

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Julián Adem

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 6

México, D. F., 1º de Abril de 1966

Núm. 2

UNA RED DE BASES MODERNAS PARA CONTROL DE GRAVEDAD EN LAS AMERICAS CENTRAL Y DEL SUR

GEORGE P. WOOLLARD, * JULIO MONGES CALDERA **
y JOSEPH A. KOZLOSKY ***

INTRODUCCION

Los valores de gravedad van adquiriendo mayor importancia para variados estudios geodésicos y geofísicos y como hay cierto grado de confusión respecto a valores de base para gravedad en las Américas Central y del Sur, los autores realizaron una revisión y análisis de aquellos publicados para esa área e intentaron preparar un conjunto de valores dignos de confianza para ser usados: (a) para establecer el *datum* absoluto para prospecciones locales de gravedad: (b) para normas de calibración usadas por diferentes grupos y (c) como valores de control para ajustar mapas de anomalías de gravedad a una norma común de calibración y *datum* por comparación de anomalías donde faltan o no están disponibles datos originales de observación.

En consecuencia, los datos de estaciones base que son presentados pueden servir para varios propósitos, pero su principal valor consiste en que permiten la derivación de representaciones unificadas del campo de gravedad, objetivo de considerable importancia para los estudios geodésicos y geológicos, así como de la corteza y del manto superior en las Américas Central y del Sur.

* Director del Instituto de Geofísica, Universidad de Hawaii, Honolulu.

** Departamento de Gravimetría, Instituto de Geofísica, U.N.A.M., México, D. F.

*** Servicio Geodésico Inter-Americano, Fort Clayton, Zona del Canal (Panamá).

A NETWORK OF MODERN GRAVITY CONTROL BASES IN CENTRAL AMERICA AND SOUTH AMERICA

GEORGE P. WOOLLARD, * JULIO MONGES CALDERA **
and JOSEPH A. KOZLOSKY ***

INTRODUCTION

As gravity values are becoming increasingly important for various geodetic and geophysical studies, and as there is a certain degree of confusion in regard to gravity base values in Central and South America, the authors have undertaken a review and analysis of published gravity values in the area and endeavored to prepare a set of reliable values that can be used: (a) for establishing the absolute *datum* of local gravity surveys; (b) for the calibration standards being used by different groups; and (c) as control values for adjusting gravity anomaly maps to a common calibration standard and *datum* through anomaly comparison where the original observational data are not available.

The base station data presented therefore can serve several purposes, but their principal value lies in that they permit the derivation of a unified representation of the gravity field, an objective of considerable importance for studies in geodesy, geology, and the study of the crust and upper mantle in Central and South America.

* Director, Institute of Geophysics, University of Hawaii, Honolulu.

** Department of Gravimetry, Institute of Geophysics, N.A.U.M. Mexico City.

*** Inter-American Geodetic Survey, Fort Clayton, Canal Zone (Panama).

CONFIABILIDAD DE DATOS EXISTENTES Y ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Es difícil definir lo que constituye una medición segura de gravedad en una área en que hay una larga historia de observaciones y escoger las mediciones más recientes no es ciertamente un criterio para definir los datos de mayor confianza. La única manera de estimarla es a través de repetidas mediciones con equipo al que se suponga poseer un alto grado de seguridad. Con ese objetivo, el primer autor (Woollard, 1949) inició en 1948 un programa global de mediciones de gravedad con el prototipo de gravímetro geodésico Worden, transportado por aire para disminuir el efecto de deriva instrumental. Esta serie de observaciones comprendían una conexión entre Washington, D.C. y Coco Solo, Panamá, que se usó como base primaria para establecer una red regional de bases en aeropuertos y observaciones de comparación a través de las Américas Central y del Sur. En el año siguiente (1949), Mr. Norman C. Harding, en aquel tiempo estudiante graduado de la Universidad de Wisconsin que trabajaba con el primer autor, llevó a cabo la iniciación del programa sud-americano propiamente mediante una serie de observaciones desde La Plata, Argentina, hacia el norte a través de América Central hasta los Estados Unidos (ver Fig. 1 para ubicar los sitios ocupados y sus interconexiones).

Aunque no era el primero de tales programas de interconexión en América del Sur, sí fué el primero que produjo datos de absoluta confianza para más de 0.5 mgal. El Dr. Paul Wuenschel, del Observatorio Geológico Lamont de la Universidad de Columbia, Nueva York, en fecha anterior, había realizado una extensa serie de mediciones de gravedad en carretera transportando por tierra un juego de péndulos de cuarzo contruídos por la Gulf Research and Development Co., que se extendía de Río de Janeiro, Brasil a Buenos Aires, Argentina y a través de la Cordillera de los Andes, a Arica, Chile. Desgraciadamente dichas mediciones se realizaron con dificultades y nunca se publicaron los resultados.

Las series más extensas de mediciones que estaban publicadas antes de las observaciones de Harding se habían hecho en Argentina por Mateo y Levin (1945), usando un aparato pendular compuesto Askania y en México por Medina, según el informe de de la O. Carreño (1949), usando el aparato pendular sencillo similar al modelo del U.S. Coast and Geodetic Survey.

Aunque Vening Meinesz (1934), en términos de conexiones internacionales para América del Sur, realizó mediciones pendulares de gravedad submarinas que ligaban Panamá, Brasil y Argentina y conexiones pendulares entre algunos sitios de bases nacionales de gravedad con otras de Europa, solo el U.S. Coast and Geodetic Survey había emprendido un programa internacional sistemático. Aslakson (1943), por ejemplo, estableció algunas bases de gravedad usando el aparato pendular del USC&GS en Colom-

RELIABILITY OF EXISTING DATA AND HISTORICAL BACKGROUND

It is difficult to define what constitutes reliable measurements of gravity in an area where there is a long history of observations, and certainly choosing the most recent measurements is not a criterion for defining the most reliable data. The only way of assessing reliability is through repeat measurements made with equipment believed itself to possess a high degree of reliability. It was with this objective that the first author (Woollard, 1949) initiated in 1948 a global program of gravity measurements with the prototype Worden geodetic gravimeter using air transport to minimize the effect of instrumental drift. This series of observations included a connection from Washington, D. C. to Coco Solo, Panama, which was to be used as a primary base for establishing a regional network of airport bases and comparison observations throughout Central America and South America. The following year (1949), Mr. Norman C. Harding, at that time a graduate student at the University of Wisconsin working under the senior author, undertook the start of the South American program proper, and carried out a series of observations that ranged from La Plata, Argentina, northward to the United States through Central America (see Fig. 1 for the location of sites occupied and their interconnections).

Although the above was not the first such international program in South America, it was the first one producing data having an over-all reliability of better than 0.5 mgal. Dr. Paul Wuenschel, of the Lamont Geological Observatory of Columbia University, New York, at an earlier date, had carried out an extensive series of gravity measurements along highways using ground transport with a set of quartz pendulums developed by the Gulf Research and Development Co. which extended from Rio de Janeiro, Brazil, to Buenos Aires, Argentina, and across the Andes Mts. to Arica, Chile. These measurements unfortunately were beset by difficulties, and the results have never been published.

The most extensive series of measurements that were in existence prior to Harding's observations that had been published were those made in Argentina by Mateo and Levin (1945) using an Askania compound pendulum apparatus, and those made in Mexico by Medina and reported by de la O. Carreño (1949) using the single pendulum apparatus similar to the model of the U. S. Coast and Geodetic Survey.

In terms of international connections in South America, although Vening Meinesz (1934) had made submarine pendulum gravity measurements interconnecting Panama, Brazil, and Argentina, and pendulum ties had been made between some of the national gravity bases sites and European gravity bases, only the U. S. Coast and Geodetic Survey had conducted any systematic international program. Aslakson (1943), for example, established several gravity bases using the USC&GS pendulum apparatus in Colom-



Fig 1

bia y Ecuador y Shelton (inédito) hizo mediciones en 1949 que interconectaban siete de las bases nacionales de gravedad.

Durante el período 1950 y 1951 el primer autor y sus estudiantes hicieron varias conexiones gravimétricas entre los Estados Unidos, México y Panamá, además de una serie de mediciones pendulares y gravimétricas en México. En 1952 Mr. William Black, de la Universidad de Wisconsin, realizó una segunda serie de observaciones regionales con un gravímetro Worden a través de las Américas Central y del Sur hasta llegar a Ushuaia, en el extremo sur de Argentina. Los sitios ocupados y sus interconexiones se muestran en la Figura 2 y tales mediciones que comprendieron reocupaciones de casi todos los sitios que Harding había tocado antes en aeropuertos y las varias bases nacionales de gravedad, indicaron la necesidad de mayor seguridad observacional. Aunque el acuerdo con las observaciones de Harding, en general, se acerca a 0.3 mgal y comprobaba la mayoría de las grandes discrepancias en trabajos previos, según sus propias observaciones, había lugares, especialmente en Brasil, con discrepancias de casi 2 mgals en los trabajos de Harding y de Black. Para tratar de anular tales discrepancias, Mr. Thomas S. Laudon y Mr. Robert Iverson, de la Universidad de Wisconsin, llevaron a cabo una tercera serie de mediciones en 1957 y 1958. Mr. Laudon y Mr. Iverson reocuparon las bases en el este y en el oeste de la América del Sur, respectivamente. La última serie de observaciones quedó infortunadamente afectada por problemas instrumentales y este conjunto particular de datos no contribuyeron mucho a la resolución de los problemas básicos.

Durante ese mismo período, Mr. Black y el segundo autor en compañía del Dr. William Bonini, entonces estudiante graduado en la Universidad de Wisconsin, establecieron una red de bases de gravedad en aeropuertos y carreteras a través de México. Los autores en colaboración con el Servicio Geodésico Inter-Americano y otras dependencias (Monges Caldera, J. *et al.*, 1962) también hicieron una red de bases de gravedad en aeropuertos a través de América Central y una serie de mediciones en caminos en el sur de México y Guatemala. La Figura 3 muestra la red de bases y recorridos realizados en ese período en que también el Servicio Geodésico Inter-Americano inició un intenso programa de observaciones de gravedad en América del Sur.

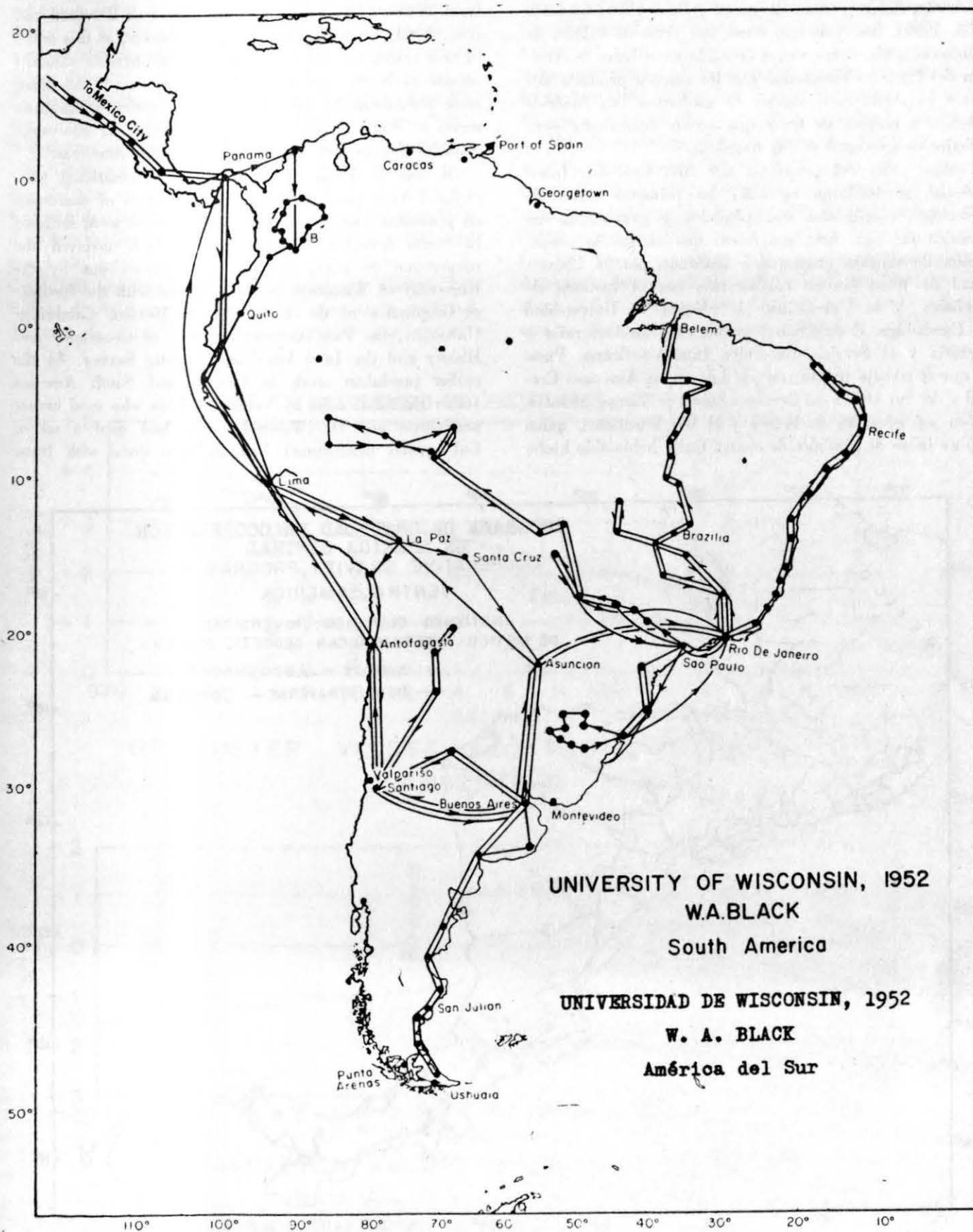
Por razón de las marcadas diferencias sistemáticas entre resultados de la Universidad de Wisconsin y del SGIA que se relacionaban obviamente con diferencias de normas de calibración que usaba cada grupo, resultaba claro que sólo podría tenerse un cuerpo de datos de gravedad hasta que se establecieran normas uniformes de seguridad. Tal problema no es exclusivo de América del Sur y el primer autor lo había planteado antes respecto a observaciones en otras partes del mundo. Para resolverlo se estableció en 1951 la primera de una serie de bases pendulares de gravedad usando los péndulos de cuarzo Gulf y los de invar Cambridge

bia and Ecuador and Shelton (unpublished) made measurements in 1949 interconnecting seven of the national gravity bases.

