

SIMPOSIO PANAMERICANO DEL MANTO SUPERIOR
PAN-AMERICAN SYMPOSIUM ON THE UPPER MANTLE

(MÉXICO, D. F., MARZO 18-21, 1968)
MARCH

GRUPO IV-MAGNETISMO
GROUP IV-MAGNETISM

*ANOMALIA DE CONDUCTIVIDAD
BAJO LOS ANDES*

M. CASAVARDE, A. GIESECKE *,
R. SALGUEIRO, S. DEL POZO **,
L. TAMAYO *** y L. T. ALDRICH ****

RESUMEN

Con mediciones adicionales al Este de los Andes, entre Perú y Bolivia, se ha intentado definir la anomalía de conductividad profunda descubierta en los últimos años. Con la elección de un perfil a través de los Andes y el empleo de un modelo de conductividad anómala de forma semi-cilíndrica, se trató de ajustar las mediciones obtenidas.

INTRODUCCION

Este trabajo es una extensión de otros que se han llevado a cabo como resultado de un esfuerzo cooperativo entre el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington, el Instituto Geofísico del Perú y el Instituto Geofísico Boliviano. El programa cooperativo está orientado al estudio de la anomalía de conductividad por métodos geomagnéticos bajo los Andes entre el Perú y Bolivia. Ahora se trató de cubrir la parte oriental de los Andes entre dichos países, para obtener, aunque parcialmente, las mediciones adicionales para su combinación en el análisis con los datos obtenidos durante campañas anteriores. Uno de los elementos básicos que se utilizan en esta clase de estudios constituye un evento geomagnético transitorio que se registra en superficie —denominado bahía magnética— como efecto de las variaciones en la conductividad eléctrica de la región-E ionosférica.

PROGRAMA DE OBSERVACIONES

La parte experimental del programa para las mediciones adicionales a las obtenidas en fechas anteriores ha incluido el establecimiento de una estación permanente en Are-

* Instituto Geofísico del Perú.
** Instituto Geofísico Boliviano.
*** Instituto Geofísico, Universidad Nacional de Arequipa, Perú.
**** Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington.

*CONDUCTIVITY ANOMALY UNDER
THE ANDES*

M. CASAVARDE, A. GIESECKE *
R. SALGUEIROS DEL POZO **
L. TAMAYO *** and L. T. ALDRICH ****

ABSTRACT

Using additional measurements along the Eastern Andes, between Peru and Bolivia, an attempt was made to define the deep conductivity anomaly discovered in the last few years. By selecting a profile across the Andes, and the use of an anomalous conductivity model of semi-cylindrical shape, measurements obtained were tentatively adjusted.

INTRODUCCION

This work is an extension of some other studies that have been accomplished as a result of a cooperation between the Department of Terrestrial Magnetism of the Carnegie Institution of Washington, the Geophysical Institute of Peru and the Bolivian Geophysical Institute. This cooperative program is oriented to study the conductivity anomaly by geomagnetic methods under the Andes between Peru and Bolivia. In this study, we tried to cover the Eastern part of the Andes between both countries, to obtain in a partial way, additional measurements to be combined with the analysis of additional data from previous surveys. One of the basic elements used in this type of studies is a transitory geomagnetic event, recorded at the surface —named magnetic bay— as an effect of the electric conductivity variation of the E ionospheric region.

OBSERVATIONAL PROGRAM

The experimental part of the program to obtain additional measurements to those obtained in previous dates included the establishment of a permanent station in Arequipa (ARE)

* Geophysical Institute of Peru.
** Bolivian Geophysical Institute.
*** Geophysical Institute, National University of Arequipa, Perú.
**** Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington.

TABLA I

ESTACIONES GEOMAGNETICAS ESTABLECIDAS EN PERU Y BOLIVIA PARA EL PROGRAMA DE ANOMALIAS DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEBAJO DE LOS ANDES, ADEMAS DE LAS ESTACIONES TEMPORALES DURANTE EL AÑO GEOFISICO INTERNACIONAL EN PERU.

GEOMAGNETIC STATIONS ESTABLISHED IN PERU AND BOLIVIA FOR THE ELECTRIC CONDUCTIVITY PROGRAM, UNDER THE ANDES, AND OTHER TEMPORARY STATIONS DURING THE INTERNATIONAL GEOPHYSICAL YEAR IN PERU.

