquifer

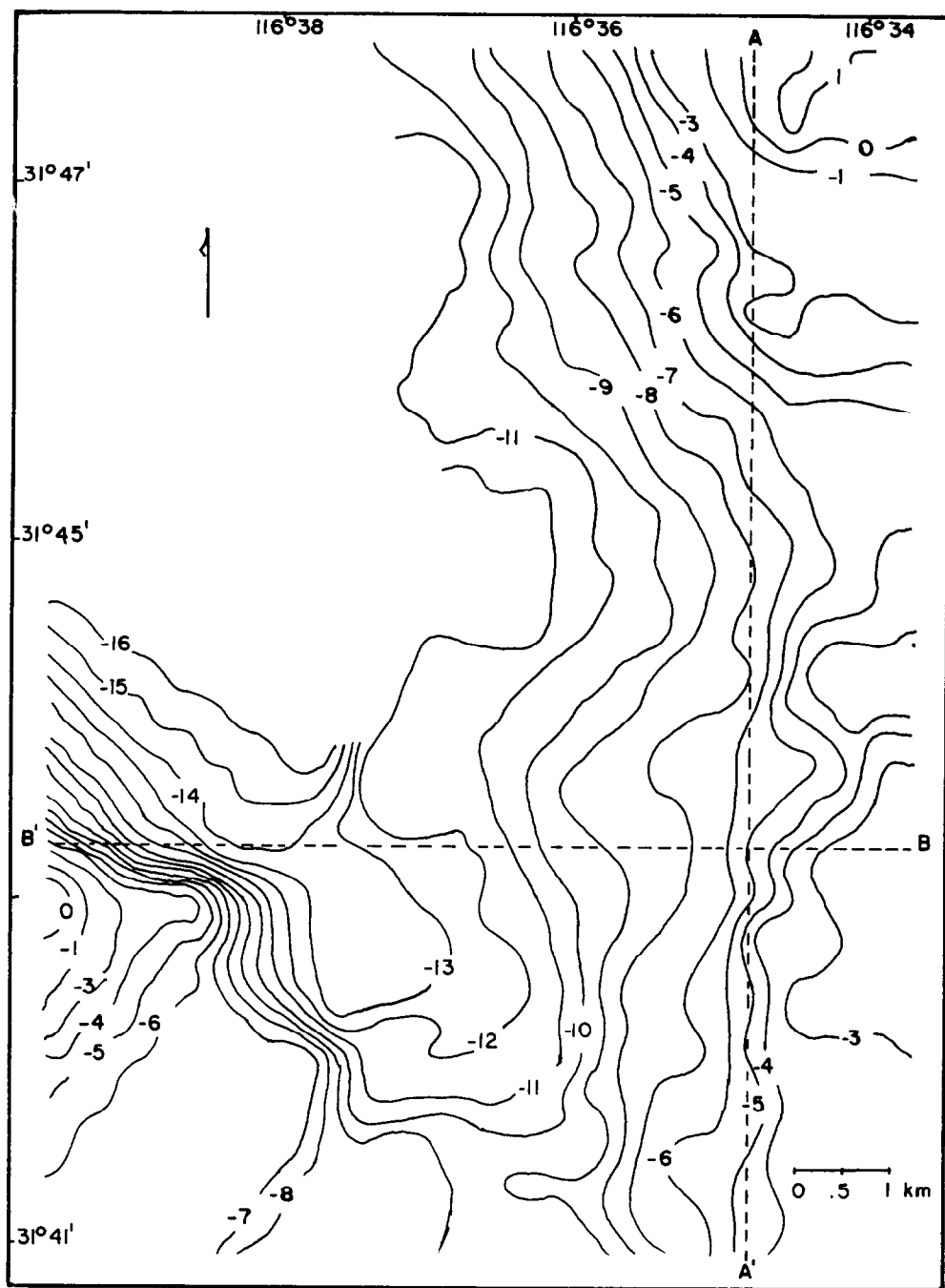


Figura 4. Isolíneas de anomalía residual (miligales). A-A' y B-B' son los perfiles para el modelaje.
Figure 4. Residual anomaly isolines (milligals). A-A' and B-B' are the profiles for the modelling.

modelaje directo utilizando el algoritmo de Talwani y Landisman (1959); e inversión de datos, lo cual vino a reforzar los cálculos iniciales.

Estimación de la capacidad de la cuenca

Se tomó el área "delimitada" de 66km² cubierta por aluvión (Fig. 3 A+B), zona donde se encuentra la mayoría de las perforaciones para extracción de agua, con el propósito de hacer la estimación de la capacidad de la cuenca. Se trata de un acuífero costero, por tanto la cuenca que lo forma no tiene definición hacia el Oeste, de ahí que se limite el área para hacer la estimación.