During the period 1950 and 1951 various gravimeter connections were made by the senior author and his students between the United States, Mexico, and Panama, as well as a series of pendulum and gravimeter measurements in Mexico. In 1952, Mr. William Black, of the University of Wisconsin, carried out a second series of regional observations with a Worden gravimeter throughout Central and South America that extended down to Ushuaia at the southern tip of Argentina. The sites occupied and their interconnection are shown in Figure 2. These measurements which involved reoccupations of most of the sites that had been occupied earlier by Harding at airports, as well as the various national gravity bases, pointed out the need for greater observational reliability. Although agreement with Harding's observations, in general, approached 0.3 mgal and verified most of the large discrepancies in earlier work indicated by Harding's observations, there were places, particularly in Brazil, where discrepancies of as much as 2 mgals were apparent between Harding's and Black's results. To try and resolve these discrepancies, Mr. Thomas S. Laudon and Mr. Robert Iverson, of the University of Wisconsin, carried out a third series of measurements in 1957 and 1958. Mr. Laudon and Mr. Iverson reoccupied the bases in eastern and western South America respectively. The latter series of observations unfortunately were subject to instrumental problems and this particular set of data did not contribute too much to the resolution of the basic problem.

During this same period Mr. Black and the second author established along with Dr. William Bonini, who was then a graduate student at the University of Wisconsin, a network of airport gravity bases and road traverses throughout Mexico. The authors in collaboration with the Inter-American Geodetic Survey and other agencies (Monges Caldera, J. *et al.*, 1962) also established a network of airport gravity bases throughout Central America and a series of road traverses in southern Mexico and Guatemala. Figure 3 shows the network of bases and traverses established. It was also during this period that the Inter-American Geodetic Survey initiated an extensive program of gravity observations in South America.

Because of marked systematic differences in the University of Wisconsin and IAGS results that were obviously related to differences in calibration standards being used by the two groups, it was clear that no coherent body of gravity data could be obtained until a reliable gravity standard was established. This problem was not unique to South America and had been recognized earlier by the first author in connection with observations elsewhere in the world. It was to resolve this problem that the first of a series of pendulum gravity bases were established in 1951, using the Gulf quartz pendulums and the Cambridge



de compensación magnética entre la ciudad de México y Fairbanks, Alaska (véanse Woollard y Rose, 1963; Garland, 1953, 1955). Sin embargo, como esta serie de valores de base no se usaba como norma de calibración fuera de América del Norte se recomendó que los mismos péndulos sirvieran para una serie similar de mediciones en América del Sur, a manera de tener una norma equivalente para trabajos de gravedad en las Américas.

Como parte del programa del Año Geofísico Internacional, se iniciaron en 1957 las primeras series de mediciones coordinadas con péndulos y gravímetros en América del Sur. Este programa, que abarcó la cooperación de muchos grupos, fué realizado por la Universidad de Wisconsin en colaboración con el Instituto de Geofísica de la Universidad de México, la Universidad de Cambridge, el Instituto Panamericano de Geografía e Historia y el Servicio Geodésico Inter-Americano. Puesto que el trabajo previo con péndulo en las Américas Central y del Sur (fuera del llevado a cabo por Vening Meinesz, quien usó péndulos de bronce y el Dr. Wuenschel, quien usó un juego de péndulos de cuarzo Gulf) había sido hecho

Invar pendulums with magnetic compensation, extending from Mexico City to Fairbanks, Alaska (see Woollard and Rose, 1963; Garland, 1953, 1955). However, as this series of base values was not being used as a calibration standard outside of North America, it was recommended that these same pendulums be used for a similar series of measurements in South America, in order to have an equivalent standard for gravity work throughout the Americas.

It was in 1957, as part of the International Geophysical Year program, that the first series of coordinated pendulum and gravimeter measurements were initiated in South America. This program, which involved the cooperation of many groups, was carried out by the University of Wisconsin in collaboration with the Institute of Geophysics of the University of Mexico, Cambridge University, the Pan-American Institute of Geography and History and the Inter-American Geodetic Survey. As the earlier pendulum work in Central and South America (other than that done by Vening Meinesz who used bronze pendulums and Dr. Wuenschel who had used a set of Gulf quartz pendulums) had all been done with Invar

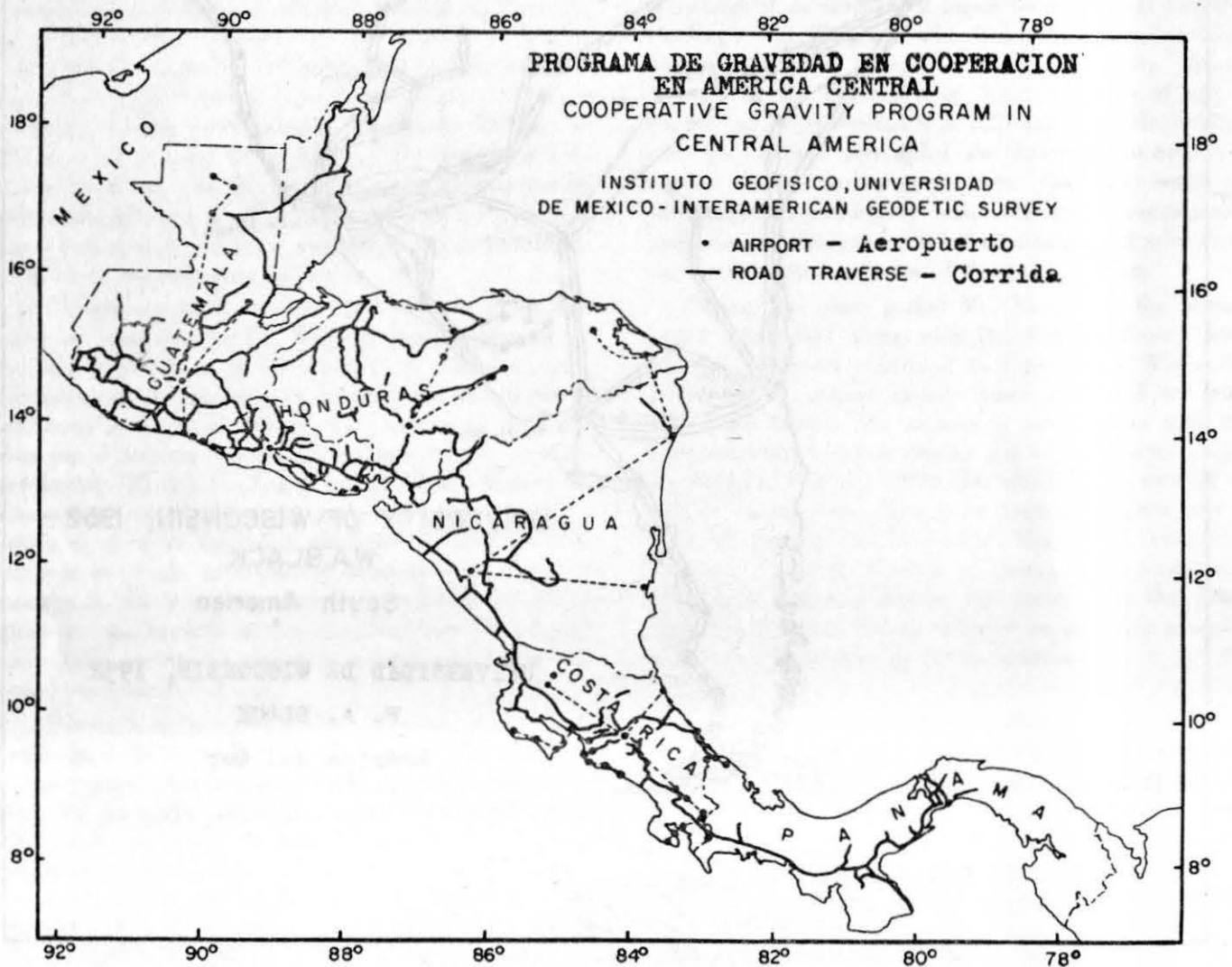
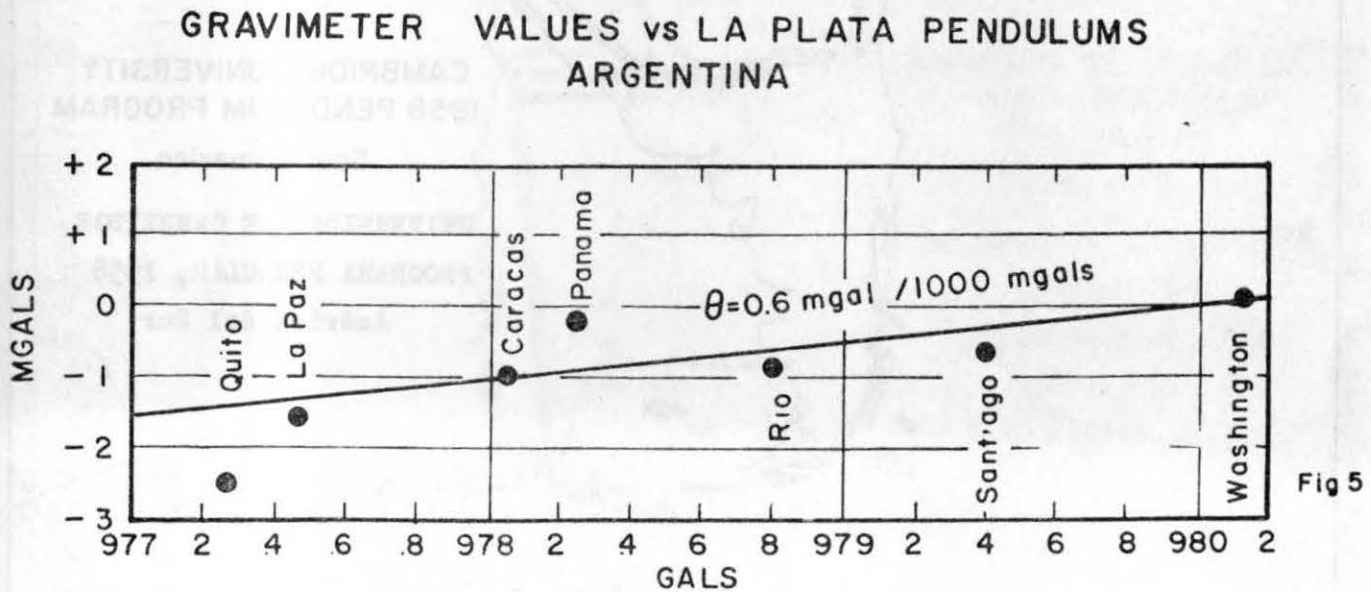
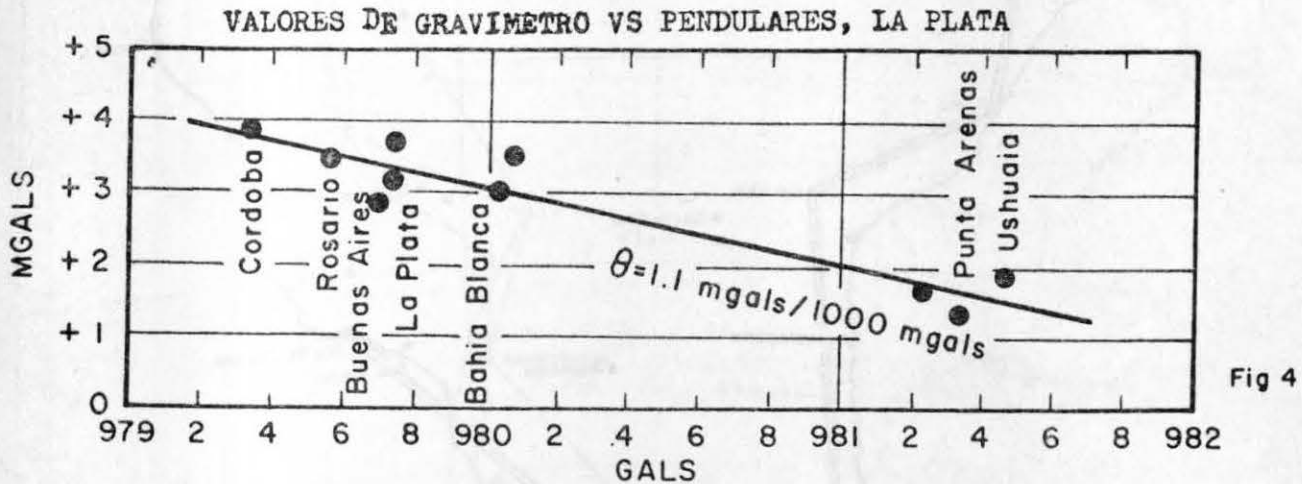


Fig. 3 .

con péndulos invar sin compensación magnética, se esperaba que dichas mediciones aclarasen discrepancias entre valores de gravímetro y pendulares anteriores. La naturaleza de tales discrepancias, como lo indican las comparaciones de valores de gravímetros en las bases pendulares de gravedad establecidas en Argentina por el Dr. José Mateo, de la Universidad de La Plata (Mateo y Levin, 1945), se muestran gráficamente en la Figura 4. Las discrepancias con valores del U.S. Coast and Geodetic Survey, en América del Sur, se muestra en la Figura 5. Puede verse que hay una desviación sistemática de -1.1 mgal por cambios de 1,000 mgals respecto a valores de Mateo y 0.6 mgal por 1,000 mgals respecto a valores pendulares del U.S. Coast and Geodetic Survey, observados por Shelton. Los valores de Aslakson indican solo un gran error ocasional de cerca de ± 1.5 mgals entre valores de gravímetro y

pendulums without magnetic compensation, it was hoped these measurements would clarify discrepancies between the gravimeter values and earlier pendulum values. The nature of these discrepancies as shown by gravimeter value comparisons at the pendulum gravity bases established in Argentina by Dr. Jose Mateo, of La Plata University (Mateo and Levin, 1945) are shown graphically in Figure 4. The discrepancies with the values of the U. S. Coast and Geodetic Survey in South America are shown in Figure 5. As seen, there is a systematic deviation of -1.1 mgal per 1,000 mgals change with Mateo's values, and $+0.6$ mgal per 1,000 mgals with the U. S. Coast and Geodetic Survey pendulum values as observed by Shelton. Aslakson's values indicate only a large random error of about $+1.5$ mgal between the gravimeter and pendulum values. The significance of the difference in sign of the



**GRAVIMETER VALUES vs USC & GS PENDULUM
1949 VALUES, SOUTH AMERICA
VALORES DE GRAVIMETRO VS PENDULARES, USC & GS, 1949
AMERICA DEL SUR**



Fig 6



Fig 7



Fig 8

pendulares. La significación de la diferencia de signo de apertura en valores con cambio en gravedad para ambos juegos de péndulos no es aparente, pero podría atribuirse al método empleado al distribuir el error de cierre. El punto importante que destaca en tales comparaciones, sin embargo, es que hay desviaciones sistemáticas significantes de valores pendulares. En este caso, no pueden atribuirse las diferencias a la calibración de los gravímetros usados ya que es el mismo en ambas comparaciones.