TABLA I

ESTACION	GEOGR.	COORD.	INCLINACION MAGNETICA	AÑO DE MEDICIONES
STATION	GEOGR.	COORD.	MAGNETIC DIP.	YEAR OF MEASUREMENTS
	S	W	(1965)	
TALARA (TAL)	4.6°	81.3°	+ 12.5°	1957-58
CHICLAYO (CHI)	6.8°	79.8°	+ 9.7°	1957-58
CHIMBOTE (CIM)	9.1°	78.6°	+ 6.3°	1957-58
CASMA (CAS)	9.5°	78.3°	+ 5.6°	1957-58-64-65
HUANUCO (HUC)	9.9°	76.3°	+ 5.2°	1964-65
UNINI (NNI)	10.8°	74.0°	+ 5.0°	1964-65
IBERIA (IBE)	11.4°	69.6°	+ 5.0°	1967
RIBERALTA (RIB)	11.0°	66.1°	+ 5.0°	1967
ANCON (ANC)	11.8°	77.2°	+ 2.1°	1967
HUANCAYO (HU)	12.1°	75.3°	+ 2.1°	Permanente Permanent
CAÑETE (CAT)	13.1°	76.4°	0.0°	1965
AYACUCHO (AYO)	13.2°	74.2°	0.0°	1962
QUINCÉMIL (QML)	13.2°	70.8°	+ 0.2°	1967
ABANCAY (ABA)	13.6°	72.8°	— 0.4°	1962-65-66
CUZCO (CUZ)	13.2°	71.9°	0.0°	1962-63-65-66
CCAPANA (CCA)	13.8°	71.2°	0.0°	1963
SICUANI (SIC)	14.2°	71.2°	— 1.2°	1962
PUCARA (PUC)	15.1°	70.4°	— 2.4°	1963
YAUCA (YAU)	15.5°	74.6°	— 4.4°	1957-58
CABANILLAS (CAB)	15.9°	70.5°	— 3.8°	1963
CAMANA (CAM)	16.6°	72.7°	— 5.5°	1957-58-65
AREQUIPA (ARE)	16.5°	71.5°	— 4.6°	1963 Permanente Permanent
AYANQUERA (AYA)	17.1°	71.7°	— 5.7°	1963
DESAGUADERO (DEA)	16.6°	69.1°	— 5.0°	1963-65
LA PAZ (LAP)	16.5°	68.2°	— 4.7°	1964-66
SICASICA (SIS)	17.3°	67.7°	— 5.3°	1965
COCHABAMBA (COC)	17.4°	66.2°	— 5.3°	1965
TARIJA (TAR)	21.6°	64.7°	— 13.2°	1967

quipa (ARE) con nuevos variómetros del Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington, y la instalación temporal de estaciones en el último trimestre de 1967, en el Perú: Unini (UNI), Quincemil (QML) e Iberia (IBE); en Bolivia: Tarija (TAR) y Riberalta (RIB). La Tabla I expone la relación de estaciones geomagnéticas establecidas en diferentes periodos, además de las permanentes, en Huancayo y Arequipa. De esta manera, las mediciones obtenidas en las estaciones

with new variometers from the Department of Terrestrial Magnetism of the Carnegie Institution of Washington and the temporary installation of stations in Peru in the last three months of 1967: Unini (UNI), Quincemil (QML), and Iberia (IBE); in Bolivia: Tarija (TAR) and Riberalta (RIB). Table I shows the list of geomagnetic stations established at different periods of time, including permanent ones in Huancayo and Arequipa. In this way, data obtained at UNI, QML, IRE, TAR, and PIB stations, complement

de UNI, QML, IBE, TAR, y RIB complementan las obtenidas anteriormente desde 1962 y las obtenidas durante el año Geofísico Internacional (AGI).

En este caso se han utilizado las reducciones de D, H y Z solamente para un solo evento nocturno en cada una de las estaciones referidas a ARE, como una primera aproximación para el análisis. Este análisis tiene la intención de llenar el vacío hacia el lado oriental de los Andes tanto en Perú como en Bolivia.

EVENTOS GEOMAGNETICOS NOCTURNOS

Schmucker (1963), Schmucker *et al* (1966), Rikitake (1966) y otros autores han desarrollado diversos métodos para el análisis de tipos de variaciones transitorias del campo magnético de la tierra en la investigación de anomalías profundas de conductividad bajo la corteza y el manto superior.