Se utilizó la rejilla de los valores estimados de profundidad al basamento, obtenidos en la sección anterior.

Primeramente se calculó el volumen total de la cuenca en m³; se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_1 = \sum h * A$$

donde:

- h = profundidad al basamento calculada previamente para cada punto de la rejilla,
- A = área de la unidad de rejilla (127548.98 m²),
- V₁ = volumen en m³.

Se calculó también el volumen (m³) ocupado desde la superficie hasta la profundidad media del nivel freático sobre toda el área de interés:

$$V_2 = A_s * h_f$$

donde:

- A_s = área superficial de la cuenca (66.07km²),
- h_f = profundidad promedio del nivel freático en el área (6.5m).

La profundidad promedio del nivel freático para la zona de estudio, fue proporcionada por la SARH (datos de 1983).

and therefore, the basin which forms it is not defined towards the west; hence, the area is delimited to make the estimation.

The grid of estimated values of depth to the basement obtained in the previous section was used.

First, the total volume of the basin was calculated in m³. The following formula was used:

$$V_1 = \sum h * A$$

where:

- h = depth to the basement calculated previously for each point of the grid,
- A = area of the grid unit (127548.98 m²),
- V₁ = volume in m³.

The volume (m³) occupied from the surface to the mean depth of the phreatic level was also calculated over all the area under study:

$$V_2 = A_s * h_f$$

where:

- A_s = surface area of the basin (66.07 km²),
- h_f = average depth of the phreatic level in the area (6.5m).

The average depth of the phreatic level for the study area was provided by SARH (data from 1983).

Finally, the total volume of water storage was calculated, through the difference of V₁ with V₂, multiplied by the porosity of the terrain:

$$V_t = (V_1 - V_2) * \phi$$

(Ali and Whiteley, 1981), where ϕ = porosity (15%).

A theoretical porosity of 17% was obtained using the density of the sediments (Ali and Whiteley, 1981):

Finalmente se calcula el volumen total de almacenamiento, por la diferencia de V_1 con V_2 , multiplicándose por la porosidad del terreno:

$$V_t = (V_1 - V_2) * \phi$$

(Ali y Whiteley, 1981), donde ϕ = porosidad (15%).

Se obtuvo una porosidad teórica de 17% utilizando las densidades de los sedimentos (Ali y Whiteley, 1981):

$$\phi = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_w$$

donde:

- ρ_1 = densidad de los sedimentos secos (1.8 gr/cm³),
- ρ_2 = densidad de los sedimentos saturados (1.97 gr/cm³),
- ρ_w = densidad del agua (1.0 gr/cm³).

A partir de datos proporcionados por la SARH, se calculó una porosidad de 13%, la cual se promedió con la calculada teóricamente obteniendo una porosidad promedio de 15%, valor que fue utilizado para estos cálculos. Lo anterior se representa gráficamente en la Figura 6.

RESULTADOS Y DISCUSION

De la estimación de la profundidad al basamento

El modelaje directo utilizando la expresión de Morris y Sultzbach (1977), y el algoritmo de Talwani y Landisman (1959), muestran una buena correlación entre el perfil de anomalía residual (modelo inicial) y la respuesta del modelo (Figs. 7 y 8); la inversión de datos indica que las profundidades al basamento a partir del modelo generado se asemejan al modelo propuesto (Fig. 9). Lo anterior indica que las profundidades al basamento estimadas (Fig. 5), son confiables.

Los valores de anomalía residual se normalizaron a una estación donde anteriormente se calculó la profundidad al basamento con resistividad eléctrica y gravimetría

$$\phi = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_w$$

where:

- ρ_1 = density of the dry sediments (1.8 gr/cm³),
- ρ_2 = density of the saturated sediments (1.97 gr/cm³),
- ρ_w = density of the water (1.0 gr/cm³).

Using data provided by SARH, a porosity of 13% was calculated. This value was combined with the one calculated theoretically obtaining an average porosity of 15% which was used for these calculations. This is represented graphically in Figure 6.

RESULTS AND DISCUSSION

Estimation of the depth to the basement

The direct modelling using Morris and Sultzbach's (1977) expression and the algorithm of Talwani and Landisman (1959) show a good correlation between the residual anomaly profile (initial model) and the response of the model (Figs. 7 and 8). The data inversion indicates that the depths to the basement from the generated model are similar to the proposed model (Fig. 9). This indicates that the estimated depths to the basement (Fig. 5) are reliable.

