

VARIACION SECULAR DE LA GRAVEDAD EN CHILE.

Gerardo Behn y Sergio Barrientos

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

RESUMEN

Se presentan los antecedentes preliminares de un estudio de variaciones seculares (de largo período) de la gravedad en Chile, describiendo la metodología usada y resultados obtenidos en Chile central, entre los años 1976 y 1979. Se discuten estos resultados y se dan líneas para el desarrollo y ampliación de este proyecto en el futuro, destacando su importancia y relación en el estudio de fenómenos premonitores de terremotos.

ABSTRACT

SECULAR VARIATIONS OF GRAVITY IN CHILE

A preliminary study for the detection of secular gravity changes in Central Chile is presented. This paper describes the methodology used and presents the first results obtained for the interval 1976-1979 in Central Chile. These results are discussed and suggestions are made for the future development of the project, pointing out its importance for the study of earthquake premonitory phenomena.

1. INTRODUCCION.

CONCEPTOS PREVIOS.

El hecho de conocer anticipadamente la hora, el lugar y la magnitud de un evento sísmico ha sido motivo de constante preocupación por parte de muchos sismólogos y geofísicos. Uno de los métodos empleados actualmente es fundamentar las predicciones en los estudios de "brechas sísmicas" (seismic gaps) al mismo tiempo que buscar indicios precursores, como son los fenómenos que ocurren de una manera característica antes de un temblor.

Recientemente, un modelo físico de procesos que preceden a un evento sísmico ha logrado explicar y unificar cierto número de observaciones hechas independientemente, unas de otras. No obstante, esta teoría conocida como "dilatancia", está en vías de prueba y ofrece esperanzas de que algunos sismos, en determinadas zonas, puedan predecirse en base a fenómenos que pueden observarse con facilidad. (Kisslinger, 1975).

Es un hecho que los sismos no están distribuidos al azar sobre la tierra, sino que se encuentran en zonas muy definidas, es entonces lógico centrar los esfuerzos de observación de estos fenómenos en aquellas zonas.

Según la teoría del "Rebote Elástico", propuesta por H. F. Reid (1910), el mecanismo de generación de un sismo es la súbita liberación de energía en forma de ondas elásticas. La energía se ha acumulado lentamente a través del tiempo como resultado de un proceso asociado a los movimientos relativos entre placas, y su liberación se produce cuando la tensión existente en el medio excede los límites físicos del material (punto de ruptura).

Esta acumulación de energía, es la que, no siendo suficiente para provocar la ruptura de material, produce ciertas alteraciones físicas en el medio.

ANTECEDENTES.

La evidencia de que un volumen de rocas está en un gran estado de tensión puede obtenerse por dos clases de observaciones. En la forma más directa se buscan cambios en la posición relativa de puntos de la superficie de la Tierra, ya sea por mediciones geodésicas o mediciones de tensión e inclinación. La segunda técnica consiste en la determinación de propiedades físicas que dependen de la tensión de las rocas "in situ", mediante la observación de los valores locales de campos de fuerzas que dependan de esas propiedades. Algunos ejemplos de propiedades que han sido estudiadas son: velocidades de las ondas elásticas (V_p y V_s), conductividad eléctrica, propiedades magnéticas, campo de gravedad regional, cambios temporales en los valores del coeficiente "b" de la relación magnitud-frecuencia de Richter ($\log N = a - bM$, en que N es el número de temblores cuya magnitud es igual o superior a M), cambios temporales en la cantidad de microsismos, etc.

CAMBIOS GEODÉSICOS.

Por efecto de los cambios de volumen producidos por la dilatación, se producen cambios de elevación en las cotas de la superficie terrestre en el área epicentral antes de que ocurra un sismo.

Este fenómeno ha sido observado principalmente en Japón, luego del sismo de magnitud 7.5 en Junio de 1964, cerca de la ciudad de Niigata. Con anterioridad al evento se observaron cambios bruscos en las medidas de nivelación en la zona. (C. Kisslinger, 1975). En Chile sólo se tienen antecedentes de una nivelación en la zona de Concepción-Chillán pre y post terremoto de 1939, cuyo epicentro se localizó en las cercanías de Chillán. Como es lógico suponer, no se conoce si hubo o no cambios bruscos en el nivel de cotas con anterioridad al evento sísmico, pero las diferencias pre y post terremoto son del orden de varios metros (Brüggen, 1950).

