

PRECISION GRAVITY STUDIES AT CERRO PRIETO

D. S. Chase, R. C. Clover, R. B. Grannell, and R. M. Leggewie
California State University, Long Beach, California, USA

J. Eppink and D. W. Tarman
California State Polytechnic University, Pomona, California, USA

N. E. Goldstein
Lawrence Berkeley Laboratory, University of California
Berkeley, California, USA

INTRODUCTION

Precision gravity and leveling measurements were initiated in 1978 at the Cerro Prieto geothermal field, for two reasons:

1. The measurement, when repeated over several years, could provide information about possible changes within the reservoir. Such changes could occur for several reasons, e.g., mass removal, densification of permeable rocks, and formation of vapor phases because of reduced reservoir pressures.

2. As an added benefit from the repetitive work, the data obtained can also be reduced to Bouguer anomaly values. These can be used to augment the available regional gravity data and can be interpreted in terms of subsurface lateral density variations (i.e., spatial lithologic variations).

First-order leveling has been conducted by the Comisión Federal de Electricidad in concert with the precision gravity effort. In conjunction with the repetitive observed gravity values, this precise leveling, when repeated, allows the calculation and removal of gravity effects due to changes in elevation. Such changes could result from either differential subsidence due to subsurface compaction of the reservoir rocks, to regional tectonics unrelated to geothermal fluid production, or both. Also, both the free-air and Bouguer corrections, used in the reduction process for obtaining Bouguer anomaly values, require a knowledge of the elevation at each station.

At present, 60 permanent stations have been established over an area of approximately 500 km² centered on the geothermal field. Some 70% of the anticipated first set of gravity and leveling readings were completed during the winter and spring of 1978. The gravity station data have been reduced to both observed gravity values and Bouguer anomalies, and statistical evaluation of the precision of measurement and of the effect of certain error factors is currently under way.

FIELD PROCEDURES

Fifty-five gravity stations, as well as five alternates, have been established. These have been distributed as uniformly as possible in and around the Cerro Prieto field and are depicted in Figure 1. In the site selection of the valley stations, an attempt was made to minimize the possibility of local short-term, nongeothermal gravity changes such as might be due to localized erosion and changes in canal water levels. Two of the stations were established on bedrock as control stations that might be presumed stable with respect to production-induced subsidence: (1) a station on granite in the Cucupa Mountains some 15 km west of the Cerro Prieto geothermal plant; and (2) a station located on the flanks of the rhyodacitic Cerro Prieto volcano less than 10 km northwest of the power plant. Conceivably, tectonic changes could differentially affect the elevations of these two locations, but the premise is made that they are considerably less susceptible to gravity changes over a few years than the remaining 53 stations. The five alternate stations were established either to augment the two bedrock stations or to provide more reliable locales in the valley, where the criteria for locating gravity stations were not quite met initially. All 60 stations were made permanent by the installation of concrete pads large enough to accommodate gravity-meter base plates.

The occupation of gravity stations followed a set routine, which was established in an attempt to maximize the precision of the values obtained. Each station was occupied an average of four times, twice each with two LaCoste and Romberg G model gravity meters (G 300 and G 423, owned by California State University, Long Beach, and California State Polytechnic University, Pomona, respectively). At each occupation, a minimum of four readings were obtained, two each by two different operators. The meters were picked up, rotated, and releveled before every reading so that possible errors due to leveling or orientation could be distributed. Following this procedure we obtained at least

Figure 1. Gravity station location map, Cerro Prieto geothermal field.

16 readings per station, involving four meter operators. The occupations were also distributed in time in an attempt to minimize the differential effects of tares in the data caused by road noise, transportation difficulties over bumpy roads, drift in the instruments, external temperature changes, and differing wind conditions. No station was occupied more than once within an individual gravity loop.

Three base stations were used for reference during the course of the gravity work. All station traverses were run in loops beginning and ending at a base station so that quantitative estimations of nontidal drift could be made and removed, and sizeable tares detected, if any. The three bases are as follows:

1. An external base was located in Mexicali, at the base station previously established by the U. S. Geological Survey. Because this base is located in the center of a traffic circle at the intersection of three major highways, noise levels are extremely high, and plans to utilize this as a major external base station for the gravity work were abandoned. However, the base does serve as an exterior reference point outside the Cerro Prieto area, and can be used as a reference in calculating Bouguer anomaly values. During the term of the field work in early 1978 (January through May), the Mexicali base was occupied once each weekend of field operation; the number of occupations will be substantially reduced in the future.

2. The major internal base utilized was station number 23, located some 5 km east of Cerro Prieto volcano. This station was chosen because its off-the-highway position substantially reduced traffic disturbances (although some trouble was encountered from the passage of occasional trains). On the other hand, its central location provided rapid access. Thus, considerable time was saved in returning to the base, and the individual loops could usually be kept to three to five hours. This station was generally occupied three times a day, the values obtained enclosing two complete gravity loops.

3. A secondary internal base was used at one of the bedrock stations, namely number 20 bis (alternate) of the flanks of Cerro Prieto volcano. Because the initial occupation of all the gravity stations spanned slightly more than four months, it was crucial to ascertain whether or not substantial gravity changes had occurred with time at base station 23, which is located on unconsolidated sedimentary materials and could subside as readily as most of the other gravity stations. (It is important to note that 23 serves only as a gravity reference base for the purpose of establishing drift, not as a reference for calculation of possible elevation and mass changes. With regard to the latter, station 23 is treated as an ordinary gravity station.) Consequently, station 20 bis was occupied at least one month; it also was used for the collection of tidal data over a 24-hour period, although severe wind conditions rendered those data too imprecise for use in more than a general way.

Because station 20 bis was more inaccessible than station 23, it could not serve both as an internal gravity base and as a bedrock reference; it would have been ideal to have one base serving both functions.

DATA REDUCTION

Before the reduction of gravity values to either observed gravity values or Bouguer anomalies, some analysis of the tidal data collected on Cerro Prieto volcano was required. This was needed to establish values for two of the tidal constants employed in the tidal reduction procedure. The first of these, the so-called lag time, reflects the difference in time between the passage of the sun and moon and the distortion of the earth's surface. Normally, a zero lag is assumed. The other constant is a proportionality constant, which brings conformance between the theoretical calculated tidal corrections and the observed tidal changes. The latter are usually larger, and the calculated values are normally multiplied by 1.16 to obtain the appropriate tidal correction. However, there is some measured variability in this value.

Although approximately 24 hours of tidal monitoring were carried out before severe wind conditions forced us to terminate measurements, we later found that only eight hours of data were considered to be of adequate quality (i.e., replicability) for analysis. A plot of the actual gravity data together with the inverse of the tidal corrections (shown as Figure 2) indicates that not much lag time is in effect in the Cerro Prieto area, since the minima of the two curves (which are deliberately offset from each other for better visualization) nearly coincide. The data were of insufficient length

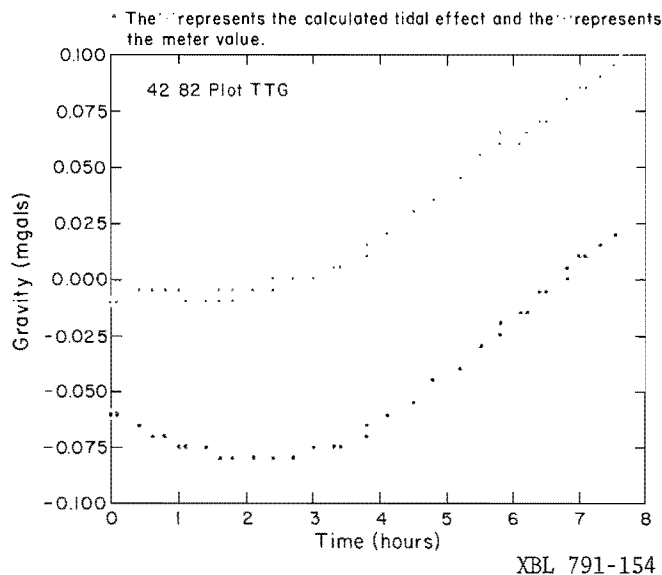


Figure 2. Calculated versus observed tidal gravity values. The two curves are deliberately offset by 0.05 mgal to show their shapes to better advantage; the two curves should be coincidental.

to give an adequate estimate of the conformance factor, and thus the 1.16 figure was used in reduction for lack of any better value. Nevertheless, approximately half of the stations showed a replicability of 15 μ gals or less for reduced values when statistical evaluation was carried out (see the next section). This suggests that the 1.16 value is a reasonable first approximation.