The residual anomaly values were normalized to that of a station where the depth to the basement with electric resistivity and gravimetry had already been calculated (Vázquez-González, 1980; Fabriol *et al.*, 1982) and the depth to the basement was calculated throughout the study area. If an error exists in the previously calculated depth which was used to normalize the data, then the estimations made will naturally be affected. However, the uncertainty will always remain until a perforation reaching the basement is made.

The depths of the basement go from 0m in the NNE part where it outcrops, to 500-650m towards the SW (Fig. 5).

Estimation of the capacity of the basin

The calculation of the capacity or volume of the basin is a first approximation to

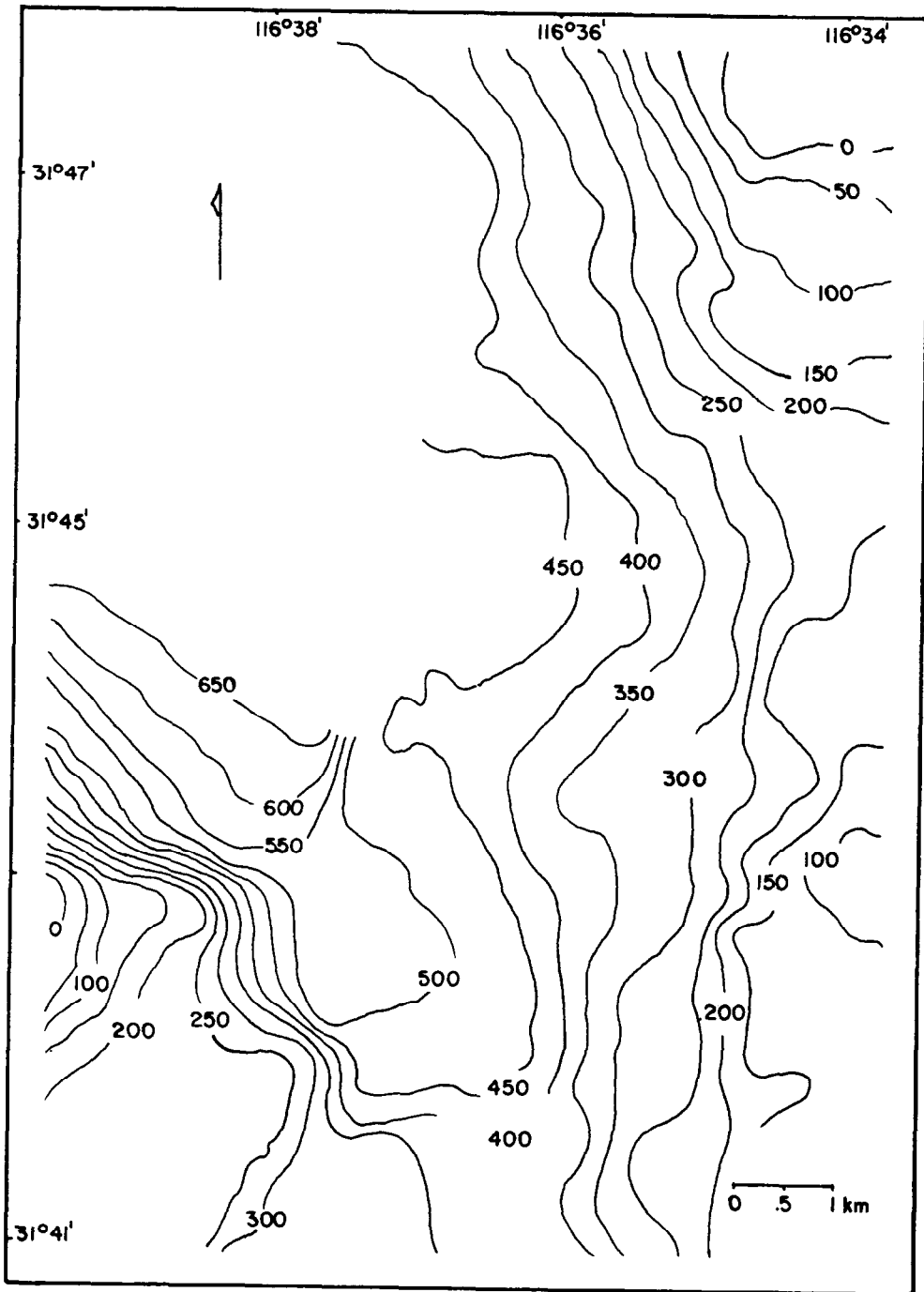


Figura 5. Isolíneas de profundidad al basamento (metros). Contornos cada 50m.
Figure 5. Isolines of depth to the basement (metres). Contours every 50m.

