

Fig. II. 1-12 Locality Map of Surface Altered Rocks for X-Ray



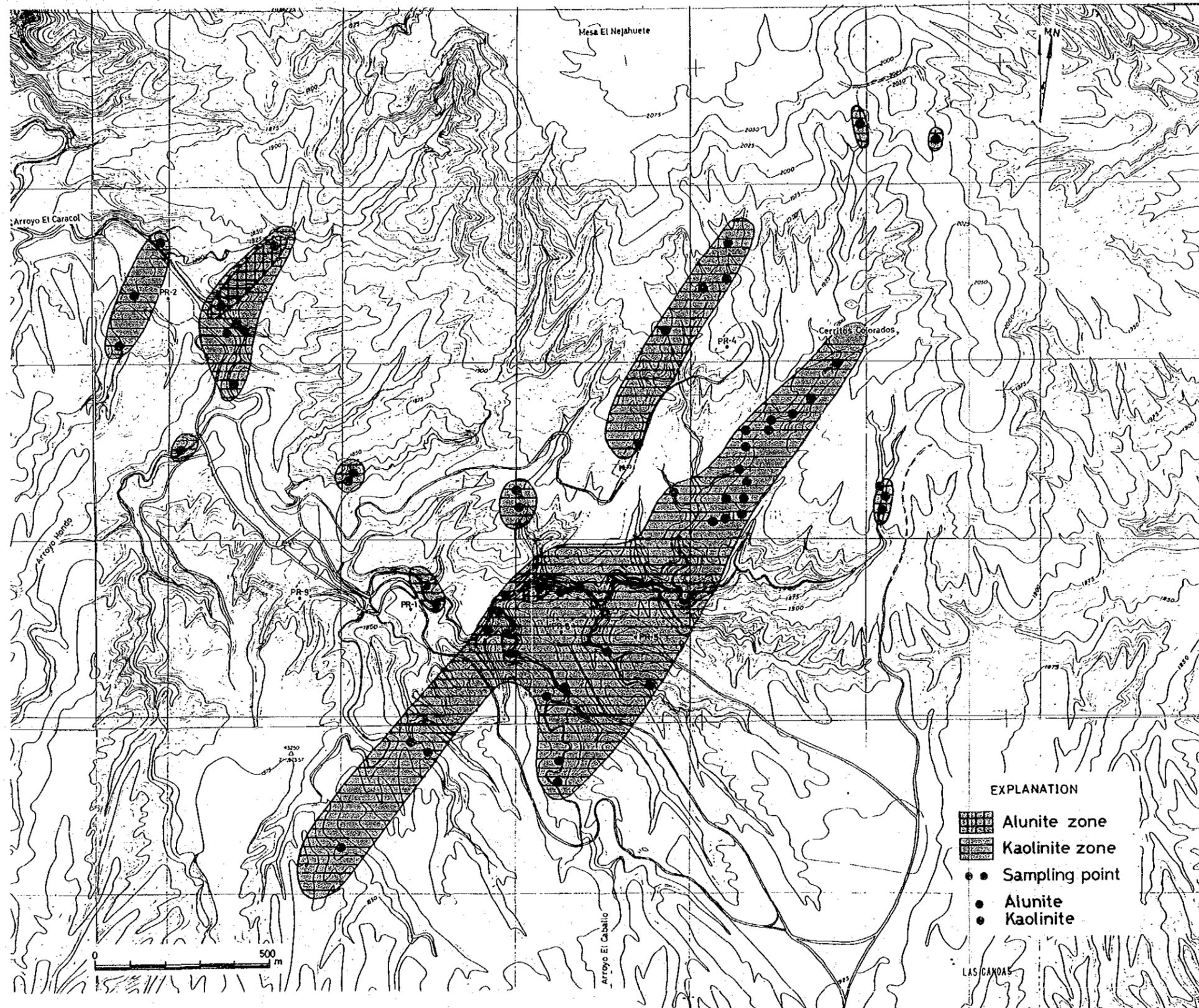


Fig. II. 1-13 Zoning Map of Rock Alteration





**Table II. 1-4 Relationship Between Conjugate Minor Fault and Principal Stress at each Survey Point**

Loc. No.	Conjugate Set		Principal Stress			Shear Angle (2θ)	Remarks
			$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$		
3	N20E, 68W	N7E, 77W	N30E, 70N	N11E, 19S	N77W, 6W	37	N with L
5	N18E, 78W	N2E, 76E	N8E, 60S	N11E, 31N	N80W, 1W	30	N with L
12	N37E, 76E	N30E, 62W	N2E, 79N	N34E, 9W	N57W, 7E	42	N
13	N30E, 85W	N42E, 83E	N37E, 43E	N35E, 47W	N55W, 1W	18	L with N
15	N31E, 80E	N70E, 72N	N55E, 36W	N44E, 54E	N40W, 5E	46	L with N
22	N40W, 58E	N40W, 77W	N50E, 80E	N40W, 0	N50E, 10W	45	N
27	N32E, 76E	N40E, 82W	N34E, 64W	N38E, 26E	N53W, 2W	23	N with L
28	N24E, 78W	N25E, 75E	N68E, 87E	N24E, 2S	N66W, 2W	26	N
30	N10W, 68E	N4E, 72W	N6W, 68S	N2W, 22N	N88E, 2W	44	N with L
31	N38E, 70E	N20E, 68W	N28E, 68N	N29E, 22S	N62W, 1E	46	N with L
32	N6W, 74W	N10E, 71E	N7E, 66N	N1E, 23S	N88W, 2W	38	N with L
33	N20E, 77W	N24E, 82E	N46E, 82W	N25E, 8N	N65W, 3E	22	N
34	N39E, 60W	N54E, 80E	N22E, 67N	N50E, 20W	N44W, 10E	42	N with L
35	N63E, 61N	N33E, 85E	N64E, 47W	N37E, 39E	N42W, 14E	47	Oblique
36	N46E, 41E	N11E, 69W	N59E, 64E	N21E, 21S	N64W, 16W	40	N with L
38a	N22E, 62W	N20E, 82E	N87W, 80W	N20E, 3N	N69W, 10E	36	N
39	N43W, 63W	N49W, 77E	NS, 80S	N47W, 8W	N43E, 7E	40	N
40	N14W, 64E	N6W, 74W	N36W, 79E	N9W, 10N	N80E, 5W	43	N
41	N43E, 72E	N27E, 79W	N41E, 60E	N33E, 29W	N55W, 4W	32	N with L
44	N55E, 70E	N36E, 68W	N43E, 68E	N46E, 22W	N45W, 1E	46	N with L
47	N6E, 75E	N52E, 59W	N38E, 46W	N20E, 43N	N63W, 8E	64	Oblique
48	N20E, 65E	N25E, 83W	N25W, 75S	N24E, 10N	N68W, 10W	32	N
50	N45E, 87W	N36E, 78E	N34E, 56W	N43E, 34E	N50W, 4W	18	Oblique
56	N10E, 73W	N62E, 75S	N37E, 34E	N39E, 56W	N54W, 0	54	L with N
59	N22W, 58W	N20W, 60E	N56W, 87W	N21W, 2E	N68E, 2S	62	N
61	N36E, 65W	N10E, 68E	N27E, 62S	N22E, 28N	N68W, 2E	52	N with L
62	N26W, 67W	N26W, 62E	N65E, 87E	N26W, 0	N65E, 3W	50	N
64	N31E, 57E	N28E, 52W	N25W, 86N	N29E, 2S	N61W, 3E	70	N
68	N11W, 77W	N28W, 87E	N16W, 42S	N26W, 47N	N70E, 5E	25	Oblique
69	N11E, 79W	N40W, 70E	N18W, 33S	N6W, 57N	N77E, 5W	56	Oblique
70	N33W, 62E	N47W, 79W	N13W, 70N	N42W, 18E	N50E, 10W	40	N
72	N35E, 67W	N25W, 70E	N6E, 37S	N2E, 51N	N86W, 2E	72	Oblique

Loc. No.	Conjugate Set		Principal Stress			Shear Angle (2θ)	Remarks
			$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$		
73	N48W, 84E	NS, 56E	N13W, 40S	N41W, 45W	N63E, 15E	59	Oblique
79	N12E, 74W	N28E, 77E	N18E, 62N	N20E, 29S	N72W, 1E	33	N with L
83	N68E, 74W	N42E, 77E	N55E, 49W	N53E, 41E	N36W, 1E	38	Oblique
85	N18E, 70E	N38W, 64W	N13W, 41N	N6W, 48S	N80E, 3E	70	Oblique
86	N55W, 29S	N74E, 57N	N23E, 50N	N87E, 19W	N16W, 33S	90	Oblique
88a	N42E, 62W	N32E, 68E	N55E, 80W	N37E, 10E	N53W, 4E	51	N with L
88b	N49E, 67W	N47E, 58E	N10W, 84S	N58E, 2E	N42W, 5W	55	N
88c	N47E, 62E	N47E, 67W	N43W, 87E	0	N43W, 3W	51	N
88d	N29E, 66W	N40E, 63E	N40E, 78E	N34E, 11S	N54W, 2W	52	N with L
89	EW	N79W, 68N	N84W, 74W	N84W, 15E	N6E, 1S	42	N with L
90	N4W, 83W	N56W, 88E	N30W, 10S	N42W, 80W	N60E, 2E	53	L
94	N26W, 78W	N48W, 88E	N34W, 33E	N46W, 56W	N53E, 10E	25	L with N
97	N13E, 73E	N27E, 65W	N26E, 71S	N18E, 18N	N71W, 4E	44	N with L
103	N6W, 67E	N18E, 72E	N2E, 60S	N7E, 30N	N84W, 2W	47	N with L
104	N2E, 55W	N22E, 72E	N16W, 70N	N16E, 18S	N78W, 10E	56	N with L
108	N58E, 56W	N49E, 61E	N73E, 82W	N54E, 8E	N36W, 3E	64	N
112	N74E, 84N	N67E, 61E	N29E, 78S	N72E, 9E	N20W, 9N	41	N
115	N48W, 60E	N76W, 69W	N54W, 62W	N65W, 27E	N27E, 4S	57	Oblique
116	NS, 83E	N20W, 75W	N14W, 49N	N7W, 41S	N81E, 4E	30	Oblique

Remarks: N : Normal-slip fault, N with L: Normal-slip with lateral component  
L : Lateral-slip fault, L with N: Lateral-slip with normal component  
Oblique: Oblique fault

Table II. 1-5 Remnant Magnetization of Cores

	Well number Depth of core Rock name	Demagne- tization mT	Strength of magnetization KA/m $\times 10^{-3}$	Declination of assumed north (Clockwise)	Strike, dip and slip direction of fracture	Principal stress axis
1	PR-1 93 m Welded tuff	0 10 20 30	2.25 2.25 2.21 2.00	259° 259 260 258	Vein N70°W 32° NE	$\sigma_1$ : N82°E, 30°W $\sigma_2$ : N82°E, 60°E $\sigma_3$ : N8°E, 0°
2	PR-1 910 m Welded tuff	0 10 20 30	2.29 2.31 2.28 2.09	231° 230 228 230	Slicken-side N30°W 63°S 80°	$\sigma_1$ : N56°E, 84°W $\sigma_2$ : N22°E, 5°NE $\sigma_3$ : N69°W, 3°E
3	PR-1 915 m Welded tuff	0 10 20 30	1.49 1.52 1.50 1.43	170° 170 169 168	slicken-side 84°W 64°N 87°	$\sigma_1$ : N60°E, 86°W $\sigma_2$ : N11°W, 2°N $\sigma_3$ : N78°E, 3°E
4	PR-2 350 m Welded tuff	0 10 20 30	2.95 2.90 2.21 1.22	108° 107 108 109	Slicken-side N40°W 30°N 90°	$\sigma_1$ : N19°W, 60°S $\sigma_2$ : N71°E, 0° $\sigma_3$ : N19°W, 30°N
5	PR-2 1,360 m Andesite	0 10 20 30	7.47 6.86 5.43 3.49	61° 59 65 70	Vein S37°W 90° lateral separation is N53°E	$\sigma_1$ : N81°W, 38°E $\sigma_2$ : N46°E, 38°SW $\sigma_3$ : N18°W, 29°N
6	PR-4 300 m Welded tuff	0 10 20 30	4.17 3.51 2.86 2.26	19° 19 18 17	Vein N10°E 85°SE	$\sigma_1$ : N58°W, 85°E $\sigma_2$ : N63°E, 5°W $\sigma_3$ : N27°E, 0°
7	PR-5 350 m Welded tuff	0 10 20 30	4.17 3.43 2.58 2.07	85° 88 88 85	Slicken-side NS 80°E 90°	$\sigma_1$ : N 5°W, 70°N $\sigma_2$ : N85°E, 0° $\sigma_3$ : N 5°W, 20°S
8	RC-1 700 m Andesite	0 10 20 30	9.24 9.18 8.63 7.12	198° 198 199 198	Slicken-side N37°W 54°S 60°	$\sigma_1$ : N36°W, 74°S $\sigma_2$ : N 8°W, 15°N $\sigma_3$ : N81°E, 3°W

Table II. 1-6 Result of X-Ray Analysis for Surface Altered Rock

No.	Sample No.	Mineral																				
		Plagioclase	K-feldspar (Sanidine)	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Calcite	Sulfur	Alunogen		Montmorillonite	Chlorite/Montmorillonite	Sericite/Montmorillonite	Sericite		Kaolin	Halloysite	Gibbsite	Alunite		Pyrite	Amorphous silica
		Pl	Kf	Qt	Cb	Td				Mt	Ch/Mt	Se/Mt	Se		Kn	Ha		An			Py	
1	501		○												○							
2	502														○							
3	503		○												○							
4	504		○	○						●					○							
5	505		○		○										○							
6	506		○		○										○	○						
7	507		○		⊗	⊗									○						●	
8	508		○		⊗										○							
9	509		○	●	⊗										○							
10	510														⊗							
11	511		○	●	●										○	●						
12	512			○											○							
13	513			○	○	●									○							
14	514			○	●										⊗							
15	515			●	●										○							
16	516				●										○							
17	517														○							
18	601		●		○										○							
19	602		○		⊗	○									○						●	
20	603		○												○							
21	604		○		○										○							
22	801		○	○											○	○						
23	802		●	○									●		○							
24	803		●	●											○	○						
25	804	●	●	⊗											○						●	
26	805		○	○											○							
27	806		○	○	○										○	○					●	
28	901			●											○							
29	902a			○	○								●		○						●	
30	902b		○	●	○								●		○							
31	903		●												○							

No.	Sample No.	Mineral																				
		Plagioclase	K-feldspar (Sanidine)	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Calcite	Sulfur	Alunogen		Montmorillonite	Chlorite/Montmorillonite	Sericite/Montmorillonite	Sericite		Kaolin	Halloysite	Gibbsite	Alunite		Pyrite	Amorphous silica
		Pl	Kf	Qt	Cb	Td				Mt	Ch/Mt	Se/Mt	Se		Kn	Ha		An			Py	
32	904			•											○							
33	905		○		⊙	⊙									○							
34	906a														⊙							
35	906b			•	•										○							
36	906c														○						○	
37	907		○												○							
38	908		○												○							
39	909a		○	○											○							
40	909b																					○
41	910			•	•										⊙			○				
42	911														⊙						•	
43	912			○											○							
44	913		○												○							
45	914		○	•											○							
46	1001		○	○	○										○							
47	1002a		○	•											○							
48	1002b		○												○							
49	1003		○	⊙											○							
50	1004														○						•	
51	1005		○		○										⊙							
52	1006																					
53	1007		○		⊙										○						•	
54	1101a														⊙							
55	1101b			○											○							
56	1102		○	○											○							
57	1103a		○	•											•							
58	1103b		○												○							
59	1103c														○							
60	1201																					
61	1202		○		⊙																	
62	1203		○	○	•										○							

No.	Mineral	Sample No.																					
		Pl	Kf	Qt	Cb	Td	Calcite	Sulfur	Alunogen		Mt	Ch/Mt	Se/Mt	Se		Kn	Ha	Gibbsite	An		Py	Amorphous silica	
63	1204		○		⊙											○							
64	1205a		○			⊙										○							
65	1205b					○		○											⊙				
66	1205c				⊙											○			○				
67	1205d		○		⊙											●							
68	1205e				⊙																		
69	1206		○			⊙										○							
70	1207																						
71	1208a					○	○		○							○			⊙				
72	1208b					○			⊙							○		○	○				
73	1301		●	○	●											○							
74	1302		○	○												○							
75	1303			●												○							
76	1304		○	○	●											○							
77	1501		○	●	●											○							
78	1502															⊙							
79	1503		○													○							
80	2001		○		⊙											○							
81	2002				●											○							
82	2003		○	●	○											○	○						

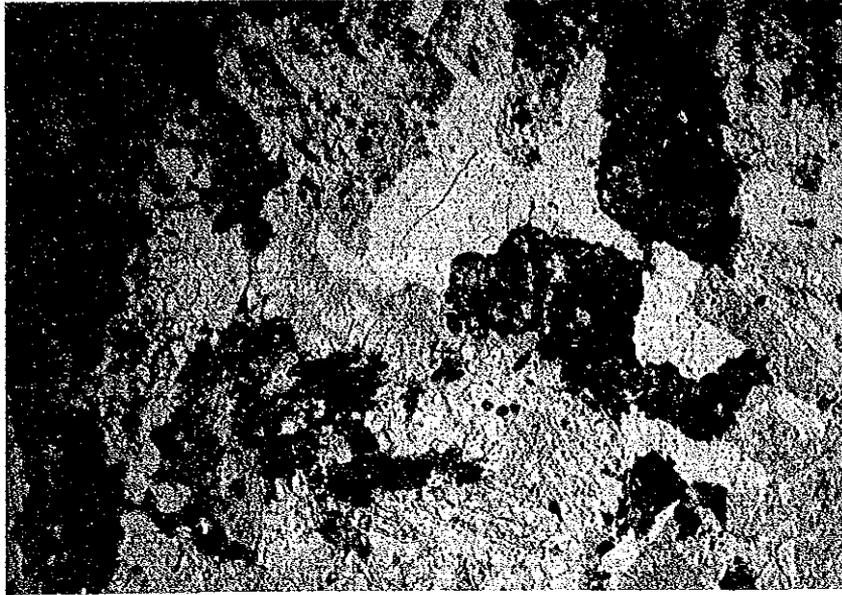
- ⊙ Abundant (scale out of maximum peak)
- Medium (from 4 cm to full scale of maximum peak)
- Little (from 2 cm to 4 cm of maximum peak)
- Rare (under 2 cm of maximum peak)

Table II. 1-7 Result of Density, Effective Porosity and Conductivity of Core Samples

No.	Well	Sampling depth (m)	Rock name	Density of rock (g/cm <sup>3</sup> )			Effective porosity (%)	Conductivity (10 <sup>-3</sup> cal/cm·sec·°C)
				Natural water	Dry condition	Wet condition		
1	PR-1	93	welded tuff	2.00	1.98	2.17	19.2	3.0625 ± 0.0380
2	PR-1	911 ~ 912	welded tuff	1.92	1.91	2.12	21.1	2.612 ± 0.0167
3	PR-2	350 ~ 352	welded tuff	2.31	2.30	2.34	3.6	4.851 ± 0.0483
4	PR-2	668 ~ 672	lapilli tuff	1.71	1.65	1.84	19.4	1.5375 ± 0.0200
5	PR-2	901 ~ 902	welded tuff	1.96	1.86	2.12	25.8	2.1223 ± 0.0164
6	PR-2	1,360 ~ 1,361	andesite	2.16	2.11	2.26	14.7	3.282 ± 0.0663
7	PR-4	300 ~ 301	welded tuff	2.24	2.22	2.30	8.3	4.256 ± 0.0204
8	PR-5	200 ~ 202	welded tuff	2.23	2.21	2.26	5.1	4.464 ± 0.0297
9	PR-5	430 ~ 431.5	welded tuff	2.19	2.17	2.21	3.2	4.1542 ± 0.0489
10	RC-1	700 ~ 702	andesite	2.17	2.00	2.23	23.1	2.573 ± 0.0513
11	RC-1	1,189 ~ 1,190	basaltic andesite	2.49	2.41	2.54	12.4	3.289 ± 0.0470
12	RC-1	1,500 ~ 1,503	andesite	2.25	2.14	2.28	14.8	3.218 ± 0.0332

