

*MEXICO, AREA DONDE OCURREN CAMBIOS  
SECULARES DE LA GRAVEDAD*

G. P. Woollard\* y J. Monges Caldera\*\*

Existen pocos lugares en el mundo en que se tengan datos adecuados para demostrar cambios seculares presentes o pasados de la gravedad. Hay lugares con marcados cambios locales en la gravedad del orden 1 mgal o más, asociados a desplazamientos corticales resultantes de temblores o subsidencias a causa de excavaciones mineras o de bombeo en campos petroleros, pero que dan poca evidencia para indicar cambios regionales continuos de la gravedad. Boulanger (comunicación personal) cree que mediciones de repetición con gravímetros múltiples en lugares claves entre Moscú y Vladivostok mostraron que tal área se encuentra en la parte este de la U.R.S.S., pero la experiencia de los autores, quienes han efectuado mediciones gravitacionales desde 1939, dice que sólo hay otro lugar donde parecen estar bien establecidos los cambios seculares de la gravedad y es la parte sur del Altiplano Mexicano.

Podría esperarse que el centro de la Ciudad de México exhibiera un cambio progresivo de la gravedad a causa de hundimientos, como lo indican los cambios de elevación superficial en la instalación de un sistema de drenaje subterráneo que eliminó la recarga de acuíferos del área. Tal efecto es análogo al hundimiento ocurrido en Long Beach, California, a causa del bombeo de campos petroleros. Como se verá, existe buena evidencia del incremento local de la gravedad asociado al hundimiento en la Ciudad de México por esta causa. Sin embargo, el cambio secular de la gravedad que nos interesa principalmente es de signo contrario y de extensión regional. Si está relacionado con el ascenso del Altiplano Mexicano como unidad tectónica o bien a la inclinación este-oeste de ese bloque cortical no se sabe claramente aún, pero como se verá, hay evidencia de un marcado ascenso del borde oeste del Altiplano.

La evidencia de tal ascenso tiene doble naturaleza: (1) conexiones de repetición con péndulo, así como observaciones con gravímetros sobre la Base de Calibración de Gravedad de Norte América en el período 1958-1966 y (2) conexiones de repetición con gravímetros entre la Ciudad de México, en la porción central sur del Altiplano y Acapulco, en la costa del Pacífico, cubriendo el período 1949-1967.

*MEXICO, AN AREA UNDERGOING SECULAR  
CHANGE IN GRAVITY*

G. P. Woollard\* and Monges Caldera\*\*

There are few places in the world where there are adequate data to demonstrate past or present secular changes in gravity. There are places where there have been marked local changes in gravity of the order of 1 mgal or more in association with crustal displacement related to earthquakes or surface subsidence due to underground mining or oil field pumping, but little evidence to support regional continuous change in gravity. Boulanger (personal communication) feels that repeat gravity measurements with multiple gravimeters at key sites between Moscow and Vladivostok indicate one such area in the eastern USSR, but in the writers' experience in conducting gravity measurements since 1939, the only other location where a secular change in gravity appears to be well substantiated is the southern end of the plateau of Mexico.

One would expect that downtown Mexico would exhibit a progressive change in gravity due to subsidence as indicated by changes in surface elevation following the installation of a closed underground sewer system that eliminated much of the former recharge to water table in the area. This effect is analogous to the surface subsidence that has occurred at Long Beach, California, due to oil field pumping. As will be seen there is good evidence for a local increase in gravity in association with the subsidence that has occurred in Mexico City from this cause. However, the secular change in gravity with which we are primarily concerned is of opposite sign and of regional extent. Whether it is related to uplift of the plateau of Mexico as a tectonic unit or east-west tilting of this crustal block is not definitely known as yet, but as will be seen; the existing evidence indicates that marked uplift has occurred along the western boundary of the plateau.

The evidence for this uplift is of a twofold nature: (1) repeat pendulum gravity connections as well as gravimeter observations along the North American gravity standardization range over the period 1958-1966, and (2) repeat gravimeter connections between Mexico City in the south-central portion of the plateau and Acapulco on the Pacific Coast covering the period 1949-1967.

\* Instituto Geofísico de Hawaii, Honolulu.

\*\* Instituto de Geofísica, U.N.A.M., México

\* Geophysical Institute of Hawaii, Honolulu.