La profundidad e intensidad de las corrientes inducidas depende de ciertos parámetros geofísicos que podemos resumir como sigue:

1. La distribución de la conductividad en el interior de la tierra;

2. El período de las variaciones transitorias del campo geomagnético. Las variaciones de período muy corto —del orden de pocos minutos— que se presentan generalmente durante el día, penetra solamente las capas superficiales. Las variaciones de período largo —del orden de 1 a 3 horas— como en el caso de las bahías magnéticas, que se presentan superpuestas sobre el registro normalmente tranquilo durante la noche, como efecto de inducción de las variaciones de la conductividad de la capa E ionosférica, penetran estructuras más profundas dentro de la tierra. Las variaciones de período largo que se presentan durante el día vienen mezcladas con los efectos de la variación diaria conocida como S_q , lo que hace difícil su empleo en el análisis de las anomalías profundas de conductividad como se verá más abajo.

3. La distribución espacial de las variaciones del campo inductor externo. En las latitudes templadas, es sabido que el campo externo de las variaciones geomagnéticas es en general, uniforme sobre áreas extensas. Esta característica se usa para identificar la presencia de cualquier anomalía como efecto de inducción debido a las irregularidades de conductividad en el interior de la tierra. En las regiones ecuatoriales, desde el punto de vista magnético, la presencia del electrochorro provee durante el día un campo externo, cuya distribución espacial, no-homogénea, con variaciones geomagnéticas diferentes sobre distancias relativamente cortas, hace difícil el estudio de cualquier anomalía interna. Sin embargo, se han utilizado en informes previos, los eventos diurnos bajo el electrochorro, principalmente la variación S_q , aplicando métodos más adecuados para separar los campos externo e interno (Schmucker *et al*, 1966).

those obtained since 1962, and those obtained during the International Geophysical Year (IGY).

In this case as a first approximation for the analysis, the reduction of D, H, and Z have been used for a single night event in each of the stations previously referred to ARE. This analysis has as the purpose to fill the gap in the Eastern side of the Andes, both in Peru and Bolivia.

NIGHTLY GEOMAGNETIC EVENTS

Schmucker (1963), Schmucker *et al* (1966) Rikitake (1966) and other authors have developed diverse methods for the analysis of various transitory variations of the earth's magnetic field in the study of conductivity anomaly, at depth, under the crust and upper mantle.

The intensity and depth of induced currents are dependent upon certain geophysical parameters that may be summarized as follows:

1. The distribution of conductivity in the interior of the earth;

2. The transitory variation period of the geomagnetic field. Very short term variation —of the order of few minutes— usually present during the day penetrate only superficial layers. Long term variations —of the order of 1 to 3 hours— penetrate into deeper structures of the earth, as is the case of magnetic bays occurring as a superposition upon the normally recorded night registry, as an effect of induction of the conductivity variations of the ionospheric E layer. Long term variations occurring during the day are produced with a daily variation effect known as S_q , a fact that makes difficult its use in the analysis of deep conductivity anomalies as we shall see next.

3. Spatial distribution of the external inductive field. In temperate latitudes it is well known that the external field of geomagnetic variation is generally uniform over extensive areas. This characteristic is used to identify any anomaly track acting as an inductive effect to conductivity irregularities in the interior of the earth. In the equatorial regions, any internal anomaly study is difficult because —from the magnetic point of view— the acting electro-jet produces during the day an external field with a non-homogeneous spatial distribution and similar geomagnetic variations upon relatively short distances. Nevertheless, diurnal events under the electro-jet mainly the S_q variation have been applied in previous reports using better methods to separate the external from the internal field (Schmucker *et al*, 1966).