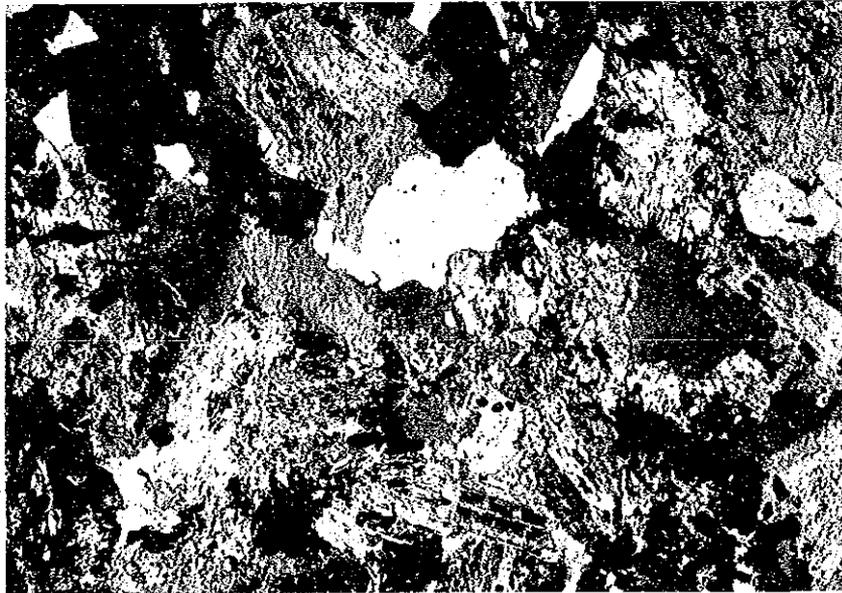


PR-9 (2,985.00 m ~ 2,986.00 m)



Open nicol

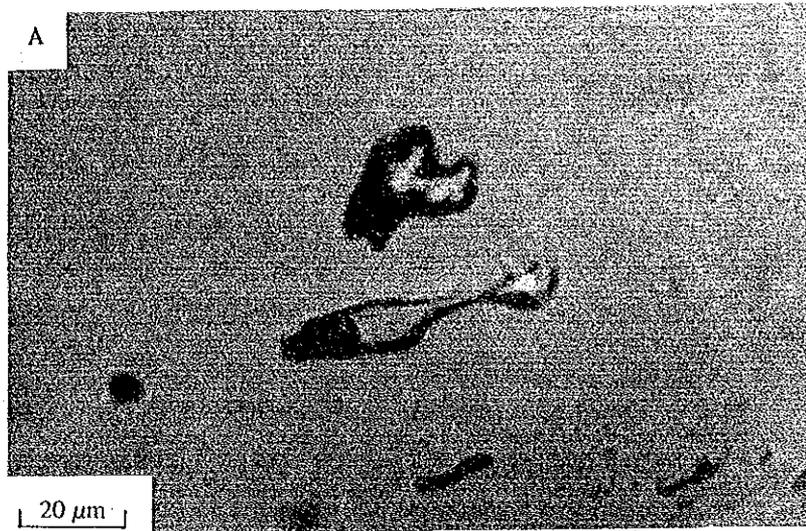
0 0.5 mm



Crossed nicols

0 0.5 mm

**Photo 1 Microscopic Photos of Biotite Granite**



**Photo 2 A: Liquid Inclusion in Vein Quartz from the Core of PR-13 (Depth: 2,004 m)**  
**B: Liquid Inclusion in Vein Ankerite from the Cuttings of PR-10 (Depth: 1,720 m)**

## 1.2 地化学調査

### 1.2.1 概要

地化学調査は、ラ・ブリマベラ地域の土壤中水銀濃度の測定およびC F Eが既に掘削した地熱井の噴出流体の化学分析とを行うことによって、当地域内のフラクチャー分布や地熱活動の広がりを推定し、さらに地熱流体の化学的特徴に基づいて、地熱貯留層の温度や流体の流動機構を推定することを目的として実施された。

調査項目は、以下のとおりである。

- ① 土壤水銀調査 ( 9.6 Km<sup>2</sup>、 272 地点 )
- ② 坑井流体調査 ( P R - 1 および P R - 8 )

上記調査は、それぞれ昭和60年7月～9月および同61年1月～2月の2回に分けて実施された。それらの結果は、以下に示すとおりである。

- ① 土壤中の水銀濃度は過去から現在までに地下から供給された火山性起源の水銀の蓄積を示すが、本地域では70 ppbを境界として2つのグループに区分でき、70 ppb以上の高濃度地点が調査地域東部に、NE-SW性の方向性を持って分布する。

このことはこの高濃度分布地域の地下にNE-SW性のフラクチャーが存在していることを示す。すなわち、Fig. II. 1-1 地質図に示すようにNE-SW方向の断層を明瞭に反映している。

- ② P R - 1、P R - 8についての地化学温度計を検討するとNa-K-Ca温度が妥当であり、P R - 1では約300℃、P R - 8では約280℃と推定される。
- ③ P R - 1、P R - 8の他にP R - 2、P R - 4、P R - 5の化学分析値も加味し、Cl-エンタルピー、Cl-Bの関係を検討すると、深部熱水はP R - 1付近から上昇しており、P R - 8→P R - 5の方向に流動し、さらにNE性のフラクチャー沿ってP R - 4の方向へ流れながら、徐々に地表水の影響を受けていくと考えられる。

P R - 1の熱水が最も本質的な深部熱水に近いことは、同位体組成の $\delta^{18}\text{O}$ 値が高く、He/Ar比が高いことから立証されている。

### 1.2.2 土壤水銀調査

地熱徴候地域を中心とし、東西3.2km、南北3.0km ( 範囲9.6km<sup>2</sup> ) の中に格子状に272地点を設定し、1m深度の土壤試料を採取し、土壤中の水銀濃度を測定した ( Fig. II. 1-14 )。試料はFig. II. 1-14の格子の交点付近において坑井や道路等の人工営造物、あ

るいは急斜面、河床を避けてハンドオーガーを用いて深度1 mの小孔をあけ、1 m深度の土壤試料を採取し、ポリエチレン袋に入れて保存した。

調査現場から持ち帰った土壤試料は、CFEの現地事務所において紙皿の上に広げて室温で4～5日間乾燥した後、磁製乳鉢を用いて粉碎し、100mlのポリエチレン容器に入れて密封保存した。この土壤試料は、分析直前に再度粉碎して200メッシュ以下とし、これを加熱気化冷原子吸光法による「リガクマーキュリーSP水銀分析装置」によって水銀濃度を測定した。

土壤水銀の分析結果をTable II. 1-8に示す。なお、水銀濃度はすべて風乾試料中の濃度である。

分析結果に基づき、水銀濃度頻度分布図 (Fig. II. 1-15) および水銀濃度累積頻度分布図 (Fig. II. 1-16) を作成した。

Fig. II. 1-16によると、水銀濃度は70 ppbを境界として2グループに分けられるが、この事は、水銀の上昇機構が2通りあって、高濃度を示すグループはフラクチャーを通して上昇してきたものであり、低濃度のものは地層中の孔隙を通じ徐々に蓄積したものと考えられる。以上の考え方に基づき、水銀濃度を、18、32、70および178 ppbで5段階に区分し、水銀濃度分布図 (Fig. II. 1-17) を作成した。

この濃度分布図から、調査地域の東部に70 ppb以上の高濃度を示す地点が多く、3～4カ所のややまとまった高濃度地点があることが分かる。濃度分布の方向性を出すために、測定値に対して3次の傾向面解析を実施した。その結果をFig. II. 1-18に示す。この図をみると濃度分布はNE-SWの方向性をもつことがわかる。すなわち、調査地域内では土壤水銀濃度の高濃度地点の分布と自然噴気分布は共に東部地区にNE-SWの方向性を持つ分布を示し、これらは位置的に重なる。したがってこの地区に自然噴気および高濃度の水銀をもたらすNE-SW性のフラクチャーが存在することが推定できる。

一方、PR-2付近については、調査地域東部と比較して水銀高濃度地点や自然噴気は、連続性のない孤立した分布を示し、この地区には大規模なフラクチャーは存在しないと推定された。

### 1.2.3 地熱流体の化学性状調査

PR-1およびPR-8から噴出する蒸気、蒸気凝縮水および熱水を採取してその成分を分析し、この化学性状から地熱貯留機構の考察を試みた。採取方法はFig. II. 1-19に、

分析方法については Table II. 1-9 に示し、両坑井の分析結果については Table II. 1-10 に示す。分析結果を基に、以下に示すような各種検討を試みた。

(1) 地化学温度計

地熱流体の温度を推定することを目的として、石英の溶解度（断熱冷却）、提唱者によって異なる 2 種類の Na/K 比および Na/K 比に Ca の補正を行った計 4 種類の地化学温度を求めた（Table II. 1-11）。4 種類の地化学温度計の値は、PR-1 についてはほぼ一致しているものの、PR-8 についてはばらつきが大きい。しかし、石英の溶解反応が、250℃以上では反応速度が高くなり、流体が坑内を上昇する間に再平衡となることを考えると、PR-8 の流体温度は 274℃以上とみなせる。したがって、Na-K-Ca 温度計の値が妥当と考えられる。

坑井試験時の坑内温度測定結果では、PR-1 において深度 1,800m で 299℃、PR-8 では、深度 1,800m で 235℃であった。PR-1 においては、坑底付近に若干の水位が確認されたが、PR-1 および PR-8 とも地層内でフラッシュし、二相流の状態で見られるという知見が得られている。PR-8 における地化学温度との差は、地層内でのフラッシュによるものと考えられる。

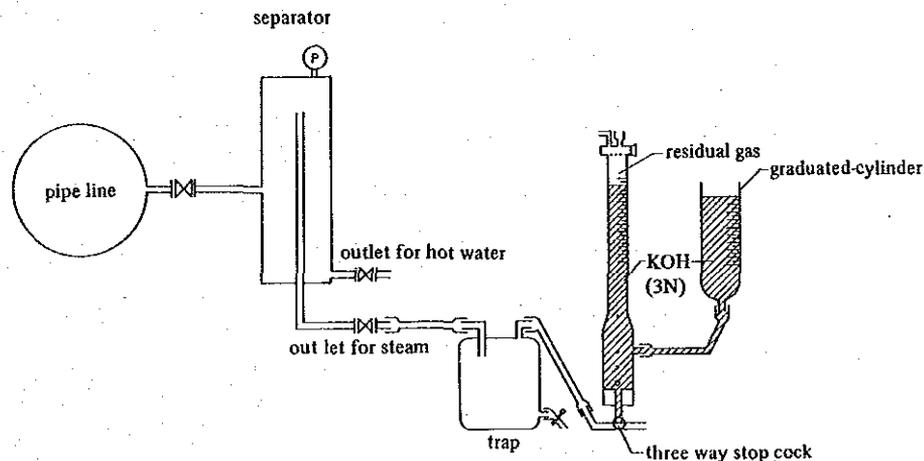


Fig. II. 1-19 Apparatus for Collecting of Steam Sample

Table II. 1-11 Chemical Geothermometer

Geothermometer			(°C)	
Well	Quartz-maximum steam loss	Na/K (Fournier)	Na/K (Truesdell)	Na-K-Ca
PR-1	> 288	301	299	297
PR-8	> 274	263	247	280

## (2) Cl 濃度とエンタルピーの関係

地下での流動様相を推定するために、各坑井についてエンタルピーと深部熱水中の Cl 濃度 (Na-K-Ca 温度計を用いてフラッシュ補正した値) の関係を調べた (Fig. II. 1-20)。図中、PR-2、PR-4 および PR-5 のデータは CFE の測定結果を使用した。Fig. II. 1-20 からわかるように PR-1、PR-8、PR-5 および PR-4 の値は一直線上にならんでいる。このことは、PR-1 の深部近傍に存在する熱水が PR-1 から PR-8 および PR-5 へと流動する間に、エンタルピーおよび Cl 濃度の低い水と混合していく機構を示している。また、土壌水銀調査および地質調査の結果より、PR-8 および PR-5 の周辺域より PR-4 にかけて NE-SW 性のフラクチャーの存在が判明しているため、それを介して PR-4 に流体が流動していると考えられる。また、PR-4 は、深度的に 600m と浅いため、地表水の混入の影響が最も大きいと考えられる。PR-2 の熱水化学性状は、これら一群の坑井の熱水化学性状と異なる。土壌 Hg 調査の結果をみても、PR-2 と PR-1、PR-8 および PR-5 との間に高濃度域が存在しないことから、PR-2 については、独立した熱水貯留機構が存在すると考えられる。

## (3) Cl 濃度と B との関係

PR-1、PR-2、PR-4、PR-5 および PR-8 の Cl 濃度と B の関係を Fig. II. 1-21 に示す。一般に  $B/Cl$  の比が大きい方は蒸気卓越型貯留層を (例えば図中 松川)、小さい方は Brine に近い貯留層を示す (例えば図中 Cerro Prieto)。本地域の坑井から得られた値はその比が 0.1 付近にまとまっており、地熱流体が同じ種類の貯留層から供給されていることを示している。そして、Cl 濃度が低い方は希釈の度合を示しているため、PR-1 → PR-8 → PR-5 → PR-4 の順で希釈度合が増していることを意味している。また、PR-2 はこれらとは若干異った値を示し、(2) で述べたことと調和している。

## (4) ガス濃度の考察

蒸気中の He、Ar および  $N_2$  についての考察を試みた。Fig. II. 1-22 から明らかのように、PR-1 および PR-8 は、ほぼ同一の  $He/Ar$  比および  $N_2/Ar$  比を示している。なお、 $(He/Ar)_s / (He/Ar)_{air}$  および  $(N_2/Ar)_s / (N_2/Ar)_{air}$  は、それぞれ試料中の  $He/Ar$  比および  $N_2/Ar$  比を大気の数値で規格化したものである。また、近郊の温泉である Hervores de la vega の値は、PR-1 および PR-8 の値

と大気と平衡な地表水の値（図中の diss. air で示される点）との混合線の近傍にある。このことから、この地域の深部ガスが、地表水に溶け込んだ大気と様々な割合で混合した後、地熱ガスとして放出されており、ラ・プリマベラの地熱井は、温泉ガスと比較して、より深部ガスの性質に近いものと考えられる。

#### (5) 同位体組成

水の起源や流動機構を検討するために、同位体組成図を作成し、Fig. II. 1-23に示した。同位体組成図の中の直線は、 $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$  の関係式で表現される地表水の値を示している（Craig 1961）。なお、PR-1およびPR-8の熱水の同位体組成に加えて、本調査地域周辺の温泉水については、CFEの分析値をプロットした。

$\delta^{18}O$  値についてみると、PR-1およびPR-8とも大きな値を示しており、とりわけPR-1の $\delta^{18}O$  値が大きいことがわかる。これは岩石と酸素同位体交換によって熱水の $\delta^{18}O$  値が大きくなる「Oxygen Shift」の効果を受けていると考えられるが、このことからPR-1の熱水はPR-8に比べて、より深部の熱水性状に近いと考えられた。

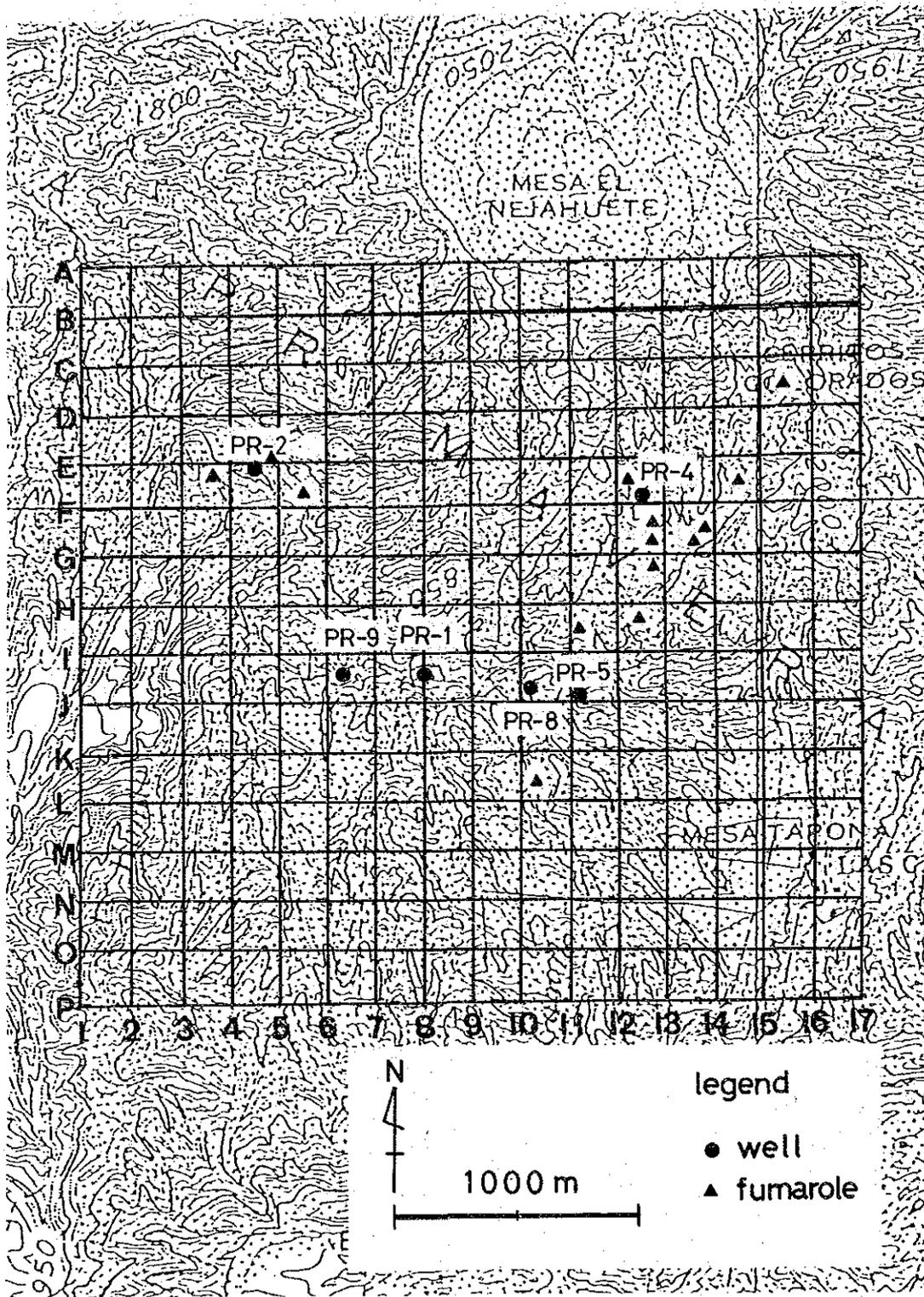


Fig. II. 1-14 Location Map of Soil Mercury Survey

Table II. 1-8 Mercury Concentration Value in Soil

(ppb)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A	35.8	20.5	19.9	19.2	20.0	27.7	11.3	34.8	32.8	39.4	26.4	24.9	18.1	35.1	13.9	34.9	32.6
B	15.2	14.2	10.5	7.0	31.6	21.7	20.1	34.1	87.1	21.4	30.5	22.3	23.8	16.8	123	429	18.1
C	24.2	14.6	16.3	36.6	17.5	21.0	22.1	19.4	24.5	31.8	16.3	13.0	35.1	19.7	37.0	32.0	16.4
D	21.7	22.4	53.1	66.5	12.8	18.0	24.6	14.7	24.7	24.7	23.2	15.8	73.0	10.6	34.3	51.8	29.9
E	32.5	10.6	22.6	60.8	919	19.6	49.6	12.2	32.3	40.1	57.9	10.4	8.7	16.9	36.8	24.2	22.5
F	33.0	23.3	43.9	29.8	15.5	19.6	32.8	43.2	33.2	28.0	31.3	6.0	15.3	27.7	30.0	41.7	9.9
G	39.4	32.1	63.8	32.0	58.4	12.0	17.3	11.2	16.5	23.2	23.7	565	15.3	10.7	32.1	15.6	17.9
H	34.9	38.6	22.1	61.7	17.8	22.3	9.2	11.7	19.7	8.3	58.0	311	1405	45.6	36.2	16.7	111
I	38.3	26.4	48.9	39.4	29.6	31.1	26.5	42.5	32.7	23.6	24.3	72.6	19.5	22.1	71.4	38.2	55.8
J	48.9	38.3	87.8	22.9	26.2	28.9	21.7	18.0	14.6	31.5	16.8	40.5	10.9	11.1	22.2	30.0	12.4
K	62.9	45.2	52.6	39.5	39.3	50.0	21.4	13.4	48.3	46.0	32.9	26.4	68.5	66.9	40.8	16.3	22.4
L	16.6	11.1	37.4	51.0	43.2	44.8	39.8	29.7	74.4	221	38.6	36.6	42.0	58.7	29.7	23.0	21.2
M	21.1	27.5	43.7	26.0	23.5	11.3	20.2	42.7	34.6	33.7	8.0	25.6	25.3	37.8	34.4	11.1	9.6
N	8.5	19.2	26.3	21.2	28.6	14.5	70.2	31.1	48.8	39.2	37.1	31.0	32.6	30.5	21.6	6.7	13.8
O	16.1	28.0	33.7	8.1	15.1	43.5	16.9	23.7	21.0	20.6	19.5	57.1	30.7	23.4	17.9	12.9	15.3
P	19.1	30.0	40.1	41.6	17.7	45.5	20.7	33.5	18.0	20.5	22.8	52.7	39.5	19.0	16.5	10.8	11.9