All the gravity data collected for the various stations were reduced to observed gravity values by the following three-step procedure:

1. The meter readings were multiplied by the appropriate calibration factors for the meters used, converting the readings into gravity values in mgals and parts of mgals.
2. Tidal drift was removed from each of the calibrated values by using the correction formulas published by Longman (1959); a lag time of zero and a conformance factor of 1.16 were employed.
3. Because the tidal corrections did not remove all of the accumulated changes which occurred between base station occupations, an assumed linear drift factor was also employed, i.e., the nontidal change between two base station occupations was distributed linearly to all the intervening gravity values.

Since some sizeable long-term drift in the meters occurred, it was not possible to compare the values of gravity taken for a particular station at greatly differing times. The most crucial parameter, however, is not the gravity value itself but rather the difference in gravity between a station and a selected reference point. Consequently, all the station data obtained in each gravity loop were subtracted from the particular value of station number 23 prevailing at the beginning of that loop, yielding an array of gravity differences which were then comparable. The desired final observed gravity value for each station was then obtained by applying two additional steps: (1) the mean of the gravity differences was calculated, and (2) the reference point was transferred to one of the bedrock stations (station 1 in the Cucupa Mountains). Values were expressed in terms of gravity differences between this bedrock locale and the remaining stations. These final calculated gravity differences should remain constant with time if no geothermal changes occur. Alternately, if mass removal and other mass changing effects are sufficiently pronounced, the gravity differences calculated in the foregoing manner should change in magnitude with time. The initially calculated gravity differences are listed together with station position parameters in Table 1.

Because the gravity data collected at the various stations have been accompanied by leveling and the positions of the stations can be obtained from a small-scale topographic map, reduction of the data to Bouguer anomaly values was also possible. We have carried out

this reduction on the calibrated and dedrifted data using a density value of 2.67 (approximately the density of granites found at station 1). The free-air, Bouguer, and latitude corrections were all applied, but because of the relatively flat topography, terrain corrections were not made. Thus, some error (not exceeding 1.5 mgal) can be expected for the bedrock stations that are located in topographically steep areas. Up to a 0.2 mgal error is possible for a station on dikes along the canals. The reduced data are plotted as the Bouguer anomaly map (Figure 3, contour interval 1 is mgal). For the purpose of illustration, station 1 was arbitrarily assigned a value of zero mgal, and all station values are referred to this zero base. The Bouguer anomaly map thus has the same reference base as the observed gravity differences. The Bouguer values are also tabulated in Table 1.

DATA INTERPRETATION

Because only one set of occupations of gravity stations has been obtained, it is too soon to determine whether changes in gravity are occurring within the geothermal field and its environs. It should be mentioned, however, that collection of the first data set spanned four months, during which most of the stations either maintained their values within narrow limits or showed erratic changes. However, for a few stations we noticed either a sudden jump or a uniform change in value over the duration of the occupations. Further analysis of the data will be required to determine whether or not these few anomalous stations underwent real gravity changes with time (presumably because of tectonic influences), or whether the variations occurred because of dissimilarities in the calibration factors of the two meters used, temporary or permanent tares, temperature factors in some of the April and May data, or operator errors.

Some of the changes are intriguing. For example, station 33 (located mid way between the CFE offices and the power plant) was occupied twice, in mid-February and early March 1978. The resulting average gravity differences for the two occupations are 0.02 mgal apart, not an unusual value for individual occupations. A month later (in early April) two more occupations were made, and again the two difference values were 0.02 mgal apart. However, the average of the first two occupations, taken before an episode of significant seismic activity in mid-March, is higher by 0.28 mgal than the average of the two later occupations, which followed the seismic events. This gravity discrepancy is an entire order of magnitude greater than the apparent instrumental precision previously obtained, and thus could be significant. The gravity change with respect to station 23 would suggest local or regional settling centered at station 33. On the other hand, two different meters were used for the two sets of occupations, and the differences may have other causes.

Generally, maximum changes of only a few hundredths mgal were seen at other stations, and

Table 1. Cerro Prieto gravity station parameters and calculated gravity differences.