Por otra parte se ha sugerido la siguiente correlación entre el tamaño de la zona que presenta cambios en la elevación y la magnitud del sismo asociado

$$M = 1.96 \log r + 4.45$$

M es la magnitud del sismo y

r es el radio de la región en kilómetros (Kisslinger, 1975).

Por lo tanto, para el caso japonés, se estima que un evento de magnitud 7.5 debiera producir anomalías en una zona de alrededor de 35 Kms. de radio.

La duración de la anomalía, según C. Kisslinger (1975) estaría relacionada con la magnitud del evento predicho, aproximadamente 30 días para un sismo de magnitud 4.0, 90 días para uno de magnitud 5.5, 3.5 años para uno de magnitud 6.5 y del orden de 10 años para uno de magnitud 7.5.

OBJETIVOS.

El presente trabajo pretende iniciar el estudio de un tipo de fenómenos premonitores en el país, en la zona central de Chile.

Dado que para el estudio del campo gravitacional, bajo el punto de vista de variaciones seculares, no se requiere de una infraestructura sofisticada, tan sólo se requiere de un gravímetro de suficiente precisión y de puntos de medición bien definidos, en 1976 se inició la medición y el control de variaciones de largo período o seculares del campo gravitacional en la zona central de Chile. Con este proyecto se desea dar comienzo a un programa, que por la naturaleza del efecto que se desea medir, puede requerir de un tiempo muy largo para manifestarse.

En los párrafos que siguen, se presentará la metodología seguida para el registro de variaciones seculares de gravedad, se presentará la red de estaciones existentes a la fecha y se hará una relación de los primeros resultados, junto con un análisis de precisión e implicancias para un posible control tectónico vertical mediante un gravímetro de precisión.

El objetivo de esta publicación, que podría parecer prematura a la luz de los primeros resultados que se expondrán en ella, es también ordenar y poner a disposición de las personas relacionadas con el tema, el trabajo hasta ahora realizado. Este permitirá el acceso a la información sintetizada a aquellos investigadores que trabajan en campos afines.

Por ello, el carácter de estas notas es mas bien fenomenológico. Se deja abierta la explicación geofísica de las variaciones y su relación con posibles fenómenos premonitores de terremotos.

2. METODO DE TRABAJO.

ESTACIONES DE GRAVEDAD.

La presente investigación exige la repetición periódica de medidas diferenciales de la componente vertical de la gravedad en diversos puntos fijos.

Para descartar efectos locales, es imprescindible que las estaciones de gravedad incluidas en este programa no sean alteradas en el tiempo. Para ello se las ha materializado en forma de pilares de concreto, ubicados en lugares tranquilos, en las inmediaciones de aeropuertos.

Fuera de estos pilares, se han instalado estaciones de segundo orden en lozas de concreto, monumentos o afloramientos de roca, no necesariamente ubicados en aeródromos, y que son recorridos en vehículos terrestres.

ELECCION DE ESTACIONES DE GRAVEDAD.

Los primeros pilares se ubicaron en Chile Central, y con especial interés en los pilares de Santiago y la ciudad de La Ligua. Esto permite conjugar tres aspectos prácticos:

i) La relativa cercanía entre ambos lugares, ya que permite efectuar el recorrido en poco tiempo.

ii) La zona de La Ligua tiene una historia sísmica muy activa en la cual se registran eventos de variada magnitud. En la Fig. 1 se pueden apreciar las ubicaciones (epicentros) de aquellos eventos con magnitud superior a 6.0. Además últimamente en Marzo de 1965 y en Julio de 1971 acontecieron dos eventos que causaron daños considerables en la zona.

iii) La Ligua y Santiago se encuentran en unidades geomorfológicas diferentes. Santiago se ubica en el Valle central y La Ligua en la zona de los valles transversales. Más aún, Barazangi e Isacks (1976) ubican aproximadamente entre ambas ciudades una zona en que la inclinación del plano de Benioff cambia de pendiente (al norte de los 33°S la inclinación se estima en unos 10° , mientras que hacia el sur varía entre 25° a 30°).