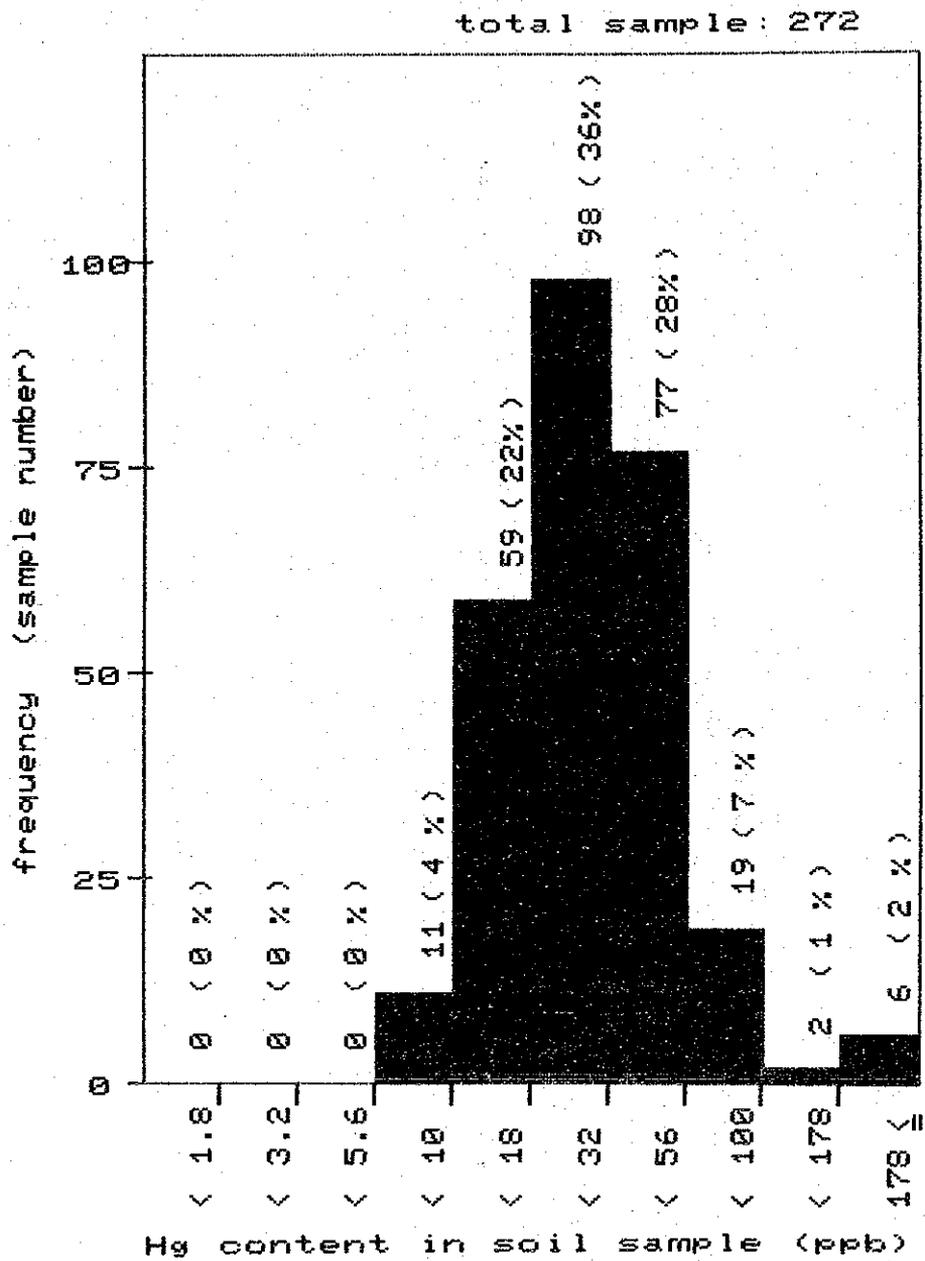
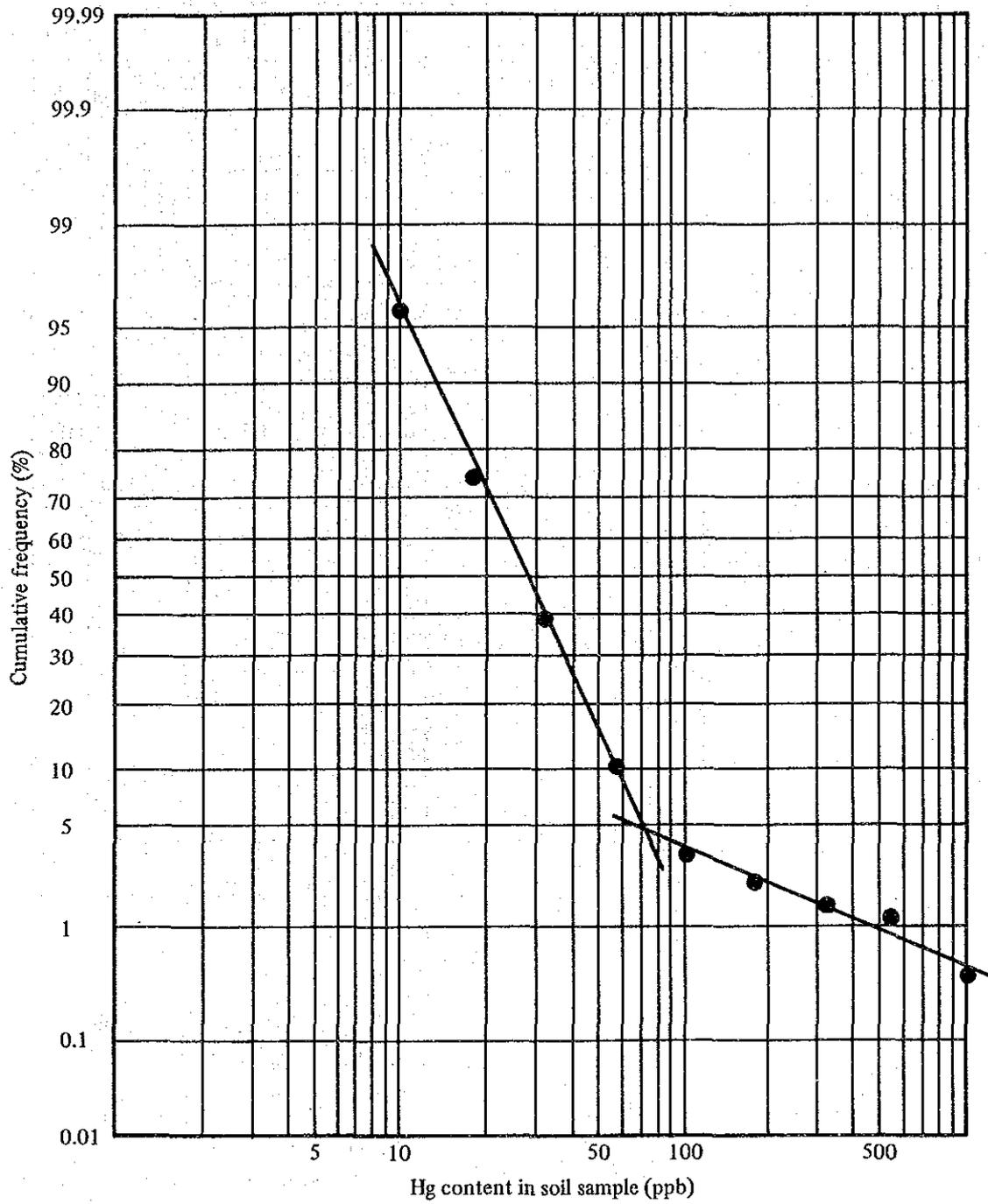


Fig. II. 1-15 Distribution Histogram for Mercury Concentration in Soil Sample



**Fig. II. 1-16 Cumulative Frequency of Mercury Concentration in Soil Sample**

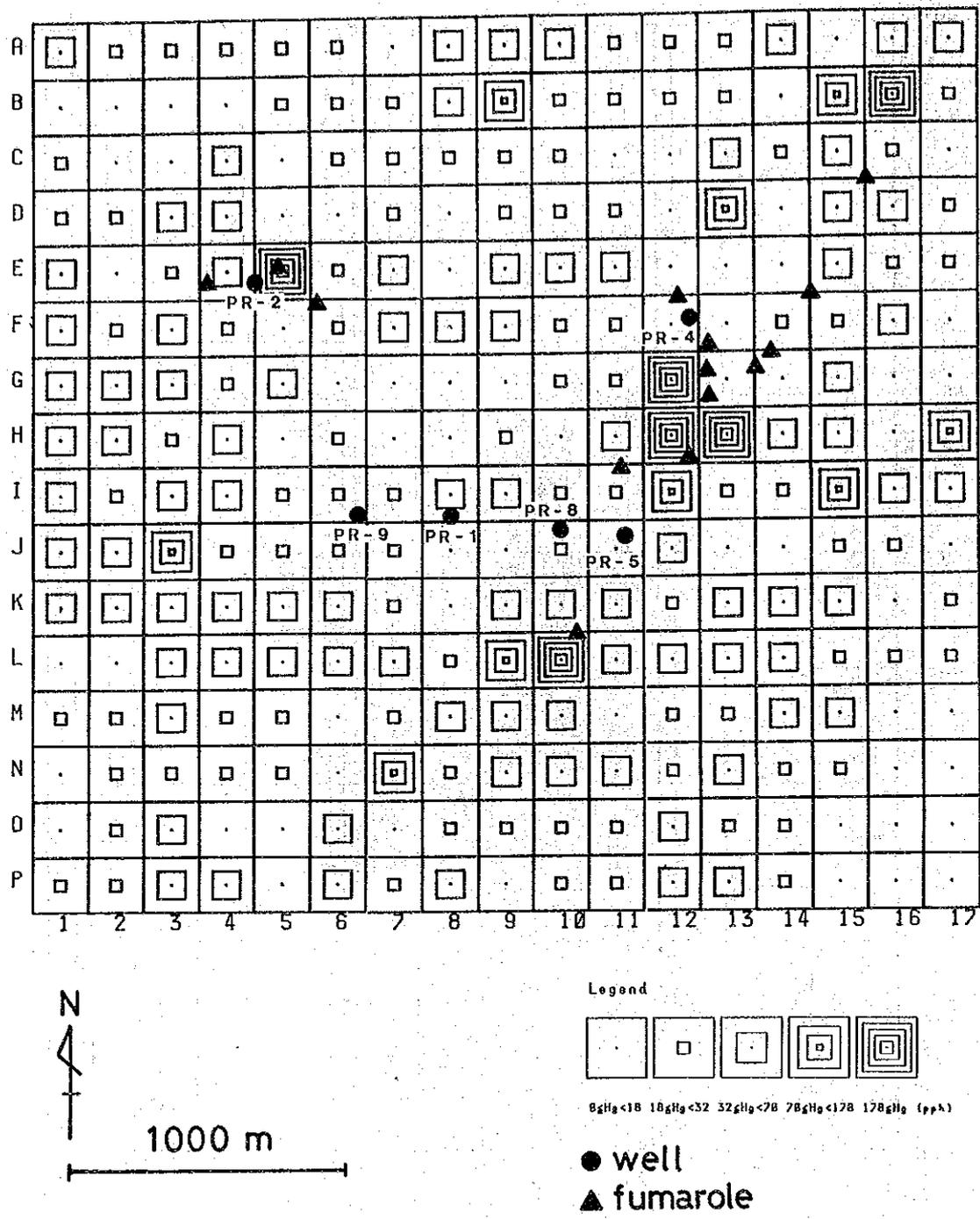


Fig. II. 1-17 Distribution Map of Hg Concentration in Soil

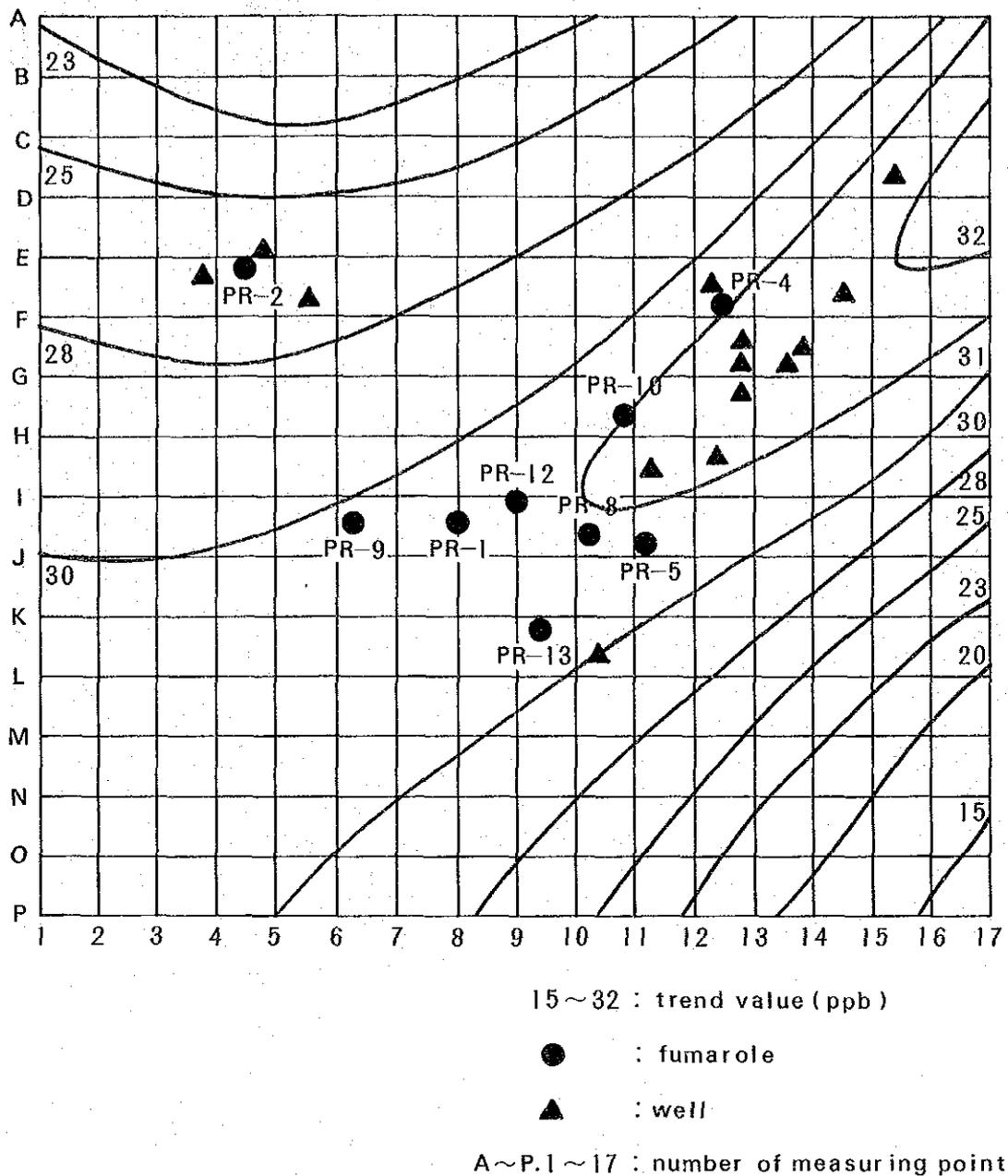


Fig. II. 1-18 Result of the Third-order Trend Surface Analysis for Mercury Concentration Value



**Table II. 1-9 Analytical Method of Hot Water and Steam Condensed Water**

element	analytical method
pH	glass electrode method
Cl	Mohr's method (hot water) absorptiometric method (condensed water)
SO <sub>4</sub>	gravimetric method
HCO <sub>3</sub>	micro diffusion method
Na	flame photometry
K	flame photometry
Ca	atomic absorption method
Mg	atomic absorption method
Li	atomic absorption method
Hg	atomic absorption method
As	atomic absorption method
SiO <sub>2</sub>	gravimetric method
Fe	absorptiometric method (Oxine/CHCl <sub>3</sub> )
Al	absorptiometric method (Oxine/CHCl <sub>3</sub> )
B	absorptiometric method (Methylene Blue)
F	absorptiometric method (La-Alizarin)
NH <sub>4</sub>	absorptiometric method (Nessler's method)
δD	mass spectrometry
δ <sup>18</sup> O	mass spectrometry
Tritium	liquid scintillation method

Table II. 1-10 Chemical Composition of Well Discharge Sample

(a) Chemical composition of steam condensed water.

Component	Unit	PR-1	PR-8
Electrical conductivity	$\mu\text{S/cm}$	2360	3180
pH	—	4.90	6.00
Cl	mg/l	0.06	667
NH <sub>4</sub>	mg/l	19.7	39.3
As	mg/l	0.03	6.08
Hg	ng/l	5.4	5.7

(b) Gas composition of steam.

	PR-1	PR-8
Liquid-vapor separate pressure	4.8 Kg/cm <sup>2</sup> G	7.7 Kg/cm <sup>2</sup> G
Total gas in steam (vol %)	2.20	3.46
H <sub>2</sub> S (vol %)	0.7	0.1
CO <sub>2</sub> (vol %)	98.6	98.9
H <sub>2</sub> (ppm)	1860	3310
N <sub>2</sub> (ppm)	1740	2160
CH <sub>4</sub> (ppm)	3360	4480
He (ppm)	11.9	14.9
Ar (ppm)	25.2	29.5

(c) Chemical composition of hot water.

Component	Unit	PR-1	PR-8
Electrical conductivity	$\mu\text{S/cm}$	4060	4340
Total dissolved solids	mg/l	3830	3670
pH	—	7.80	8.60
Cl	mg/l	1160	929
SO <sub>4</sub>	mg/l	44.4	109
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	mg/l	2.7	1.4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	71.2	227
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	0.3	6.9
Na	mg/l	751	834
K	mg/l	173	136
Ca	mg/l	2.07	1.07
Mg	mg/l	0.35	0.04
Fe	mg/l	0.96	0.06
Al	mg/l	1.25	0.08
SiO <sub>2</sub>	mg/l	1090	927
Li	mg/l	6.52	6.40
B	mg/l	174	125
F	mg/l	8.4	7.9
NH <sub>4</sub>	mg/l	3.3	2.8
As	mg/l	14.8	12.6
Hg	ng/l	0.23	0.23
D/H	‰(SMOW)	-49.6	-57.0
<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O	‰(SMOW)	+0.7	-1.6
Tritium	T.U.	<0.23	<0.21

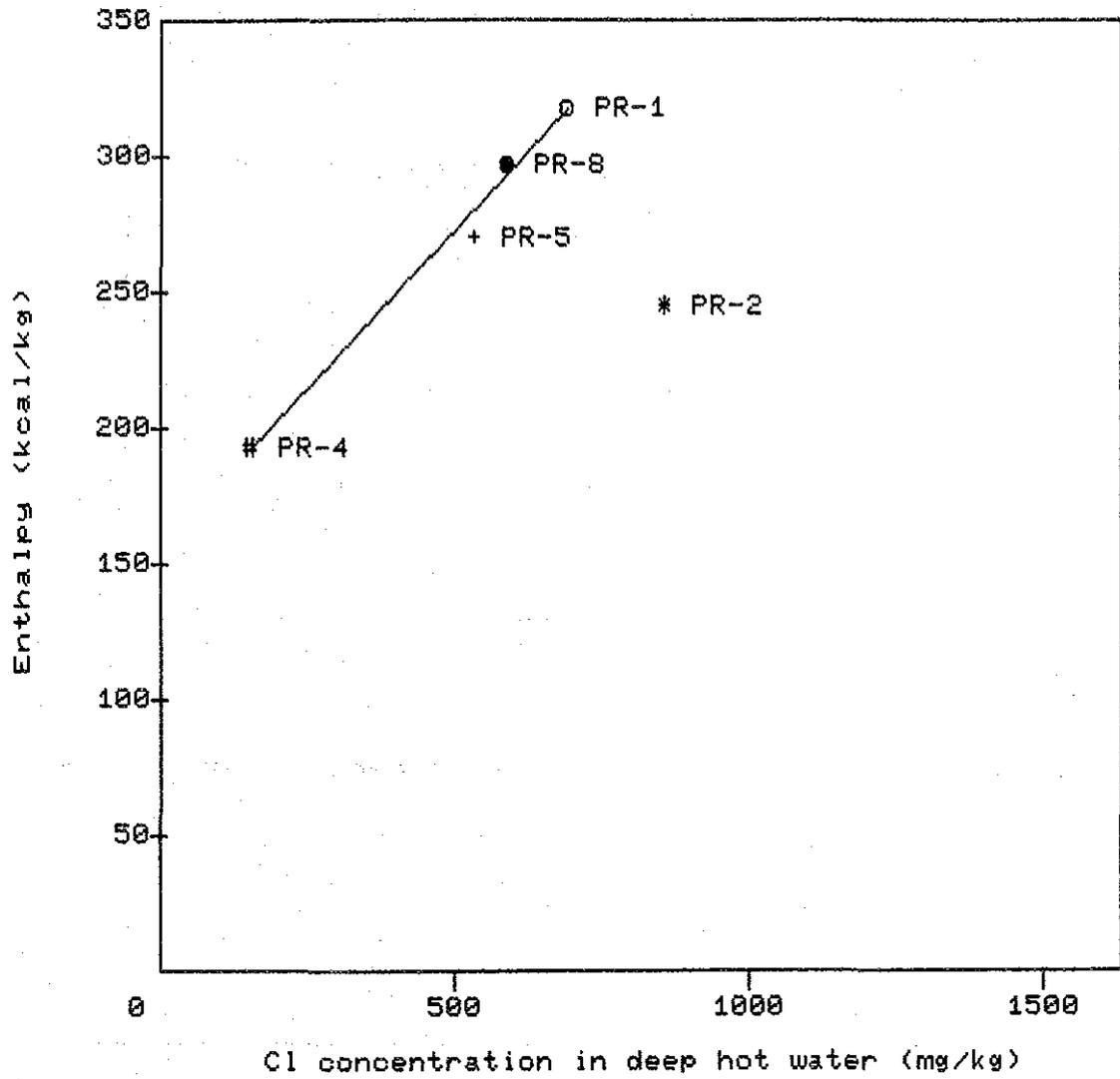


Fig. II. 1-20 Relationship between Enthalpy and Chloride Concentration in Deep Hot Water in the La Primavera