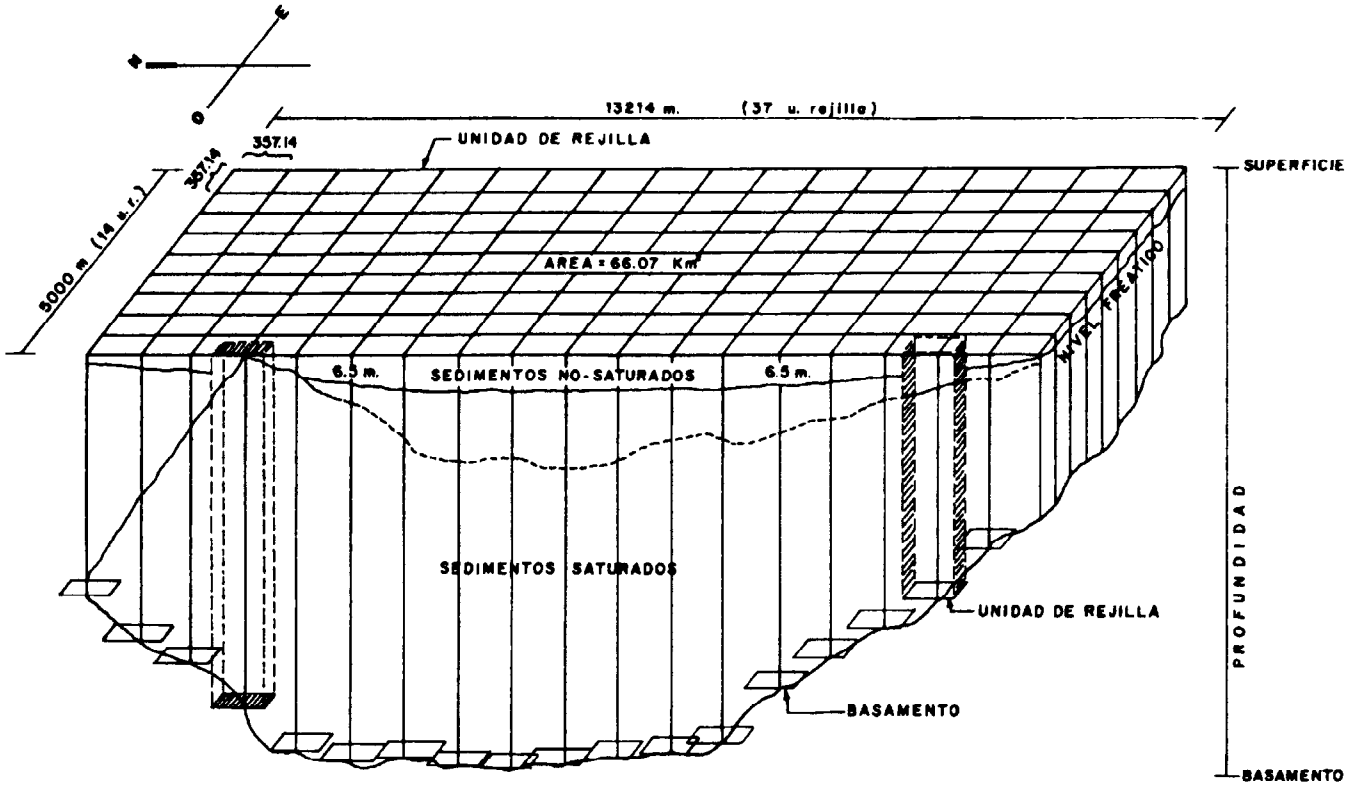


Figura 6. Se muestran los parámetros utilizados para el cálculo de volumen de almacenamiento de agua de la Cuenca Maneadero-Chapultepec. (Fuera de escala.)
Figure 6. Parameters used for the calculation of the water storage capacity of the Maneadero-Chapultepec basin. (Not in scale.)