\*\* Institute of Geophysics, N.A.U.M. Mexico

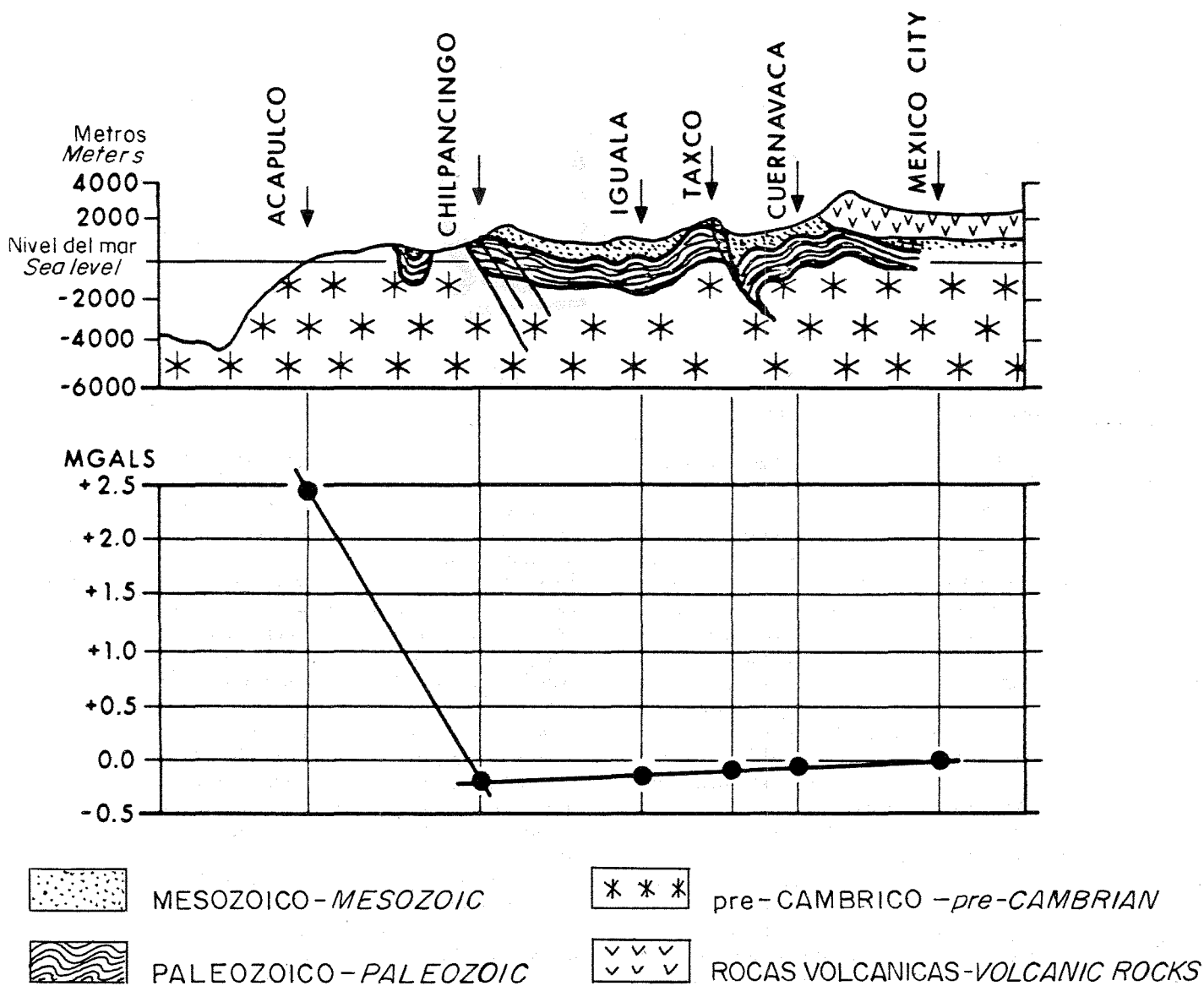


Fig1. - CAMBIOS EN INTERVALOS DE GRAVEDAD, CIUDAD DE MEXICO-ACAPULCO  
 Fig 1. - CHANGE IN GRAVITY INTERNAL, MEXICO CITY-ACAPULCO

0 100 200 kms  
 1949-1967

Se pensó por vez primera en un cambio secular al reexaminar datos antiguos de péndulo de la Base de Calibración de Gravedad de Norte América en conexión con el actual Programa de la U.G.G.I., de Estandarización Mundial de Gravedad (Woollard, en preparación). Se notó que si los resultados obtenidos con péndulos Gulf de la Universidad de Hawaii y de la Universidad de Cambridge fuesen corregidos