STATION	ELEVATION (IN METERS)	LATITUDE	LONGITUDE	AVERAGED GRAVITY DIFFERENCE IN MILLIGALS (RELATIVE TO STATION 1)	STANDARD DEVIATION OF GRAVITY DIFFERENCE	BOUGUER ANOMALY VALUES (RELATIVE TO STATION 1)
0.0	8.6999	32.6150	115.4385	5.7050	0.4375	-23.5937
1.0	46.5159	32.3479	115.3430	0.0000	0.0217	0.0000
1.2	56.2009	32.3539	115.3419	-1.7951	0.0219	-0.3751
2.0	20.0660	32.3479	115.3301	-3.4516	0.0134	-8.6575
3.0	13.9320	32.3676	115.3037	-11.0308	0.0296	-19.0522
4.0	13.2620	32.3777	115.2817	-7.0705	0.0243	-16.0469
5.0	12.0650	32.3827	115.2741	-4.5071	0.0194	-14.1306
6.0	12.5330	32.3891	115.2645	-1.9277	0.4808	-11.9830
7.0	12.2320	32.3910	115.2580	-1.1514	0.0319	-11.4157
8.0	10.9690	32.3969	115.2483	0.1533	0.0422	-10.8460
9.0	9.6979	32.4006	115.2408	0.6090	0.0253	-10.9398
10.0	10.6450	32.4033	115.2322	-0.0226	0.4754	-11.6097
11.0	26.8369	32.4001	115.3021	-5.8058	0.0176	-13.9440
11.2	23.8339	32.4001	115.3021	-2.2259	0.0042	-10.9549
12.0	15.2680	32.4134	115.2876	-0.0627	0.0056	-11.5634
12.2	12.6229	32.4134	115.2876	0.6225	0.0017	-11.3986
13.0	15.0330	32.4212	115.2763	2.6280	0.0043	-9.5554
13.2	12.6139	32.4212	115.2763	3.2182	0.0008	-9.4417
14.0	12.4270	32.4111	115.2666	1.0467	0.0532	-10.8259
15.0	11.2140	32.4111	115.2580	1.7675	0.0105	-10.3439
16.0	9.7529	32.4024	115.2510	1.3188	0.0180	-10.3690
17.0	11.5310	32.4203	115.2376	0.5062	0.0068	-12.2916
18.0	10.7360	32.4184	115.2129	-1.2595	0.0041	-14.0640
19.0	11.7000	32.4294	115.1930	-2.9041	0.0112	-16.4175
20.0	37.5749	32.4239	115.2994	-2.3179	0.0223	-10.2893
20.2	89.5199	32.4203	115.3016	-20.8702	0.0080	-18.3182
21.0	11.0520	32.4290	115.2881	4.1250	0.0124	-9.4784
22.0	11.4760	32.4336	115.2774	4.5364	0.0190	-9.3580
23.0	13.5330	32.4404	115.2666	0.7371	0.0000	-13.3143
23.2	10.7229	32.4404	115.2666	1.4302	0.0137	-13.1737
24.0	13.4380	32.4455	115.2553	-1.6553	0.0062	-16.1375
25.0	14.0050	32.4514	115.2424	-3.3747	0.0096	-18.2322
26.0	14.2740	32.4569	115.2311	-4.9964	0.0611	-20.2505
27.0	14.3300	32.4624	115.2198	-6.0434	0.0039	-21.7361
28.0	14.4580	32.4688	115.2102	-6.6135	0.0089	-22.8056
29.0	14.8670	32.4835	115.1930	-6.3701	0.0094	-23.6809
30.0	9.6699	32.4450	115.2833	4.6577	0.0109	-10.5285
31.0	12.3610	32.4304	115.2682	3.4156	0.0154	-10.0425
32.0	9.9789	32.4189	115.2580	2.3082	0.8006	-10.6827
33.0	9.8309	32.4102	115.2467	1.6149	0.1441	-10.6938
34.0	10.3180	32.3942	115.2322	-1.8851	0.0165	-12.7880
35.0	11.8540	32.3864	115.2252	-4.4507	0.0180	-14.4151
36.0	12.6940	32.3791	115.2172	-7.5169	0.0229	-16.7173
37.0	10.4040	32.3589	115.1983	-11.7265	0.0160	-19.7316
38.0	13.4630	32.3896	115.1951	-7.6834	0.0167	-17.5931
39.0	12.9570	32.3562	115.2059	-9.4436	0.0004	-16.7219
40.0	13.2750	32.3493	115.2161	-8.2999	0.0064	-14.9546
41.0	11.9334	32.3734	115.1897	-10.7239	0.0228	-19.6070
42.0	12.0994	32.4025	115.1940	-4.7000	0.0311	-15.9323
43.0	11.8997	32.4193	115.1903	-2.8111	0.0104	-15.4602
44.0	13.0789	32.4426	115.1924	-3.9693	0.0033	-18.2857
45.0	13.2834	32.4585	115.1935	-5.4673	0.0007	-21.0474
46.0	13.0789	32.4444	115.2021	-4.0792	0.0110	-18.5447
47.0	12.6787	32.4426	115.2231	-3.2674	0.0097	-17.6626
48.0	10.9194	32.4685	115.2715	-0.2243	0.0245	-17.0895
49.0	10.2709	32.4549	115.2924	6.1152	0.1898	-9.7597
50.0	12.2884	32.3750	115.3225	-7.7937	0.0039	-16.7372
51.0	13.5969	32.3529	115.2919	-13.0954	0.0000	-19.9771
52.0	13.2684	32.3606	115.2693	-9.2457	0.0000	-16.8244
53.0	12.9753	32.3606	115.2263	-7.8164	0.0000	-15.4529
54.0	12.0539	32.3993	115.2123	-3.8680	0.0000	-14.8487
55.0	12.4970	32.4080	115.2198	-0.9554	0.0000	-12.5562

* STATION NUMBER 0 REPRESENTS THE MEXICALI BASE WHILE ALL OTHER NUMBERS DESIGNATE THE CERRO PRIETO AREA.

* STATION NUMBERS CONTAINING THE DECIMAL FRACTION 2 REPRESENT ALTERNATE STATIONS.

* ELEVATIONS FOR STATIONS 1 THROUGH 40 HAVE BEEN DETERMINED BY SURVEYING WHILE

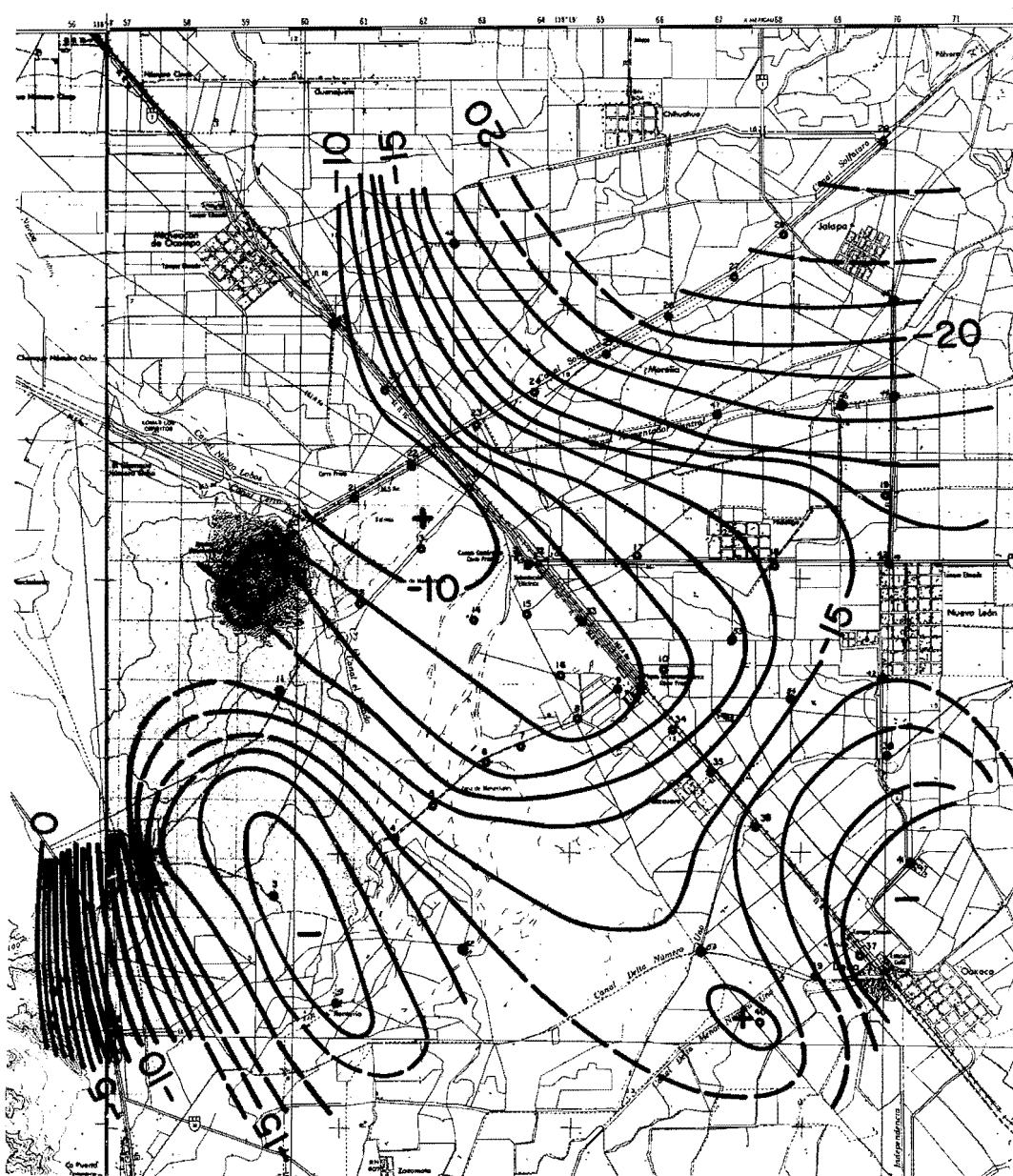
* ELEVATIONS FOR STATIONS 41 THROUGH 55 HAVE BEEN ESTIMATED FROM THE TOPOGRAPHIC MAP.