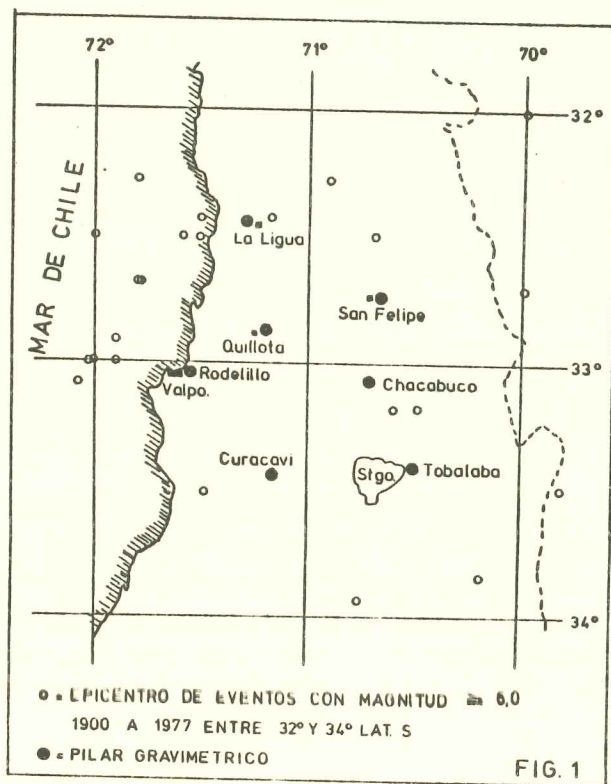
Barrientos (1980), efectuando una regionalización sísmica concluye que en los 33.5°S existe una división sismo-tectónica.

Una vez considerados estos aspectos, la distribución de las estaciones quedó tal como lo muestra la Fig. 1. En la Tabla I se da una relación de las coordenadas geográficas y características físicas de cada estación de observación. Además existe un archivo fotográfico de cada uno de los pilares de medición.

TABLA 1

UBICACION GEOGRAFICA PILARES OCUPADOS HASTA 1979

PILAR	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	DESCRIPCION
TOBALABA	33° 27' 11" S	70° 32' 41" W	640 m	Pilar de concreto, aeropuerto.
CHACABUCO	33° 03' 00"	70° 43' 00"	640	Pilar de concreto, aeropuerto.
SAN FELIPE	32° 44' 30"	70° 42' 10"	658	Loza de prueba motor, aeropuerto.
LA LIGUA	32° 26' 00"	71° 19' 00"	76	Pilar, Aeródromo.
RODELILLO	33° 03' 00"	71° 34' 00"	335	Loza, Aeródromo.
CURACAVI	33° 24' 50"	71° 09' 50"	203	Loza prueba motor, Aeródromo.
QUILLOTA	35° 52' 00"	71° 16' 00"	129	Loza hangar, Aeródromo.



MEDIO DE TRANSPORTE .

El recorrido de los pilares se efectuó en general en aviones monomotores cuyas velocidades de crucero varían entre 160 y 200 Km/hr. De esta forma se reduce el tiempo necesario para medir las diferencias de "g" entre dos o más estaciones. Por otra parte se reducen los impactos ocasionados por caminos ásperos y que afectan la deriva del gravímetro.

INSTRUMENTO.

En todas las medidas fue empleado el gravímetro LACOSTE-ROMBERG modelo G 411 perteneciente al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

Este instrumento permite leer diferencias de gravedad desde 10 μ gales y su rango permite lecturas en cualquier punto de la tierra.

El gravímetro es entregado por el fabricante con una tabla de transformación de divisiones de escala instrumental a miligales. Esta tabla se confeccionó tras la calibración de cada instrumento fabricado y entrega los constantes de calibración como función del rango de la escala y con una precisión de 1 en 10^5 .