Secular change was first suggested by a re-examination of the older pendulum data on the North American gravity standarization range in connection with present IUGG World Gravity Standarization Program (Woollard, in preparation). It was noted that if the results obtained with the University of Hawaii Gulf pendulums and the Cambridge University pendulums were corrected for creep, tares and environmental

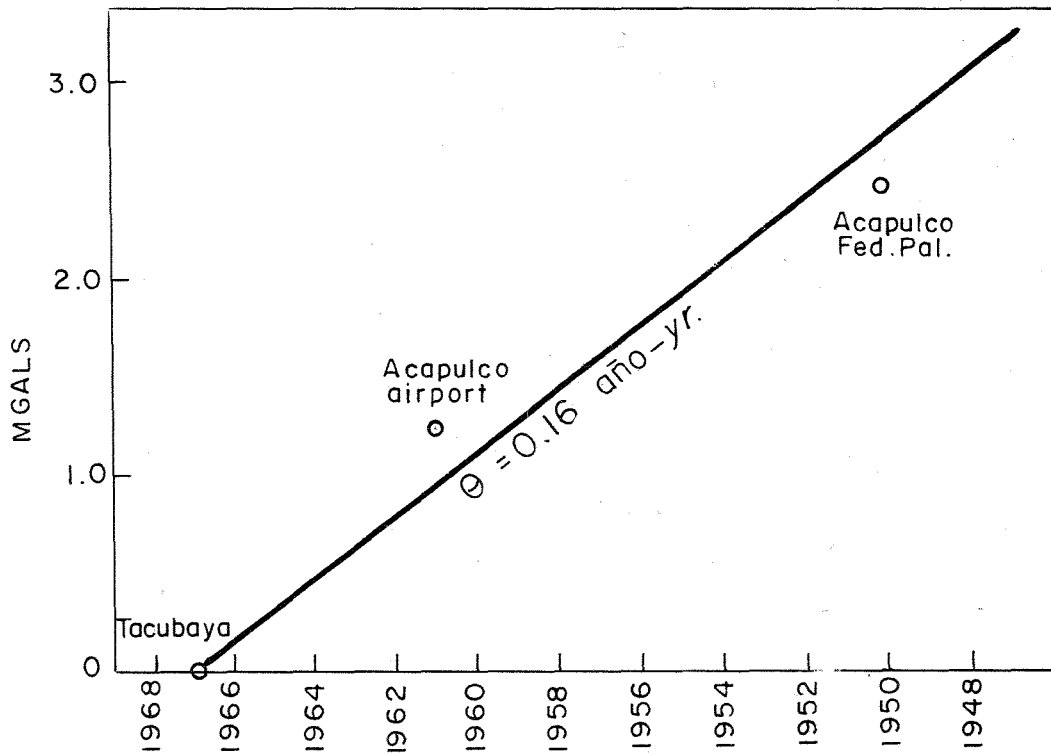


Fig.2 CAMBIO EN EL INTERVALO ( $\Delta g$ )TACUBAYA-ACAPULCO  
 Fig.2 CHANGE IN INTERVAL ( $\Delta g$ ) TACUBAYA-ACAPULCO