El programa pendular de la Universidad de Wisconsin durante el AGI fué realizado por Mr. Robert Iverson auxiliado por el Dr. Joel Watkins y el Dr. Thomas S. Laudon y consistió de dos series de observaciones: una a lo largo de la costa occidental hasta Puntas Arenas con una liga a Buenos Aires y otra a lo largo de la costa oriental terminando en Buenos Aires. El programa pendular de la Universidad de Cambridge fué realizado por Mr. J.E. Jackson ayudado por el segundo autor y consistió en una serie de observaciones iniciadas en Madison, Wisconsin y ampliadas a Buenos Aires, Argentina, en la costa oriental de América del Sur y Santiago, Chile, en la costa occidental, vía Ciudad de México. Ambos grupos de mediciones se hicieron en una secuencia de escalera (A-B-C-D-D-C-B-A) para obtener cierre en cada sitio. Los resultados de las mediciones con el péndulo Cambridge han sido publicados por Jackson (1959) y los de mediciones con el péndulo Gulf por Woollard y Rose (1963). Los sitios ocupados y las interconexiones establecidas se muestran en la Figura 6 para los péndulos Cambridge y en las Figuras 7 y 8 para los péndulos Gulf.

Para completar dichas observaciones y proporcionar una valoración independiente de intervalos para detectar taras (saltos en período pendular) se hicieron también mediciones adicionales con gravímetro al realizarse las observaciones con el péndulo Gulf. Igualmente, durante el período del AGI, el Dr. Geoffrey Oldham de la California Exploration Co., como una contribución de esa compañía al Año Geofísico Internacional, usó un gravímetro Worden de gran alcance prestado por el primer autor para establecer una serie de bases de gravedad tanto en América Central como en América del Sur. Los sitios ocupados en América del Sur se muestran en la Figura 9.

El programa cooperativo de gravedad del AGI entre la Universidad de Wisconsin y el Servicio Geodésico Inter-Americano comprendía una serie independiente de mediciones con gravímetro en América del Sur usando dos instrumentos geodésicos La Coste-Romberg. Esa serie de observaciones, realizadas por Mr. Richard Longfield, de la Universidad de Wisconsin y el tercer autor, difería de previos programas gravimétricos en que todas las mediciones se hacían en secuencia de escalera (A-B-C-D-D-C-B-A) más que en cierres de asa (A-B-C-D-A), que refuerza inconmesurablemente los resultados hasta obtener una confiabilidad cercana a ± 0.1 mgal. La Figura 10 demuestra los sitios ocupados y las interconexiones establecidas. Sobre la base de estas últimas mediciones, en particular, fué po-

departures in values with change in gravity for the two sets of pendulums is not aparent, but it could be related to the method employed in distributing the closure error. The important point brought out by these comparisons, however, is that there are significant systematic desviations in pendulum values. In this case, the differences cannot be attributed to the calibration of the gravimeters used as it is the same in both comparisons.

The University of Wisconsin pendulum program during the IGY was carried out by Mr. Robert Iverson assisted by Dr. Joel Watkins and Dr. Thomas S. Laudon, and consisted of two series of observations: one along the West Coast to Punta Arenas with a tie to Buenos Aires, and one along the East Coast terminating at Buenos Aires. The Cambridge University pendulum program was carried out by Mr. J. E. Jackson assisted by the second author, and consisted of a series of observations starting from Madison, Wisconsin, and extending via Mexico City to Buenos Aires, Argentina, on the east coast of South America and Santiago, Chile, on the west coast. Both groups of measurements were carried out in ladder sequence (A-B-C-D-D-C-B-A) in order to obtain closures at each site. The results for the Cambridge pendulum measurements have been reported by Jackson (1959), and those for the Gulf pendulum measurements by Woollard and Rose (1963). The sites occupied and the interconnections established are shown in Figure 6 for the Cambridge pendulums and in Figures 7 and 8 for the Gulf pendulums.

To supplement these observations and provide an independent evaluation of intervals for detecting tares (jumps in pendulum period), companion gravimeter measurements were also made along with the Gulf pendulum observations. Also, during the IGY period, Dr. Geoffrey Oldham, of the California Exploration Co., as a contribution of this company to the International Geophysical Year, used a high-range Worden gravimeter, loaned by the first author, to establish a series of gravity bases in both Central America and in South America. The sites occupied in South America are shown in Figure 9.

The cooperative IGY gravity program between the University of Wisconsin and the Inter-American Geodetic Survey involved an independent series of gravimeter measurements in South America using two LaCoste-Romberg geodetic gravimeters. This series of observations, which was carried out by Mr. Richard Longfield, of the University of Wisconsin and the third author, differed from the earlier gravimeter programs in that all measurements were made in ladder sequence (A-B-C-D-D-C-B-A) rather than as loop closures (A-B-C-D-A) which immeasurably strengthened the results so that a reliability approaching ± 0.1 mgal was obtained. Figure 10 shows the sites occupied and the interconnections established. On the basis of these last measurements in particular, it was possible to define the nature of



Fig 9

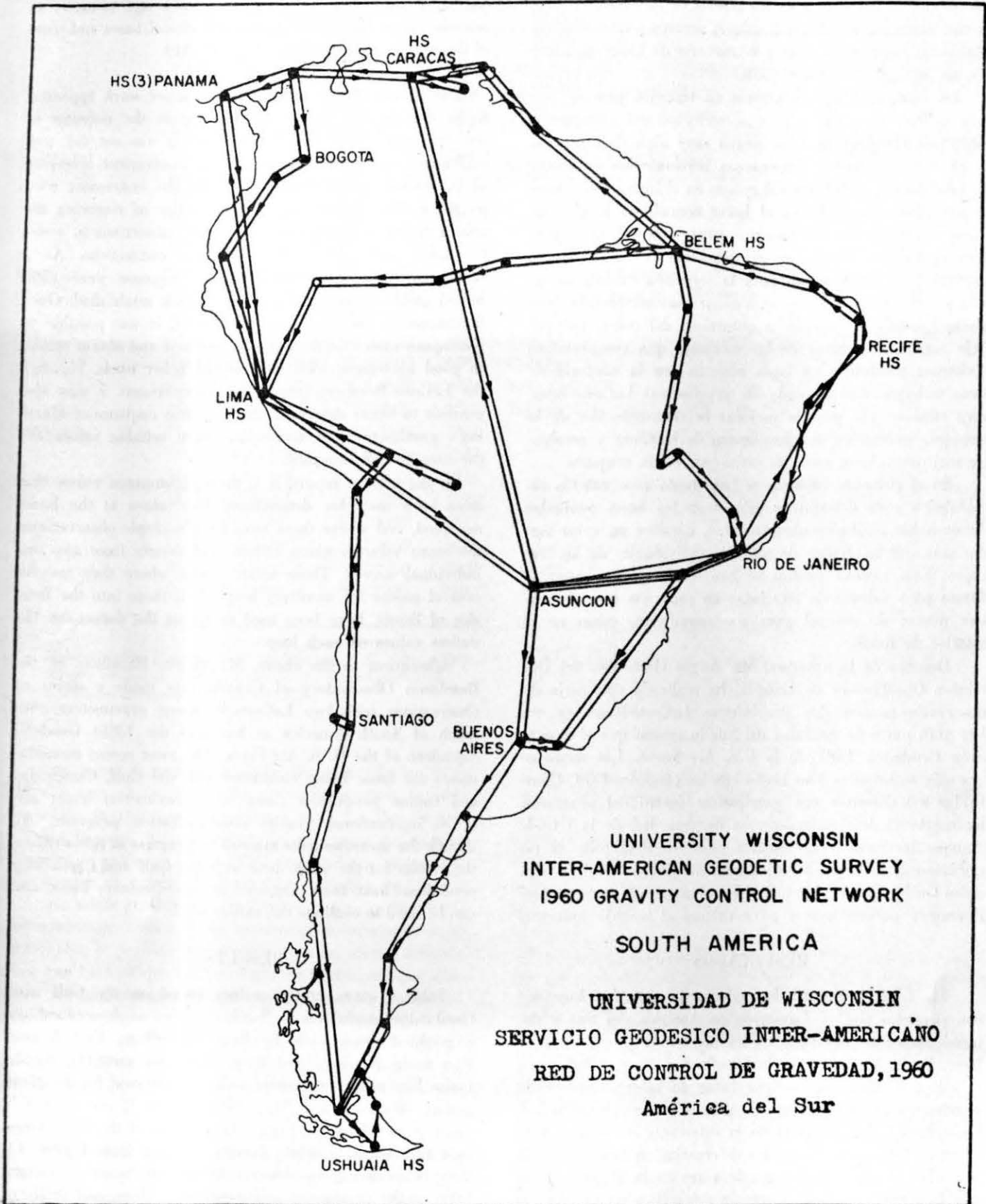


Fig. 10

sible definir la naturaleza de los errores en anteriores trabajos con gravímetro y llegar a valores seguros para todas las principales bases nacionales y la mayoría de bases en aeropuertos establecidas desde 1949.

La naturaleza de los errores en trabajos previos parecía deberse en parte a la concetricidad del gravímetro usado por Harding, que no estaba muy bien desarrollado en 1949 y en parte a inversiones involuntarias de lecturas iniciales del cuadrante del resorte en el instrumento usado por Black. La práctica al hacer conexiones locales de quitar el cuadrante del resorte para obtener más precisas conexiones locales de gravedad era la causa. Como resultado, las correcciones para la respuesta excéntrica estaba a 180° fuera de fase en algunas asas establecidas por Black. Cuando se conoció la naturaleza del error, fué posible recalcular valores de las secciones que comprendían y obtener resultados en buen acuerdo con la mayoría de otros trabajos. Comparando los gravímetros LaCoste-Romberg también fué posible mejorar la determinación de la respuesta excéntrica del gravímetro de Harding y recalcular mejores valores para los sitios que había ocupado.

En el presente informe se han usado esos valores recalculados para determinar valores en las bases ocupadas donde había múltiples observaciones, dándose un valor medio más que resultados de medidas individuales de los trabajos. Esos valores medios se han usado para ajustar el *datum* para valores de estaciones en cada asa que abarcaban puntos de control para asas auxiliares, como en el interior de Brasil.

Después de lo anterior, Mr. Angus Hamilton, del Dominion Observatory de Canadá, ha realizado una serie de observaciones con dos gravímetros LaCoste-Romberg sobre gran parte de América del Sur lo mismo que el Escuadrón Geodésico 1381 de la U.S. Air Force. Las mediciones más recientes se han hecho con los péndulos Gulf, Cambridge e italianos y con gravímetros dentro del programa internacional de standardización de gravedad de la UGGI. Aunque las mediciones todavía están en desarrollo al escribirse este informe, los resultados del trabajo con los péndulos Gulf y Cambridge han sido calculados de manera preliminar y pueden usarse para valorar el trabajo anterior.

RESULTADOS

La Tabla I muestra los valores de gravedad logrados con péndulos Gulf y Cambridge en América del Sur y determinados con una base media ponderada por Rose (ver Rose, Parte 5 y Parte 6, *in* Woollard y Rose, 1963, para el método). También incluye listas de valores medios de gravímetro derivados por el primer autor (Woollard y Rose, 1963). La Tabla II da la diferencia en valores y la Figura 11 es un trazo de las diferencias en función de la gravedad absoluta. Como puede verse en la Figura 11 no hoy indicación de una diferencia sistemática en valores entre datos de péndulos y gravímetros y además, la desviación media en valores no excede de ± 0.3 mgal.

the errors in the earlier gravimeter work and to arrive at reliable values for all the principal national bases and most of the airport bases established since 1949.