* THE STANDARD DEVIATION VALUES FOR STATIONS 51 THROUGH 55 ARE MEANINGLESS BECAUSE OF THE LACK OF

* MORE THAN ONE SET OF OCCUPATIONS AT THESE STATIONS.

so the large change at station 23 is extremely anomalous. It is also intriguing to observe that the gravity difference between station 33 (the reference base used daily) and station 20 bis (the base on Cerro Prieto volcano) did not change significantly in the four-month occupation period, during which the gravity was monitored at both locations a total of eight times (averaging every other week). On the other hand, the difference between base station 23 on the valley floor and base station 1 in the Cucupa Mountains increased some 0.05 mgal in the four months of operation, a change consistent with an increasing elevation difference between the two locations (i.e., relative subsidence of the valley floor, with respect to the Sierra Cucupa).

With regard to the interpretation of Bouguer anomaly values, several distinct anomaly patterns can be seen on the Bouguer anomaly map (Figure 3). As noted by others, Cerro Prieto geothermal field is located near the southeasterly termination of a major northwest-trending gravity high, interpreted by Puente (1978) as a basement horst bounded by faults with several hundred meters of vertical displacement. Alternately, this positive gravity feature could be partially attributed to significant densification of reservoir rocks due to hydrothermal alteration from geothermal fluids; such alteration has been documented by Elders et al. (1978). To the northeast, southeast, and southwest of the high are areas of low gravity, presumably areas of thickened alluvial and deltaic fill in depressed



XBL 791-162

Figure 3. Bouguer anomaly map of the Cerro Prieto geothermal field and its vicinity. Contour interval is 1 mgal.

and presumably fault-controlled troughs. The trough to the southwest is bounded on its western side by a very steep gravity gradient (14 or more mgal per km), reflecting the proximity of exposed, relatively dense Cucupa granitic rocks in fault contact with sediments. A gradient this steep is nowhere else repeated on the map, although moderate gradients (approximately 6-7 mgals per km) of roughly the same orientation bound both flanks of the major gravity high discussed above.

Puente (1978) has identified a second set of faults, called the Volcano System, which trend normal to the major faults bounding the gravity high and the Sierra Cucupa. One of these has been identified as passing through the area of Cerro Prieto volcano. This fault, however, is not characterized by a significant gravity expression, probably because of the lack of notable vertical displacement (and consequent density contrasts) across its trace. Indeed, Cerro Prieto volcano itself lacks any sizeable gravity expression, and a detailed gravity survey in its vicinity, coupled with mathematical filtering techniques, is needed to show whether or not an anomalous mass exists. The Cerro Prieto mass, if present, is effectively camouflaged by a relatively steep gravity gradient. A more significant northeast-trending gravity feature is the abrupt termination of the "horst" south of the Cerro Prieto geothermal field, between the power plant and the town of Delta. Presumably, this northeast-trending feature is another fault of the Volcano System and, based on the self-potential data (Corwin et al., 1978), may have considerable significance in the formation of the Cerro Prieto geothermal field. There is a close similarity in location, but not strike, between the gravity feature and the "Pátzcuaro" fault, which may control the self-potential anomaly. The self-potential anomaly has a N 5° W strike.

One final anomaly pattern worthy of note is the change in direction of contour lines from northwest to east-west in the northeast corner of the Bouguer anomaly map near the town of Jalapa. The contour lines presumably define the boundary of an area of deeper sedimentary fill. However, the reason for the shape of the gravity feature is currently not known.

ACCURACY OF MEASUREMENT

Standard deviations were calculated for all of the observed gravity differences obtained from stations that had received more than one set of gravity occupations. In general, four values were used for each calculation; namely, the mean values of the four replications taken during each set of gravity occupations. (Each set was taken, generally, on a different day, and sometimes as much as months apart.) These values were normalized to station 23. The standard deviations are quite variable, but at least half of the stations yielded values of 0.015 mgal (15 μ gal) or less, indicating a fairly high degree of replicability in spite

of several unfavorable field circumstances. We expect this level of accuracy to be improved in the future, both by modified experimental procedures and by increased data handling capabilities; these techniques for future utilization will be discussed in the next section. In addition, the 15 μ gal value represents all the data that were analyzed; none were deleted because of obvious errors or otherwise poor quality. As an example of the latter, several sets of data collected in late April and May show extreme variability because of high temperatures experienced for much of the day. The gravity values were observed to undergo severe amplitude oscillations of 0.1 mgal or more when ambient temperature exceeded 105°F. Further analysis will be needed to ascertain if there is a sudden break in data quality at this temperature point, or whether there is some other relationship between data quality and temperature. In addition, in cases where a set of occupations at a particular station showed considerable variability, more than four replications were obtained in the data set. At present, however, only the last four values in each data set have been reduced and analyzed. The inclusion of the additional values is also likely to increase the precision somewhat.

Although we hope to improve the accuracy of measurements, the present value of 0.015 mgal may be satisfactory. Isherwood (1977a) obtained variations in gravity of up to 0.12 mgal over 1-1/2 years in The Geysers area. Variations of the same magnitude at Cerro Prieto would clearly be significant and detectable within our present capabilities. The 15 μ gal value also compares favorably with the 11 μ gal accuracy reported by Jachens and Roberts (1977) in studies along the San Andreas fault, where noise and transport problems were of less consequence than at Cerro Prieto, and where shorter-time gravity loops could be utilized.

RECOMMENDATIONS FOR FUTURE WORK

The following work must be done to help with the evaluation of existing and future data sets:

1. It is desirable to examine the data station by station to see if any are inherently noisier than others, thus requiring more sets of station occupations.
2. The relationship between time of occupation within a particular gravity loop and precision of measurement needs to be examined with regression analysis. The effect of temperature also requires full evaluation.
3. It was noted that within-station replicability was greater by a factor of two for one meter and its operators than for the other and its operators. The question of whether or not this difference affects the accuracy of the observed gravity differences needs to be answered. Also, the effect of discrepancies between differing meter calibration factors, if they exist, needs

examination. This latter effect should be identified if one compares data that differ greatly in value from the reference base to those that do not.

4. Finally, the question of significant gravity changes over the four-month interval of station occupation at a few stations has already been raised; the possibility of such changes must be considered.

A major concern is the collection of tidal gravity data for the evaluation of the tidal constants and their incorporation into the tidal reduction program. This will be a prime task during the field season in late 1978 and early 1979.

A second set of data needs to be collected during the winter of 1978-1979 so that comparisons of observed gravity differences can be made. Some modifications of the data collection process are anticipated.

1. Data should be collected over a shorter time span. Logistical problems during the first interval of station occupations caused considerable delays, incurring the lengthy four-month time span. These problems have now been eliminated and the next field season should occupy no more than two months. This should improve the precision of measurement by eliminating or minimizing real gravity changes, which currently can be separated from the other factors affecting precision only with great difficulty or not at all.
2. Gravity measurements should be restricted to the cooler part of the year to avoid the lack of precision caused by temperature extremes.
3. The completion of several data reduction and interpretation programs, including those for statistical evaluation, will allow us to reduce the data while the field season is in progress and identify those stations that need more sets of occupations than others to maintain a certain level of accuracy. Based on the analysis of data already collected, we may also modify our field techniques to reach a higher level of accuracy. The possibilities include shortening the time required for individual gravity loops and performing only two replications at each station, but making more than four sets of such replications.