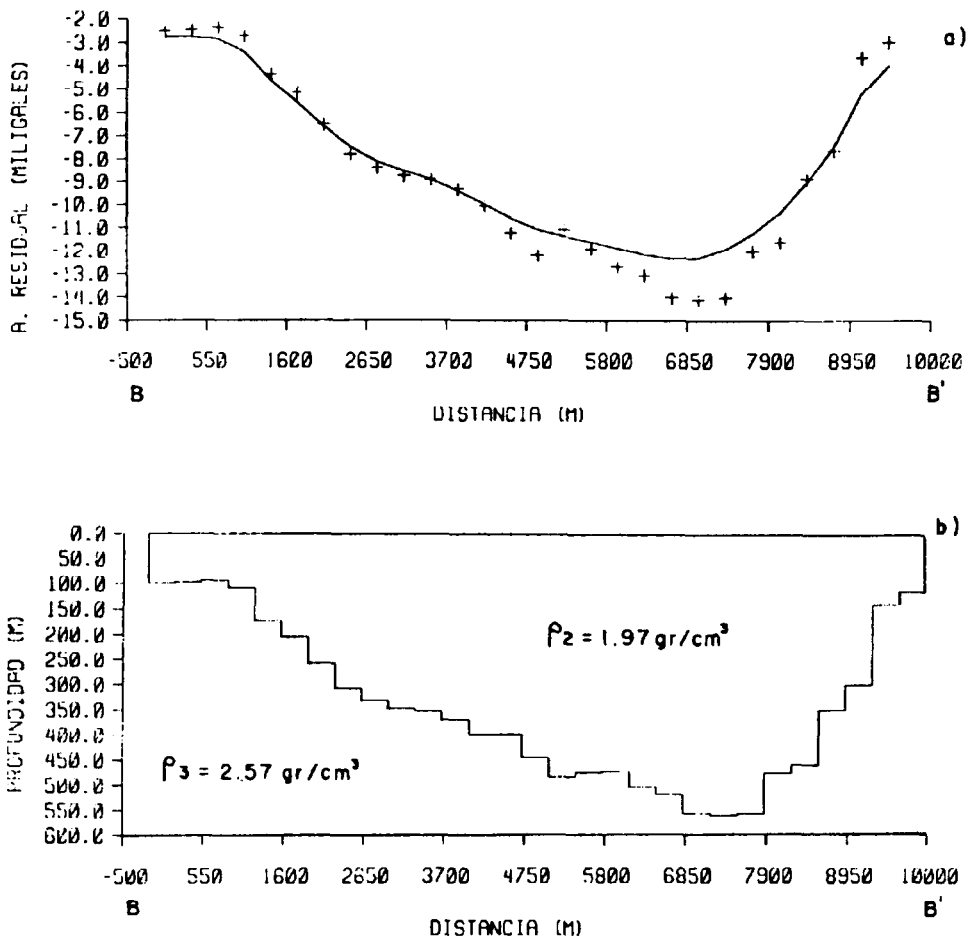


Figura 7. Modelaje directo usando la expresión de Morris and Sultzbach (1977). a) Perfil de anomalía residual (cruces), comparado con la respuesta del modelo (línea continua). b) Geometría del modelo. El contraste de densidad es de 0.6 gr/cm^3 . B-B' se muestra en la Figura 4.

Figure 7. Direct modelling using Morris and Sultzbach's (1977) expression. a) Residual anomaly profile (crosses), compared to the response of the model (continuous line). b) Geometry of the model. The density contrast is 0.6 gr/cm^3 . B-B' is shown in Figure 4.

(Vázquez-González, 1980; Fabriol *et al.*, 1982), de ahí se estimó la profundidad al basamento en toda el área de estudio. Si existe error en la profundidad calculada previamente, la cual se tomó para normalizar los datos, lógicamente afectará a las estimaciones hechas. Pero la incertidumbre existirá hasta que no se lleve a cabo una perforación que alcance el basamento.

evaluate the capacity of the aquifer in this region, using geophysical methods. The alternating sequence of sedimentary strata which fill up the basin can have layers of different thickness of clayey material or clayey lenses distributed irregularly and, therefore, the volume of water storage would be relatively smaller. In order to correct this, a lithologic correlation from one well to another would