The nature of the errors in the earlier work appeared to be due in part to the eccentricity in the response of the gravimeter used by Harding which was not too well established in 1949, and in part to inadvertent inversion of the coarse spring reading dial on the instrument used by Black. This resulted from the practice of removing the coarse spring dial when making local connections in order to obtain more precise local gravity connections. As a result, corrections for the eccentric response were 180° out of phase on some of the loops Black established. Once the nature of the error was established, it was possible to recompute values on the sections involved and obtain results in good agreement with most of the other work. Through the LaCoste-Romberg gravimeter comparisons it was also possible to better determine the eccentric response of Harding's gravimeter and recompute more reliable values for the sites he had occupied.

In the present report, it is these recomputed values that have been used for determining the values at the bases occupied, and where there have been multiple observations, the mean value is given rather than results from any one individual survey. These mean values where they involve control points for auxiliary loops, like those into the interior of Brazil, have been used to adjust the *datum* for the station values on each loop.

Subsequent to the above, Mr. Angus Hamilton, of the Dominion Observatory of Canada, has made a series of observations with two LaCoste-Romberg gravimeters over much of South America as has also the 1381st Geodetic Squadron of the U. S. Air Force. The most recent measurements are those being conducted with the Gulf, Cambridge and Italian pendulums along with gravimeters under the IUGG international gravity standardization program. Although the measurements are still in progress at this writing, the results for the work done with the Gulf and Cambridge pendulums have been computed on a preliminary basis, and can be used to evaluate the earlier work.

RESULTS

Table I gives gravity values based on the Gulf and Cambridge pendulums in South America as determined on a weighted mean basis by Rose (See Rose, Part 5 and Part 6, *in* Woollard and Rose, 1963, for method). Table I also lists mean gravimeter values as derived by the first author (Woollard and Rose, 1963). Table II gives the differences in values and Figure 11 is a plot of the differences as a function of absolute gravity. As seen from Figure 11 there is no indication of any systematic difference in values between the gravimeter and pendulum values, and furthermore, it is seen that the mean deviation in values does not exceed ± 0.3 mgal.

TABLA I

TABLE I

COMPARACION DE DATOS MEDIOS PONDERADOS DE PENDULO Y GRAVIMETRO AMERICAS CENTRAL Y DEL SUR

COMPARISON OF WEIGHTED MEAN PENDULUM AND GRAVIMETER DATA CENTRAL AND SOUTH AMERICA

SERIE OCCIDENTAL WESTERN SERIES	PENDUL.	GRAVM.	SERIE ORIENTAL EASTERN SERIES	PENDUL.	GRAVM.
Santiago, Chile	979.4290	.4294	Rio de Janeiro, Brazil	978.8048	.8047
Houston, Texas	979.2983	.2983	Buenos Aires, Arg.	979.7053	.7053
Laredo, Texas	979.0803	.0800	Miami, Florida	979.0355	.0356
Monterrey, Mex.	978.8052	.8055	Panama, C. Z.	978.2418	.2417
Tamazunchale, Mex.	978.6603	.6598	Caracas, Venez.	978.0398	.0399
Chapulhuacan, Mex.	978.4843	.4843	Belem, Brazil	978.0370	.0374
Lima, Peru	978.2831	.2830	Bogotá, Colombia	977.4050	.4049
Panama, C. Z.	978.2418	.2417			
Ixmiquilpan, Mex.	978.1676	.1681			
Mexico City, Mex.	977.9416	.9414			
El Zarco, Mex.	977.7682	.7678			
Paso Cortes, Mex.	977.5713	.5711			
La Paz, Bolivia	977.4669	.4671			
Bogota, Columbia	977.4050	.4049			
Quito, Ecuador	977.2785	.2782*			

Valores medios ponderados de péndulo por J. C. ROSE (1963).

Valores medios de gravímetro por G. P. WOOLLARD (1963).

* Publicado erróneamente como 977.2777.

Weighted mean pendulum values by J. C. ROSE (1963).

Mean gravimeter values by G. P. WOOLLARD (1963).

* Published erroneously as 977.2777.

Las únicas razones para dudar de los resultados de la Tabla I son: a) los resultados preliminares para las nuevas series de mediciones pendulares entre La Paz, Bolivia y Point Barrow, Alaska, dentro del programa de standardización de gravedad de la UGGI, que indican ciertas modificaciones en valores y b) una revaloración de los más antiguos datos pendulares a la luz de lo que se ha sabido posteriormente acerca de la incidencia de errores y taras (saltos) en el período del péndulo y en los efectos ambientales que indican que los tres tipos de perturbaciones afectaron las mediciones del AGI, cuyos efectos no fueron conocidos ni apreciados correctamente en su totalidad.

La Tabla III señala que las correcciones para efectos de perturbaciones inducirían cambios significativos en valores pendulares comparables a valores pendulares medios recalculados, como lo hizo Rose (1963) para las bases establecidas durante y después del período del AGI. Ya que Washington, D.C. y Madison, Wisconsin, se usaron como bases primarias para las mediciones del AGI, los datos de la Tabla III incluyen las series completas de mediciones en cada una de las tres bases primarias. La Figura 12, muestra las interconexiones pendulares establecidas entre las varias bases.

The only reasons for questioning the results in Table I are: a) the preliminary results for the new series of pendulum measurements between La Paz, Bolivia, and Point Barrow, Alaska, under the current IUGG gravity standardization program suggest certain modifications in values, and b) a re-evaluation of the earlier pendulum data in the light of what subsequently has been learned about the occurrence of creep and tares (jumps) in pendulum period and environmental effects indicates all three types of perturbation did affect the IGY measurements, and that these effects were not all identified and handled correctly.

That corrections for all the perturbation effects would significantly change the pendulum values is brought out in Table III which compares the recomputed mean pendulum values with those derived by Rose (1963) for the bases established during and subsequent to the IGY period. As both Washington, D. C., and Madison, Wisconsin, were used as primary bases for the IGY measurements, the data of Table III include the complete series of measurements from each of these primary bases. Figure 12 shows the pendulum interconnections established between the various bases.

TABLA II

DIFERENCIA ENTRE DATOS DE GRAVIMETRO Y RELATIVOS DE
PENDULO AMERICAS CENTRAL Y DEL SUR

DIFFERENCE BETWEEN GRAVIMETER DATA AND RELATIVE
PENDULUM DATA CENTRAL AND SOUTH AMERICA

SERIE OCCIDENTAL WESTERN SERIES		SERIE ORIENTAL EASTERN SERIES	
Site-Sitio	mgal	Site-Sitio	mgal
Santiago, Chile	+0.4	Buenos Aires, Arg.	0.0
Houston, Texas	0.0	Miami, Florida	+0.1
Laredo, Texas	-0.3	Rio de Janeiro, Brazil	-0.1
Monterrey, Mex.	+0.3	Panama, C. Z.	-0.1
Tamazunchale, Mex.	-0.5	Caracas, Venez.	+0.1
Chapulhuacan, Mex.	0.0	Belem, Brazil	+0.4
Lima, Peru	-0.1	Bogota, Colombia	-0.1
Panama, C. Z.	-0.1		
Ixmiquilpan, Mex.	+0.5		
Mexico City, Mex.	-0.2		
El Zarco, Mex.	-0.4		
Paso Cortes, Mex.	-0.2		
La Paz, Bolivia	+0.2		
Bogota, Colombia	-0.1		
Quito, Ecuador	-0.3		

TABLE II

TABLA III

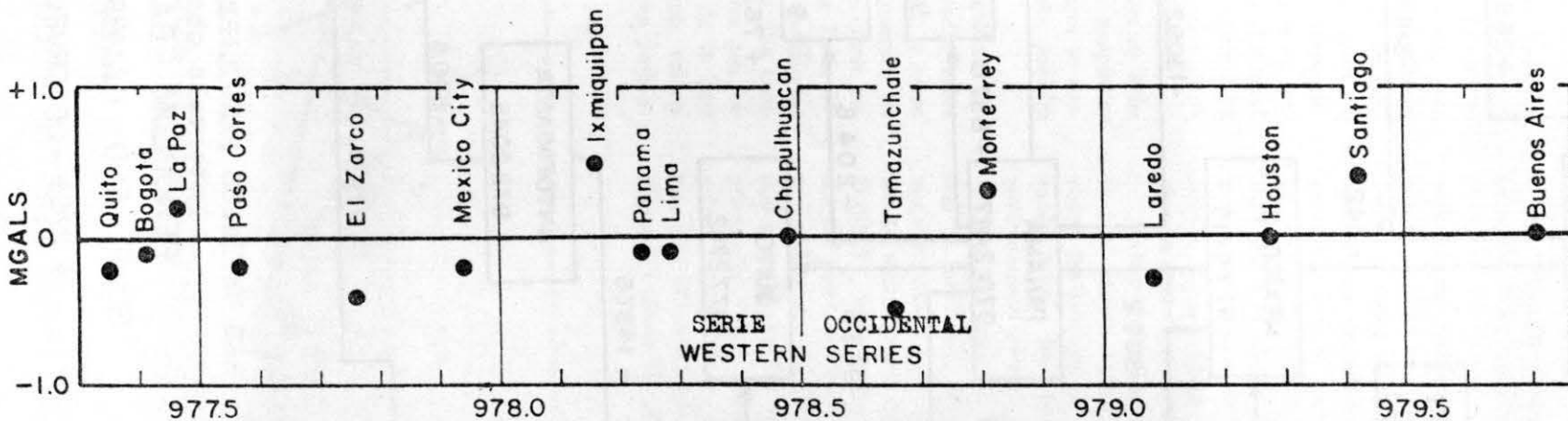
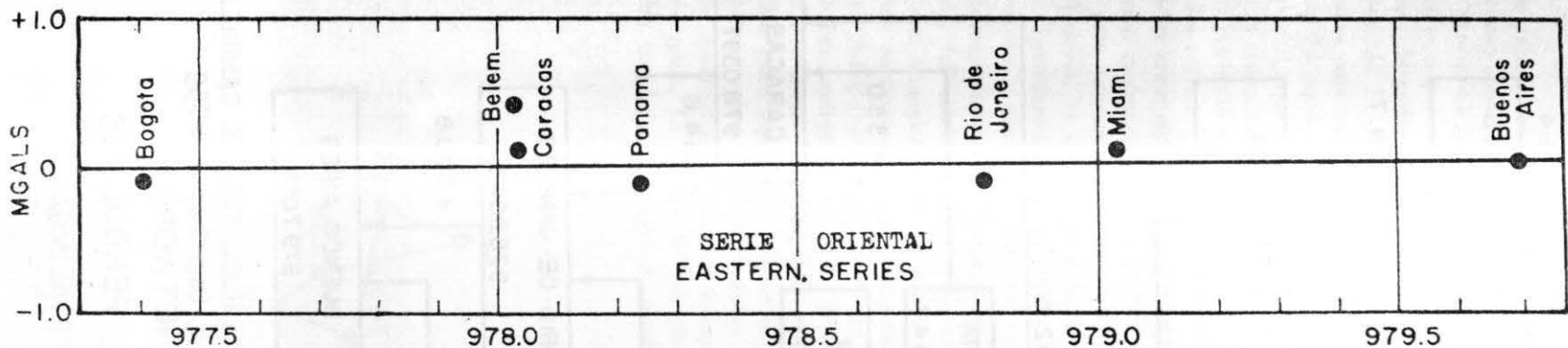
COMPARACION DE VALORES DE BASE PENDULAR ANTIGUOS Y NUEVOS
COMPARISON OLD AND NEW PENDULUM BASE VALUES

TABLE III

	ROSE 1963	VALOR NUEVO NEW VALUE	DIFER DIFF.		ROSE 1963	VALOR NUEVO NEW VALUE	DIFER DIFF.
Madison	980.3690	.3689	-0.1	Washington	980.1006	.1006	0.0
Denver	979.6116	.6124	+0.8	Charleston	979.5510	.5509	-0.1
Houston	979.2983	.2985	+0.2	Panama	978.2418	.2417	-0.1
Monterrey	978.8052	.8055	+0.3	Bogota	977.4050	.4047	-0.3
Mexico City	977.9416	.9415	-0.1	Belem	978.0370	.0371	+0.1
Panama	978.2418	.2417	-0.1	Caracas	978.0398	.0397	-0.1
Lima	978.2831	.2831	0.0	Rio de Janeiro	978.8043	.8043	-0.5
Quito	977.2785	.2782	-0.3	Buenos Aires	979.7053	.7051	-0.2
La Paz	977.4669	.4669	0.0				
Antofagasta	978.9017	.9045	+2.8				
Santiago	979.4290	.4292	+0.2				

Como puede haber alguna duda sobre lo que se hizo exactamente al derivar los nuevos valores pendulares, el recálculo de las mediciones con péndulo Cambridge por Jackson (1959) será usado como un ejemplo ilustrativo.

As there may be some question as to exactly what was done in deriving the new pendulum values, the recomputation of the Cambridge pendulum measurements by Jackson (1959) will be used as an illustrative example.