Once a second complete set of data has been collected and reduced, it can be compared with the first set and possible gravity changes identified. If a second set of leveling data are collected at approximately the same time, then gravity changes due to elevation changes can be systematically removed and the residual changes analyzed in terms of mass changes. These can be modeled in a variety of ways. The simplest way is the disk model employed by Isherwood (1977b) to evaluate the anomaly at The Geysers. More complex models could be used depending on anomaly shape.

We plan to occupy the gravity network at least one more time after the occupations planned for winter 1978-1979--perhaps in 1979-1980. We also feel it would be ideal to expand the gravity network into areas where no production is currently under way, but where it is possible in the near future. One possibility is the Tule Check area northwest of Cerro Prieto, where surface manifestations and the results of geophysical work suggest the existence of a geothermal reservoir (Díaz, 1978). The reason for the establishment of predevelopment gravity changes is straightforward. It allows the separation of the effects of geothermally induced gravity changes from those arising from nongeothermal sources such as tectonism, seasonal temperature and precipitation changes, and ground water removal. We feel that two years of monitoring gravity and leveling should precede any significant withdrawal of geothermal waters.

REFERENCES

- Corwin, R. F., Díaz C., S., and Rodríguez B., J., 1978. Self-potential studies at the Cerro Prieto geothermal field, in *Abstracts, first symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico*. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098 ABS.
- Díaz C., S., 1978. CFE self-potential survey northwest of Cerro Prieto, in *Abstracts, first symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico*. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098 ABS.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., and McDowell, S. D., 1978. Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto, Baja California, Mexico, in *Abstracts, first symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico*. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098 ABS.
- Isherwood, W. F., 1977a. Reservoir depletion at The Geysers, California. *Geothermal Resources Council, Transactions*, v. 1, p. 149 (Summary).
- _____, 1977b. Geothermal reservoir interpretation of change in gravity, in *Proc. Third workshop, geothermal reservoir engineering, Stanford, Stanford University*, pp. 18-23.
- Jachens, R. C., and Roberts, C. W., 1977. Repeat gravity measurements in southern California (abstract). *Transactions, American Geophysical Union*, v. 58, no. 12, p. 1122.
- Longman, I. M., 1959. Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *J. Geophys. Res.*, v. 64, pp. 2351-2355.
- Puente C., I., 1978. Geology of the Cerro Prieto geothermal field, in *Abstracts, first symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico*. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098 ABS.

Wilt, M., Goldstein, N. E., and Razo M., A.,
1978. LBL resistivity studies at the
Cerro Prieto geothermal field, in Abstracts,

first symposium on the Cerro Prieto geo-
thermal field, Baja California, Mexico.
Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098 ABS.

ESTUDIOS DE GRAVIMETRIA DE PRECISION EN CERRO PRIETO

INTRODUCCION

En 1978 en el campo geotérmico de Cerro Prieto por dos razones se iniciaron mediciones precisas de gravedad y nivelación.

1. Al repetirse a lo largo de varios años, las mediciones podrían proporcionar información acerca de posibles cambios en el yacimiento. Dichos cambios pueden responder a diversas razones, por ejemplo: remoción de masa, densificación de rocas permeables, y formación de fases gaseosas debido a la reducción de presión del yacimiento.

2. Como beneficio adicional del trabajo repetitivo, los datos obtenidos pueden también reducirse a valores de anomalía de Bouguer. Estos pueden utilizarse para aumentar los datos de gravedad disponibles para la región e interpretarse en términos de variaciones laterales de densidad bajo la superficie (es decir, variaciones litológicas espaciales).

La Comisión Federal de Electricidad ha llevado a cabo nivelaciones de primer orden coordinadamente con las mediciones precisas de gravedad. En conjunto con los valores repetitivos de gravedad observados, esta nivelación precisa, al repetirse, permite el cálculo y eliminación de los efectos gravitatorios debidos a cambios en la elevación. Dichos cambios pueden provenir de un asentamiento diferencial debido a la compactación subterránea de las rocas del yacimiento de la tectónica regional, no relacionada a la producción de fluido geotérmico, o de ambas cosas. Además, tanto la corrección de Bouguer como la de aire libre, utilizadas en el proceso de reducción para obtener los valores de anomalías de Bouguer, requieren el conocimiento de la elevación de cada estación.

Hasta el momento, se han establecido 60 estaciones permanentes sobre un área de aproximadamente 500 km² centrada en el campo geotérmico. Durante el invierno y la primavera de 1978 se completó aproximadamente el 70% del primer conjunto previsto de lecturas de nivelación y gravedad. Los datos de gravedad de cada estación fueron reducidos tanto a valores observados de gravedad como a anomalías de Bouguer; actualmente se están evaluando estadísticamente la precisión de las mediciones y los efectos de ciertos factores de error.

PROCEDIMIENTOS DE CAMPO

Se han establecido cincuenta y cinco estaciones de gravedad, y cinco alternativas. Dichas estaciones se distribuyeron lo más uniformemente posible en y alrededor del campo de Cerro Prieto, como se aprecia en la Figura 1. Al seleccionar la ubicación de las estaciones en el valle se ha intentado reducir al mínimo la posibilidad de cambios de gravedad locales, no geotérmicos y de corto plazo, tales como los causados por la erosión localizada y por cambios en los niveles de agua de los canales. Dos de las estaciones se establecieron en roca firme, como estaciones de control que pueden suponerse estables con respecto al asentamiento inducido por la producción: (1) una estación sobre granito en la Sierra Cucapa, aproximadamente 15 km al oeste de la planta geotermoelectrica de Cerro Prieto; y (2) una estación ubicada sobre el flanco del volcán riodacítico de Cerro Prieto, a menos de 10 km al noroeste de la planta. Se concibe que los cambios tectónicos pueden afectar diferencialmente las elevaciones de estas dos ubicaciones, pero se adopta la premisa de que ellas son bastante menos susceptibles a cambios de gravedad a lo largo de unos pocos años que las 53 estaciones restantes. Las cinco estaciones alternativas fueron establecidas ya sea para complementar las dos estaciones establecidas en roca firme o para proporcionar sitios más confiables en el valle, donde al principio no se cumplimentaban adecuadamente los criterios de ubicación para las estaciones de gravedad. Las 60 estaciones se hicieron permanentes instalando mojones de concreto lo suficientemente grandes para acomodar la base de los gravímetros.

La ocupación de las estaciones de gravedad siguió una rutina fija, que se estableció con el objeto de maximizar la precisión de los valores obtenidos. Cada estación se ocupó un promedio de cuatro veces, dos veces cada una con dos gravímetros LaCoste y Romberg modelo G (G 300 y G 423, propiedad de California State University, Long Beach, y de California State Polytechnic University, Pomona, respectivamente). En cada ocupación se obtuvieron como mínimo cuatro lecturas a razón de dos lecturas por operador. Los gravímetros fueron levantados, girados, y renivelados antes de cada lectura, para distribuir los posibles errores debidos a nivelación u orientación. Siguiendo este procedimiento se obtuvieron por lo menos 16

lecturas por estación, involucrando cuatro operadores. Las ocupaciones también se distribuyeron en el tiempo tratando de reducir al mínimo los efectos diferenciales de taras en los datos causadas por ruidos del camino, dificultades de transporte por carreteras con baches, deriva de los instrumentos, cambios de la temperatura externa, y diferencias en las condiciones de viento. Ninguna estación se ocupó más de una vez dentro de cada circuito individual de gravedad.