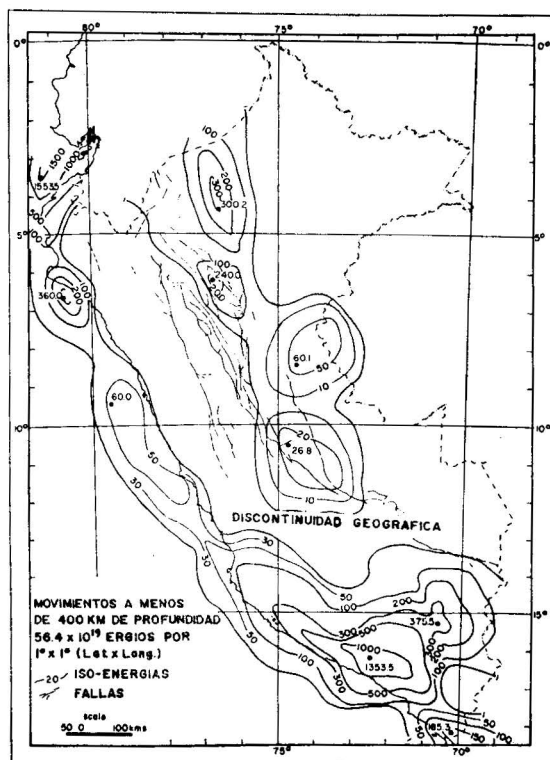


Fig. 1.—Posición de la anomalía indicada por la línea de rayas gruesas con los vectores de perturbación de la variación de la componente vertical (ΔZ) para las diferentes estaciones geomagnéticas establecidas en diferentes períodos.

Fig. 1.—Position of the anomaly indicated by a thick dashed line with vectors of perturbation and distribution of the variation of the vertical component (ΔZ) for different geomagnetic stations established at different periods.

De las consideraciones anteriores, podemos decir que los eventos conocidos como bahías magnéticas, son los eventos más convenientes para la investigación de anomalías de conductividad interna de nuestras latitudes y en el caso presente en la investigación de las anomalías bajo los Andes. Los eventos geomagnéticos utilizados en el presente informe están contenidos en la Tabla II, eventos registrados simultáneamente en la estación de Arequipa (ARE), como estación de referencia.

TABLA II

ESTACIÓN STATION
QUINCEMIL (QML)
IBERIA (IBE)
RIBERALTA (RIB)
LA PAZ (LAP)
TARJA (TAR)
UNINI (UNI)

Los vectores de perturbación han sido calculados sobre la base de los componentes anómalos x, y utilizando la ecuación:

$$\Delta B = \Delta X \cdot \hat{i} + \Delta Y \cdot \hat{j}$$

donde \hat{i} , \hat{j} , son los vectores unidad sobre las líneas verdaderas Norte y Este, respectivamente. Estos vectores indican la dirección e intensidad relativas de las variaciones horizontales de la anomalía. La Fig. 1 muestra estos vectores de perturbación para las diferentes estaciones establecidas en diversos períodos tal como se ha descrito. Los números, con sus signos respectivos, bajo cada estación indican las varia-

From these considerations, we can say that events known as magnetic bays, are the most convenient to investigate the internal conductivity anomalies in our latitudes, and in the present case to study the anomalies under the Andes. The geomagnetic events utilized in this report are shown in Table II, as simultaneously recorded events with reference to the station at Arequipa (ARE).

TABLE II

FECHA DATE	HORA (TU) HOUR (UT)
Sep. 29, 1967	03 ^h 10 ^m
Sep. 29, 1967	03 ^h 10 ^m
Nov. 1, 1967	03 ^h 42 ^m
Dic. 23, 1967	01 ^h 10 ^m
Dic. 23, 1967	01 ^h 10 ^m
Dic. 31, 1967	23 ^h 10 ^m

The perturbation vectors have been computed on an x, y, anomaly component basis and using equation:

where \hat{i} , \hat{j} are the unitary vectors above the true Northern and Eastern lines, respectively. These vectors show the relative direction and intensity of the horizontal anomaly variations. Fig. 1 shows these perturbation vectors in different station established on different periods of time, as has been previously discussed. The number with their respective sign under each station show the variations (ΔZ)