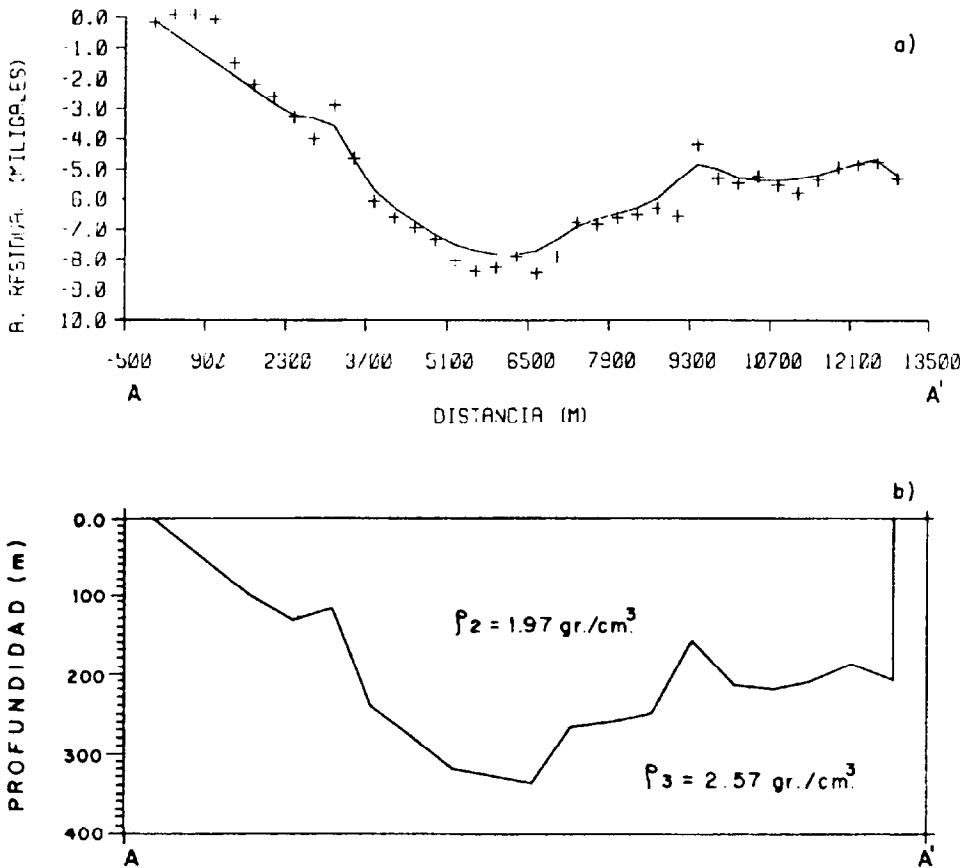


Figura 8. Modelaje directo utilizando el algoritmo de Talwani y Landisman (1959). a) Perfil de anomalía residual (cruces), comparado con la respuesta del modelo (línea continua). b) Geometría del modelo. El contraste de densidad es de 0.6 gr./cm^3 . A-A' se muestra en la Figura 4.
Figure 8. Direct modelling using Talwani and Landisman's (1959) algorithm. a) Residual anomaly profile (crosses), compared to the response model (continuous line). b) Geometry of the model. The density contrast is 0.6 gr./cm^3 . A-A' is shown in Figure 4.

Las profundidades del basamento van desde 0m en la parte NNE donde éste aflora, hasta 500-650m hacia el SO (Fig. 5).

De la estimación de la capacidad de la cuenca

El cálculo de la capacidad o del volumen de la cuenca es una primera aproximación para evaluar la capacidad del acuífero en esta región, utilizando métodos geofísicos. La secuencia alternante de estratos sedimentarios que rellenan la cuenca puede tener capas de

have to be done. However, this would not be enough as the wells are not deep. Furthermore, the phreatic level is not the same throughout the area. An average is therefore taken which can cause differences in the calculation of the total volume of the order of 20 million m^3 in $\pm 2\text{m}$, which is significant.

Another important factor which should be considered is the porosity of the sedimentary material which fills up the basin. This value directly affects the calculations and was obtained with the densities of the saturated