Se utilizaron tres estaciones de base como referencia durante el curso del trabajo de gravedad. Todas las poligonales se recorrieron en circuitos que comenzaban y terminaban en una estación de base, para poder estimar cuantitativamente y eliminar las desviaciones no mareológicas, y para detectar las taras significativas, si las hubiera. A continuación se describen estaciones de base:

1. En Mexicali, se ubicó una base externa en la estación establecida anteriormente por el U.S. Geological Survey. Como dicha base está ubicada en el centro de una rotonda en la intersección de tres carreteras principales, los niveles de ruido son extremadamente altos, y se han abandonado los planes para utilizarla como una importante estación de base externa para el trabajo de gravedad. Sin embargo, la base sirve como punto de referencia exterior fuera del área de Cerro Prieto, y puede utilizarse como referencia para calcular los valores de anomalías de Bouguer. Mientras duró el trabajo de campo (enero a mayo de 1978), la base de Mexicali fue ocupada al finalizar cada semana de operaciones en el campo; en el futuro el número de ocupaciones se reducirá considerablemente.

2. La principal base interna utilizada fue la estación número 23, ubicada aproximadamente 5 km al este del volcán Cerro Prieto. Se eligió esta estación debido a que, por su posición alejada de la carretera, sufre mucho menos perturbaciones debidas al tráfico (aunque hubo algunos problemas debido al paso ocasional de trenes). Por otro lado, su ubicación central permite un rápido acceso, por lo tanto se ahorra un tiempo considerable en el regreso a la base, y por lo general los tiempos requeridos por los circuitos individuales pudieron mantenerse de tres a cinco horas. Esta estación por lo general se ocupaba tres veces al día, y los valores obtenidos cerraban dos circuitos de gravedad completos.

3. Se utilizó como base interna secundaria una de las estaciones en roca firme, la 20 bis (alterna), situada en los flancos del volcán Cerro Prieto. Debido a que la ocupación inicial de todas las estaciones de gravedad abarcó algo más de cuatro meses, era vital determinar si durante dicho lapso tuvieron lugar cambios substanciales de gravedad en la estación de base 23, que está ubicada sobre sedimentos no consolidados, y podría asentarse tan fácilmente como cualquiera de las otras estaciones de gravedad. (Es importante hacer notar que la estación 23 sirve únicamente como base de referencia de gravedad a los efectos de determinar la deriva, y no como referencia para calcular los posibles cambios de masa y elevación. En relación con esto último, la estación 23 es tratada como una estación de gravedad común y corriente. Por lo tanto, la estación 20 bis fue

ocupada cuando menos un mes; también se utilizó para la recolección de datos mareológicos en un período de 24 horas, aunque las severas condiciones de viento determinaron que los datos fueran demasiado imprecisos para ser utilizados en cualquier forma que no fuera general.

Como la estación 20 bis es menos accesible que la estación 23, no pudo ser utilizada simultáneamente como base interna de gravedad y como referencia en roca firme; hubiera sido ideal tener una base que sirviera para ambas funciones.

REDUCCION DE DATOS

Antes de reducir los valores de gravedad a valores de gravedad observados o a anomalías de Bouguer, se requirió algún análisis de los datos de marea recolectados en el volcán Cerro Prieto. Esto fue necesario para establecer los valores de dos de las constantes de marea empleadas en el método de reducción. La primera de ellas, llamada tiempo de retardo, refleja la diferencia de tiempo entre el paso del sol y la luna y la distorsión de la superficie terrestre. Normalmente, se asume un retardo nulo. La segunda es una constante de proporcionalidad, que compatibiliza las correcciones de marea calculadas y los cambios de marea observados. Estos últimos por lo general son mayores, y los valores calculados se multiplican normalmente por 1.16 para obtener la corrección de marea apropiada. Sin embargo, existe evidencia observacional de variabilidad en este valor.

Aunque se llevaron a cabo observaciones de marea durante aproximadamente 24 horas antes de que severas condiciones de viento forzaran la finalización de los mediciones, posteriormente se encontró que solamente ocho horas de datos son de calidad adecuada para el análisis (es decir replicabilidad). Una gráfica de los datos de gravedad real, junto con la inversa de las correcciones de marea (Figura 2) indica que el tiempo de retardo en el área de Cerro Prieto es muy pequeño, ya que los mínimos de las dos curvas (desplazadas deliberadamente una de la otra para una mejor visualización) casi coinciden. Los datos fueron de insuficiente duración para estimar adecuadamente el factor de compatibilización, y por lo tanto se utilizó la cifra 1.16 en la reducción, a falta de un mejor valor. Sin embargo, aproximadamente la mitad de las estaciones mostraron una reproducibilidad de 15 μ gals o menos para valores reducidos cuando se hizo una evaluación estadística (ver la siguiente sección). Esto sugiere que el valor de 1.16 es una primera aproximación razonable.

Todos los datos de gravedad recolectados en las diferentes estaciones se redujeron a valores de gravedad observados mediante el siguiente procedimiento:

1. Las lecturas de cada gravímetro se multiplicaron por los factores de calibración apropiados para el mismo convirtiendo las lecturas en valores de gravedad en μ gals y fracciones de μ gals.

2. Se eliminó la deriva mareológica de cada uno de los valores calibrados utilizando las fórmulas de corrección publicadas por Longman (1959); se emplearon un tiempo de retardo de cero y un factor de compatibilización de 1.16.

3. Debido a que las correcciones de marea no eliminaron todos los cambios acumulados entre ocupaciones de las estaciones base, también se utilizó un factor de deriva lineal. Es decir, el cambio no atribuible a mareas entre dos ocupaciones de gravedad intervinientes.

Debido a que los gravímetros acusaron en algunos casos significativas derivas de largo plazo, no fue posible comparar los valores de gravedad obtenidos en una estación dada, en instantes muy separados. Sin embargo, el parámetro más crucial no es el valor de gravedad mismo, sino la diferencia de gravedad entre una estación y un punto de referencia seleccionado. Consecuentemente, los datos obtenidos en todas las estaciones incluidas en cada circuito de gravedad fueron restados del valor particular prevaleciente en la estación número 23 al iniciarse dicho circuito, produciendo un conjunto de diferencias de gravedad que entonces son comparables. A continuación se obtuvo para cada estación el valor final de la gravedad observada aplicando dos pasos adicionales: 1) se calculó la media de las diferencias de gravedad, y 2) se transfirió el punto de referencia a una de las estaciones establecidas en roca firme (estación 1 en la Sierra Cucapa). Los valores se expresaron en términos de diferencias de gravedad entre dicho sitio en roca firme y las demás estaciones. Estas diferencias de gravedad finales debieran permanecer constantes con el tiempo si no ocurren cambios en el sistema geotérmico. Alternativamente, si la remoción y otros efectos asociados con cambios de masa son lo suficientemente pronunciados, las magnitudes de las diferencias de gravedad calculadas en la forma descrita debieran variar en función del tiempo. Las diferencias de gravedad calculadas inicialmente, junto con los parámetros de posición de las estaciones se enumeran en la Tabla 1.