En medidas de variaciones seculares es de extraordinaria importancia asegurar la adecuada calibración del gravímetro, y para ello se debe disponer de circuitos de calibración y/o recurrir a una revisión periódica por el fabricante.

3. RESULTADOS.

PRIMEROS RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DIFERENCIALES DE "G" EN EL TIEMPO.

Las medidas se han estado realizando en forma de circuitos que permiten ocupar dos veces la estación de partida y cada uno de los intermedios.

Esto es necesario para establecer el monto de la deriva instrumental y tener un elemento de juicio acerca de la precisión del trabajo.

Antes de compensar las medidas por deriva instrumental, se procedió a calcular y descontar el efecto gravitacional diario de mareas, producidas por el sol y la luna. Este efecto puede alcanzar hasta 250 μ gales y es por lo tanto 25 veces mayor que precisión del gravímetro (de ± 10 μ gales en este gravímetro).

El residuo que queda después de esta corrección fué descontado proporcionalmente al tiempo entre cierres suponiendo una deriva instrumental real.

En general este residuo no fué mayor a los 50 μ gales en circuitos de hasta 3 horas.

En la tabla 2 se muestran las medidas hechas hasta la fecha. En ella se muestran las diferencias de gravedad al pilar ubicado en el aeródromo Tobalaba de Santiago.

TABLA 2

MEDIDAS REALIZADAS ENTRE 1976 y 1979

Pilar	Diferencias "g" TOBALABA - "g" pilar en diversas fechas (mgal)					
	08.XI.76	02.VI.77	09.I.78	13.I.78	27.X.78	06.IV.79
STGO. DG	- 64,13		- 64,06		- 64,04	
CHACABUCO	- 1,32			- 1,34		
SAN FELIPE		71,91*		7,83		
LA LIGUA	-169,14			-169,08		- 169,05
QUILLOTA		-121,77*				
RODELILLO		-129,14*		-193,23		
CURACAVI		-133,71*				

* Estas diferencias son referidas al pilar STGO. DG, desde donde se inició el recorrido. En este caso el circuito se hizo en vehículo terrestre y la diferencia al cierre en 24 hrs. fue de 1/100 mgal. Se aplicó corrección de mareas terrestres.

En la tabla 3 se resumen aquellos resultados de la tabla 1 que permiten establecer comparaciones en el tiempo. En este caso todas las diferencias se refieren al pilar de Tobalaba, interpolando para el valor de la diferencia TOBALABA-DG cuando las medidas se originaron en el Departamento de Geofísica (DG).

TABLA 3

RESUMEN MEDIDAS COMPARABLES, ENTRE 1976 y 1979

Pilar	Diferencias "g" TOBALABA - "g" pilar en mgal				
	08.XI.76	02.VI.77	13.I.78	27.X.78	06.IV.79
STGO. DG.	- 64,13			- 64,04	
CHACABUCO	- 1,32		- 1,34		
SAN FELIPE		7,82	7,83		
LA LIGUA	-169,14		-169,08		-169,05
RODELILLO		-193,23	-193,23		

Las medidas del 02 - VI - 77 fueron hechas con vehículo y en el transcurso de unas 24 horas, por lo cual el control de deriva instrumental se considera deficiente y no se les asigna la misma confiabilidad.

De estos resultados se puede concluir preliminarmente las siguientes variaciones significativas en el tiempo, anotadas en la Tabla 4.

En la Fig. 2 se muestra parte de los resultados en forma gráfica, referido a la variación de la diferencia de gravedad en el tiempo, entre los pilares de Tobalaba y La Ligua.

A modo de ejemplo comparativo, los sismos del 27 de marzo de 1964 en Alaska ($M = 8,4$) y del 9 de febrero de 1971 en San Fernando, California, ($M = 6,5$) estuvieron asociados con variaciones entre 100 y 1.000 microgales. (Barnes, 1966, Lambert y Beaumont, 1977).