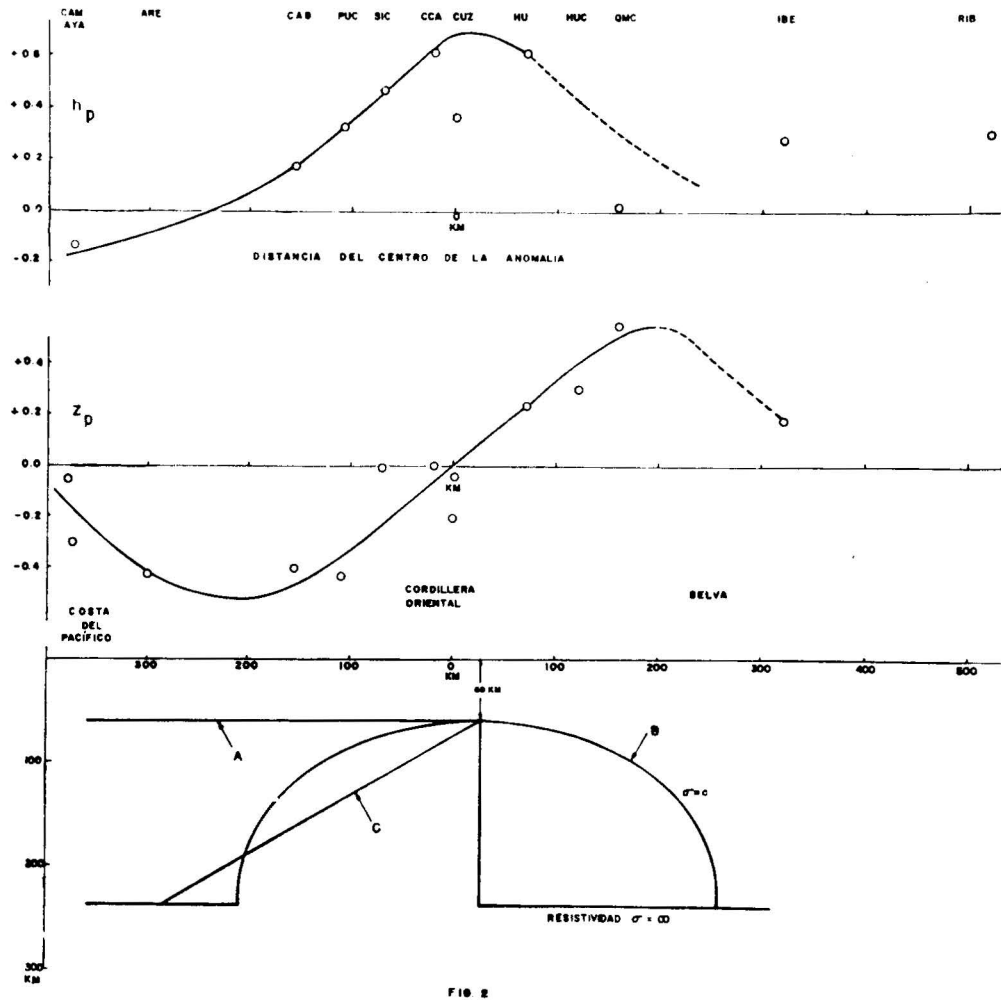


FIG 2

Fig. 2.—Variación de los componentes anómalos del campo horizontal (h_p) y campo vertical (z_p) a lo largo de una sección transversal PP' de la Fig. 1, calculados para bahías geomagnéticas de las estaciones aproximadamente alrededor del perfil mencionado. Parte inferior: Tres diferentes modelos (A, B, C) de isoconductividad interna de 0.1 (ohm-m)^{-1} correspondientes a isotermas de $1,500-1,700^\circ\text{C}$ entre una superficie no conductora y el manto superior considerado con material superconductor.

Fig. 2.—Variation of anomalous components of the horizontal field (h_p) and vertical field (z_p) along transverse section PP' of Fig. 1, calculated for geomagnetic bays of stations approximately around the meridional profile. Lower part: three different models (A, B, C) of internal isoconductivity of 0.1 (ohm-m)^{-1} corresponding to isothermas of $1500-1700^\circ\text{C}$ between a non-conductor surface and the upper mantle considered as as uper conductor material.