GALS ABSOLUTE GRAVITY
 GRAVEDAD ABSOLUTA GALS
**GRAVIMETER VERSUS PENDULUM VALUES
 CENTRAL AND SOUTH AMERICA**
 (Woollard and Rose 1963)
 VALORES DE GRAVIMETRO VS PENDULARES
 AMERICAS CENTRAL Y DEL SUR

Fig II

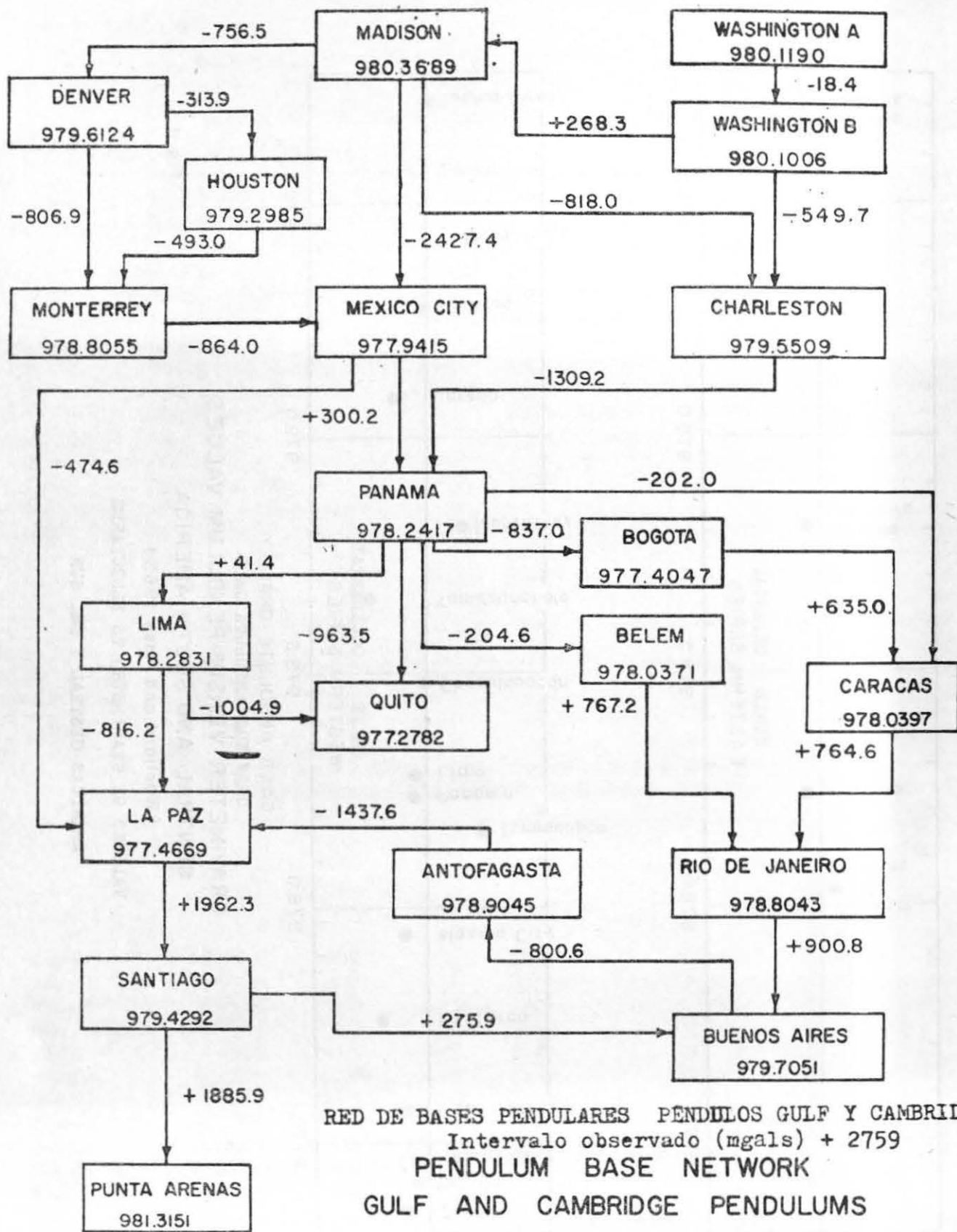


Fig. 12

RECALCULO DE LAS MEDICIONES
CAMBRIDGE 1958

Se publicó originalmente (después de hacer todas las correcciones standard para variaciones de amplitud, temperatura y presión) que los intervalos de gravedad según se determinaron por varias combinaciones de péndulos para cada uno de ambos juegos, entre bases se habían listado y promediado. En general es pequeña la separación de valores medios para cada juego de péndulos y raras veces excedía de 0.4 mgal. Sin embargo, se observaron diferencias hasta de 0.8 mgal y como se verá, el Juego VI tenía una diferencia acumulativa respecto al Juego I de casi -1.0 mgal. Por ello, era obvio que si uno de los juegos de péndulos daba resultados correctos, promediar grupos de intervalos introduciría un error sistemático general de casi 0.5 mgal.

Como cualquier error sistemático en valores es indeseable para estaciones de base utilizadas para propósitos de calibración, los dos juegos de datos pendulares se analizaron separadamente por el primer autor para posibles taras, errores y efectos del ambiente.

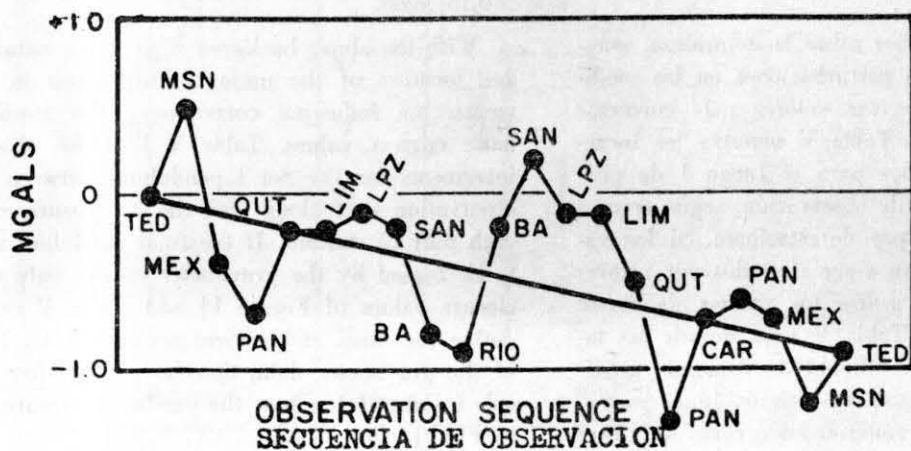
Consecuentemente el primer paso en el análisis emprendido, fué establecer valores de cierre basados sobre mediciones acumulativas de intervalos de estación y como todas las mediciones fueron realizadas en secuencia de escalera (A-B-C-D-D-C-B-A), había un valor de cierre para cada base excepto en el último punto. En la Tabla IV se listan valores acumulativos respecto a Teddington (981.1966 gals supuestos), valores de cierre y una comparación de ambos grupos de valores pendulares con valores de gravímetro relativos al mismo valor de la base de Teddington. La Figura 13 permite comparar valores obtenidos con los dos juegos de péndulos según Jackson

RECOMPUTATION OF CAMBRIDGE
1958 MEASUREMENTS

As originally published (after making all the standard corrections for amplitude, temperature, and pressure variations), the gravity intervals between bases as determined with various combinations of pendulums for each of two sets of pendulums were listed and averaged. In general, the scatter in mean values for each set of pendulums was small and seldom exceeded 0.4 mgal. However, differences as great as 0.8 mgal were observed, and as will be seen, on an over-all basis, Set VI had an accumulative difference from Set I of about -1.0 mgal. If was, therefore, obvious that ever if one set of pendulums was giving correct results, the averaging of the two sets of intervals would give an over-all systematic bias in values of about 0.5 mgal.

As any obvious systematic bias in values is undesirable in base station values being utilized for calibration purposes, the two sets of pendulum data were analyzed separately by the first author for possible tares, creep, and environmental effects.

The first step in the analysis undertaken, therefore, was to establish the closure values based on the accumulative station interval measurements, and as all measurements were carried out in a ladder sequence (A-B-C-D-D-C-B-A), there was a closure value for each base except the end point. Table IV lists the accumulative values relative to Teddington (981.1966 gals assumed), the closure values, and a comparison of the two sets of pendulum values with gravimeter values relative to the same Teddington base value. Figure 13 compares the values obtained with the two sets of pendulums as reported by Jackson (1959). Figure 14 shows the closure plots for each of the two sets



CAMBRIDGE PENDULUMS
DIFFERENCES SET VI vs SET I
PENDULOS CAMBRIDGE
CON DIFERENCIAS ENTRE JUEGOS VI Y I

Fig 13

(1959). La Figura 14 muestra trazos de cierre para cada juego de péndulos y la Figura 15 muestra los respectivos trazos de comparación de gravímetro.

Si el trazo de cierre para el Juego I de péndulos es examinado, puede verse que se suponen tres taras, que son las siguientes:

Intervalo Santiago-La Paz interval: 0.3 mgal
 Intervalo Lima-Quito interval: +0.5 mgal
 Intervalo Mexico City-Madison interval: 0.7 mgal

También puede verse que un efecto ambiental de 0.3 mgal queda indicado en la segunda observación en Panamá.

Si es examinado el correspondiente trazo de comparación de gravímetro de la Figura 15, puede verse que se comprueban las taras entre la Ciudad de México y Madison y entre Lima y Quito, pero que la tara entre Santiago y La Paz se debe realmente a un efecto ambiental en la primera observación de Santiago, lo cual es señal del requisito de que una tara positiva debe ser seguida por una tara negativa de valor similar. También se comprueba el efecto ambiental sobre la segunda observación en Panamá indicado por el trazo de cierre y además, el trazo de comparación de gravímetro muestra que la observación en Río de Janeiro también fué afectada como efecto ambiental, así como que a lo menos queda indicada una tara adicional (Buenos Aires II—Santiago II). Esta tara no se muestra en el trazo de cierre por perturbaciones de signo opuesto que se compensaron mutuamente. La pequeña tara indicada entre México I y Panamá I, en la Fig. 15, es real y debería verse en el trazo de cierre (Fig. 14). Sin embargo, la falta de una tara de esa magnitud en el trazo de cierre no es significativa como error ocasional de medición cuando no hay efectos de perturbación, ya que es de ± 0.15 mgal.

Con la información anterior sobre la naturaleza, magnitud y ubicación de grandes perturbaciones en las mediciones, se aplicaron para derivar valores más correctos las siguientes correcciones. La Tabla V muestra los incrementos de gravedad observados para el Juego I de péndulos entre cada par de sitios de observación, según errores de cierre de Δg entre cada par de estaciones. Si los valores finales de péndulo no van a ser afectados por valores de gravímetro, solo pueden usarse los valores de cierre pendular de la Figura 14 y Tabla V para definir las taras y efectos ambientales. La utilidad de datos de gravímetro, consecuentemente, termina después de jugar su papel para saber cómo se desarrollaron los errores de cierre de péndulo en la Fig. 14.

La primera perturbación (ver Fig. 15) es un efecto ambiental sobre Santiago, como puede verse en los resultados de la Tabla V en el primer intervalo Santiago-La Paz que es menor que la segunda por 0.45 mgal. Debe agregarse por ello una corrección de -0.45 mgal al intervalo La Paz I—Santiago I que es un efecto ambiental y tam-

of pendulums, and Figure 15 shows the respective gravimeter comparison plots.

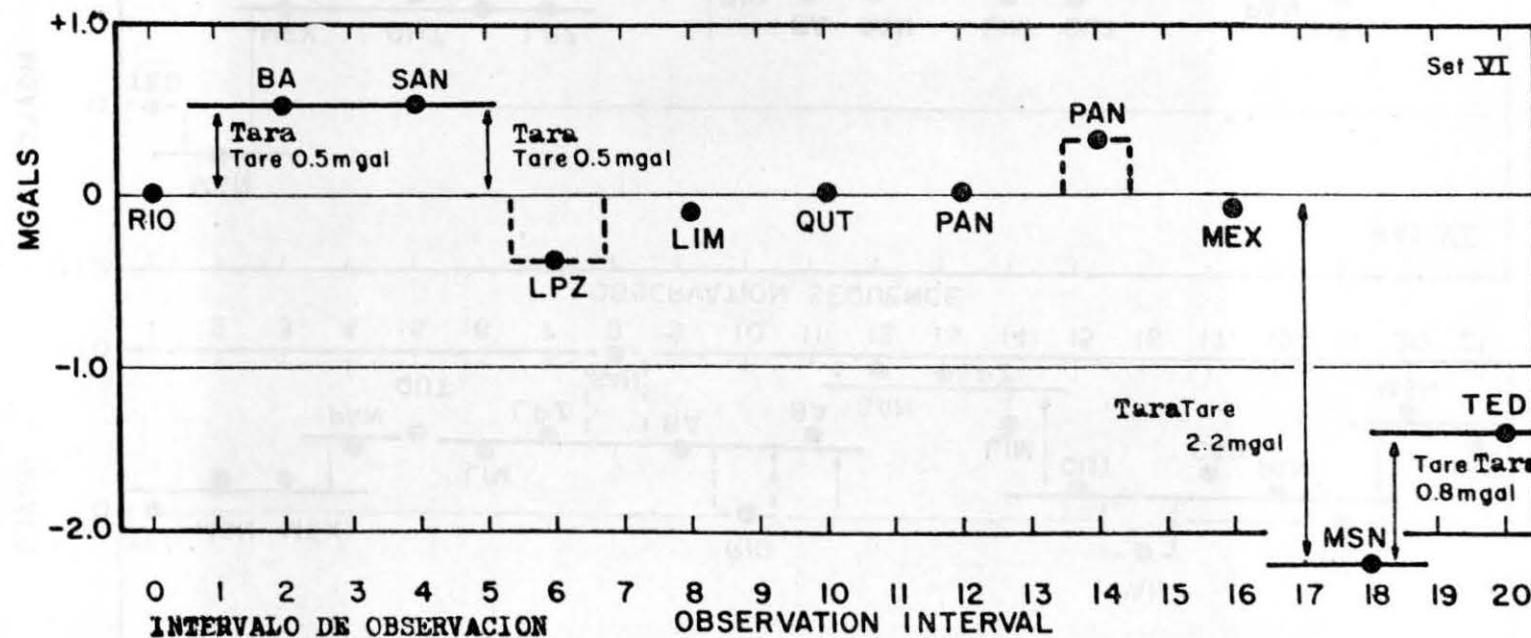
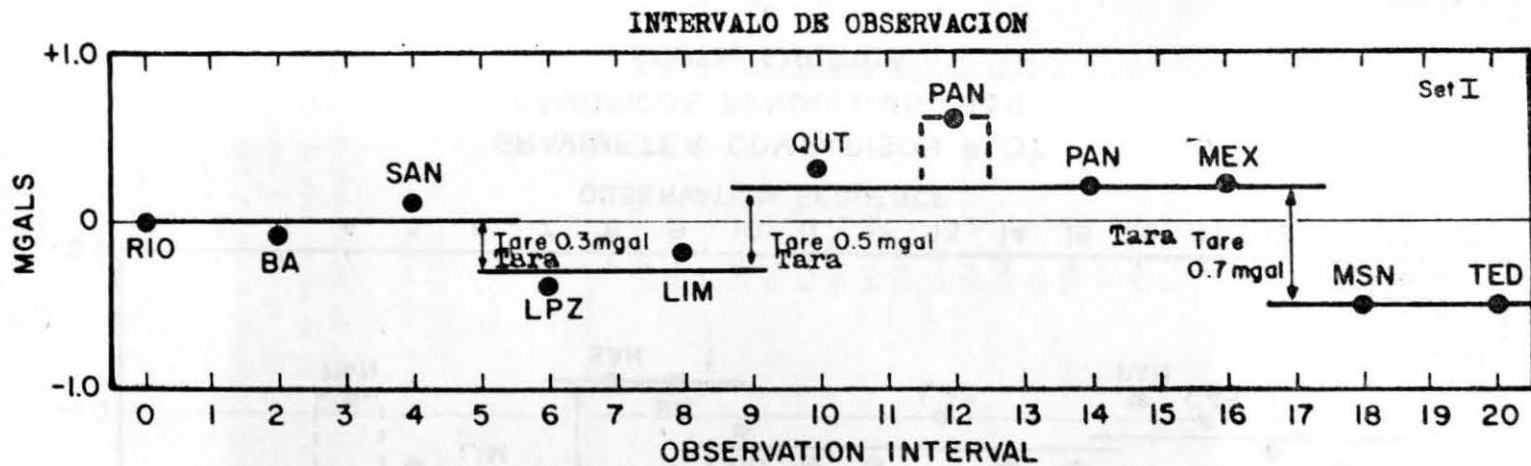
If the closure plot for the Set I pendulums is examined, it is seen that three tares are suggested. These are as follows:

It is also seen that an environmental effect of 0.3 mgal is indicated on the second observation made at Panama.

If the corresponding gravimeter comparison plot of Figure 15 is examined, it is seen that the tares between Mexico City and Madison and between Lima and Quito are verified, but that the one between Santiago and La Paz is actually due to an environmental effect on the first Santiago observation. This is indicated by the requirement for a positive tare followed by a negative tare of similar value. The environmental effect on the second Panama observation indicated by the closure plot is likewise verified. In addition, the gravimeter comparison plot indicates that the Rio de Janeiro observation also is biased by an environmental effect. It also is seen that at least one additional tare is indicated (Buenos Aires II—Santiago II). This tare does not show up in the closure plot because the Santiago-Buenos Aires interval on each leg is affected by perturbations of opposite sign which compensate each other. The small tare indicated between Mexico I and Panama I in Fig. 15, if real, should show up in the closure plot (Fig. 14). However, failure of a tare of this magnitude to show on the closure plot is not significant as the random error of measurement when there are no perturbation effects is ± 0.15 mgal.

With the above background as to the nature, magnitude and location of the major perturbations in the measurements, the following corrections were applied to derive more correct values. Table V lists the observed gravity increments for the Set I pendulums between each pair of observation sites along with the Δg closure errors between each pair of stations. If the final pendulum values are not to be biased by the gravimeter values, only the pendulum closure values of Figure 14 and Table V can be used to define the tares and environmental effects. The usefulness of the gravimeter data, therefore, ends after playing their role in identifying how the pendulum closure errors shown in Fig. 14 developed.

The first perturbation (see Fig. 15) is an environmental effect on Santiago which as seen from Table V results in the first Santiago—La Paz interval being less than the second by 0.45 mgal. A correction of ± 0.45 mgal on the La Paz I—Santiago I interval is therefore added, and as this is an environmental effect, a compensating correction of -0.45



INTERVALO DE OBSERVACION
TRAZO DE CIERRE
PENDULOS CAMBRIDGE, 1958
AMERICA DEL SUR

OBSERVATION INTERVAL
CLOSURE PLOT
CAMBRIDGE PENDULUMS 1958
SOUTH AMERICA

Fig. 14

TRAZO DE COMPARACION DE GRAVIMETROS

PENDULOS CAMBRIDGE, 1958

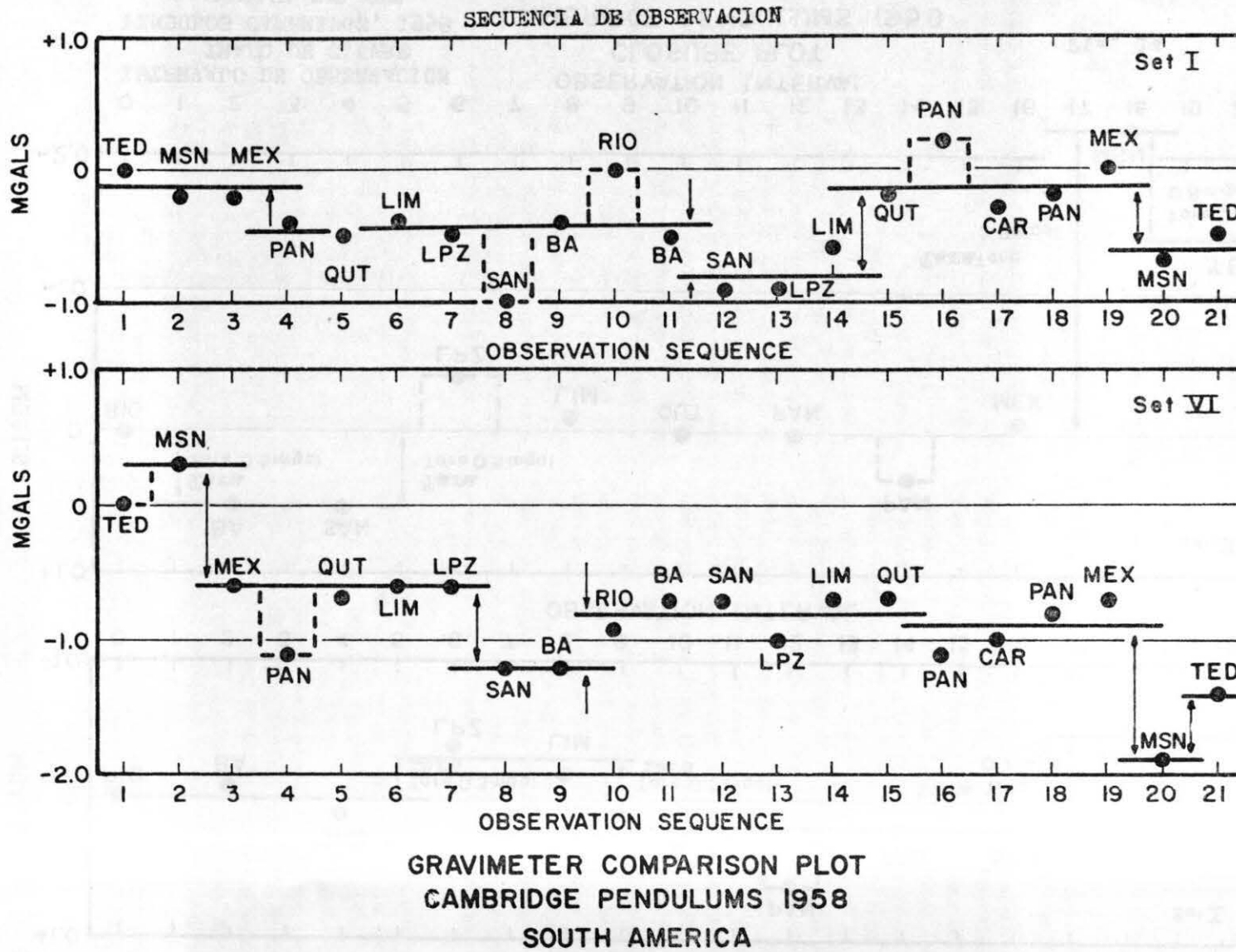


Fig 15

TABLA IV

TABLA IV

 PENDULOS CAMBRIDGE, 1958
 CAMBRIDGE PENDULUMS, 1958

	OBSERVADO JUEGO I	CIERRE	OBSERVADO JUEGO VI	CIERRE	GM	I vs GM	VI vs GM
	OBSERVED SET I	CLOSURE	OBSERVED SET VI	CLOSURE			
1 Teddington	981.1966	(21) - 0.5	1.1966	(21) - 1.4	1.1966	0.0	0.0
2 Madison	980.3687	(20) - 0.5	0.3692	(20) - 2.2	0.3689	-0.2	+0.3
3 Mexico City	977.9412	(19) +0.2	7.9408	(19) - 0.1	7.9414	-0.2	-0.6
4 Panama	978.2413	(18) +0.2		(18) +0.3	8.2417	-0.4	-1.1
		(16) +0.6	8.2406	(16) 0.0			
5 Quito	977.2777	(15) +0.3	7.2775	(15) 0.0	7.2782	-0.5	-0.7
6 Lima	978.2826	(14) - 0.2	8.2824	(14) - 0.1	8.2830	-0.4	-0.6
7 La Paz	977.4666	(13) - 0.4	7.4665	(13) - 0.4	7.4671	-0.5	-0.6
8 Santiago	979.4284	(12) +0.1	9.4282	(12) +0.5	9.4294	-1.0	-1.2
9 Buenos Aires	979.7049	(11) - 0.1	9.7041	(11) +0.5	9.7053	-0.4	-1.2
10 Rio de Janeiro	978.8047		8.8038		8.8047	0.0	-0.9
11 Buenos Aires	979.7048		9.7046		9.7053	-0.5	-0.7
12 Santiago	979.4285		9.4287		9.4294	-0.9	-0.7
13 La Paz	977.4662		7.4661		7.4671	-0.9	-1.0
14 Lima	978.2824		8.2823		8.2830	-0.6	-0.7
15 Quito	977.2780		7.2775		7.2782	-0.2	-0.7
16 Panama	978.2419	(18) - 0.4	8.2406	(18) +0.3	8.2417	+0.2	-1.1
17 Caracas	978.0396		8.0389		8.0399	-0.3	-1.0
18 Panama	978.2415		8.2409		8.2417	-0.2	-0.8
19 Mexico City	977.9414		7.9407		7.9414	0.0	-0.7
20 Madison	980.3682		0.3670		0.3689	-0.7	-1.9
21 Teddington	981.1961		1.1952		1.1966	-0.5	-1.4

Base Supuesta: Teddington 981.1966 gals
 Assumed Base:

bién debe agregarse una compensación de corrección de -0.45 mgal al siguiente intervalo Santiago I—Buenos Aires I.

La segunda perturbación es un efecto ambiental de signo opuesto sobre la observación en Río de Janeiro, enmascarada con el trazo de cierre ya que fué una sola observación (punto final) y que la magnitud de la corrección tiene que ser calculada por otros datos, resultando que es de casi 0.4 mgal según el trazo de comparación de gravímetro y de 0.6 mgal según datos tomados con el Juego VI de péndulos. La corrección adoptada tuvo un valor medio de 0.5 mgal.

La tercera perturbación es una tara entre Buenos Aires II y Santiago II que no se muestra en el trazo de cierre ya que tiene un signo compensado por el efecto ambiental en Santiago I, debiendo agregarse una corrección de tara de la misma magnitud ($+0.45$ mgal) a este intervalo reduciéndolo de -276.35 mgal a -275.90 mgal.

mgal has to be added to the next interval, Santiago I—Buenos Aires I.

The second perturbation is an environmental effect of opposite sign on the Rio de Janeiro observation. This is masked in the closure plot as this was a single (end-point) observation and the magnitude of the correction has to be gauged from other data. This is seen to be about 0.4 mgal from the gravimeter comparison plot, and 0.6 mgal from the data taken with the Set VI pendulums. A mean value of 0.5 mgal was the correction adopted.

The third perturbation is a tare between Buenos Aires II and Santiago II. As this does not show on the closure plot as its sign is such that it is compensated by the environmental effect on Santiago I, a tare correction of the same magnitude ($+0.45$ mgal) is added to this interval reducing it from -276.35 mgal to -275.90 mgal.

TABLA V

TABLE V

CIERRE + SOLUCION DE COMPARACION DE Gm.
PENDULOS CAMBRIDGE 1958 JACKSON
JUEGO I

CLOSURE + Gm. COMPARISON SOLUTION
CAMBRIDGE PENDULUM 1958 JACKSON
SET I

	OBSERVADO OBSERVED ΔG	CIERRE CLOS.	TARAS CORRECS. CORR. TARES	VALOR ΔG CORREG. CORR. ΔG VALUE	VALOR MEDIO ΔG AV. ΔG VALUE	VALOR FINAL FINAL VALUE
Madison I	-2427.55	-.70			-2427.55	980.36890
Mexico I	+ 300.10	+.05			+ 300.13	977.94135
Panama I	- 963.55	+.35			- 963.55	978.24143
Quito I	+1004.90	-.45			+1004.93	977.27793
Lima I	-816.05	+.15			- 816.13	978.28286
La Paz I	+1961.80	+.45	+.45	1962.25	+1962.25	977.46673
Santiago I	+ 276.50	-.15	-.45	+ 276.05	+ 275.97	979.42898
Buenos Aires I	- 900.20	-.05	-.50	- 900.70	- 900.68	979.70495
Rio de Janeiro	+ 900.15		+.50	+ 900.65		978.80427
Buenos Aires II	- 276.35		+.45	- 275.90		
Santiago II	-1962.25					
La Paz II	+ 816.20					
Lima II	-1004.45		-.50	-1004.95		
Quito II	+ 963.90		-.35	+ 963.55		
Panama II	- 202.30		+.35	- 201.95	- 201.95	978.24148
Caracas	+ 201.95					978.03953
Panama III	- 300.15					
Mexico II	+2426.85		+.70	2427.55		
Madison II						

TABLA VI

TABLA VI

COMPARACION DE VALORES ORIGINALES Y CORREGIDOS
PENDULOS CAMBRIDGE
JUEGO I

COMPARISON OF CORRECTED AND ORIGINAL VALUES
CAMBRIDGE PENDULUMS
SET I

	VALOR CORREGIDO JUEGO I	VALOR ORIGINAL JUEGO I	DIFER
	CORRECTED VALUE SET I	ORIGINAL VALUE SET I	DIFF.
Madison	980.36890	.36890	0.0
Mexico	977.94135	.94170	+ .35
Panama	978.24148	.24183	+ .35
Quito	977.27793	.27810	+ .17
Lima	978.28286	.28278	— .08
La Paz	977.46673	.46665	— .08
Santiago	979.42898	.42868	— .30
Buenos Aires	979.70495	.70511	+ .16
Rio de Janeiro	978.80427	.80493	+ .66
Caracas	978.03953	.03975	+ .22

La cuarta perturbación es una tara entre Lima II y Quito II, definida por el trazo de cierre en -0.5 mgal y que puede determinarse como aproximadamente de -0.5 mgal por incremento de valores de cierre.