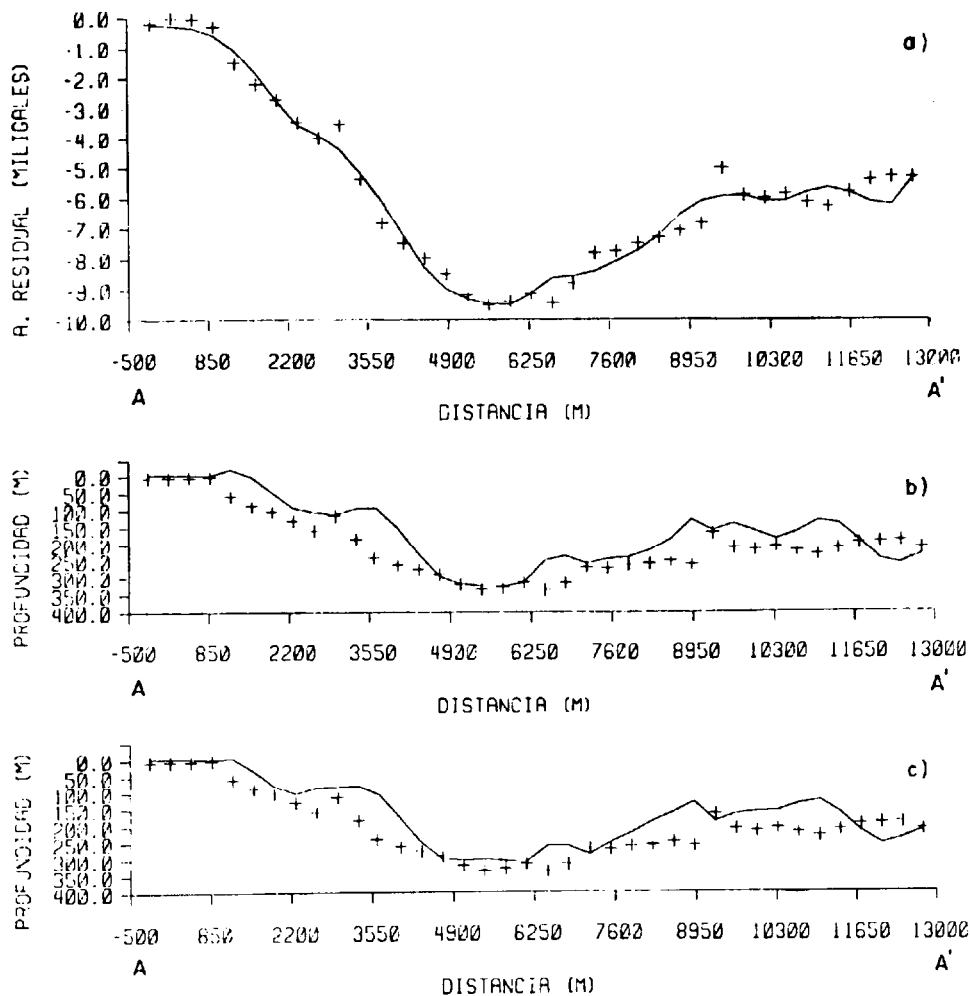


Figura 9. Modelaje con inversión de datos. a) Datos (cruces) y respuesta del modelo (línea continua), de la iteración No. 9. b) Modelo generado para la iteración No. 9 (línea continua) y modelo inicial (cruces), ajuste = 0.973. c) Modelo generado para la iteración No. 10 (línea continua) y modelo inicial (cruces), ajuste=0.939. A-A' se muestra en la Figura 4.

Figure 9. Modelling with data inversion. a) Data (crosses) and response of the model (continuous line) of the No. 9 iteration. b) Model generated for the No. 9 iteration (continuous line) and initial model (crosses), adjustment = 0.973. c) Model generated for the No. 10 iteration (continuous line) and initial model (crosses), adjustment = 0.939. A-A' is shown in Figure 4.

diferente espesor de material arcilloso o lentes arcillosos distribuidos irregularmente, lo que evitaría ahí la acumulación de agua, y por tanto el volumen de almacenamiento de agua sería relativamente menor. Para corregir esto se tendría que hacer una correlación litológica

and unsaturated sediments (Ali and Whiteley, 1981) as well as with data provided by SARH (1983). The porosity can also vary both laterally and vertically.

The results were the following:

de pozo a pozo, pero no es suficiente puesto que los pozos no son profundos. Asimismo el nivel freático no es igual en toda el área, por lo que se toma un promedio, que puede ocasionar diferencias en el cálculo del volumen total del orden de 20 millones de m^3 en $\pm 2m$, lo cual es significativo.

Otro factor importante que hay que considerar es la porosidad del material sedimentario que rellena la cuenca, valor que afecta directamente los cálculos y el cual fue obtenido con las densidades de los sedimentos saturados y no saturados (Ali y Whiteley, 1981), así como por datos proporcionados por la SARH (1983). La porosidad también puede variar tanto lateralmente como en sentido vertical.

Los resultados fueron los siguientes:

V_1 (volumen total de la cuenca) = $2.0 \times 10^{10} m^3$.

V_2 (volumen ocupado de la superficie a la profundidad media del nivel freático) = $4.29 \times 10^3 m^3$.

V_t (volumen total de almacenamiento de la cuenca) = $2.94 \times 10^9 m^3 \pm 4.10 \times 10^3$ (con variaciones de 4.5 a 8.5 metros en el nivel freático, y 13 a 17% en la porosidad del sedimento).

CONCLUSIONES

La estimación de la profundidad al basamento es confiable. Concuere da con los resultados del modelaje directo e inversión, y coincide con las profundidades calculadas anteriormente por Pohle (1977) y Fabriol *et al.* (1982), en la parte sur del área de estudio.

La estimación de la capacidad de almacenamiento de agua de la cuenca es aproximada, puesto que habría que considerar la variación de parámetros como porosidad, profundidad del nivel freático, existencia de lentes arcillosos, etc. Pero viene a ser una buena primera aproximación para evaluar la capacidad del acuífero del Valle de Maneadero-Chapultepec, utilizando el método de prospección gravimétrica.

V_1 (total volume of the basin) = $2.0 \times 10^{10} m^3$.

V_2 (volume occupied from the surface to the mean depth of the phreatic level) = $4.29 \times 10^3 m^3$.

V_t (total storage volume of the basin) = $2.94 \times 10^9 m^3 \pm 4.10 \times 10^3$ (with variations of 4.5 to 8.5 metres in the phreatic level and 13% to 17% in the porosity of the sediment).