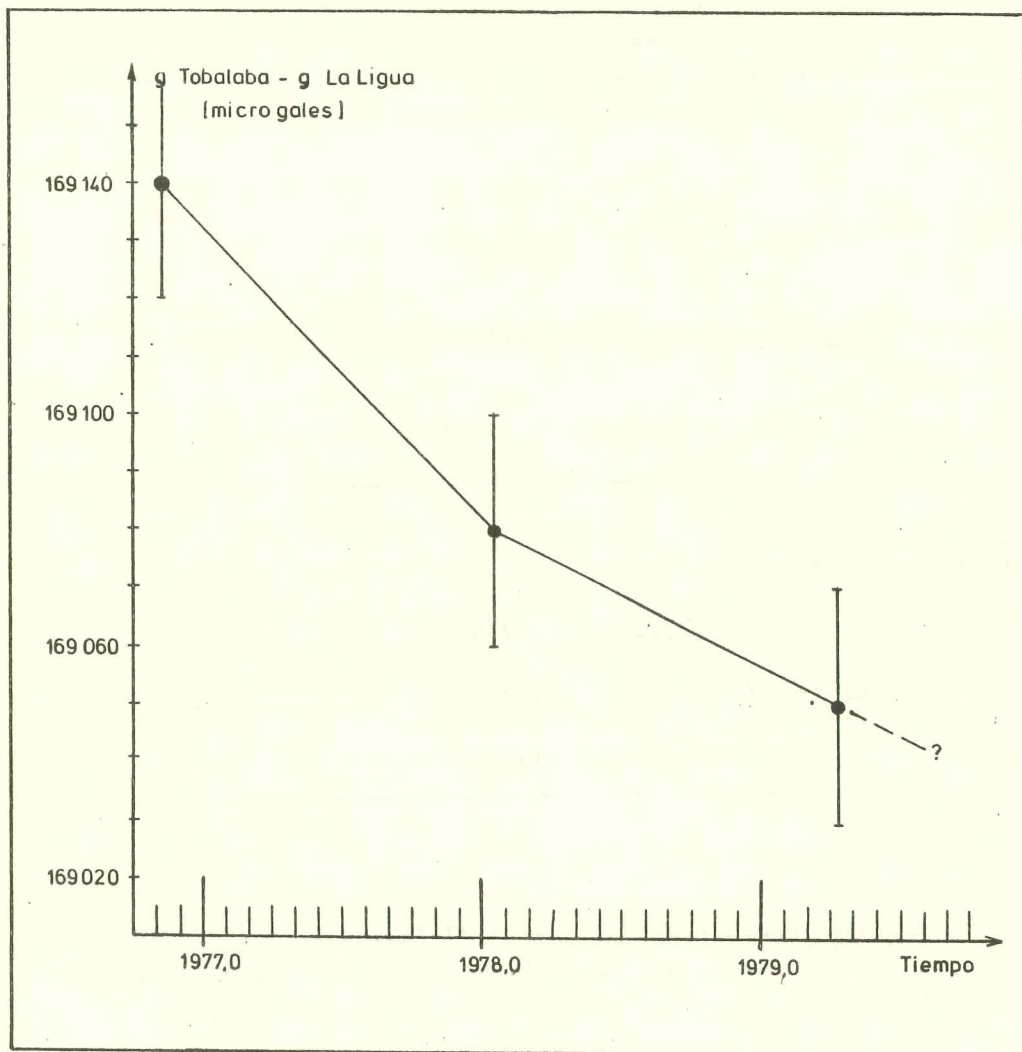


Fig. 2 Variación temporal de la diferencia de gravedad entre los pilares de Tobalaba y La Ligua. (Las barras verticales representan el error estimado para cada medición)

TABLA 4

Entre	Diferencia en Microgales	Período días	Variación anual $\mu\text{gal/año}$
TOBALABA Y CHACABUCO	+ 20	431	+ 16,9
TOBALABA Y SAN FELIPE	+ 10	225	+ 16,2
TOBALABA Y LA LIGUA	- 60/-30	431/448	- 59,3/ -24,

PRECISION DE LAS MEDIDAS.