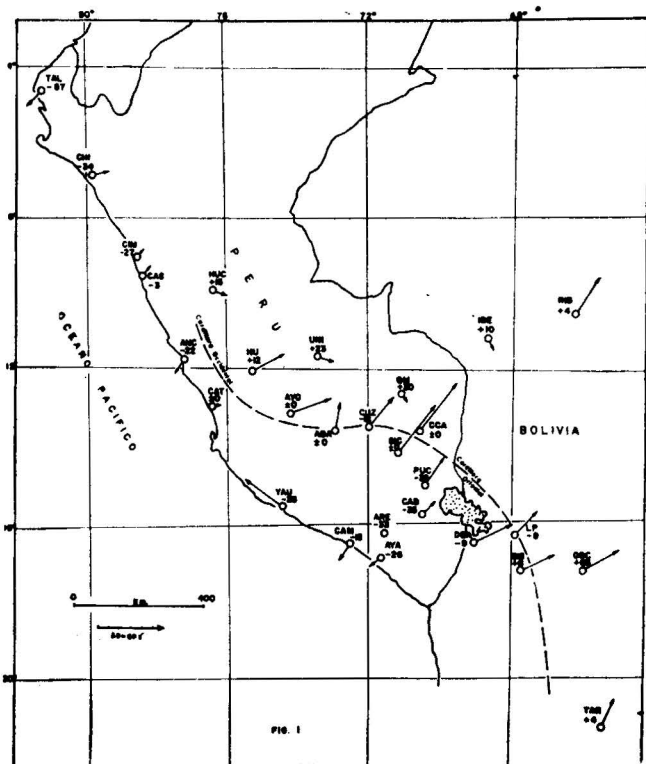


Fig. 3.—Mapa de liberación de energía de movimientos sísmico, Enero 1949 a Julio 1963. Grupos de densidad de energía e isolneas en unidades de 10^{19} ergs por área (1° de latitud x 1° de longitud) por 14.5 años.

Fig. 3.—Map of energy liberation of seismic movements, January 1949 to July 1963. Groups of energy density and isolines in units of 10^{19} ergs by area (1° of latitude x 1° by longitude) by 14.5 years.

ciones (ΔZ) de la componente vertical. Con estos parámetros: ΔB y ΔZ , se ha trazado la posición de la anomalía indicada sobre la Fig. 1 con una línea gruesa a rayas. Tal como se observa, la anomalía coincide con los vectores de mayor magnitud y $\Delta Z = 0$. Los valores de ΔZ definen claramente la posición de la anomalía con las variaciones positivas hacia el Este y los negativos hacia el Oeste (de la anomalía). En Bolivia, el centro de la anomalía parece pasar muy cerca de La Paz y Tarija. En Perú, en la región norte pasa bajo la Cordillera Occidental, para luego desviarse aproximadamente hacia el Este en la parte central y luego hacia el Sur-Este coincidiendo con la región bajo la Cordillera Oriental en la parte meridional para continuar en Bolivia cruzando la región occidental del Altiplano.

La Fig. 2 representa una transversal a la anomalía, a lo largo de la línea PP' de la Fig. 1, siguiendo el mismo modelo utilizado anteriormente (Schmucker *et al.*, 1966, Rikitaki, 1966). Cada punto h_p representa la componente anómala del campo horizontal transitorio en superficie deducida de las bahías magnéticas mencionadas más arriba, y z_p representa a los puntos que corresponden a la componente vertical anómala deducida de las mismas bahías. Las curvas están calculadas para un modelo de conductividad anómala de forma semi-cilíndrica (ver Modelo B, figura inferior de la Fig. 3). Las últimas observaciones hechas en QML, IBE, UNI, LAP, RIB, y TAR se ajustan mejor en la componente vertical z_p que en la componente horizontal h_p . Estos resultados indican la necesidad de analizar cuidadosamente otros eventos que podrán obtenerse en mediciones futuras con una cadena de estaciones más cercanas entre sí sobre el perfil aproximado PP' , además de realizar estudios teóricos de otros modelos que ayuden a definir las características de este interesante fenómeno bajo los Andes.

ACTIVIDAD SISMICA EN EL PERU

Una información adicional que podría ser de mucho interés para los físicos del interior de la tierra, es la estrecha correlación que existe entre la actividad sísmica de la región expuesta por L. Ocola (1966) y la posición de la anomalía de conductividad bajo los Andes descrita más arriba. La Fig. 3 muestra el mapa de liberación de energía como consecuencia de movimientos sísmicos registrados en un período de 14.5 años para cuyo estudio de sismicidad se han tomado en cuenta el número de eventos registrados para dicho período, magnitud, frecuencia, distribución espacial, modo de ocurrencia y empleando como referencia una magnitud igual a 4 en la escala de Richter. El mapa muestra la distribución de los focos sísmicos y la tendencia de su ocurrencia, además de las posibles regiones sismo-tectónicas del Perú.

Comparando los mapas de las Figs. 2 y 3, se observa que la anomalía geomagnética coincide en líneas generales con la discontinuidad geográfica señalada por Ocola.