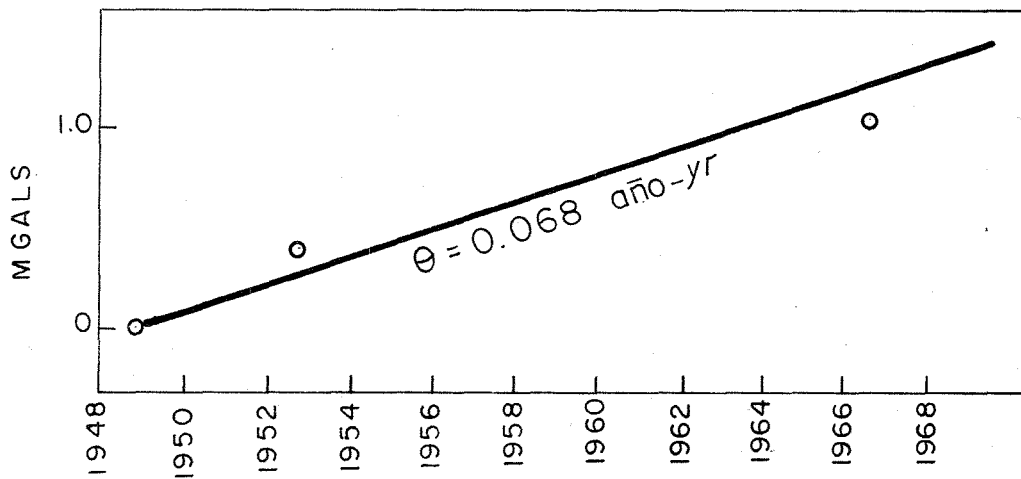


Fig.3 CAMBIO EN EL INTERVALO ( $\Delta g$ )TACUBAYA-HOTEL GENEVA  
 Fig.3 CHANGE IN INTERVAL ( $\Delta g$ ) TACUBAYA-HOTEL GENEVA

para efectos de taras, medio-ambiente y saltos, como lo indicaban las comparaciones gravimétricas y los valores de cierre, habría entonces un cambio sistemático en los valores para la Ciudad de México en relación a Madison, Wisconsin, como función del tiempo. Esto no había sido notado porque las observaciones de repetición con el péndulo de Cambridge eran valores promedio que no incorporaban correcciones por observación y los resultados del péndulo Gulf solamente incluían correcciones para taras mayores (saltos en período).

Los cambios mostrados por los péndulos Gulf son los siguientes:

			Con/With 0 =.065/año yr.	Difer./Diff. mgal.
1953	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94129	.94175	-0.46
1953	péndulo Gulf "K" Gulf "K" pendulums	977.94160	.94175	-0.15
1958	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94143	.94143	0.00
1961	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94125	.94124	+ 0.01
1964	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94106	.94104	+0.02
1966	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94091	.94091	0.00

Exceptuando las mediciones de 1953, todas las demás fueron realizadas en secuencia de escalera (A-B-C-D-C-B-A) de manera que hay un cierre en cada sitio y por lo mismo buen control para definir cualquier aberración presente observable. Las observaciones de 1953, por lo tanto, no fueron tan bien controladas como las otras. Son también de menor calidad porque la instrumentación auxiliar disponible en 1953 para definir la presión de operación, la temperatura y el período pendular no fué tan precisa como la usada para mediciones posteriores. La confiabilidad estimada para las observaciones de 1953 fue de  $\pm 0.3$  mgal. Las otras mediciones se cree que son confiables en más de  $\pm 0.15$  mgal. Un mejor ajuste de los datos tomando en cuenta la baja calidad de las observaciones de 1953 define un cambio secular de  $-0.065$  mgal por año. Como se mostró anteriormente, excepto para el conjunto de datos de 1953, este predictor da resultados que están de acuerdo con cada uno de los valores observados desde 1958 a 1966 en  $0.02$  mgal. Este grado de ajuste es fortuito, pues la desviación estandard en valores de período define la confiabilidad de una observación aislada como no mejor de  $\pm 0.15$  mgal. También se ve que los resultados del péndulo "K" parecen ser válidos y solo los datos del péndulo "M" resultaron dudosos en 1953.

En contraste con lo anterior, si se examina el número más limitado de observaciones del péndulo Gulf en Monterrey, en la porción noreste del Altiplano de México, se encuentra que no hay evidencia de un cambio sistemático de valores en el tiempo.

effects as indicated by closure values and gravimeter comparisons, that there was a systematic change in values for Mexico City relative to Madison, Wisconsin, as a function of time. This had not been noted before because the Cambridge pendulum observations reported had mean average values that incorporated no correction for aberrations, and the Gulf pendulum results had only incorporated corrections for major tares (jumps in period).

The changes noted with the Gulf pendulums are as follows:

			Con/With 0 =.065/año yr.	Difer./Diff. mgal.
1953	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94129	.94175	-0.46
1953	péndulo Gulf "K" Gulf "K" pendulums	977.94160	.94175	-0.15
1958	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94143	.94143	0.00
1961	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94125	.94124	+ 0.01
1964	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94106	.94104	+0.02
1966	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulums	977.94091	.94091	0.00