El error absoluto que afecta las diferencias medidas, está relacionado con la diferencia en los cierres, después de corregir por mareas terrestres. La suposición de una deriva lineal en el tiempo es sólo una hipótesis, a falta de otra mejor, para reducir los residuos señalados.

En general, este residuo fue inferior a los 50 μ gales. El error absoluto entre estaciones de gravedad debe ser del orden de los 20 μ gales.

Los efectos de mareas terrestres se calcularon con un programa de computación diseñado para este efecto y que entrega el valor de la corrección teórica en función de la fecha, hora y coordenadas geográficas del lugar.

El factor gravimétrico adoptado es 1.2. Este factor considera la deformación elástica de la corteza terrestre por el efecto de las mareas.

En la Fig. 2 se representa el error posible en cada medida, en forma de barras de ± 20 μ gales.

4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

Los primeros resultados obtenidos en este proyecto muestran la existencia sistemática de diferencias de gravedad medidas en varios pilares entre 1976 y 1979.

Para el caso de La Ligua (Fig. 2) se observa una tendencia de disminución de la diferencia de gravedad con respecto al pilar de Tobalaba.

Entre Noviembre de 1976 y Abril de 1979 se registró un cambio de 90 microgales, que podría estar relacionado con movimientos verticales relativos entre ambos lugares. Si toda esta diferencia se atribuye a movimientos verticales relativos se obtendrá una aproximación en cota de Tobalaba y La Ligua entre 40 y 30 cm., según el modelo que se adopta (Bouguer o Aire Libre respectivamente).

El desarrollo futuro de este proyecto de investigación deberá enfocarse en los siguientes aspectos:

- Control de calibración del gravímetro para descartar efectos de relajamiento o cambios de la constante del instrumento como causales de las diferencias observadas. Para ello debe materializarse un circuito de calibración con fuertes diferencias de cota.
- Aumentar la cantidad de medidas diferenciales para tener un mejor control estadístico de las medidas y de su confiabilidad.
- Extender el estudio a estaciones lejanas como Arica, Antofagasta, Puerto Montt, Punta Arenas e Isla de Pascua.
- Realizar las medidas diferenciales en lo posible con más de un gravímetro.

Finalmente conviene señalar que por situarse Chile en una geotectónica muy singular y de gran actividad sísmica, la continuación de este proyecto y su ampliación puede aportar información de gran valor en el problema de la tectónica de placas y la ocurrencia de sismos.

Los resultados y antecedentes aquí publicados constituyen un primer paso en el estudio de las variaciones seculares de gravedad en Chile, y como tal distan aún mucho de permitir conclusiones definitivas. Para ello deberá contarse con una serie de medidas prolijamente efectuadas y apoyadas por un continuo trabajo de control instrumental.

BIBLIOGRAFIA.

- BARAZANGI M., ISACKS B., 1976 "Spatial distribution of earthquakes and subduction of the NAZCA plate beneath South America". *Geology*, Vol. 4 Nov. pp. 686-692.
- BARNES D.F., 1966 "Gravity changes during the Alaska earthquake". *Jour. Geophys. Res.* Vol. 71 pp. 451-456.
- BARRIENTOS S., 1980 "Regionalización sísmica de Chile". Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias con mención en Geofísica. Fac. de Ciencias Fís. y Mat. U. de Chile (En preparación)

- BRUGGEN J. 1950 "Fundamentos de la Geología de Chile". Editado por el Instituto Geográfico Militar de Chile.
- KISSLINGER C., 1975. "Predicción de Terremotos". Revista de Geofísica, IPGH N° 3, pp. 43-65.
- LAMBERT A., BEAUMONT C. 1977. "Nano variations in gravity due to seasonal groundwater movements: Implications for the gravitational detection of tectonic movements". Jour. Geoph. Res. Vol. 82 N° 2, pp. 297-306.
- PARDO M., "Estudio de predicción y sismicidad inducida en zona de Colbún y Panimávida". Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias con mención en Geofísica. Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas U. de Chile.