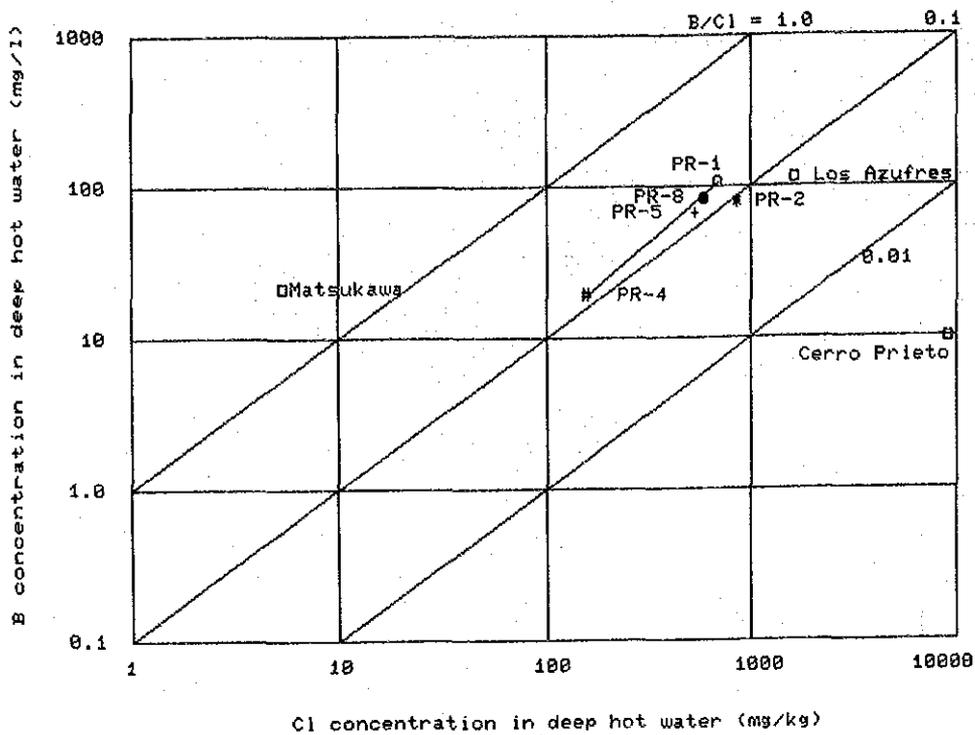


Fig. II. 1-21 Relationship between Boron and Chloride Concentration in Deep Hot Water

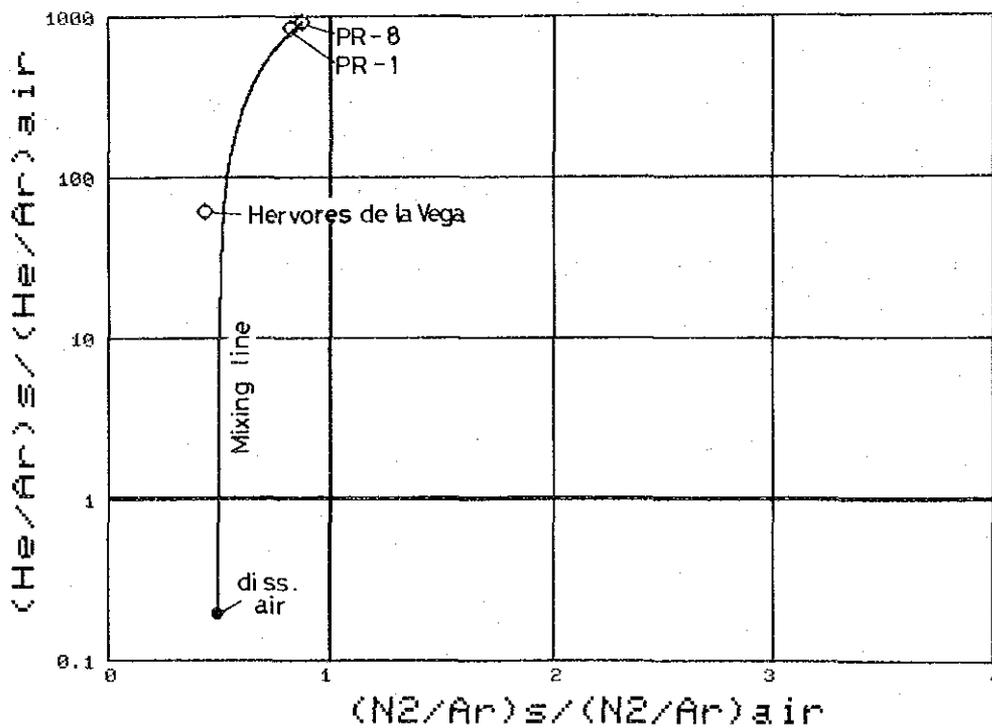


Fig. II. 1-22 Relationship between He/Ar and N<sub>2</sub>/Ar Ratio in Geothermal Gaseous Discharge from PR-1 and PR-8

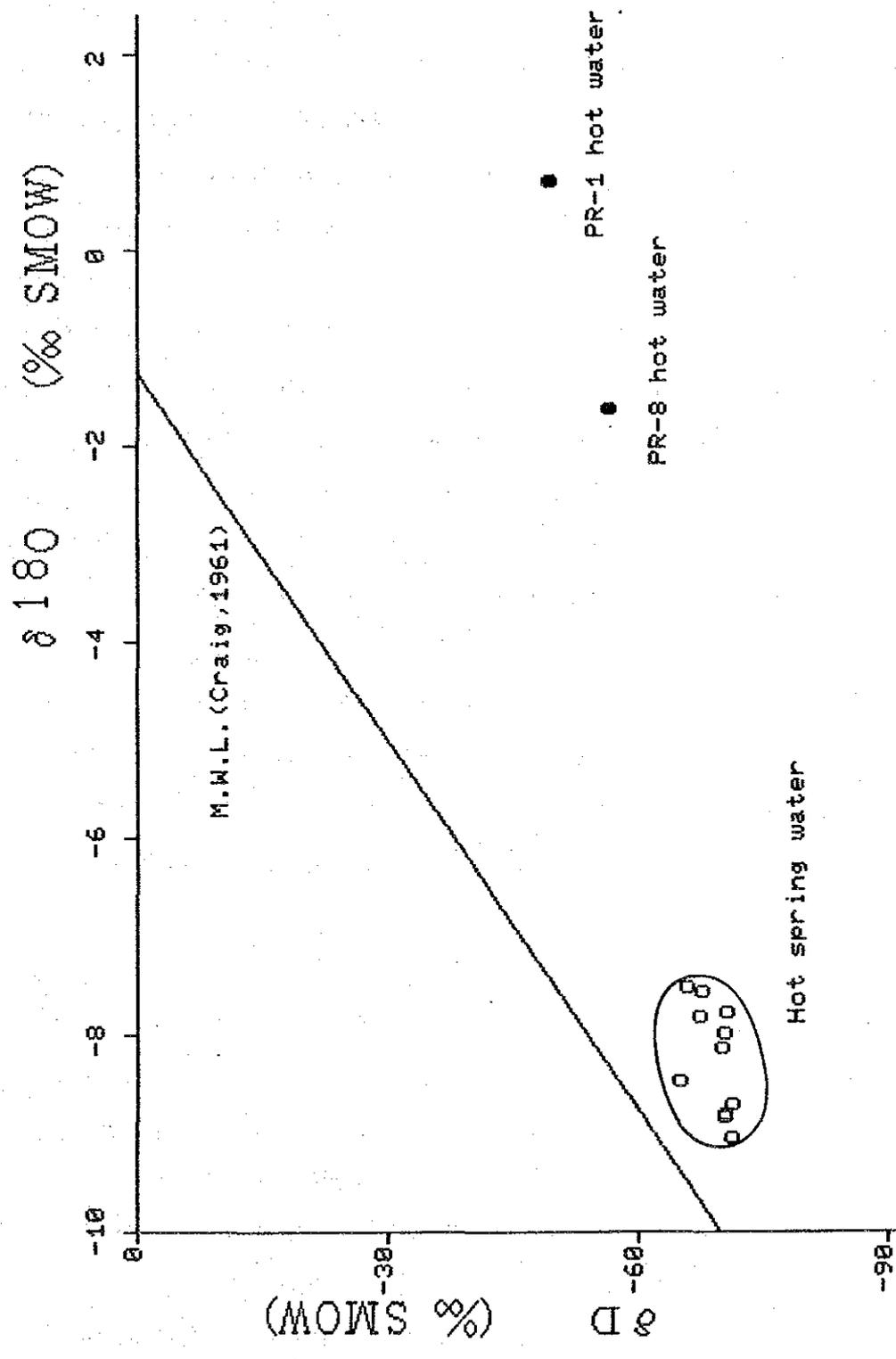


Fig. II. 1-23 Oxygen-18 and Deuterium Compositions of Hot Water of PR-1, PR-8 and Hot Springs and of Meteoric Waters

### 1.3 重力探査

#### 1.3.1 概要

ジェラ・ラ・プリマベラカルデラ内の地下構造を把握する目的で、重力探査を実施した。この探査では、La Coste & Romberg社製のG型重力計No.178を使用して重力測定を行い、最終的には2次元断面解析まで実施した。その結果を要約すると以下のとおりである。

- ① ジェラ・ラ・プリマベラカルデラ地域の精密重力調査によるブーゲー異常をみると、カルデラ内は低重力異常で特徴づけられ、局部的に高重力異常が認められる。2次元断面解析によれば、この高重力はカルデラの再隆起に伴うもので、NE-SW方向の長軸をもつ楕円形ないし矩形を示すものと想定される。
- ② カルデラ外縁部のうち北壁と西壁は重力異常に明瞭にあらわれているが、南壁は地質図に描かれている場所より南側に位置する。また、局所的な低重力異常はタラ凝灰岩や湖成層の厚い部分に相当する。
- ③ 広域的なブーゲー異常図によると、“基盤岩類”や第三系分布地域ではNW-SE性あるいはNS性の構造が卓越しているので、地熱徴候地域の地下におけるコルディリエーラン火山噴出物下部や基盤岩類の構造の主構造もこの方向であると推測される。この方向は①で述べた方向と調和していないが、①の方向性はごく最近（おそらく数万年前）に形成されたもので、浅部の岩質に左右されているためと考えられる。

#### 1.3.2 重力探査結果

##### (1) 重力測定

##### ① 測点数

ラ・プリマベラ地域(238 km<sup>2</sup>)には合計306点の測点を配置した。

このうち158点を地熱徴候地周辺の精査地域に400m間隔で、残り148点を周辺地域に800m間隔で配した。

また、以上のほかに、広域的な重力分布を把握する目的で14,000 km<sup>2</sup>の範囲について重力調査を実施した。測点数は156点で、測点間隔はラ・プリマベラの地域の周辺で約5 km、遠方の地域では10~12 kmとした。測点の位置についてはFigs. II. 1-26およびFig. II. 1-35を参照のこと。

## ② 重力値の基準

重力値の基準は、メキシコ市気象台構内の国際重力基準点No.04669Eの重力値977,927.15mgalとし、本調査ではC F Eグアダハラ事務所内に起点(No.1000)を設け、978,188.034mgalと決定した。

## ③ 重力定点観測

重力の日変化をみるために、8月27日午前6時より午後24時まで、本地域西部のRio Calienteにおいて、30分間隔の重力を測定した。この結果、重力値は-165～+85mgalの間で変化していて、理論曲線とのカーブマッチングの結果、潮汐補正定数として1.15を採用した(Fig. II. 1-24)。

## ④ 水準測量

ラ・プリマベラ地域の測点306点のうち291点についてはレベルによる水準測量を実施した。地形条件の良くない場所に位置する15点についてはPaulin精密高度計によって標高を測定した。

なお、広域重力調査の156点は全点Paulin精密高度計によって標高を測定した。

## (2) データ処理

データ処理は、まず重力計のダイヤル読取り値を重力単位に変換するミリガル変換に始まり、重力測定場所と水準測量場所との高低差補正(器械高補正)、潮汐補正、ドリフト補正、緯度補正、フリーエア補正、ブーゲー補正および地形補正を行って各測点の重力値を算出した。

シェラ・ラ・プリマベラ地域の地形補正は、半径20mまでは現場スケッチ断面図、20m～60kmまでは地形図から読取った標高に基づいて実施した。また、広域調査の測点の地形補正は、測点から36kmまでの範囲について、2種類のチャートを用いて読み取った標高に基づいて実施した。

このような補正後の重力成果の例をTable II. 1-12に示す。

## (3) 補正密度とブーゲー異常

補正密度を決めるために、調査地域内およびその周辺で採取した岩石試料の密度を測定し、地質毎に区分するとFig. II. 1-25のようになった。Fig. II. 1-25の試料数は47個で、うち12個はコア・サンプルである。この表によると、古い岩石ほど密度が高く、顕著な密度境界面はコルディリェラン火山噴出物中の凝灰岩との間にある。本地域の地形を形成している第四系の平均密度はFig. II. 1-25によると2.12g/cm<sup>3</sup>であり、湖成

層の密度はもっと低い。したがって、作成したブーゲー異常図  $\rho = 1.90 \text{ g/cm}^3$  ( Fig. II. 1-26 )。  $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$  ( Fig. II. 1-27 ) および  $\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$  ( Fig. II. 1-28 ) のうち、補正密度  $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$  ( Fig. II. 1-27 ) によって解析した方がよいと判断された。

### 1.3.3 重力解析と地下構造

#### (1) ブーゲー異常図と傾向面解析

Fig. II. 1-27 によると調査地域のブーゲー異常値は  $-109 \text{ mgal}$  から  $-126 \text{ mgal}$  の範囲にある。最大値は北西端部に、最小値は中央部の No 112 の測点の近くにそれぞれ位置する。 $-120 \text{ mgal}$  以下の低重力域が、調査地域中央部を中心に広い範囲を占め、大局的に見ると、中央部を中心に円形ないし楕円形を呈する規模の大きな低重力異常が形成されていることが判る。この低重力異常の北縁部、西縁部および南縁部はコンターが混み合っており、ブーゲー異常値の変化が著しい。一方、東縁部ではブーゲー異常値はゆるやかに変化している。このように、本地域のブーゲー異常は全体として低重力異常を示すが、局所的に高重力異常も認められ、低重力異常の内部はやや複雑な構造を呈している。この局所的な異常をとり除くために、Fig. II. 1-27 に対して、2次および3次の傾向面解析を実施し、それぞれ傾向面図と残差図を作成した ( Fig. II. 1-29~32 )。これらの面をみれば、カルデラの中心部が測点 No 87、89、121 付近にあり、カルデラ外縁部のうち北壁および西壁が明瞭にあらわれている事を示している。

#### (2) 2次元断面解析

局所的な高重力異常が何に起因しているのかを調べるために、Fig. II. 1-27 の A-A'、B-B'、C-C' 3 段面の2次元解析を実施した。断面解析結果を Fig. II. 1-33 に示すが、解析計算は Talwani の基本式に基づいている。この解析では、3層構造として密度の仮定を行ったが、第1層 ( $\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$ ) は流紋岩、タラ凝灰岩およびコルディリエラン火山噴出物上部、第2層 ( $\rho = 2.40 \text{ g/cm}^3$ ) はコルディリエラン火山噴出物下部の安山岩、第3層 ( $\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$ ) は“基盤岩類”とした。なお第1層については、局所的な低密度部分として、湖成層 ( $\rho = 1.60 \text{ g/cm}^3$ )、流紋岩 ( $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$ ) およびタラ凝灰岩 ( $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$ ) を部分的に付け加えた。コントロール・ポイントは、A-A' 断面では PR-2、B-B' では PR-9、C-C' では PR-5 に設定したが、第3層上面は PR-9 でしか確認されていないため、3断面とも同じ深度とした。解析結果として、ステップ状構造 (実線) とやや滑らかな構造 (破線) を示しているが、これら 2

種類の構造は、ほぼ等しい重力異常を形成している。

Fig. II. 1-33でも明らかなように、カルデラ壁の落差を500~600mとすると測定された重力異常に一致している。この値は、地質調査や坑井データから得られた陥没落差とほぼ一致している。次に中央部(Cerritos Colorados付近)における局所高重力異常は、高密度層が約400m隆起したとすると説明がつく。MAHOOD(1980)によればカルデラの再隆起量が260mなので、中央部による高重力異常は、カルデラ再隆起に起因するものと考えられる。この隆起の形は、Fig. II. 1-27によればNE-SW方向の長軸を持つ楕円形ないし矩形と想定される。

次に、局所低重力異常について考察する。Fig. II. 1-27およびII. 1-33と地質図を対応させると、No. 39周辺、No. 63周辺およびNo. 112周辺の低重力異常は湖成層の分布地域で、かつ地形的に高い場所に一致する。この事は、高地を作っている地層の密度( $\rho = 1.60 \text{ g/cm}^3$ )が補正密度( $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$ )に比べて著しく低いために、補正のしすぎで表われているものと考えられる。すなわち、上記の低重力異常は湖成層の厚い地域と考えられる。しかし、No. 286周辺の低重力異常地域は、地形の低所であつ湖成層が分布していない地域である。この異常が何に起因するか明らかではないが、Fig. II. 1-33において $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$ と仮定すると断面解析がうまくいくことから推定すると、 $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$ に相当するタラ凝灰岩の厚い部分のためと想定される。

以上の解析をとりまとめて図示すると、Fig. II. 1-34に示すような構造図が得られた。構造図では、カルデラ壁のうち南壁の部分が、従来の地質図によるものよりも低く、より南側に位置しているのが特徴的である。重力探査によって隆起とその方向性が明らかになった事は地熱探査上有用である。

### (3) 広域ブーゲー異常図

ジェラ・ラ・プリマベラ地域は第四系によって広く覆われているために、重力異常と地質との対応をつけることは難しい。そこで、“基盤岩類”や第三系が分布している地域にまでも重力測定を広げ、断面解析等に用いた重力異常と地質との対応が妥当であるかどうかの検討を行った。Fig. II. 1-35に補正密度 $\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$ の広域ブーゲー異常図を示す。Fig. II. 1-35によると、 $-1.10 \text{ mgal}$ 以上の高いブーゲー異常は南西部から西部にかけて分布し、一部はAmecaの北方からLa Vega湖方面に張り出している。CFEが作成した1:100,000地質図によると、これらの地域には高重力異常に一致して本地域で最も古い地質である白亜紀の堆積岩類および花崗類が分布している。また、

古第三系および新第三系中新統（すべて火成岩類より構成される）も局所高重力異常によく対応している。鮮新統および第四系は、テキーラ火山と東部の Cerro Grande を除き、全般に低重力異常に対応している。

これらの結果は、Fig. II, 1-25 に示す密度区分および断面解析で想定した層区分と調和している。また、重力異常の形から、NW-S E 性および N S 性の構造が読みとれるが、これらの方向性は地質調査で判明している NW-S E 性の Tepic-Chapala 地溝帯および N-S 性の Colima 地溝帯の方向性と一致している。このように、“基盤岩類”や第三系の方向性が NW-S E 性あるいは N S 性を示しているものの、カルデラ内の局所的高重力異常は N E-S W 性の隆起を示している。隆起の方向性と深部の方向性が一致していないが、これはおそらく局所的重力異常が比較的浅部の岩質（例えば流紋岩）に左右されているためと考えられた。