Except for the 1953 measurements, all of the above observations were carried out in ladder sequence (A-B-C-D-C-B-A) so that there was a closure on each site and thus good control for defining any observational aberration present. The 1953 observations therefore are not as well controlled as the others. They are also of poorer quality because the auxiliary instrumentation available in 1953 for defining operational pressure, temperature and pendulum period was not as precise as that used for the later measurements. The estimated reliability of the 1953 observations is  $\pm 0.3$  mgal. The other measurements are believed to be reliable to better than  $\pm 0.15$  mgal. A best fit to the data taking cognizance of the poorer quality of the 1953 observations defines a secular change of  $-0.065$  mgal per year. As seen above, except for the 1953 sets of data, this predictor gives results that agree to  $0.02$  mgal with each of the observed values from 1958 to 1966. This degree of agreement is fortuitous since the standard deviation in period values defines the reliability of a single observation as not being better than  $\pm 0.15$  mgal. It is also seen that the 1953 "K" pendulum results appear to be valid and only the "M" pendulum results doubtful.

In contrast to the above, if the more limited number of Gulf pendulum observations at Monterrey in the northeastern portion of the plateau of Mexico is examined, it is found that there is no evidence of systematic change in values with time.

Los valores del péndulo Golfo son los siguientes:

The Gulf pendulum values are as follows:

			Difer. de/Diff. from Av.
1953	péndulo Gulf "M" Gulf "M" pendulum	978.80528	-0.06 mgal
1953	péndulo Gulf "K" Gulf "K" pendulum	978.80533	-0.01 mgal.
1961	péndulo Gulf "K" Gulf "K" pendulum	978.80543	+0.09 mgal.
1964	péndulo Gulf "K" Gulf "K" pendulum	978.80533	- .01 mgal.
	Av.	.80534	

Aunque en lo general el cambio en gravedad que se estima en la Ciudad de México en un período de 13 años es de aproximadamente 0.8 mgal que corresponde a casi 3 metros de cambio en elevación si tomamos en cuenta el efecto de masa del material rocoso incluido; hay evidencia de un desplazamiento tectónico cortical relativamente rápido que no está compensado.

Para probar la realidad del cambio secular indicado en la Ciudad de México, los autores repitieron las mediciones de gravedad en el otoño de 1967, en estaciones clave en la línea de gravedad establecida en 1949 entre la Ciudad de México y Acapulco (Woollard, 1952). También se hizo la conexión al sitio del aeropuerto de Acapulco, el cual fué unido directamente a la Ciudad de México en 1961 por el Ing. Julio Monges usando dos gravímetros LaCoste & Romberg. Las mediciones originales de 1949 fueron efectuadas con un gravímetro geodésico prototipo Worden que usó Woollard en la primera red global de observaciones en 1948 (Woollard, 1949).

Si bien la respuesta excéntrica de este gravímetro Worden era apreciable y posiblemente no muy bien definida ya que los valores corregidos eran confiables hasta  $\pm 0.1$  mgal, esta restricción en las comparaciones no es limitativa. Tampoco se puede tomar la incertidumbre en calibración como un factor limitativo, puesto que el cambio total en gravedad entre la Ciudad de México y Acapulco es del orden de 500 mgal y la calibración usada en 1949 se conoce que fué buena en mas de 1 mgal en 2,000 mgal. La limitación total para obtener una comparación significativa parece ser por lo tanto de no más de 0.3 a 0.4 mgal. Como se verá de la siguiente comparación, esta limitación de ninguna manera restringe la validez de los resultados obtenidos. Para simplificar la com-

As the gross change in gravity suggested at Mexico City over a 13-year period is approximately 0.8 mgal and this corresponds to roughly 3 meters' change in surface elevation if we allow for the mass effect of the included rock material, there is evidence of relatively rapid tectonic crustal displacement that is not being compensated.

To test the reality of the secular change indicated at Mexico City, the writers carried out repeat gravity measurements in the fall of 1967 at key stations on the gravity traverse established in 1949 between Mexico City and Acapulco (Woollard, 1952). A connection was also made to the Acapulco airport site which had been tied directly to Mexico City in 1961 by Ing Julio Monges using two LaCoste & Romberg gravimeters. The original 1949 measurements had been made with the prototype geodetic Worden gravimeter that the senior writer used on his first global network of observations in 1948 (Woollard, 1949).