La quinta perturbación es un efecto ambiental sobre Panamá II que se define en 0.35 mgal por valores de cierre y que afecta ambas mediciones de intervalos adyacentes, aplicándose una corrección de 0.35 mgal con signos contrarios al intervalo Quito II—Panamá II y al intervalo Panamá II—Caracas.

La sexta perturbación es una tara entre México II y Madison II que se fija en -0.70 mgal por el trazo de cierre.

El anterior procedimiento pone de acuerdo todos los valores de incremento de los pares dentro de 0.15 mgal y en cada caso el valor medio corregido de incremento es el usado para calcular los valores finales de la Tabla V.

El efecto de tales correcciones sobre los valores destaca en la Tabla VI, en que se comparan los valores del Juego I de péndulos originales respecto a Madison (980.36890 gals) con los derivados después de corregir perturbaciones indicadas por el trazo de cierre y el trazo de comparación de gravímetros. Como se ve, se obtienen diferencias en valores de más de 0.6 mgal.

Los resultados para el Juego VI de péndulos Cambridge, así como los obtenidos al usar los péndulos Gulf se analizaron de la misma manera y a base de tales valores re-

The fourth perturbation is a tare between Lima II and Quito II. From the closure plot this is defined as -0.5 mgal. It can also be determined to be approximately -0.5 mgal from the increment closure values.

The fifth perturbation is an environmental effect on Panamá II which the closure values define as 0.35 mgal. As this affects both adjacent interval measurements, a correction of 0.35 mgal is applied with signs reversed to the Quito II—Panamá II interval and the Panamá II—Caracas interval.

The sixth perturbation is a tare between Mexico II and Madison II. From the closure plot this is seen to be -0.70 mgal.

The above procedure brings all of the pairs of increment values into agreement within 0.15 mgal, and the average corrected increment value in each case is the one used to compute the final values as shown in Table V.

The effect of these corrections on the values is brought out in Table VI, which compares the original Set I pendulum values relative to Madison (980.36890 gals) with those derived after correcting for perturbations as revealed by the closure plot and gravimeter comparison plot. As seen, differences in values of over 0.6 mgal are obtained.

The results for the Set VI of Cambridge pendulum as well as those obtained using the Gulf pendulums were analyzed in the same manner, and it is on the basis of these

TABLA VII

TABLA VII

COMPARACION DE VALORES DE GRAVIMETRO CON
NUEVOS VALORES PENDULARES
COMPARISON OF GRAVIMETER VALUES WITH NEW PENDULUM VALUES

	NUEVO VALOR PENDULAR NEW PEND. VALUE	WOOLLARD 1963 GM	DIFF. PEND. DIFF.	HAMILTON LR-G-7	(DOMINION OBSERV.)		
					DIFER. PEND. DIFF.	LR-G-9	DIFER. PEND. DIFER.
Madison	980.3689	.3689	0.0				
Washington	980.1006	.1006	0.0				
Buenos Aires	979.7051	.7053	+0.2	.70496	— .14		
Denver	979.6124	.6123	—0.1	<u>.61240</u>	0.0	<u>.61240</u>	0.0
Charleston	979.5509	.5509	0.0				
Santiago	979.4292	.4294	+0.2	.42923	+ .03		
Houston	979.2985	.2983	—0.2	.29861	+ .11	.29853	+ .03
Antofagasta	978.9045	.9045	0.0				
Monterrey	978.8055	.8055	0.0	.80581	+ .31	.80595	+ .45
Rio de Janeiro	978.8043	.8047	+0.4				
Lima	978.2831	.2830	—0.1	.28380	+ .70		
Panama	978.2417	.2417	0.0	.24224	+ .54	.24253	+ .83
Caracas	978.0397	.0399	+0.2				
Belem	978.0371	.0374	+0.3				
Mexico City	977.9415	.9414	—0.1	.94221	+ .71	.94267	+1.17
La Paz	977.4669	.4671	+0.2				
Bogota	977.4047	.4049	+0.2				
Quito	977.2782	.2782	0.0	.27917	+ .97	.28004	+1.84

calculados se obtuvieron los valores resultantes que se listan en la Tabla III.

COMPARACION DE VALORES PUBLICADOS DE
GRAVIMETRO CON VALORES RECALCULADOS DE
PENDULO

En la Tabla VII se comparan los valores de gravímetro publicados (Woollard, 1963) con los valores medios de péndulo Gulf y Cambridge recalculados. Para comparación también se muestran los valores determinados por Hamilton (1963), del Dominion Observatory de Canadá, usando dos gravímetros LaCoste-Romberg con base en Denver (979.61240 gales). La Fig. 16 muestra trazos de diferencias de valores de gravímetro respecto a nuevos valores pendulares. Como se ve en la Tabla VII y la Figura 16, los valores de gravímetro publicados por Woollard (1963) parecen ser positivos por casi 0.2 mgal en la mayor parte de América del Sur sugiriendo taras de esa magnitud en el trabajo con gravímetro entre Panamá y Caracas y entre Lima y La Paz. Excepto por esa aparente desviación en *datum*, solo quedó indicado un pequeño error de calibración que sube por encima de 0.05 mgal por 1,000 mgales en cambio de gravedad. Las comparaciones

recomputed values that the final results listed in Table III were obtained.

COMPARISON OF PUBLISHED GRAVIMETER
VALUES WITH RECOMPUTED PENDULUM
VALUES

In Table VII the published gravimeter values (Woollard, 1963) are compared with the means of the recomputed Gulf and Cambridge pendulum values. Also for comparison are shown the values determined by Hamilton (1963), of the Dominion Observatory of Canada, using two LaCoste-Romberg gravimeters with Denver (979.61240 gals) as a base. Fig. 16 shows plots of the differences in respective gravimeter values from the new pendulum values. As seen from Table VII and Fig. 16, the published gravimeter values by Woollard (1963) appear to be positive by about 0.2 mgal throughout most of South America which suggests taras of this magnitude in the gravimeter work between Panama and Caracas and between Lima and La Paz. Except for this apparent offset in *datum* only a slight error in calibration is indicated which amounts to about 0.05 mgal per 1,000 mgal change in gravity. The comparisons for Hamilton's results indicate significant differences in cali-

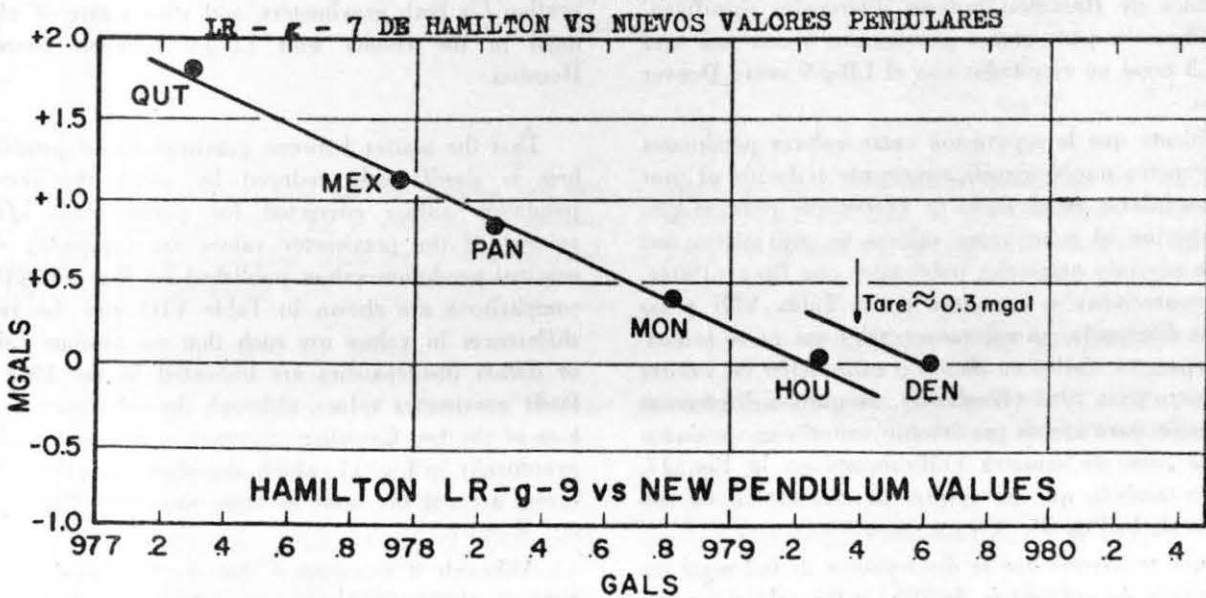
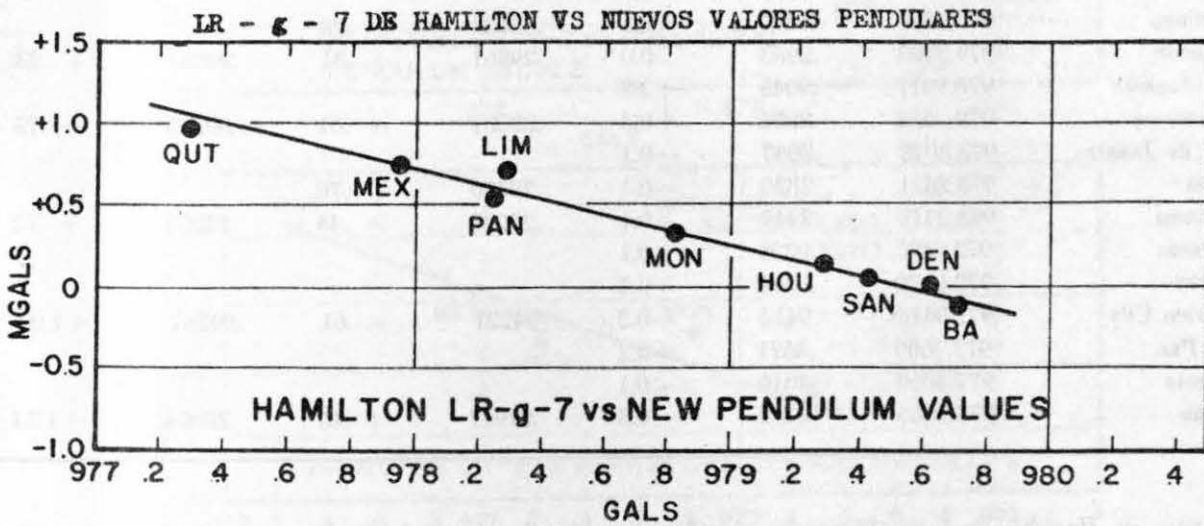
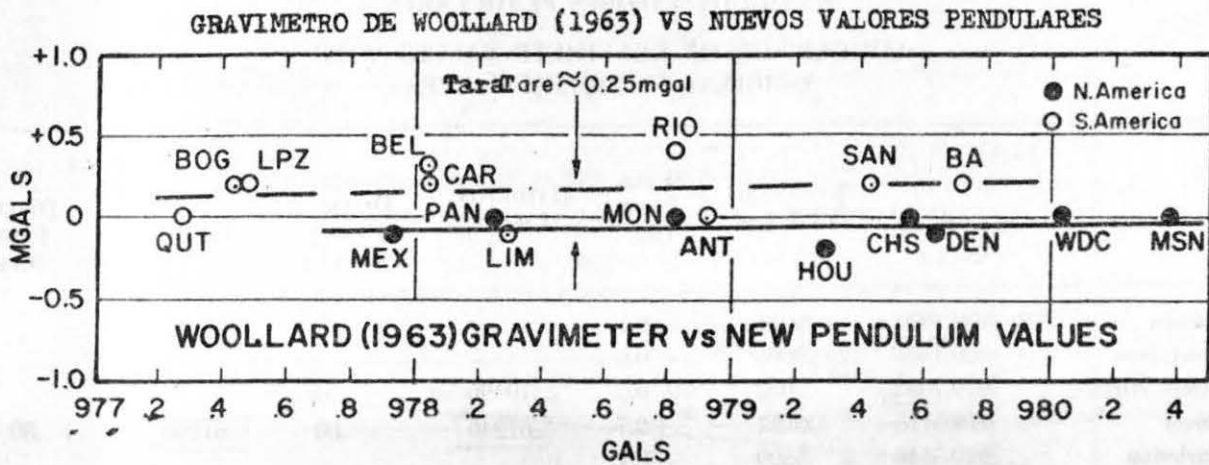


Fig 16

TABLA VIII

TABLA VIII

COMPARACION DE VALORES DE GRAVIMETRO CON
ANTIGUOS VALORES PENDULARES

COMPARISON OF GRAVIMETE VALUES WITH
ORIGINAL PENDULUM VALUES

	ANTIGUO VALOR PENDULAR		DIFER. PEND. DIFF.	HAMILTON LR-G-7	(DOMINION OBSERV.)		
	OLD PEND. VALUE	WOOLLARD 1963 GM			DIFER. PEND DIFF.	LR-G-9	DIFER. PEND DIFF.
Madison	980.3690	.3689	-0.1				
Washington	980.1006	.1006	0.0				
Buenos Aires	979.7053	.7053	0.0	.70496	- .34		
Denver	979.6116	.6123	+0.7	<u>.61240</u>	+ .80	<u>.61240</u>	+ .80
Charleston	979.5510	.5509	-0.1				
Santiago	979.4290	.4294	+0.4	.42923	+ .23		
Houston	979.2983	.2983	0.0	.29861	+ .31	.29853	+ .23
Antofagasta	978.9017	.9045	+2.8				
Monterrey	978.8052	.8055	+0.3	.80581	+ .61	.80595	+ .75
Rio de Janeiro	978.8048	.8047	-0.1				
Lima	978.2831	.2830	-0.1	.28380	+ .70		
Panama	978.2418	.2417	-0.1	.24224	+ .44	.24253	+ .73
Caracas	978.0398	.0399	+0.1				
Belem	978.0370	.0374	+0.4				
Mexico City	977.9416	.9414	-0.2	94221	+ .61	.94267	+1.07
La Paz	977.4669	.4671	+0.2				
Bogota	977.4050	.4049	-0.1				
Quito	977.2785	.2782	-0.3	.27917	+ .67	.28004	+1.54

de resultados de Hamilton indican diferencias significantes en calibración para ambos gravímetros y con una tara de casi 0.3 mgal en resultados con el LR-g-9 entre Denver y Houston.