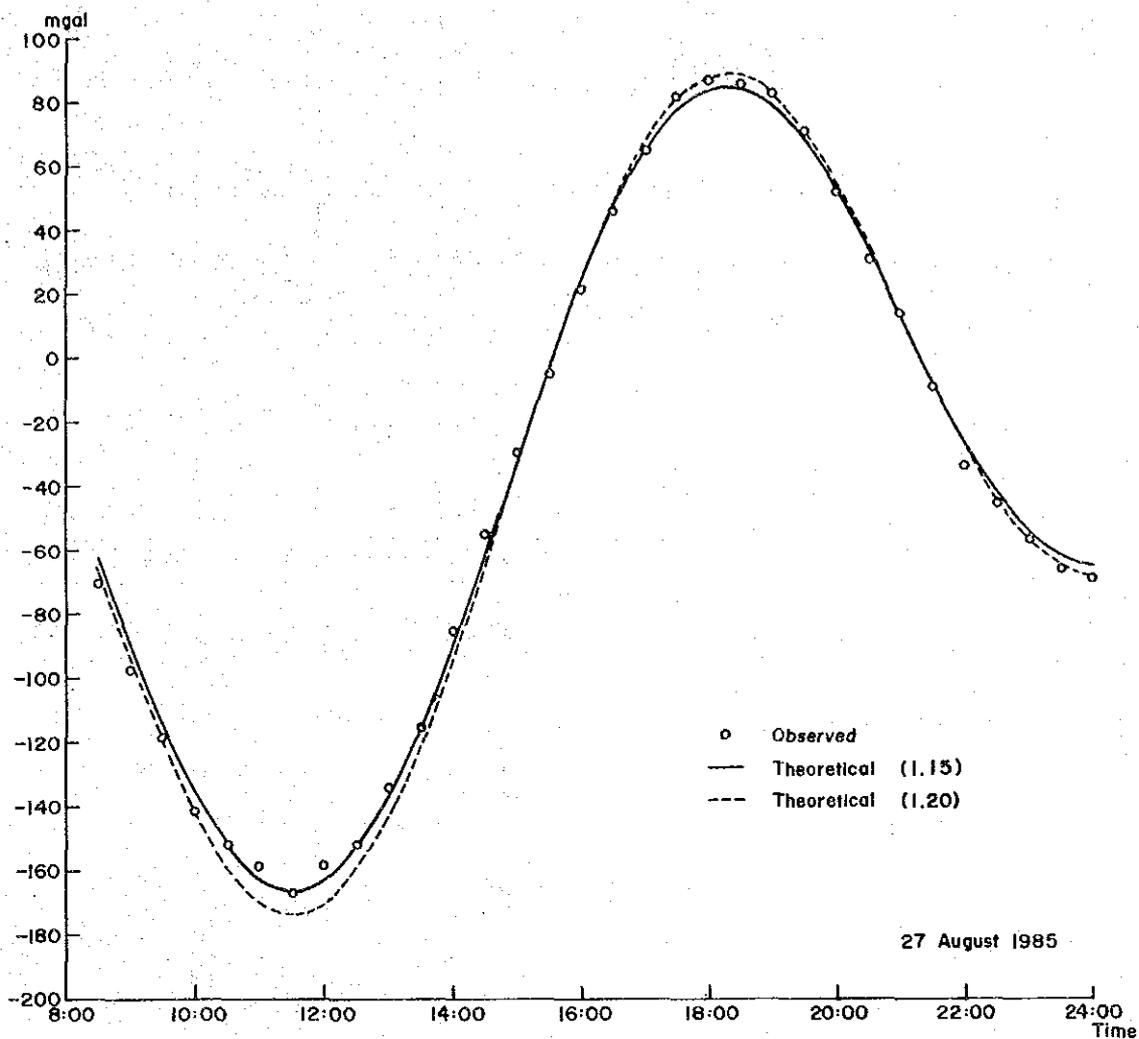


Fig. II. 1-24 Observation of Diurnal Gravity Variation

Geology		Wet Density (g/cm <sup>3</sup> )		Number of Sample	Mean Density (g/cm <sup>3</sup> )		
Quaternary	rhyolite (Central Dome)		••••••	6	2.21	2.12	2.21
	Welded tuff (Tala tuff)	••••••	□□□□	9	2.06		
Tertiary	rhyolite	•	••••••	10	2.33	2.28	
	tuff	□	□□••	7	2.22		
	andesite		□□□	7	2.39		
	basalt		•••••	6	2.60		
Cretaceous sedimentary rock			••	2	2.57		

• Surface Sample □ Core Sample

Fig. II. 1-25 Density of Rock Samples in the Sierra La Primavera Area

Table II. 1-12 An Example of List of Gravity Survey

ST. NO.	OBS. DAY	D	M	S	LATITUDE	D	M	S	LONGITUDE	LEVEL	ABS. G	ETC	*	TERR. C	F.E.C	B.G.C	DENSITY = 2.00 (G/CM <sup>3</sup> )	NORM. G	ANOM. F	ANOM. B
1	85	729	20	43	36.4	103	33	41.2	1603.564	978.204169	L	L	*	.698	494.860	-134.379	978.678885	20.842	-113.536	
2	85	729	20	43	40.0	103	33	11.8	1613.990	978.201138	L	L	*	.657	498.077	-135.252	978.678946	20.947	-114.305	
3	85	729	20	43	37.2	103	32	42.8	1622.917	978.199354	L	L	*	.438	500.832	-136.000	978.678898	21.725	-114.275	
4	85	729	20	43	42.8	103	31	17.2	1621.771	978.200320	L	L	*	.463	500.479	-135.992	978.678992	22.269	-113.535	
5	85	729	20	43	43.5	103	31	48.9	1618.128	978.200906	L	L	*	.596	499.354	-135.599	978.679004	21.852	-113.747	
6	85	729	20	43	42.3	103	31	21.2	1622.816	978.198519	L	L	*	.624	500.801	-135.992	978.678984	20.960	-115.032	
7	85	729	20	43	37.5	103	30	53.7	1627.836	978.197019	L	L	*	.691	502.350	-136.413	978.678905	21.156	-115.257	
8	85	729	20	43	28.5	103	30	26.1	1634.000	978.196598	L	L	*	1.055	504.252	-136.929	978.678755	23.150	-113.779	
9	85	730	20	43	21.5	103	29	60.0	1645.983	978.194347	L	L	*	.644	507.950	-137.933	978.678638	24.302	-113.631	
10	85	730	20	43	14.1	103	29	35.2	1649.806	978.193514	L	L	*	.506	509.130	-138.254	978.678516	24.634	-113.620	
11	85	730	20	43	6.4	103	29	9.4	1650.910	978.192914	L	L	*	.447	509.471	-138.346	978.678389	24.443	-113.903	
12	85	730	20	42	59.4	103	28	44.2	1649.998	978.192044	L	L	*	.353	509.189	-138.970	978.678272	23.315	-114.955	
13	85	730	20	42	50.4	103	28	17.1	1667.535	978.186812	L	L	*	.321	514.601	-139.739	978.678123	23.612	-116.127	
14	85	730	20	42	29.7	103	27	57.9	1674.354	978.184716	L	L	*	.287	516.706	-140.311	978.677780	23.928	-116.383	
15	85	730	20	42	10.4	103	27	41.6	1673.997	978.183765	L	L	*	.269	516.595	-140.281	978.677460	23.170	-117.111	
16	85	730	20	41	48.8	103	27	22.8	1676.045	978.182600	L	L	*	.316	517.227	-140.453	978.677102	23.042	-117.411	
17	85	730	20	41	23.4	103	27	20.0	1677.650	978.179948	L	L	*	.336	517.723	-140.587	978.676681	21.326	-119.262	
18	85	730	20	40	57.7	103	27	18.9	1682.783	978.177298	L	L	*	.339	519.307	-141.017	978.676255	20.689	-120.328	
19	85	730	20	40	31.4	103	27	19.1	1686.919	978.175647	L	L	*	.429	520.583	-141.364	978.675819	20.840	-120.524	
20	85	730	20	40	3.9	103	27	6.3	1695.492	978.172975	L	L	*	.478	523.229	-142.082	978.675365	21.316	-120.766	
21	85	730	20	39	42.7	103	26	57.6	1681.368	978.175907	L	L	*	.472	518.870	-140.899	978.675014	20.235	-120.663	
22	85	730	20	39	19.2	103	26	47.1	1664.113	978.180220	L	L	*	.408	513.545	-139.453	978.674625	19.547	-119.906	
23	85	730	20	38	57.0	103	26	58.0	1649.423	978.182950	L	L	*	.331	509.012	-138.222	978.674258	18.035	-120.187	
24	85	730	20	38	34.5	103	26	29.0	1646.845	978.183303	L	L	*	.372	508.124	-137.980	978.673886	17.812	-120.168	
25	85	730	20	38	12.3	103	26	19.2	1639.129	978.183241	L	L	*	.248	505.835	-137.359	978.673519	15.805	-121.554	
26	85	730	20	37	48.5	103	26	9.8	1632.628	978.183981	L	L	*	.341	503.829	-136.814	978.673125	14.926	-121.888	
27	85	730	20	37	46.8	103	26	36.4	1640.427	978.181501	L	L	*	.297	506.236	-137.468	978.673097	14.938	-122.530	
28	85	730	20	37	45.7	103	27	3.3	1651.555	978.178494	L	L	*	.346	509.670	-138.400	978.673079	15.430	-122.970	
29	85	731	20	37	39.4	103	27	28.9	1650.000	978.176318	L	L	*	.445	512.276	-139.108	978.672976	16.063	-123.045	
30	85	731	20	37	29.2	103	27	53.5	1678.702	978.171673	L	L	*	.586	518.047	-140.675	978.672807	17.500	-123.176	
31	85	731	20	37	18.1	103	28	19.5	1704.044	978.165896	L	L	*	.823	525.868	-142.799	978.672623	19.964	-122.835	
32	85	731	20	37	7.6	103	28	45.5	1729.120	978.160554	L	L	*	.849	533.606	-144.900	978.672450	22.560	-122.340	
33	85	731	20	36	57.7	103	29	9.4	1750.404	978.154951	L	L	*	.796	543.261	-147.522	978.672287	26.721	-120.801	
34	85	731	20	36	44.6	103	29	36.4	1806.031	978.147432	L	L	*	1.128	537.341	-151.345	978.672071	33.830	-117.515	
35	85	731	20	37	6.3	103	30	2.4	1877.774	978.130091	L	L	*	1.023	579.481	-157.357	978.672429	38.165	-119.192	
36	85	731	20	36	59.4	103	30	30.1	1840.490	978.114946	L	L	*	1.229	598.835	-162.613	978.672315	42.695	-119.918	
37	85	731	20	37	6.5	103	30	56.2	1946.705	978.109827	L	L	*	1.054	600.753	-163.134	978.672431	39.203	-123.931	
38	85	731	20	37	17.0	103	31	5.8	1946.210	978.110141	L	L	*	1.265	600.600	-163.092	978.672605	39.400	-123.692	
39	85	731	20	37	28.6	103	30	57.7	1937.059	978.110544	L	L	*	1.639	597.776	-162.326	978.672797	37.163	-125.163	
40	85	731	20	37	42.2	103	30	52.4	1921.340	978.115450	L	L	*	1.235	592.926	-161.008	978.673022	37.088	-123.920	
41	85	731	20	37	55.2	103	30	47.5	1908.658	978.119485	L	L	*	1.629	589.012	-159.946	978.673236	36.890	-123.055	
42	85	731	20	38	7.5	103	30	44.6	1908.249	978.120367	L	L	*	1.978	588.886	-159.911	978.673439	37.791	-122.120	
43	85	731	20	38	17.9	103	30	43.4	1895.733	978.124836	L	L	*	1.979	585.023	-158.862	978.673611	38.227	-120.635	
44	85	731	20	38	31.2	103	30	45.7	1919.187	978.120508	L	L	*	1.260	592.261	-160.828	978.673832	40.197	-120.631	
45	85	731	20	38	41.4	103	30	52.2	1909.421	978.122995	L	L	*	1.050	588.247	-160.009	978.674000	39.293	-120.717	
46	85	731	20	38	47.7	103	31	5.6	1878.609	978.130207	L	L	*	1.050	579.739	-157.427	978.674104	37.232	-120.196	
47	85	731	20	38	53.6	103	31	24.4	1877.019	978.130160	L	L	*	1.178	579.248	-157.294	978.674202	36.584	-120.710	
48	85	731	20	39	6.4	103	31	16.9	1841.839	978.138992	L	L	*	1.322	568.392	-154.346	978.674413	34.293	-120.053	
49	85	731	20	39	11.0	103	31	34.3	1811.461	978.146345	L	L	*	1.724	559.017	-151.800	978.674489	32.597	-119.203	
50	85	731	20	39	19.9	103	31	43.9	1799.966	978.148766	L	L	*	1.436	555.470	-150.837	978.674636	31.036	-119.801	



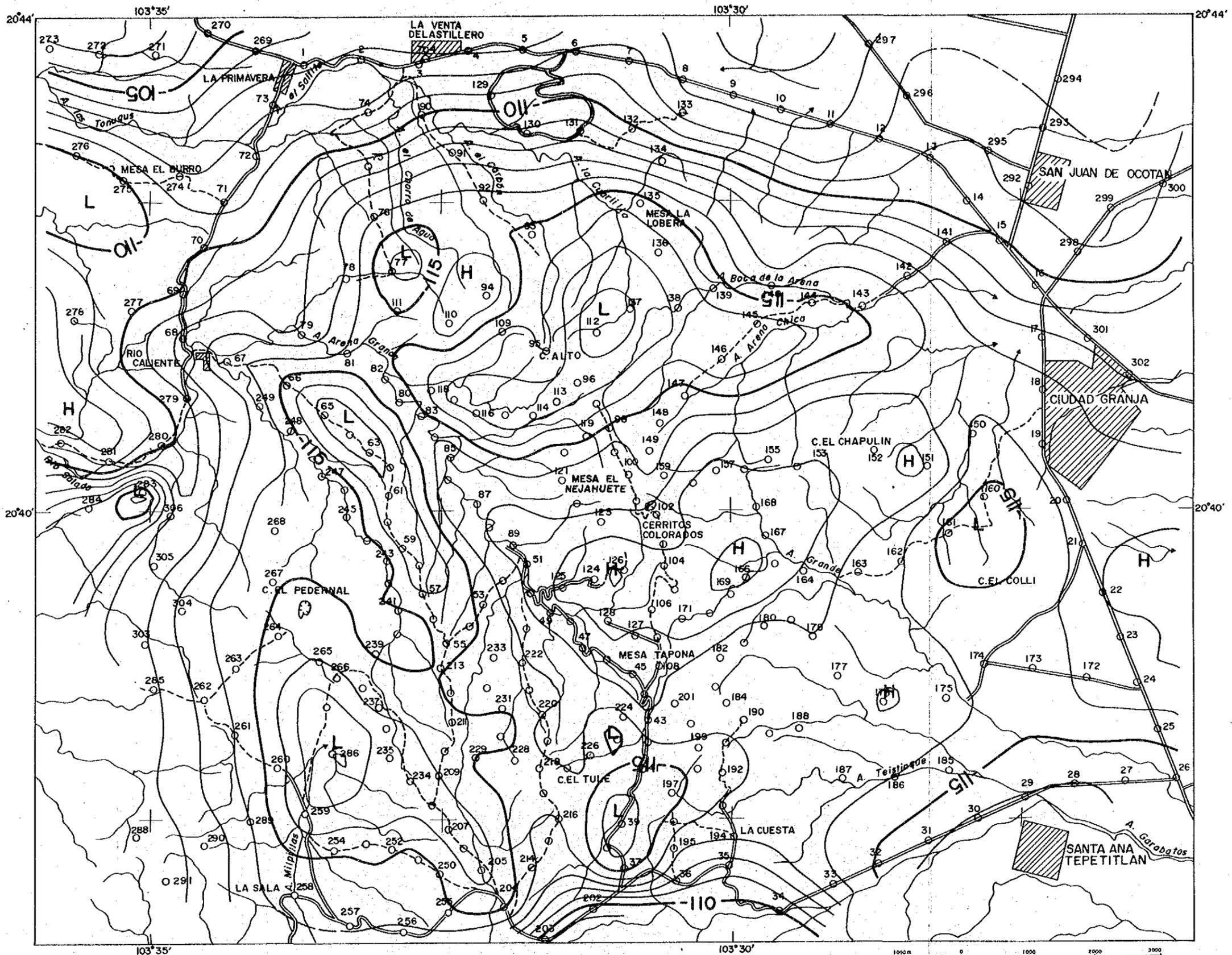


Fig. II. 1-26 Bouguer Anomaly Map ( $\rho=1.90g/cm^3$ )



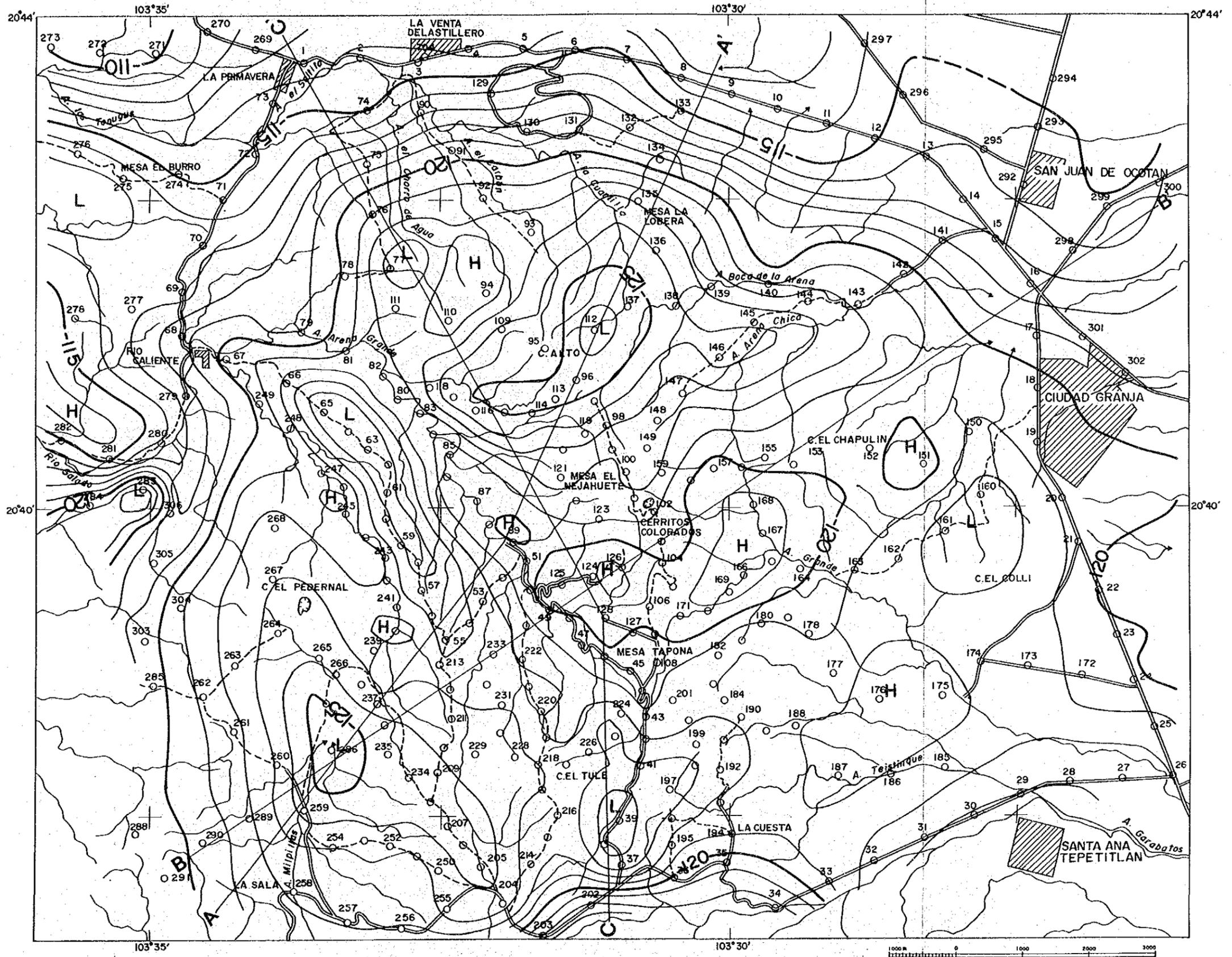


Fig. II. 1-27 Bouguer Anomaly Map ( $\rho=2.00\text{g/cm}^3$ )