CONCLUSIONS

The estimation of the depth to the basement is reliable. It agrees with the direct modelling and inversion results and coincides with the depths calculated previously by Pohle (1977) and Fabriol *et al.* (1982) in the southern part of the study area.

The estimation of the water storage capacity of the basin is approximate, since the variation of parameters such as porosity, depth of the phreatic level, existence of clayey lenses, etc., would have to be considered. However, it is a good first approximation to evaluate the capacity of the aquifer of the Maneadero-Chapultepec Valley, using the gravimetric prospection method.

ACKNOWLEDGEMENTS

The support given by the Dirección General de Oceanografía Naval and the equipment, support and advice provided by the Departamento de Geofísica de Exploración of the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) is acknowledged.

English translation by Christine Harris.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Oceanografía Naval, por el apoyo y tiempo permitido para la realización de este trabajo; y al Departamento de Geofísica de Exploración del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), por el equipo facilitado, apoyo y asesoramiento.

APENDICE

PASOS A SEGUIR PARA LA ESTIMACION DE LA CAPACIDAD DE LA CUENCA
POR ALI Y WHITELEY (1981)

1) Primeramente se calcula el exceso de masa (Nettleton, 1976, p. 213):

$$M = K \sum g * s^2$$

donde:

$$K = 2.39 \times 10^7,$$

g = residual (miligales),

s^2 = área de la unidad de rejilla (km^2),

M = toneladas métricas (1 = 1000kg).

2) Estimación del volumen, donde la masa anómala es dividida en la parte saturada y no saturada del acuífero:

$$V = M - (\rho_2 - \rho_1) h * A / (\rho_3 - \rho_2)$$

donde:

M = exceso de masa calculado,

ρ_1 = densidad de los sedimentos secos (gr/cm^3),

ρ_2 = densidad de los sedimentos saturados (gr/cm^3),

ρ_3 = densidad del basamento (gr/cm^3),

h = profundidad promedio del nivel freático (m),

A = área superficial de la cuenca (km^2).

3) Cálculo del volumen total de almacenamiento:

$$V_t = V * \phi$$

donde ϕ = porosidad.

$$\phi = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_w$$

donde ρ_w = densidad del agua ($1.0 \text{ gr}/\text{cm}^3$).

LITERATURA CITADA

- Ali, H.O. and Whiteley, R.J. (1981). Gravity explorations for ground water in the Bara Basin, Sudan. *Geoexploration*, 19: 127-141.
- Allen, C.R., Silver, L.T. and Stahlis, G. (1960). Agua Blanca Fault - A major transverse structure of northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71: 457-428.
- Carmichael, R.S. and Henry, G. Jr. (1977). Gravity exploration for ground water and bedrock topography in glaciated areas. Michigan State University, East Lansing, MI48824. Society of Exploration Geophysicists.
- Cruz Falcón, A. (1986). Gravimetría de la cuenca del Arroyo San Carlos, Ensenada, B.C. Tesis de Maestría, CICESE, 82 pp.
- Fabriol, H., Martínez, M. y Vázquez, G.R. (1982). Mediciones gravimétricas y telúricas en el Valle de Maneadero, Ensenada, B.C. *Geofísica Internacional*, Vol. 21(1): 41-56.
- Morris, B.D. and Sultzbach, A.R. (1977). Gravity data reduction and interpretation using a digital computer, a case history. In: *Mining Geophysics*, Vol. 11, Theory, pp. 630-641.
- Nettleton, L.L. (1976). Gravity and magnetics in oil prospecting. Copyright by McGraw-Hill, Inc., Cap. 4, pp. 75-100.
- Phillips, R.P. (1975). Mapa de gravedad regional del Estado de Baja California. En: G.R. Gordon, R.P. Phillips y E.C. Allison (1975). *Reconnaissance Geology of the State of Baja California*. The Geological Society of America, Inc. Memoir 140, Boulder, Colorado 80310, 170 pp.
- Pohle, C.R. (1977). A gravity survey along the north side of the Agua Blanca Fault, B.C. Research Report, Vol. 30. San Diego State University, San Diego, California, 51 pp.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (1983). Dirección de geohidrología y de zonas áridas, residencia en el Estado de Baja California.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE)(1980). Ecoplán del Estado de Baja California, 210 pp.
- Secretaría de Marina (1974). Estudio Oceanográfico de la región de Ensenada. Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía y Señalamiento Marítimo, México, D.F., pp. 133-144.
- Talwani, M. and Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fractura Zone. *J. Geophys. Res.*, 64: 49-59.
- Vázquez González, R. (1980). Estudios de métodos potenciales con aplicación a Geohidrología del Valle de Maneadero, B.C. Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE, 108 pp.