Es evidente que la separación entre valores pendulares y de gravímetro quedó significativamente reducida al usar valores pendulares recalculados y corregidos para efectos de perturbación al compararse valores de gravímetro con valores de péndulo originales publicados por Rose (1963). Tales comparaciones se muestran en la Tabla VIII y las respectivas diferencias en valores son tales que no se indicaron discrepancias obvias en *datum* o calibración en valores de gravímetro para 1963 (Woollard), aunque las diferencias en calibración para ambos gravímetros canadienses quedaron verificadas como se muestra gráficamente en la Fig. 17, que señala también que los errores de calibración no son los mismos de la Fig. 16.

Aunque se supone que la discrepancia de 0.2 mgal entre los valores de gravímetro de 1963 y los valores pendulares recalculados en la América del Sur se debe a errores en el primitivo trabajo con gravímetro, no resulta cierto. Para no equivocar valores como fuente de tal discrepancia no establecida definitivamente, los valores de gra-

bration for both gravimeters, and with a tare of about 0.3 mgal in the results with LR-g-9 between Denver and Houston.

That the scatter between gravimeter and pendulum values is significantly reduced by using the recomputed pendulum values corrected for perturbation effects, is evident, if the gravimeter values are compared with the original pendulum values published by Rose (1963). These comparisons are shown in Table VIII and the respective differences in values are such that no obvious calibration or *datum* discrepancies are indicated in the 1963 (Woollard) gravimeter values, although the difference in calibration of the two Canadian gravimeters is verified, as shown graphically in Fig. 17, which also shows that the calibration errors are not the same as those shown by Fig. 16.

Although it is assumed that the 0.2 mgal discrepancy between the 1963 gravimeter values and the recomputed pendulum values in South America is related to errors in the early gravimeter work, this is by no means certain. In order to not confuse values as the source of this discrepancy not definitely established, the gravimeter values

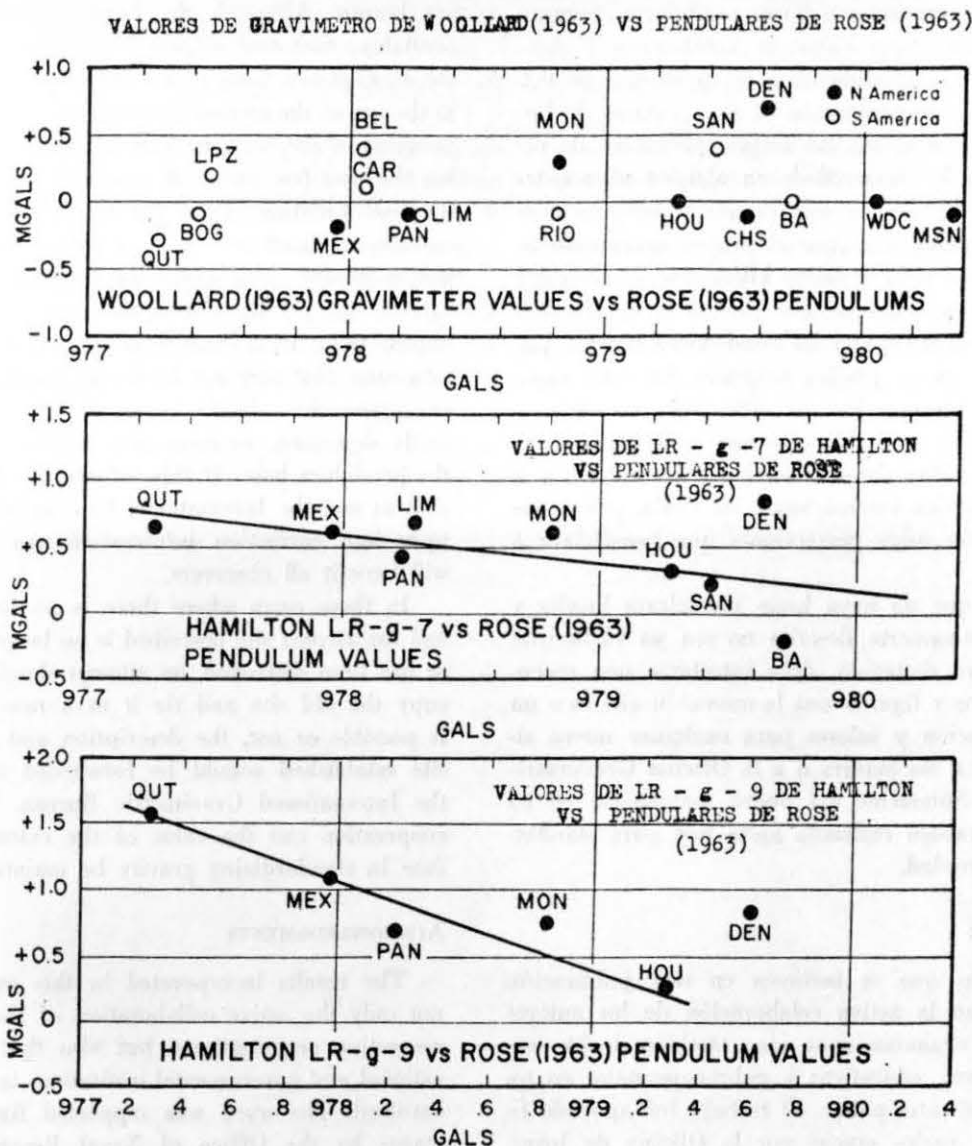


Fig 17

vímetro señalados para cada base son los mismos que publicó el primer autor en 1963. En el caso de las estaciones pendulares fueron señalados tanto los valores de 1963 como los valores recalculados.

DESCRIPCION DE BASES

Para presentar las descripciones y valores en los varios sitios de base se tabularon los datos alfabéticamente por países en el Apéndice.

CONEXIONES EXCENTRICAS DE BASES PENDULARES

Como pocas veces es posible tener tiempo para ocupar una base pendular a varios kilómetros del aeropuerto cuando se hacen corridas de calibración por transporte aéreo, deben usarse las bases de aeropuertos como sitios equivalentes de calibración si se conocen los intervalos

listed for each base are as published by the first author in 1963. In the case of the pendulum stations both the 1963 values and the recomputed values are listed.

DESCRIPTIONS OF BASES

In presenting the descriptions and values for the various base sites, the data are tabulated alphabetically by country in the Appendix.

EXCENTER PENDULUM BASE CONNECTIONS

As it is seldom feasible on a calibration run using air transport to take time to occupy a pendulum base which may be several kilometers from the airport, the airport base can be used as an equivalent calibration site provided the gravity interval between and airport and pendulum sites

de gravedad entre aeropuertos y bases pendulares. Aunque las conexiones locales entre bases de aeropuertos y pendulares eran buenas originalmente a un promedio de 0.1 mgal, ahora se necesita precaución al usar valores de bases de aeropuertos por efecto del amplio programa de reconstrucción que se ha desarrollado en algunos años anteriores. En muchos lugares no solo se han construido nuevos edificios terminales, sino que el propio aeropuerto se ha desplazado a otro sitio a varios kilómetros del original en que se hicieron mediciones. Por ello, si la descripción dada no parece concordar con las condiciones locales, podrá suponerse que ya no pueden aplicarse. En tales casos debe hacerse una observación en sitio bien accesible y con fácil descripción y establecerse una conexión con la base pendular. Si dichos datos se envían a los autores y a la Oficina Gravimétrica Internacional, en París, podrá publicarse información sobre correcciones que beneficiará a los observadores.

En casos en que no haya bases pendulares locales y que el sitio del aeropuerto descrito no sea ya fácilmente accesible o se haya destruido, debe intentarse una reocupación de las viejas y ligarlas con la nueva. Si ello es o no posible, la descripción y valores para cualquier nuevo sitio debe remitirse a los autores o a la Oficina Gravimétrica Internacional. Solamente así podrá mantenerse en su valor el amplio trabajo realizado hasta hoy para standardización en la gravedad.

AGRADECIMIENTOS:

Los resultados que se incluyen en esta publicación no sólo representan la activa colaboración de los autores y sus respectivas organizaciones, sino también de las instituciones científicas, educativas y gubernamentales en todos los correspondientes países. El trabajo fué apoyado financieramente en varias etapas por la Oficina de Investigación Naval de la United States Navy, los U.S. Air Force Cambridge Research Laboratories, el Programa Nacional de los Estados Unidos para el Año Geofísico Internacional, el Servicio Geodésico Inter-Americano, el Instituto Panamericano de Geografía e Historia y el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Un subsidio de la U.S. National Science Foundation permitió la preparación de esta publicación.

BIBLIOGRAFIA

- ASLAKSON, C. I. & C. H. SWICK. 1943. Gravity Observations in Peru and Colombia, *U.S. Coast and Geodetic Survey, Spec. Pub.* 233, 18 pp.
- DE LA O CARREÑO, A., 1949, Cartas de Anomalías de la Gravedad en la República Mexicana. *Ingen. Hidrául.* (México).
- GARLAND, G. D. 1953. Gravity Measurements in North America with the Cambridge Pendulum Apparatus, I. *Proc. Royal Soc. (London)*, A, 219: 215-233.
- 1955. Gravity Measurements in North America with the Cambridge Pendulum Apparatus, II, *Proc., Royal Soc. (London)*, A, 233: 203-213.
- HAMILTON, A. C. 1963. A Comparison of Gravity Standards in Europe and the Americas. *Dom. Obsrv. Canada, Spec. Pub.* 13.

are known. Although the local connections between the pendulum sites and airport bases were originally good on the average to 0.1 mgal, a word of caution is required now in the use of the airport base values because of the extensive program of airport reconstruction that has taken place during the past few years. At many places not only have new terminal buildings been constructed, but in some places the airport itself moved to another location several kilometers distant from where the original measurements were carried out. If the descriptions given, therefore, do not appear to fit local conditions as described, it is fairly safe to assume that they are no longer applicable. In such cases an observation should be made at a readily accessible, easily described, location and a connection established to the pendulum base. If this information is forwarded to the authors and the International Gravimetric Bureau in Paris, up-to-date correction information can be published that will benefit all observers.

In those cases where there is no local pendulum base and the airport site described is no longer readily accessible or has been destroyed, an attempt should be made to reoccupy the old site and tie it to a new site. Whether this is possible or not, the description and value for any new site established should be forwarded to the authors and the International Gravimetric Bureau. Only through such cooperation can the value of the extensive work done to date in standardizing gravity be maintained.

ACKNOWLEDGMENTS

The results incorporated in this publication represent not only the active collaboration of the authors and their respective organizations, but also that of scientists, educational and governmental institutions in all of the countries involved. The work was supported financially at various stages by the Office of Naval Research of the United States Navy, the U. S. Air Force Cambridge Research Laboratories, the United States National Program for the International Geophysical Year the Inter-American Geodetic Survey, the Pan-American Institute of Geography and History, and the Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. The preparation of this publication was supported through a grant from the U. S. National Science Foundation.

BIBLIOGRAPHY

- JACKSON, S. E. 1959. Observations with the Cambridge Pendulum Apparatus in North, Central and South America 1958. *Geophys. Jour., Royal Astron. Soc.*, 2: 337-347.
- MATEO, J. & E. LEVIN. 1945. Observaciones Gravimétricas Pendulares (Años 1936-1941). *Pub. Observ. Astron. Univ. Nac. la Plata, Serie Geodésica*, IV: 198 pp.
- MONGES CALDERA, J., G. P. WOOLLARD, J. A. KOZLOSKY & H. DUARTE V. 1962. Informe sobre Trabajos Gravimétricos en Centro-América y Panamá. *Anal. Inst. Geofísica, U.N.A.M.*, III: 13-22.
- VENING MEINESZ, F. A., J. H. F. UMBGROVE & PH. H. KUENEN. 1934. Gravity Expeditions at Sea 1923-1932, *Pub. Netherlands Geod. Comm.*, Vol. II, 208 pp.
- WOOLLARD, G. P. & J. C. ROSE. 1963. International Gravity Measurements. *Soc. Explor. Geophysicists, Monograph*, 518 pp.