Agradecimientos. Deseamos expresar nuestro reconocimiento por el continuo apoyo y estímulo recibido a los Drs. Merle

of the vertical component. With parameters ΔB and ΔZ , we have plotted the anomaly position shown in Fig. 1 with a wide dashed line. The ΔZ , anomaly as can be seen, is concurrent with vectors of larger magnitude, and $\Delta Z = 0$. ΔZ values clearly define the anomaly position with positive variations toward the East, and the negatives toward the West (of the anomaly). In Bolivia, the center of the anomaly seems to be located close to La Paz and Tarija. In Perú, in the Northern region falls under the Western Cordillera, to deviate afterwards approximately toward the East of the Central part and then, to the South-East in the region under the Eastern Cordillera, in the meridional side, entering into Bolivia and crossing the western region of the High Plateau.

Fig. 2 represents a transverse to the anomaly along PP' line of Fig. 1, using the same model already mentioned (Schmucker *et al.*, 1966, Rikitaki, 1966). Each point h_p represents the anomalous component of the horizontal transitory field in areas deduced from the above mentioned magnetic bays and z_p represents points that correspond to the vertical anomalous component of the same bays. Curves are computed for a semi-cylindrical model of anomaly conductivity (see Model B, lower figure in Fig. 3). Later observations in QML, IBE, UNI, LAP, RIB, TAR, fit better in the vertical component z_p than in the horizontal component h_p . These results point out the need for careful analysis of some other events that could be made in future measurements with a string of stations closer to each other along the approximate PP' profile as well as by more theoretical studies of some other models that may help to explain the characteristics of this interesting phenomena under the Andes.

SEISMIC ACTIVITY IN PERU

As an additional information that could be of great interest to the physicist of the interior of the earth, there is the close correlation between the seismic activity in the region exposed by L. Ocola (1966) and the anomaly conductivity under the Andes as indicated before. Fig. 3 shows a map of energy release as a result of seismic movements recorded in a 14.5 years period, in this study, the number of events recorded in the period has been taken into account magnitude, frequency, spatial distribution, the mode of occurrence using a reference magnitude of 4 in the Richter scale. The map shows focal distribution and the occurrence tendency of the events, as well as the possible seismotectonic regions of Peru.

Comparing the maps in Fig. 2 and 3, it may be observed that there is geomagnetic anomaly coinciding in general with the geographical discontinuity, as pointed out by Ocola.

Acknowledgements. We wish to thank Drs. Merle A. Tuve and L. Thomas Aldrich, of the Department of Terrestrial

A. Tuve y L. Thomas Aldrich, del Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution of Washington, aportando instrumentación y fondos para parte de los costos de los trabajos de campo; al Ing. L. Ocola, del Instituto Geofísico del Perú, ahora en la Universidad de Wisconsin, por permitir el uso de su mapa de actividad sísmica en Perú; al Dr. U. Schmucker por su valiosa contribución al proyecto en general y al Dr. Anibal Rodríguez, de la Universidad Nacional de Arequipa, por su continua cooperación. Nuestro especial reconocimiento al U. S. Coast and Geodetic Survey ESSA, por facilitarnos los variógrafos Askania.

Magnetism of the Carnegie Institution of Washington for their continuous help and encouragement, and for their assistance in providing instruments and support for part of the field work; to Ing. L. Ocola, of the Instituto Geofísico del Perú, now at University of Wisconsin for the use of his map of seismic activity in Peru, to Dr. U. Schmucker for his valuable contribution in the general project; and to Dr. Anibal Rodríguez of the Universidad Nacional de Arequipa for his assiduous cooperation. Our special recognition goes also to the U. S. Coast and Geodetic Survey ESSA, for the use of their Askania variographs.

BIBLIOGRAFIA

- OCOLA, L. 1966. Earthquake Activity of Peru. *American Geophys. Union Monogr.* (Vol. in honor of Merle A. Tuve) pp. 508-528.
- SCHMUCKER, U. 1963. Anomalies of Geomagnetic Variations in the Southwestern United States. *Jour. Geomagn. Geoelectr.*, 15:
- *et al.* 1966. Electrical Conductivity Anomaly under the Andes. *Carnegie Inst. Washington. Year Book 65*, pp. 11-28.
- RIKITAKE, T. 1966. *Electromagnetism and the Earth Interior*. Elsevier Publishing Co., 1 Vol.

BIBLIOGRAPHY