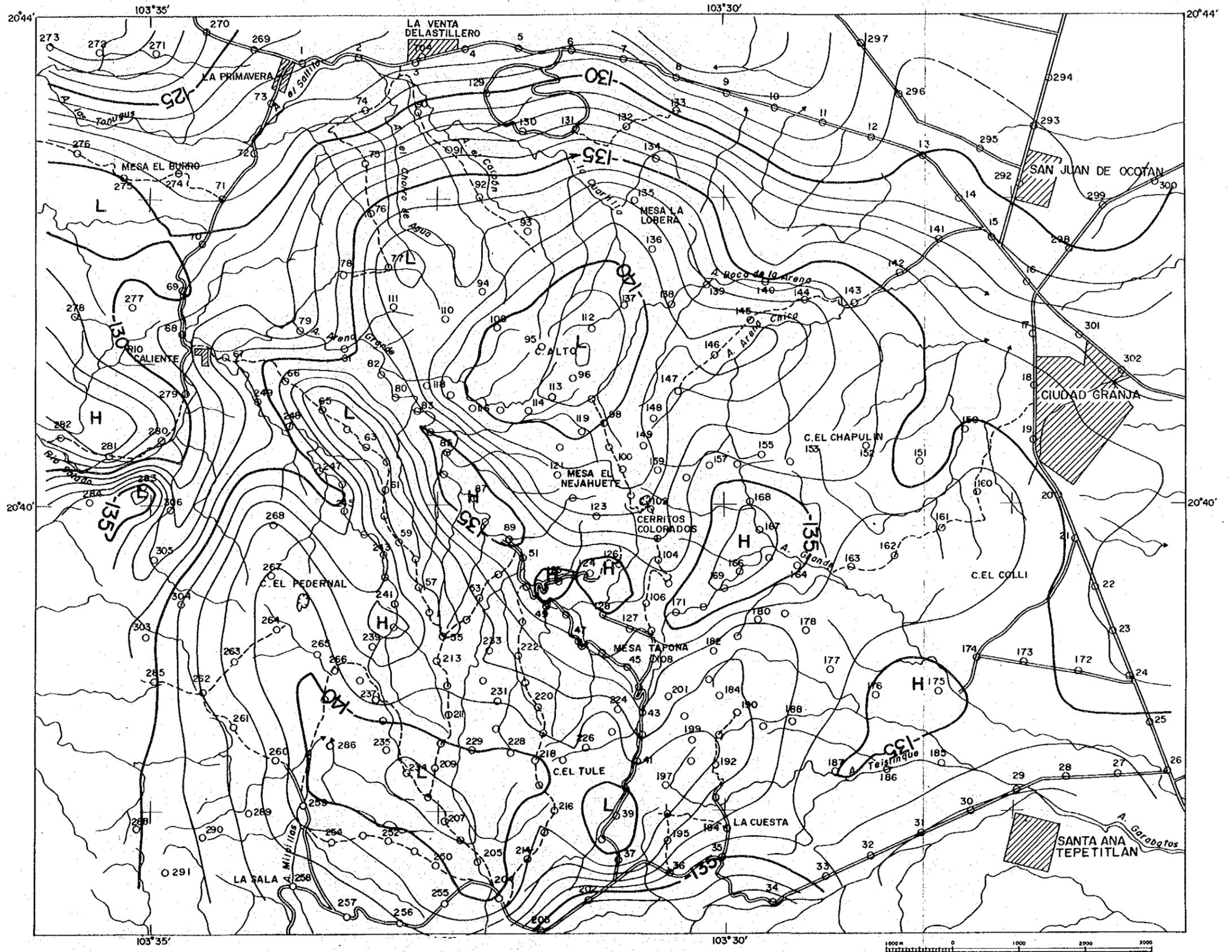


Fig. II. 1-28 Bouguer Anomaly Map ( $\rho=2.20\text{g/cm}^3$ )







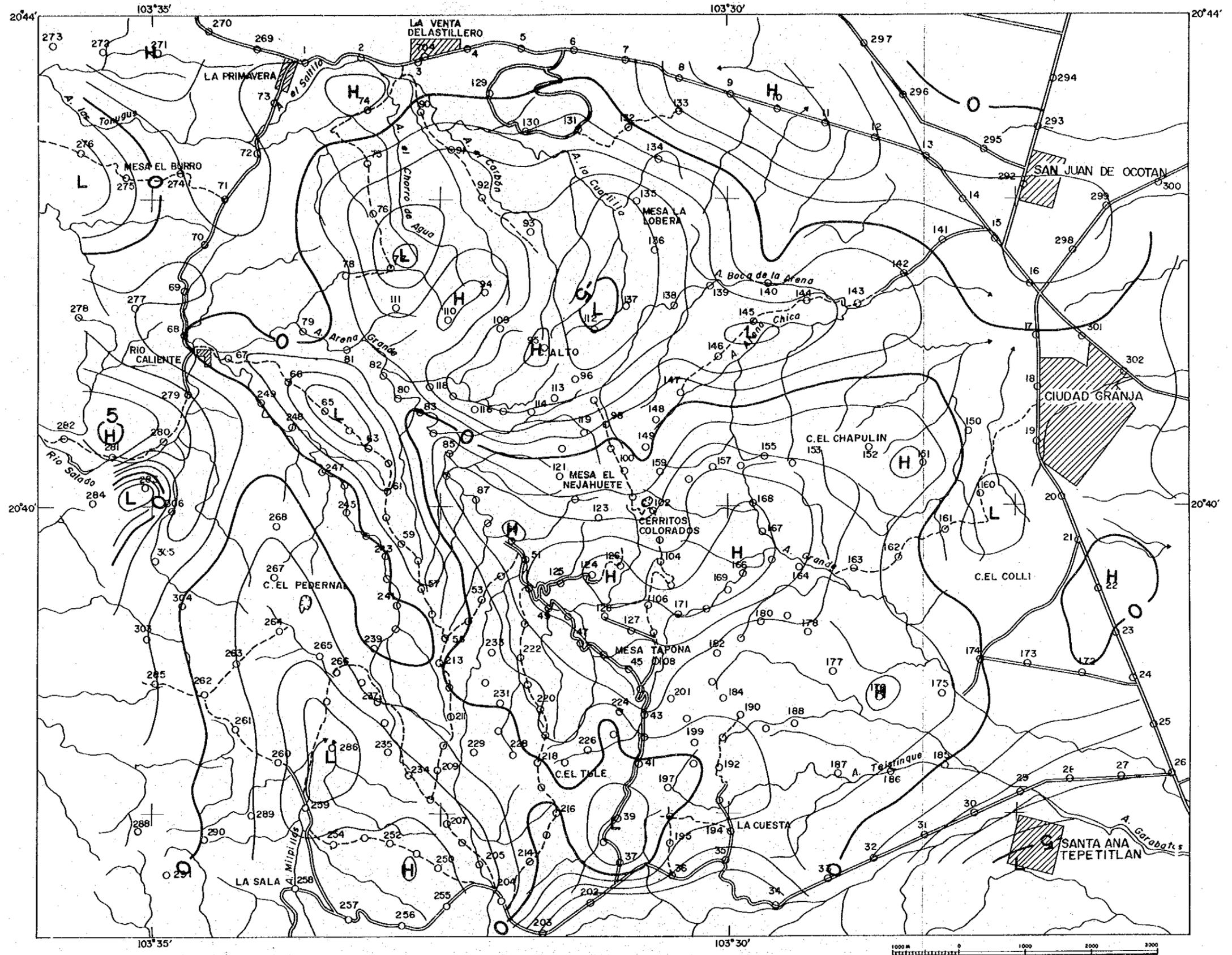


Fig. II. 1-30 Residuals of Third-order Trend Surface



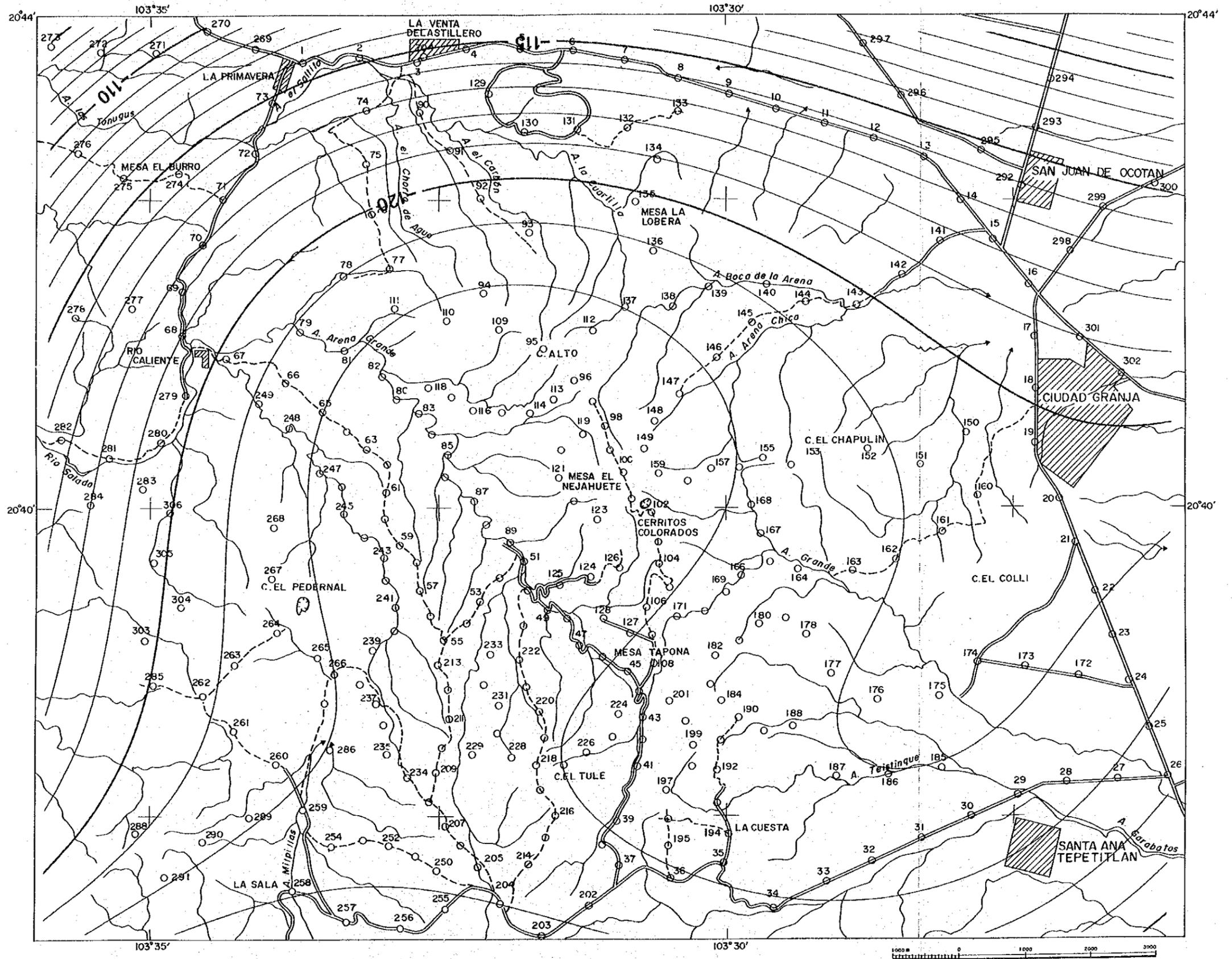


Fig. II. 1-31 Third-order Trend Surface



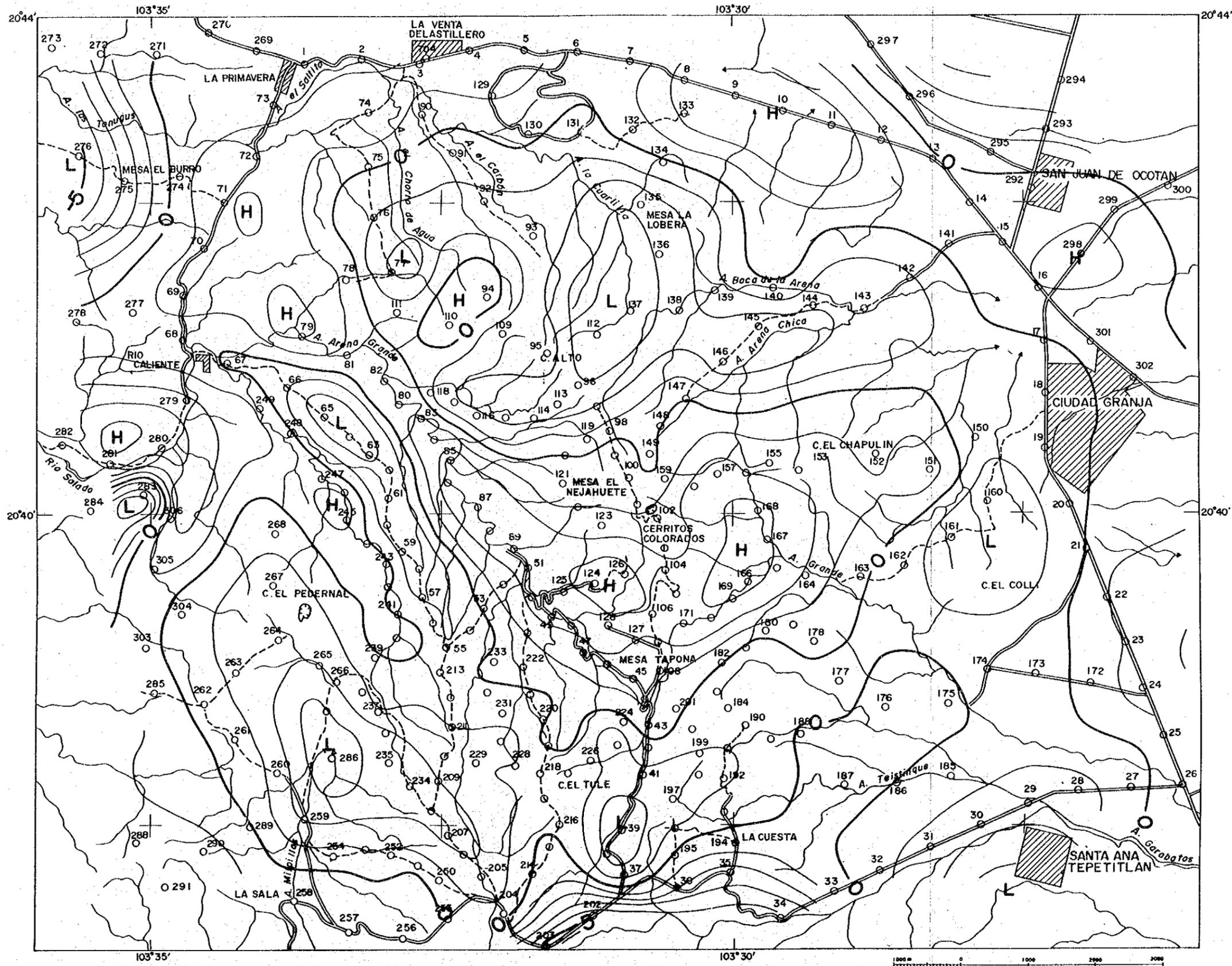
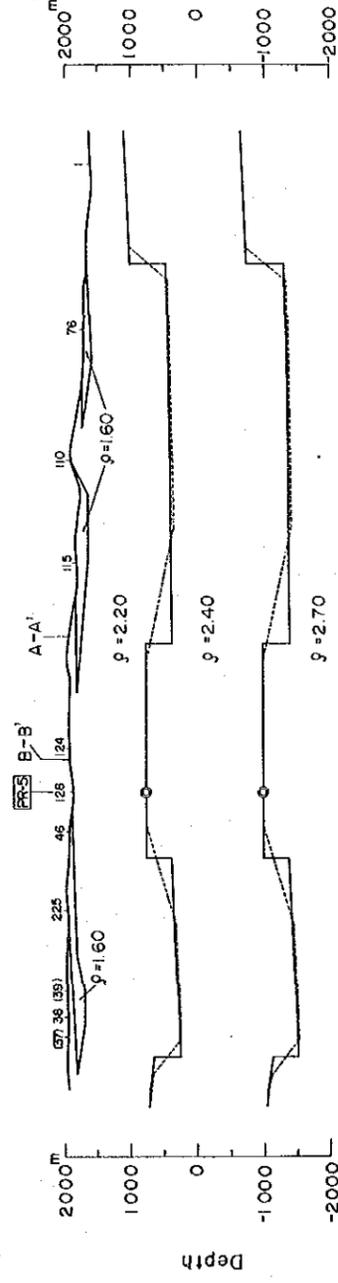
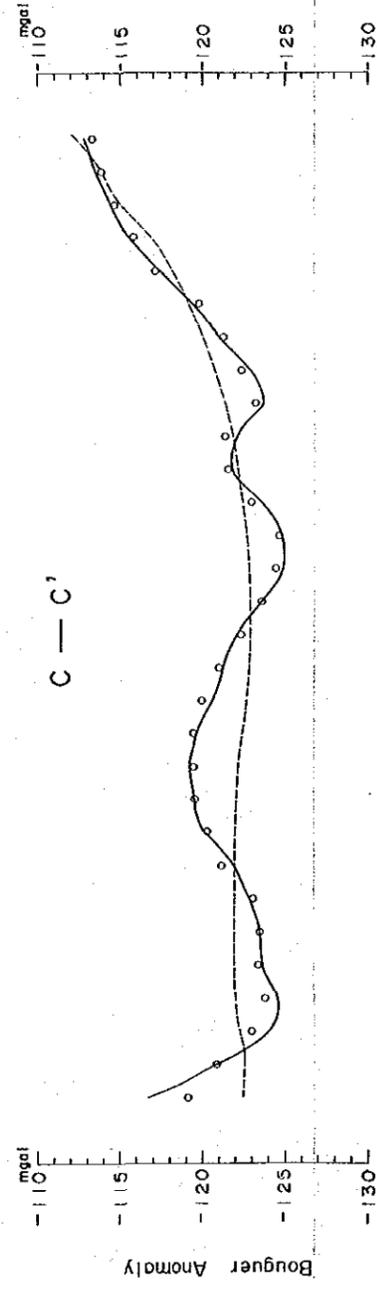
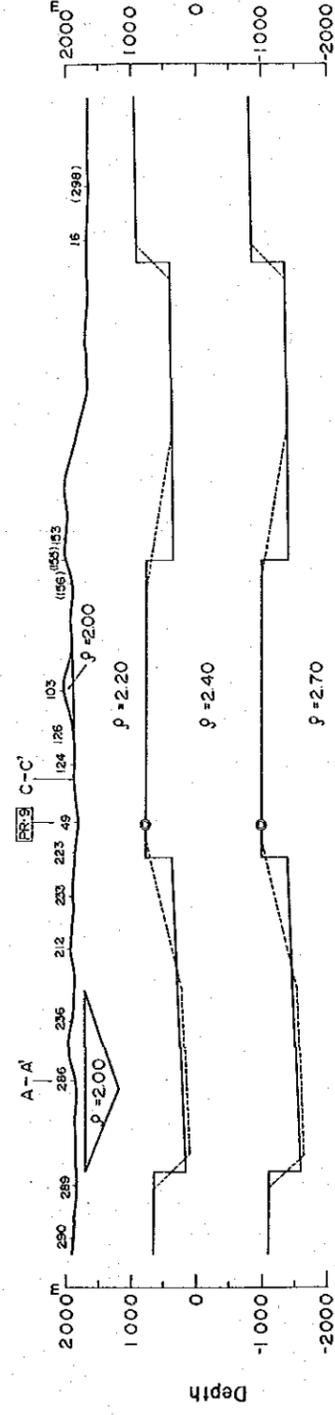
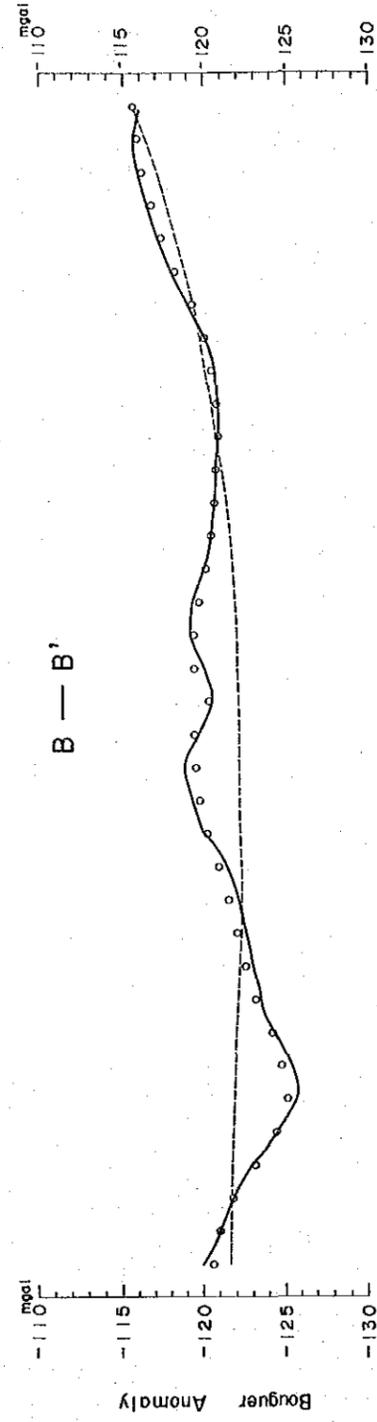
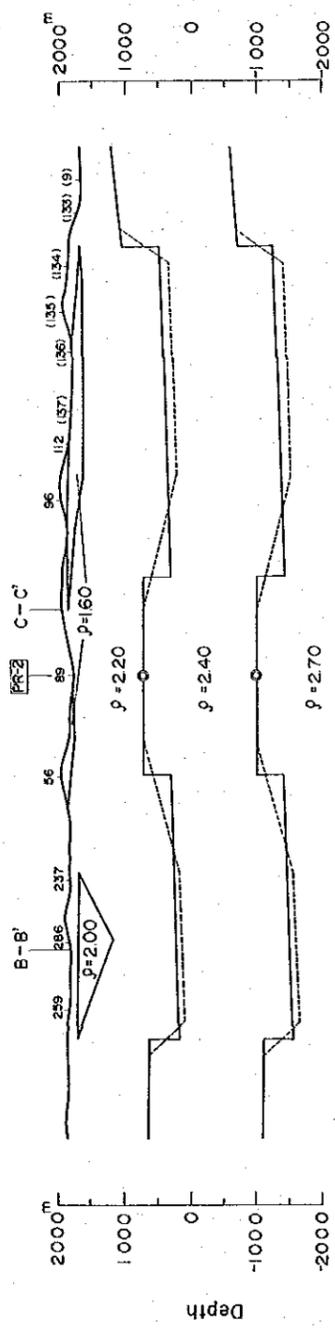
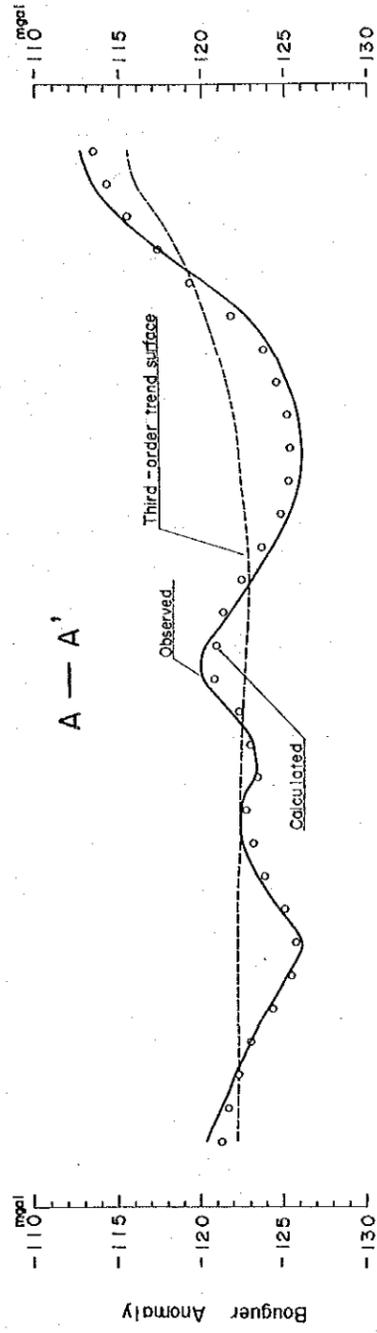