Although the eccentric response of this Worden gravimeter was appreciable and possibly not so well defined that the corrected values had a reliability no better than of  $\pm 0.1$  mgal, this restriction on the comparisons is not limiting. Neither can the uncertainty in calibration be regarded as a limiting factor, since the total change in gravity between Mexico City and Acapulco is of the order of 500 mgal, and the calibration used in 1949 is known to have been good to better than 1 mgal in 2,000 mgal. The total limitation in obtaining a significant comparison therefore appears to be no more than 0.3 to 0.4 mgal. As seen from the following comparison, this limitation in no way restricts the validity of the results obtained. To simplify the comparison, all values are given with respect to the value obtained for the old national gravity base at Tacubaya Observatory. Verification

	1949	1967	Difer.-Differ.
Tacubaya	---	---	---
Cuernavaca	+173.2	+173.17	+0.03
Río Huajuotla	+134.3	+134.26	+0.04
Iguala	+318.4	+318.26	+0.14
Chilpancingo	+223.7	+223.49	+0.21
Acapulco	+582.0	+584.49	-2.49
	1961	1967	Difer.-Differ.
Tacubaya	---	---	---
Acapulco Airport	575.08	576.36	-1.28

paración, se dan todos los valores con relación al valor obtenido para la antigua base nacional de gravedad en el Observatorio de Tacubaya. La verificación del marcado cambio encontrado en Acapulco se da por comparaciones con el valor del Aeropuerto de Acapulco determinado por uno de los autores en 1961.

Las diferencias en valores entre 1949 y 1967 se muestran gráficamente como función del lugar y de la geología en la Fig. 1 y las diferencias de Tacubaya-Acapulco para 1949, 1961 (relativos) a 1967 se muestran como función del tiempo en la Fig. 2. Nótese que al menos de modo relativo, las antiguas mediciones del gravímetro Worden de 1949 entre Tacubaya y Chilpancingo parecen ser buenas hasta en 0.1 mgal en promedio y que la incertidumbre estimada de 0.3 a 0.4 mgal probablemente tampoco se aplique a la observación en Acapulco de 1949 que muestra una diferencia de casi 2.5 mgal. A pesar que existía alguna incertidumbre en ocupar el sitio de 1949, cualquier error por esta causa no reduciría el cambio secular indicado en la Fig. 2, de 0.16 mgal por año. El error probable calculado por recuperar el sitio de 1949 que fué destruido se cree que no excede 0.2 mgal que podrían cambiar la variación secular de  $\approx 0.02$  mgal por año. La relación que se indica en la Fig. 2 (0.16 mgal/año) es aproximadamente el doble del valor indicado al repetir observaciones de péndulo en la Ciudad de México (0.065 mgal/año). Esto sugiere una posible diferencia en compensación entre Acapulco y la Ciudad de México.

Esta no es una hipótesis irrazonable, puesto que como muestra la gráfica de diferencias de valores como función de la localidad y de la geología en la Fig. 1, existe una gran sistema de fallas entre Acapulco y Chilpancingo que separa ambas áreas por desplazamiento cortical aparentemente distintos y cambio secular.

Si se repitieran las nivelaciones a través de este sector, que fue explorado en 1948, como parte de una nivelación de primer orden de Acapulco a la Ciudad de México y Tuxpan, en el Golfo de México, no sólo se comprobarían (o no) las indicaciones de gravedad del cambio secular por elevación de la superficie sino que se destacaría la explicación de la diferencia de valores del cambio secular.

Que ha habido un cambio secular local en gravedad en la Ciudad de México de signo contrario al asociado al Altiplano como un todo, se muestra en las mediciones repetidas entre Tacubaya y el sótano del Hotel Génova que se ocupó en 1949 y 1953. Los cambios en los valores de los intervalos de la gravedad son los siguientes:

1949	+14.20 mgal	0.0	Difer.-Differ.
1953	+14.60 mgal	+0.40	Difer.-Differ.
1967	+15.23 mgal	+1.03	Difer.-Differ.

Como se vé en la Fig. 3, estos datos definen un valor de +0.068 mgal por año. Como se indicó antes, se cree que este cambio se debe a hundimiento local en el Centro de la Ciudad de México, construida sobre un lago antiguo que parece hundirse por compactación del peso estático y extracciones de agua. Por lo tanto, operan en esta área dos efectos de signo contrario. Puede existir un tercero; puesto que la Fig. 1 sugiere un efecto sistemático entre la Ciudad de México y Chilpancingo.

of the marked change found at Acapulco is given by the comparisons against the Acapulco Airport value determined by the junior author in 1961.