Como además de los datos de gravedad recolectados en las diferentes estaciones se dispone de las correspondientes elevaciones, y las localizaciones de las estaciones pueden obtenerse de un mapa topográfico de pequeña escala, fue posible también hacer la reducción de los datos a valores de anomalía de Bouguer. Hemos llevado a cabo esta reducción usando los datos calibrados y corregidos por deriva utilizando un valor de 2.67 para la densidad (la densidad aproximada de los granitos encontrados en la estación 1). Se aplicaron las correcciones de aire libre, de Bouguer y de latitud, pero, debido a la topografía relativamente plana, no se hicieron correcciones por terreno. Por lo tanto, puede esperarse algún error (de no más de 1.5 mgal) para las estaciones en roca firme ubicadas en áreas montañosas. Errores de hasta 0.2 mgal son posibles para estaciones situadas en los albardones de los canales. Los datos reducidos se graficaron como un mapa de anomalías de Bouguer (Figura 3, intervalo entre contornos: 1 mgal). Con propósitos ilustrativos, a la estación 1 se le asignó arbitrariamente un valor de cero mgal, y todos los valores de las estaciones se refieren a esta base. Por lo tanto, el mapa de anomalías de Bouguer tiene la misma base de referencia que las diferencias de gravedad observadas. Los valores Bouguer también se tabulan en la Tabla 1.

INTERPRETACION DE LOS DATOS

Debido a que hasta el momento sólo se dispone de un conjunto de mediciones de gravedad, es demasiado pronto para determinar si se están produciendo cambios en la gravedad dentro del campo geotérmico y sus alrededores. Debe mencionarse, sin embargo, que la recolección de los primeros datos abarcó cuatro meses, durante los cuales la mayoría de las estaciones mantuvieron sus valores dentro de límites reducidos o mostraron cambios erráticos. Sin embargo, en algunas estaciones notamos una variación repentina o un cambio uniforme en valor durante la duración de las ocupaciones. Serán necesarios análisis adicionales de los datos para determinar si estas estaciones anómalas sufrieron cambios verdaderos de gravedad en función del tiempo (presumiblemente debidos a influencias tectónicas), o si las variaciones se deben a diferencias en los factores de calibración de los dos gravímetros utilizados, a taras temporarias o permanentes, a factores de temperatura en algunos de los datos de abril y mayo, o a errores de los operadores.

Algunos de los cambios son curiosos. Por ejemplo, la estación 33 (ubicada aproximadamente a mitad de camino entre las oficinas de la CFE y la planta) fue ocupada dos veces, a mediados de febrero y a principios de marzo de 1978. Las diferencias promedio de gravedad resultantes para las dos ocupaciones están separadas por 0.02 mgal, lo que no es inusitado para ocupaciones individuales. Un mes después (a principios de abril) se hicieron dos ocupaciones más, y de nuevo los dos valores de diferencia resultaron distanciados por 0.02 mgal. Sin embargo, el promedio de las primeras dos ocupaciones, realizadas antes de un episodio de actividad sísmica importante que tuvo lugar a mediados de marzo, es 0.28 mgal mayor que el promedio de las dos ocupaciones posteriores, después de los eventos sísmicos. Esta discrepancia en gravedad es un orden de magnitud mayor que la precisión instrumental aparente obtenida previamente, y por lo tanto podría ser significativa. El cambio de gravedad con respecto a la estación 23 sugeriría un asentamiento local o regional centrado en la estación 33. Por otra parte, se utilizaron dos gravímetros diferentes para los dos conjuntos de ocupaciones, y las diferencias podrían deberse a otras causas.

Por lo general, los cambios máximos observados en otras estaciones fueron de únicamente unas centésimas de mgal, lo que hace que el gran cambio en la estación 33 sea extremadamente anómalo. Es también curioso observar que la diferencia de gravedad entre la estación 23 (la base de referencia utilizada diariamente) y la estación 20 bis (la base en el volcán Cerro Prieto) no cambió en forma significativa durante el período de ocupación de cuatro meses, en el cual se verificó la gravedad en ambas ubicaciones un total de ocho veces (en promedio, cada semana de por medio). Por otra parte, la diferencia entre la estación de la base 23 situada en el valle y la estación de base 1 en la Sierra Cucapa aumentó aproximadamente 0.05 mgal en los cuatro meses de operación, un cambio consistente con un aumento en la diferencia de

elevación entre los dos puntos (es decir, asentamiento relativo del piso del valle, con respecto a la Sierra Cucapa).

Con respecto a la interpretación de los valores de anomalías de Bouguer, se observan varios patrones diferentes en el mapa de anomalías de Bouguer (Figura 3). Como es sabido, el campo geotérmico de Cerro Prieto está ubicado cerca de la terminación sureste de un importante máximo local de gravedad de rumbo noroeste, interpretado por Puente (1978) como un horst del basamento limitado por fallas con varios cientos de metros de desplazamiento vertical. Alternativamente, esta anomalía positiva de gravedad podría atribuirse parcialmente a una densificación significativa de las rocas del yacimiento debida a una alteración hidrotermal causada por fluidos geotérmicos; dicha alteración ha sido documentada por Elders et al. (1978). Al noreste, sureste y suroeste de la anomalía hay áreas de baja gravedad, presumiblemente áreas de espeso relleno deltaico y aluvial en depresiones presumiblemente controladas por fallas. La depresión que se extiende hacia el suroeste está limitada en su lado occidental por un gradiente de gravedad sumamente empinado (14 o más mgal por km), que refleja la proximidad de rocas graníticas aflorantes relativamente densas de Cucapa en contacto de falla con sedimentos. En ningún otro lugar del mapa se repite un gradiente tan empinado aunque existen gradientes moderados (de aproximadamente 6-7 mgals por km) de aproximadamente igual orientación, que limitan ambos lados de la importante anomalía de gravedad discutida anteriormente.

Puente (1978) ha identificado un segundo grupo de fallas, llamado Sistema Volcano, cuyo rumbo es normal al de las fallas principales que limitan al alto gravimétrico y a la Sierra Cucapa. Se ha encontrado que una de estas fallas atraviesa el área del volcán Cerro Prieto. Sin embargo, dicha falla no se caracteriza por una expresión significativa de gravedad, probablemente debido a la falta de un desplazamiento vertical notable (y consecuente contraste de densidad). De hecho, el mismo volcán Cerro Prieto carece de una expresión gravimétrica de consideración, y se requiere un levantamiento detallado de gravedad en sus alrededores, y la aplicación de técnicas matemáticas de filtrado para determinar si existe una masa anómala. La masa de Cerro Prieto, si es que existe, está eficazmente enmascarada por un gradiente de gravedad relativamente empinado. Con rumbo noreste un rasgo de gravedad más significativo es la abrupta terminación del "horst" al sur del campo geotérmico de Cerro Prieto, entre la planta y la población de Delta. Se presume que, este rasgo de rumbo noreste es otra falla del Sistema Volcano y, en base a los datos de potencial natural (Corwin et al, 1978) puede tener considerable importancia en la formación del campo geotérmico de Cerro Prieto. Hay una estrecha similitud en la ubicación, pero no en el rumbo, entre la anomalía de gravedad y la falla de "Pátzcuaro", que podría controlar la anomalía de potencial natural. Dicha anomalía tiene un rumbo N 5° W.

Un último patrón de anomalías que vale la pena hacer notar es el cambio de dirección de las líneas de contorno, de noroeste a este-oeste, en la esquina noreste del mapa de anomalías de Bouguer cerca de la población de Jalapa. Las líneas de contorno definen presumiblemente los límites de un área de relleno sedimentario más profundo. Sin embargo, el porqué de la forma de los contornos de gravedad no se conoce actualmente.