Fig. II. 1-32 Residuals of Third-order Trend Surface





1000m 0 1000 2000 3000

Fig. II. 1-33 Two-Dimensional Gravity Analysis, Lines A-A', B-B' and C-C' are Shown in Fig. II. 1-27







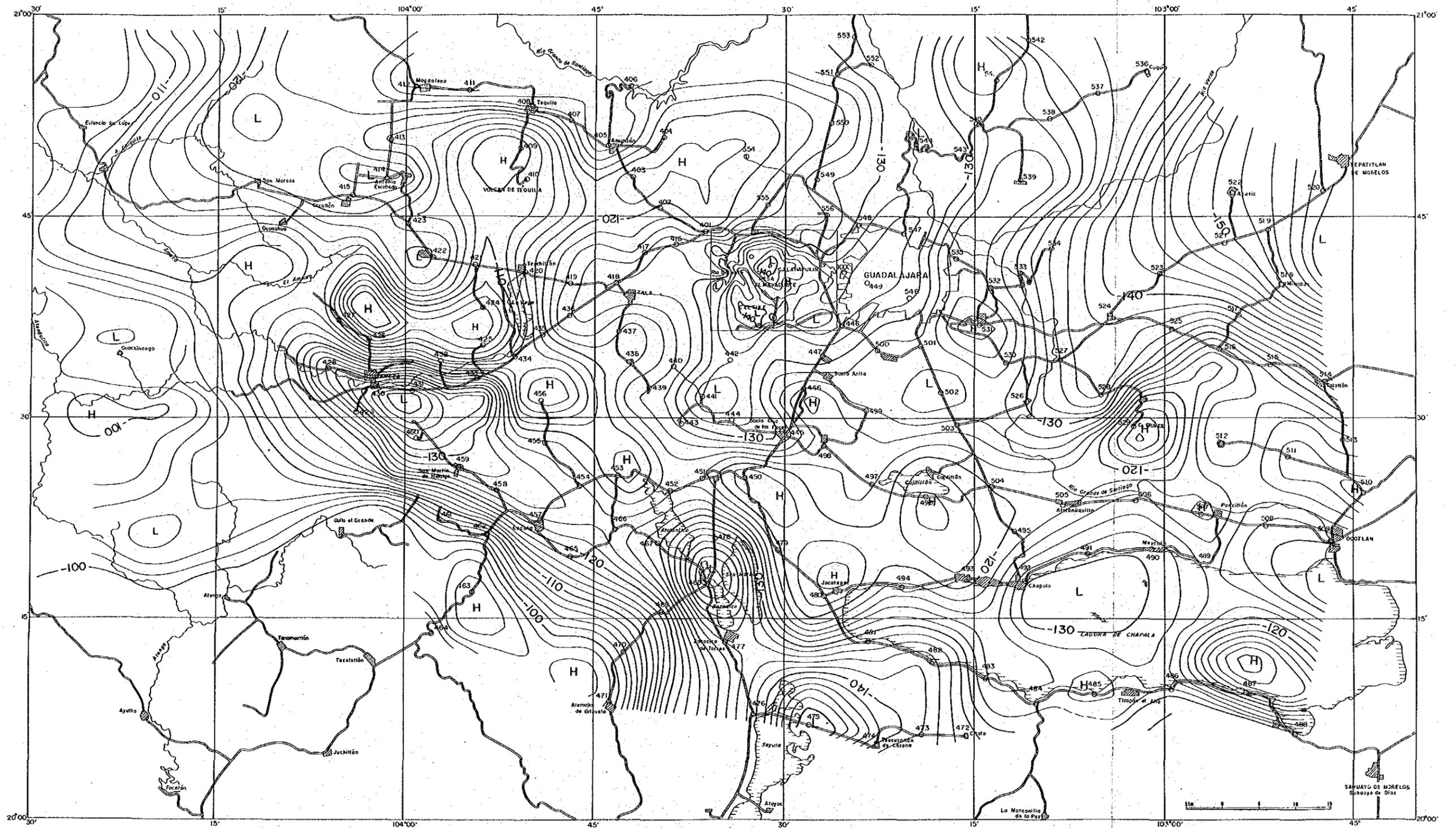


Fig. II. 1-35 Regional Bouguer Anomaly Map ( $\rho = 2.20 \text{g/cm}^3$ )





## 1.4 電磁探査

### 1.4.1 概 要

地熱徴候地域の深部までの比抵抗分布および比抵抗構造を明らかにし、地熱貯留層に関する情報を得ることを目的として、リモートリファレンス方式MT法 (Magneto Telluric Method、地磁気地電流法) による電磁探査を実施した。

その結果は以下のとおりである。

- ① 今回実施したMT法電磁探査では精度の良い信号がとれ、インバージョン解析による比抵抗・深度曲線も良好な結果となった。これは、本地域は典型的な水平3層構造 (浅部から高比抵抗-低比抵抗・高比抵抗) であり、構造指標解析でも一部を除いて1次元構造であることも一つの要因となっている。
- ② インバージョン後の比抵抗・深度曲線を基に、水平比抵抗分布を描くと、主たる貯留層は5~20 $\Omega$ -mの低比抵抗で特徴づけられ、特に、PR-1~PR-8の南方には、垂直的にのび、up-flowによると思われる低比抵抗異常域も検出された。
- ③ 比抵抗構造は、深部にいくほどNW-SE性が顕著となるので、本地域の地熱流体の存在はこの方向に規制されていると考えられる。
- ④ インバージョン後の比抵抗、層厚解を連結すると1次元モデル断面図が得られ、さらに、2次元モデル解析も実施された。これらの断面解析によると、②で述べたup-flowがより明瞭になるとともに、蒸気噴出の大きい坑井が低比抵抗帯中に掘削されており、中深度における低比抵抗帯はフラクチャーの卓越した地熱貯留層として注目される。

### 1.4.2 電磁探査結果

#### (1) 現場におけるMT測定

##### ① 測定点

調査範囲および測定点位置をFig. II. 1-36に示す。地熱徴候地を中心に54点の測点を設けたが、このうち8測定点については、取得データの品質改善を目的として再データ取得を行った。原則として測点配置は、坑井近傍では約300m間隔、その周辺では約500m間隔としたが、地形が急峻な測点は、状況に応じて適宜移動させて測定を行った。

##### ② データ取得方式

データ取得方式として、RRMT (Remote Reference Magnetotelluric

Method) を採用し、2 測定点間で同時測定を実施した。測定の同期化にはクォーツクロックを使用した。

MT 法における観測成分は、自然電場 2 成分 ( $E_x$ 、 $E_y$ ) および自然磁場 3 成分 ( $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ ) であるが、これらの現場における測定状況の一例を Fig. II. 1-37 ~ 38 に示す。

③ データ取得帯域と時間

データ取得は高周波数帯域 (HF)、中周波数帯域 (MF)、低周波数帯域 (LF) の 3 つの帯域に分けて実施し、125Hz ~ 200 秒以上までの 5 成分の時系列データを取得した。

データ取得帯域、パラメータと平均のデータ取得時間を Table II. 1-13 に示す。

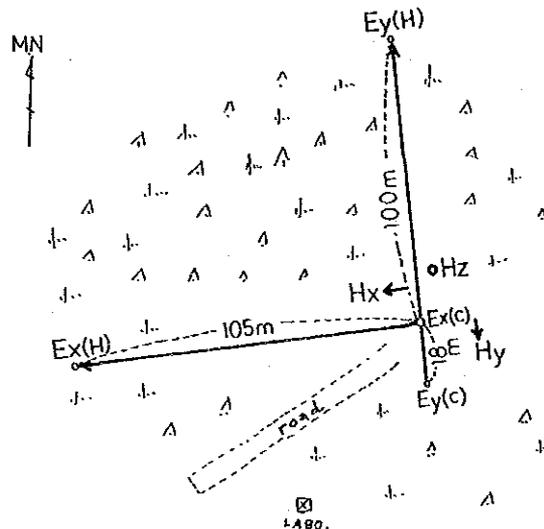
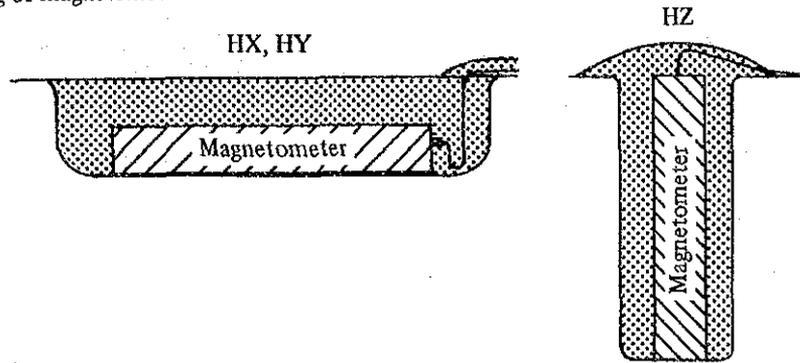


Fig. II. 1-37 Positioning of Sounding Station of No.27

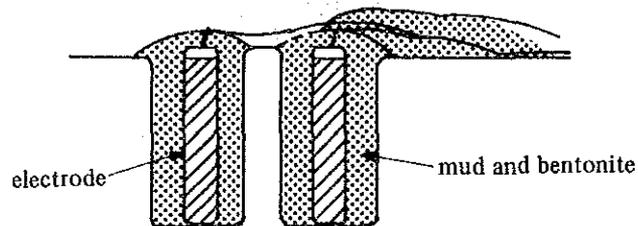
Table II. 1-13 Recording Band Width, Parament and Duration of MT Survey

	Band width of frequency	Sampling channel rate	Length of each recording segment	Segment number for 1 file	Recording duration for 1 file	File number	Sampling number for FFT	Q value
HF	125Hz 3Hz	each 500Hz	512	64	about 1 min.	3 ~ 5	512	6
MF	15Hz 10 second	each 60Hz	512	64	about 9 min.	3 ~ 5	512	6
LF	0.5Hz 200 second	each 2Hz	512	30 ~ 40	130 ~ 170 min.	1	1024	4

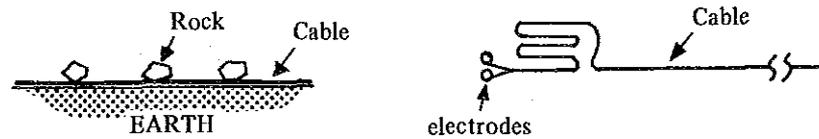
(1) Setting of magnetometers



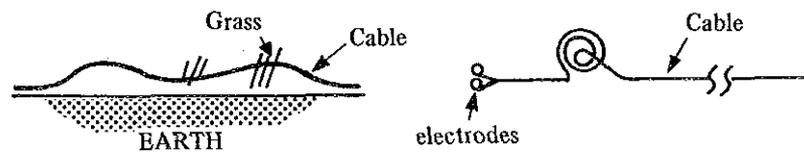
(2) Setting of electrode



(3) Example of cable setting  
(Example of good setting)



(Example of bad setting)



(1) Setting of magnetometers

3 magnetometers were buried in the earth completely.

(2) Setting of electrode

2 or 3 electrodes were buried in each hole (4 holes for 2 lines) with bentonite and mud.

(3) Setting of cables

Cables were setted on the earth not to move. And sometimes cables were buried in the earth.

Fig. II. 1-38 An Example of Setting of Magnetometers, Electrodes and Cables

#### ④ データ取得システム

データ取得システムは主としてフィールドプロセッサ、シグナルコンディショナー、クォーツクロック、磁場センサ（インダクション・マグネットメータ）、電場センサ（ $\text{CuSO}_4$  非分極電極）等により構成されており、バッテリー駆動方式の人力可搬型のシステムである（Fig. II. 1-39）。

各成分の時系列データは電場及び磁場センサー、シグナルコンディショナーを通じてフィールドプロセッサに取り込まれる。

フィールドプロセッサは3つのCPU、5インチCRT、5 M byte カートリッジ式ハードディスク用ドライブを内蔵しており、これらにより時系列データの記録と同時にリアルタイムデータ処理が可能なシステムとなっている。データ取得とリアルタイムデータ処理はすべてフィールドプロセッサと連結したキーボードによって操作される。

また、クォーツクロックのクォーツ精度は $10^{-9}$  秒/秒、同期精度は $10^{-6}$  秒/回であり、データ取得時には16ビットのアナログデジタル変換方式を採用した。

#### (2) データ処理

フィールドプロセッサはデータ取得中にもリアルタイムでデータ処理が可能であるので、現地において見かけ比抵抗曲線（Fig. II. 1-40）や位相曲線等を算出した。これらはデータの品質管理を目的としたものであって、実際の解析には以下に述べるようなデータ処理の結果を採用した。

- ① 時系列データの編集
- ② FFT処理（高速フーリエ変換）
- ③ シングル処理、リモートリアレンス（RRMT）処理
- ④ MTパラメーターの計算、表示
- ⑤ コヒーレンシーチェック（電場・磁場の相関度チェック）によるデータ品質の低い区間の除去

Fig. II. 1-41 には測点7におけるリアルタイムデータ処理結果、最終データ処理結果（シングル処理、RRMT処理）の比較例を示す。解析にはRRMT処理結果を使用した。

なお、MTパラメーターとは、見かけ比抵抗（ $\rho_{XY}$ 、 $\rho_{YX}$ ）、位相（ $\phi_{XY}$ 、 $\phi_{YX}$ ）、インピーダンスストライキ、ティップーストライキ、ティッパー・マグニチュードおよび

スキューである。

### (3) モデルインバージョン解析と構造指標

#### ① モデルインバージョン解析

現場測定で得られたMTデータは見かけ比抵抗値( $\rho_a$ )と周期( $T$ )との関係である。これを比抵抗値( $\rho$ )と深度(層厚、 $h$ )に変換するためには、モデルインバージョン解析を実施する必要がある。そこで、本調査では地下の比抵抗構造を水平多層構造と仮定した1次元のモデルインバージョン解析を実施した。この解析の手順は Fig. II. 1-42 に示すとおりである。Fig. II. 1-42 からわかるようにこの解析における主眼は、測定から得られた見かけ比抵抗・周期曲線に対し、水平多層の比抵抗値と層厚を各種仮定してあてはめ、最も適合する比抵抗値を得ることにあるこのインバージョン解析の例を Fig. II. 1-43 に示す。Fig. II. 1-43 は Fig. II. 1-41 と同じ測点7での解析例である。Fig. II. 1-41 の最終RRMTデータを基に、コヒーレンスチェックをした後、Fig. II. 1-42 に従ってインバージョン解析をすると、右下に示すような深度・比抵抗曲線が得られた。これを各測点毎にとりまとめて図示すると付帯資料に示したようになる。この一部を Fig. II. 1-44 に示す。

#### ② TE、TMモードの選定

このような1次元モデルインバージョン解析の問題点は、地下が水平多層構造になっていない場合の適合性である。すなわち、地下の比抵抗構造が2次元あるいは3次元構造である場合、どのように1次元解析を適用させることができるかである。地下が2次元比抵抗構造の場合、得られる見かけ比抵抗値には $\rho_{XY}\rho_{YX}$ があるので、一般に次の2種類のモードが考えられる。

TEモード：電場の方向が構造の軸と平行

TMモード：磁場の方向が構造の軸と平行

磁場は周囲の地質的状況(岩石の磁気・変質など)によって変化しやすく、側方からの影響があるために1次元解析には不適當である。したがって、今回の解析には常にTEモードを使用した。

$\rho_{XY}$ 、 $\rho_{YX}$ のうちどちらがTEモードであるかを定めるには、ティッパー・ストライキ(TEの方向を示す)とインピーダンス・ストライキ( $\rho_{XY}$ の方向を示す)の角度を検討し、もしその角度が $\pi/4$ 以下なら $\rho_{XY}$ をTEモード、 $\pi/4$ 以上なら $\rho_{YX}$ をTEモードとした。

### ③ 構造指標

また、地下比抵抗構造の次元を判断するには、ティッパーマグニチュード ( T ) と スキュー ( S ) を用いた。

1 次元的構造 :  $T \approx 0$  かつ  $S \approx 0$

2 次元的構造 :  $T \gg 0$  かつ  $S \approx 0$

3 次元的構造 :  $T \gg 0$  かつ  $S \gg 0$

周期 30 秒におけるティッパーマグニチュードとスキューの分布図をそれぞれ Fig. II. 1-45 と II. 1-46 に示すが、本地域は全体として 1 次元的構造であり、わずかに測点 01 および 46 近傍において 2 次元的構造が認められた。また、3 次元的構造は本地域では認められていない。

#### 1.4.3 電磁探査による比抵抗構造

##### (1) 水平比抵抗分布

ある特定の水平断面における見かけ比抵抗を調べるために 3 周期 ( 0.01 秒、1 秒、30 秒 ) における TE モード見かけ比抵抗分布図を作成した。それらの特徴は以下のとおりである。

##### ① 周期 0.01 秒

調査地域全般にわたって  $50 \Omega\text{-m}$  以上の高見掛比抵抗値の分布が認められ、調査地域北部 ( 測定点 54, 14, 20, 29 付近 )、東部 ( 測定点 41, 49, 52 付近 ) には  $200 \Omega\text{-m}$  以上の高見掛比抵抗域が分布している。