The differences in values between 1949 and 1967 are shown graphically as a function of location and geology in Fig. 1, and the Tacubaya-Acapulco differences for 1949, 1961 (relative) to 1967 are shown as a function of time in Fig. 2. It is to be noted that at least on a relative basis the old 1949 Worden gravimeter measurements between Tacubaya and Chilpancingo appear to have been good to at least 0.1 mgal on the average, and that the estimated uncertainty of 0.3 to 0.4 mgal also probably does not apply to the 1949 Acapulco observation where a difference of nearly 2.5 mgal is indicated. Although there was some uncertainty in occupying the 1949 site, any error from this cause would not reduce the secular change indicated by figure 2 of 0.16 mgal per year. The estimated probable error in recovering the 1949 site which had been destroyed is not believed to exceed 0.2 mgal which would change the secular rate defined by  $\approx 0.02$  mgal per year. The relation indicated by Fig. 2 (0.16 mgal/year) is approximately twice the rate indicated by the repeat pendulum observations at Mexico City (0.065 mgal/year). This suggests a possible difference in compensation between Acapulco and Mexico City.

This is not an unreasonable hypothesis for, as seen from the plot of differences in values as a function of location and geology in Fig. 1, there is a major fault system between Acapulco and Chilpancingo which separates the two areas of apparently different crustal displacement pattern and secular change. Repeat leveling across this sector which was surveyed in 1948 as part of a first order level line from Acapulco to Mexico City and on to Tuxpan on the Gulf of Mexico should not only prove or disprove the gravity indications of secular change in surface elevation, but bring out the explanation for the difference in rate of secular change.

That there has been a local secular change in gravity in Mexico City of opposite sign to that associated with the plateau as a whole is indicated by repeat measurements between Tacubaya and the Hotel Geneva sub-base that was occupied in 1949 and 1953. The changes in gravity interval values are as follows:

As seen from Fig. 3, these data define a rate of +0.068 mgal per year. As indicated earlier, it is believed that this change is due to local subsidence in downtown Mexico which is built on a former lake bed that appears to be subsiding through compaction from static loading and dewatering. There are thus two effects of opposite sign that are operative in the area. There may be a third; for as seen from Fig. 1, there is a suggestion of a systematic effect between Mexico City and Chilpancingo.

## Tacubaya y Hotel Génova

Aunque se intentó el presente trabajo solo para probar la realidad del cambio secular mostrado por observaciones de repetición de péndulo en la Ciudad de México, también ha servido para destacar un importante problema tectónico. En particular, muestra que está en proceso un *activo desplazamiento cortical* con tal rapidez que pueden hacerse mediciones significativas en intervalos de solo un año o dos. Para capitalizar tal oportunidad de estudiar tectónica en acción, se debe repetir tan pronto como sea posible el sector Ciudad de México-Tuxpan de la línea de gravedad Acapulco-Tuxpan 1949 y si es posible, efectuar nivelaciones de tercer orden en sectores clave como entre Acapulco y Chilpancingo.

Estos datos, mas los que existen de nivelaciones de 1948 y mediciones gravitacionales de 1949, proveerán una base firme para un análisis significativo del desplazamiento cortical y actividad tectónica en cuanto ocurra. Obviamente, este suceso por fortuna, también define automáticamente un área de intensos estudios geofísicos afines, particularmente flujo de calor y sismicidad.

*BIBLIOGRAFIA*

- WOOLLARD, G. P., N. C. HARDING, C. MUCKENFUSS, W. E. BONINI, and W. A. BLACK. 1952. World-wide Gravity Measurements Conducted during the Period June 1949-January 1952: *Woods Hole Ocean. Inst. Tech. Report 52-59.*

## Tacubaya and Hotel Genova

Although the present study was intended only as a test of the reality of the secular change indicated by the repeat pendulum observations at Mexico City, it has also served to focus attention on an important tectonic problem. In particular, it has indicated that *active crustal displacement* in Mexico is proceeding at such a rate that meaningful measurements can be made at intervals of only a year or two. In order to capitalize on such an opportunity for studying tectonics in action, the Mexico City-Tuxpan sector of the 1949 Acapulco-Tuxpan gravity traverse should also be repeated as soon as possible, and if possible, at least third order levels run over key sectors such as between Acapulco and Chilpancingo. Such data, plus the existing 1948 leveling and 1949 gravity measurements, would provide a firm basis for a significant analysis of crustal displacement and tectonic activity as it occurs. Obviously, this fortunate occurrence also automatically defines an area for intensive related geophysical studies; particularly the study of heat flow and seismicity.

*BIBLIOGRAPHY*