PRECISION DE LAS MEDICIONES

Se calcularon las desviaciones estandar para todas las diferencias de gravedad observadas correspondientes a estaciones en las que se realizaron más de un grupo de ocupaciones. En general, se utilizaron cuatro valores para cada cálculo, a saber, los valores promedio de las cuatro repeticiones tomados durante cada conjunto de ocupaciones de gravedad. (Por lo general, cada grupo se tomaba en diferentes días, algunas veces hasta con meses de intervalo). Estos valores se normalizaron a los de la estación 23. Las desviaciones estandar son bastante variables, pero por lo menos la mitad de las estaciones dieron valores de 0.015 mgal (15 µgal) o menos, lo que indica un grado bastante alto de reproducibilidad a pesar de varias circunstancias desfavorables en el trabajo de campo. Esperamos que el nivel de precisión mejore en el futuro, con el uso de procedimientos experimentales modificados y con una mayor capacidad para manejo de datos; estas técnicas a utilizar en el futuro se discutirán en la próxima sección. Además, el valor de 15 µgal representa todos los datos analizados; no se eliminó ninguno debido a errores obvios o por su mala calidad. Como ejemplo de esto último, varios grupos de datos obtenidos a fines de abril y en mayo, muestran una variabilidad extrema debido a las altas temperaturas registradas durante gran parte del día. Se observó que los valores de gravedad sufrían severas oscilaciones de 0.1 mgal de amplitud o más cuando la temperatura ambiente excedía 105°F. Análisis adicionales serán necesarios para determinar si existe un cambio repentino en la calidad de los datos a dicha temperatura, o si existe alguna otra relación entre la calidad de los datos y la temperatura. Además, en los casos en que un conjunto de ocupaciones de una estación dada muestra una variabilidad considerable, se obtuvieron más de cuatro repeticiones del conjunto de datos. Sin embargo, a la fecha sólo se han reducido y analizado los últimos cuatro valores en cada grupo de datos. La inclusión de los valores adicionales probablemente mejorará la precisión.

Aunque esperamos mejorar la precisión de las mediciones, el valor actual de 0.015 mgal podría resultar satisfactorio. Isherwood (1977a) en el área The Geysers obtuvo variaciones en la gravedad de hasta 0.12 mgal en un período de un año y medio. En Cerro Prieto variaciones de la misma magnitud serían claramente significativas y detectables con nuestra capacidad actual. El valor de 15 µgal también se compara favorablemente con la precisión de 11 µgal señalada por Jachens y Roberts (1977) en estudios a lo largo de la falla de San Andrés,

donde los problemas de ruido y de transporte fueron de menor importancia que en Cerro Prieto, y donde pudieron utilizarse circuitos de gravedad de menor tiempo.

RECOMENDACIONES PARA EL TRABAJO FUTURO

Es necesario realizar los siguientes trabajos para ayudar en la evaluación de los datos existentes y futuros:

1. Es deseable examinar los datos estación por estación para determinar si algunas son inherentemente más ruidosas que otras, requiriendo por lo tanto más conjuntos de ocupaciones.

2. Es necesario examinar mediante análisis de regresión la relación entre el tiempo de ocupación dentro de un circuito de gravedad dado y la precisión de las mediciones. El efecto de la temperatura también requiere una evaluación completa.

3. Se notó que la reproducibilidad dentro de cada estación era mayor por un factor dos para un gravímetro y sus operadores que para el otro instrumento y sus operadores. Es necesario determinar si esta diferencia afecta o no la precisión de las diferencias de gravedad observadas. También se debe examinar el efecto de las discrepancias, si existieran, entre los factores de calibración correspondientes a los diferentes gravímetros. Este último efecto debería ser identificado si se comparan datos que difieren significativamente de los valores de la base de referencia con datos que no difieren.

4. Finalmente, se ha mencionado la cuestión de los cambios significativos de gravedad en algunas estaciones en el intervalo de cuatro meses de ocupación; debe considerarse la posibilidad de dichos cambios.

Un punto importante es la obtención de datos de mareas de gravedad para la evaluación de las constantes de marea y su incorporación en el programa de reducción de mareas. Esta será una tarea de primordial importancia durante los trabajos de campo a finales de 1978 y principios de 1979.

Es necesario obtener un segundo conjunto de datos durante el invierno de 1978-1979, para poder hacer comparaciones de las diferencias de gravedad observadas. Se anticipa que se realizarán algunas modificaciones en el proceso de recolección de datos.

1. Se deben reunir los datos en un período más corto de tiempo. Los problemas logísticos durante el primer intervalo de ocupación de las estaciones causaron considerables demoras, de ahí el largo período de cuatro meses. Estos problemas ya fueron eliminados y la siguiente temporada de trabajos de campo no debería extenderse más de dos meses. Esto debiera mejorar la precisión de las mediciones eliminando o reduciendo al mínimo los cambios verdaderos de gravedad que actualmente no se pueden separar, o pueden serlo sólo con gran dificultad, de los demás factores que afectan la precisión.

2. Las mediciones de gravedad deberían limitarse a la parte más fresca del año, para evitar los problemas de precisión causados por extremos de temperatura.

3. Al completar los diversos programas de interpretación y reducción de datos, incluyendo los necesarios para la evaluación estadística, nos permitirá reducir los datos durante la temporada de trabajos de campo, e identificar las estaciones que necesitan más conjuntos de ocupaciones que otras, para mantener un cierto nivel de precisión. Con base en el análisis de los datos ya recolectados, también podríamos modificar nuestras técnicas de campo para alcanzar un nivel más alto de precisión. Las posibilidades incluyen reducir el tiempo requerido para los circuitos individuales de gravedad y hacer sólo dos repeticiones en cada estación pero, haciendo al mismo tiempo más de cuatro conjuntos de dichas repeticiones.

Una vez que se haya reunido y reducido un segundo conjunto completo de datos podrá compararse con el primer conjunto para identificar los posibles cambios de gravedad. Si aproximadamente al mismo tiempo, se obtiene un segundo grupo de datos de nivelación podrán eliminarse sistemáticamente los cambios de gravedad debidos a cambios en elevación, y los cambios residuales se podrán analizar en términos de cambios de masa. Se pueden hacer modelos de éstos en diversas formas. La forma más sencilla es el modelo discoidal empleado por Isherwood (1977b) para evaluar la anomalía en The Geysers. Podrían utilizarse modelos más complejos, dependiendo de la forma de la anomalía.

Planeamos ocupar la red gravimétrica por lo menos una vez más después de las ocupaciones previstas para el invierno de 1978-1979--probablemente en 1979-1980. También pensamos que sería ideal ampliar dicha red a áreas donde no hay producción actualmente, pero donde ésta sería posible en un futuro cercano. Una posibilidad es el área de Tule Check al noroeste de Cerro Prieto, en donde las manifestaciones superficiales y los resultados del trabajo geofísico sugieren la existencia de un yacimiento geotérmico (Díaz, 1978). La razón para determinar cambios de gravedad previamente al desarrollo es obvia, permite la diferenciación de los cambios de gravedad inducidos por el desarrollo geotérmico de los generados por otras causas, tales como tectonismo, cambios de estación, de precipitación y temperatura, y extracción de aguas subterráneas. Creemos que dos años de monitoreo de gravedad y de nivelación deben preceder cualquier extracción importante de aguas geotérmicas.

Títulos de Figuras

Figura 1. Mapa de la ubicación de las estaciones gravimétricas en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

Figura 2. Valores de gravedad de marea observados versus calculados. Se han desplazado las dos curvas deliberadamente por 0.05 mgal para mostrar sus formas más ventajosamente; las dos curvas deberían coincidir.

Figura 3. Mapa de anomalías de Bouguer del campo geotérmico de Cerro Prieto y sus alrededores. El intervalo entre contorno es de 1 mgal.

Título de Tabla

Tabla 1. Parámetros de las estaciones gravimétricas en Cerro Prieto, y diferencias de gravedad calculadas.