##### ② 周期 1 秒

$10 \Omega\text{-m}$  前後の低見掛比抵抗域が調査地域全般にわたって広く分布しており、比抵抗コントラストもそれ程明確ではない。

##### ③ 周期 30 秒

PR-2 と PR-5 を結ぶ線を境として北東側の相対的に高い見掛比抵抗域と南西側の低見掛比抵抗域に大別可能であり、両地域の見掛比抵抗コンタの伸びが北西-南東の方向性を示す傾向にある。

南西側の低見掛比抵抗域の中で特に測定点 10, 18, 22 付近 ( PR-1 ~ PR-8 付近 ) の低見掛比抵抗域が顕著であり周囲に明確な見掛比抵抗のコントラストも認められる。周期 30 秒は本地域の貯留層の性質を表わすと考えられるので、Fig. II. 1-

47にTEモードの分布図を示す。

次に、見かけ比抵抗・周期曲線にボスティック・インバージョンを適用させ、比抵抗・深度曲線を求めた時に、任意の深度の比抵抗値を各測点について抽出し、TEモードの比抵抗水平断面図を作成した。海拔1,500mから-1,000mの間に500mおきに6層準さらに-3,000mと計7深度の水平断面図を作成した。これらのうち特徴的な比抵抗分布について以下に述べる。

- ① 海拔1,500m (Fig. II. 1-48) — 比較的高比抵抗 ( $50\Omega\text{-m}$ 以上) 地域が、地熱徴候地をとりまくように分布し、低比抵抗地域と明瞭なコントラストを示している。  
 $50\Omega\text{-m}$ 以下の特に低い比抵抗地域が局所的に認められる。この海拔深度にはタラ燧灰岩、石質燧灰岩および流紋岩層準が分布しているが、比抵抗値とはこれらの岩質とは無関係であり、むしろ、比抵抗値は熱水の多少とか変質等の要因に左右されていると考えられる。
- ② 海拔1,000m (Fig. II. 1-49) — この深度では  $50\Omega\text{-m}$ 以上の高比抵抗は殆んど認められず、全般に  $10\Omega\text{-m}$ 前後の低比抵抗域が広く分布し、比抵抗値のコントラストは明瞭でない。この海拔深度はコルディリェーラン火山噴出物上部層に相当し、低比抵抗はフラクチャーの多少に起因した様相を呈する。
- ③ 海拔0m (Fig. II. 1-50) — 全般に  $5\sim 20\Omega\text{-m}$ の低比抵抗域が広く分布しているが、その中で、PR-1~PR-8の南方(測点18付近)にある  $2\sim 5\Omega\text{-m}$ 以下の低比抵抗異常域が顕著である。この深度は主たる地熱貯留層の層準なので、全域に渡る低比抵抗は地熱流体の存在に起因していると考えられる。
- ④ 海拔-500m (Fig. II. 1-51) — 海拔0mと殆んど同じ比抵抗分布を示す。PR-1~PR-8南方の低比抵抗異常域は、この深度さらには海拔-3,000mにまで明瞭に表われているので、地質調査で見出された uplift 帯および流体包有物や坑内温度測定から見出された upflow 帯と一致しており注目に値する。
- ⑤ 海拔-3,000m (Fig. II. 1-52) — PR-1~PR-8南方の低比抵抗異常域がこの深度でも顕著であるものの、全般に  $50\Omega\text{-m}$ 以上の高比抵抗分布域が卓越し、特に地域東部に認められる。このことは、おそらくフラクチャー分布が局所的になっており、高比抵抗分布域にはフラクチャー(すなわち地熱流体の存在)がないことを示唆している。

以上、①~⑤に共通な点として、比抵抗構造がNE-SW性ではなく、NW-SE性

を示す点があげられた。この傾向は深くなるほど顕著になった。この事は、地熱貯留層内の地熱流体の存在が地表でみられるNE-S E性の断層等に規制されるのではなく、深部に存在するNW-S E性のフラクチャー等に左右されていることを示している。

## (2) 垂直断面解析

垂直断面における見かけ比抵抗・周期と比抵抗・深度との関係はFig. II. 1-53~54のようになった。これらの図はFig. II. 1-36に示す測線3に沿う断面であり、測点18の低比抵抗部がFig. II. 1-53では深部から上方および側方に広がった様相を呈するのに対し、Fig. II. 1-54では深部から浅部に垂直的に連続しており、up-flowがこの部分に存在することを示している。なお、Fig. II. 1-54はボスティック・インバージョン後の垂直断面である。

インバージョンによって得られた比抵抗・層厚解を測線に沿って連結すると1次元モデル断面図が描ける。これを9測線について実施したが、それらのうち代表的な測線Bと測線3のモデル断面図をFig. II. 1-55およびII. 1-56に示す。断面図からわかるように浅部の高比抵抗層、中深部の低比抵抗層そして深部の高比抵抗層の典型的な3層構造を示している。浅部の高比抵抗層はおそらくタラ凝灰岩のdryな地層を反映していると考えられる。これは、坑井試験によってPR-1やPR-8の地熱流体が地層内でフラッシュしている事実(すなわち浅部地層における水分の欠如)と調和する。測線3では中部は一様な低比抵抗を示すが、測線Bでは場所によって比抵抗値が異なる。Fig. II. 1-55に既存坑井の軌跡を入れてみたところ、蒸気噴出の大きい坑井は低比抵抗帯中に掘削されていることがわかり、この中部の低比抵抗帯はフラクチャーが卓越した地熱貯留層として注目される。測点18の深部には周囲とは全く異常な形で低比抵抗があらわれているが、これはup-flowと関係があるものと推定された。

Fig. II. 1-56のうち、測点21~20および測点40では高比抵抗部が卓越している。このことは、貯留層の範囲がこれらの測点にはさまれた地域に限られることを意味している。このような、範囲については、Fig. II. 1-55では言及できない。1.4.2 (3) ③構造指標のところでも述べたように、本調査地域はほぼ1次元的な比抵抗構造を示すので、以上の1次元モデル断面解析結果は、地下の情報を明確に反映しているものと考えられる。

最後に、測線Bと測線3については、2次元モデル解析をも実施した。その結果は、1次元モデル断面図とよく似た比抵抗分布、比抵抗構造が認められるが、水平多層構造

がより強調されているし、比抵抗のコントラストがより強調されていた。

すなわち、Fig. II. 1-57 をみると、1次元モデルでは中深度の低比抵抗層が、水平的に連続せず、局所的に分布していたのに対し、2次元モデルでは、PR-1~PR-8 付近に低比抵抗異常 ( $5\Omega\text{-m}$ 以下) が集中し、 $5\sim 50\Omega\text{-m}$ の低比抵抗層が連続的に追跡できた。また、深部の高比抵抗層も水平的に連続していた。

一方、Fig. II. 1-58 の測線 3 における2次元モデルをみると、中深部に広がっている  $5\Omega\text{-m}$ 以下の低比抵抗層が1次元モデルで表われたのに比べ南側でせばまっていること、および、測点 18 付近における低比抵抗異常域が浅部から深部まで連続し、深部ほどより低比抵抗 ( $1\Omega\text{-m}$ 以下) になっていることが読みとれた。











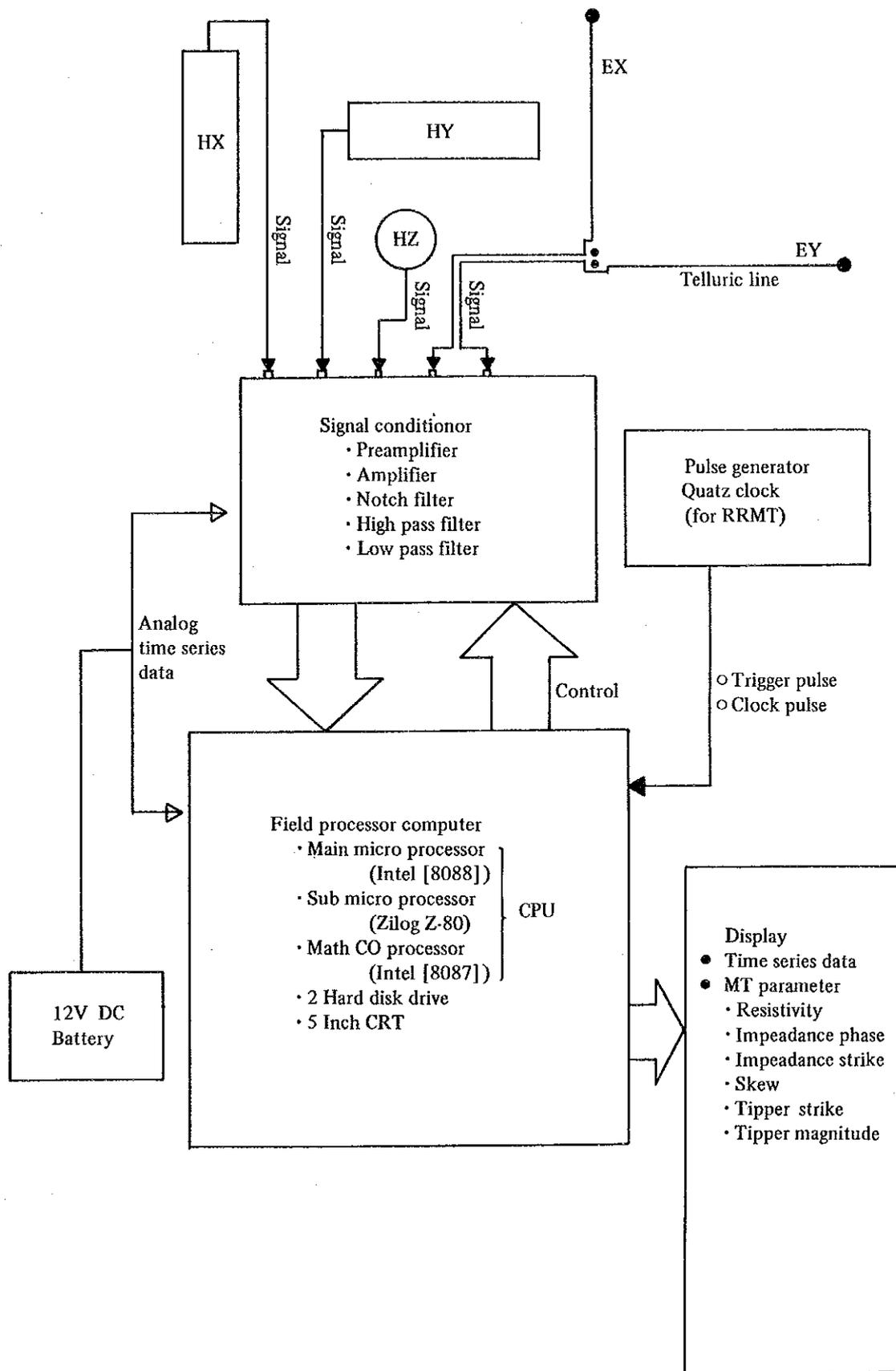
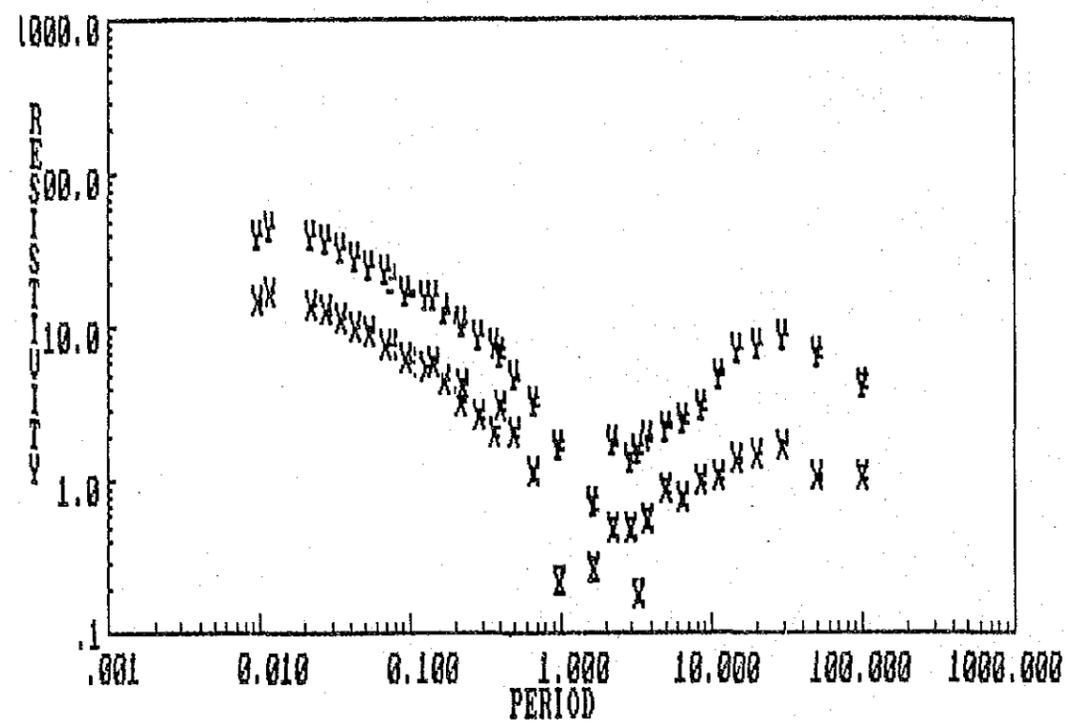


Fig. II. 1-39 Outline of MT Data Acquisition System

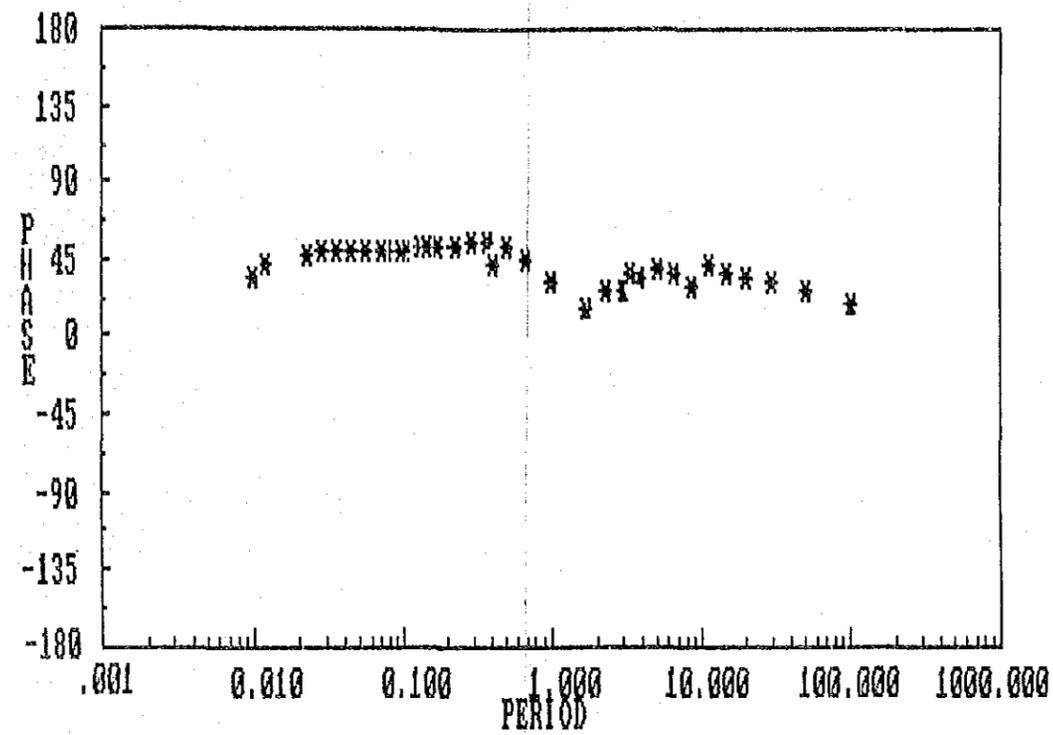




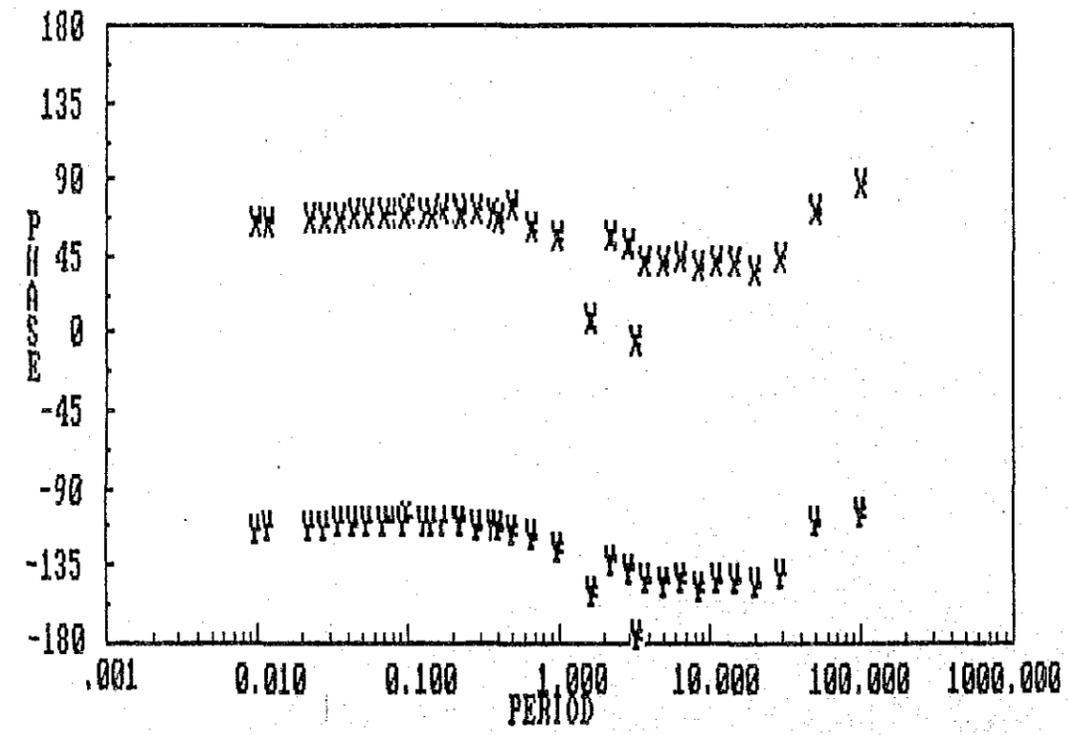
X and Y RESISTIVITY (a)



STRIKE ANGLE (c)



X and Y PHASE (b)



STRIKE ANGLE (d)

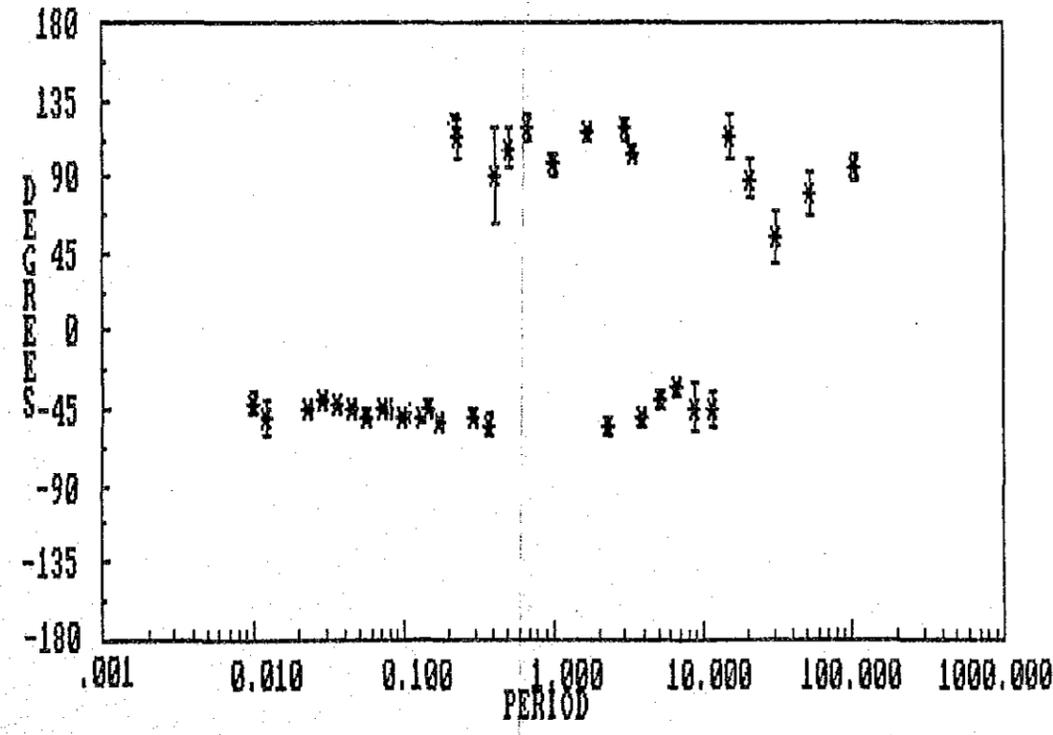
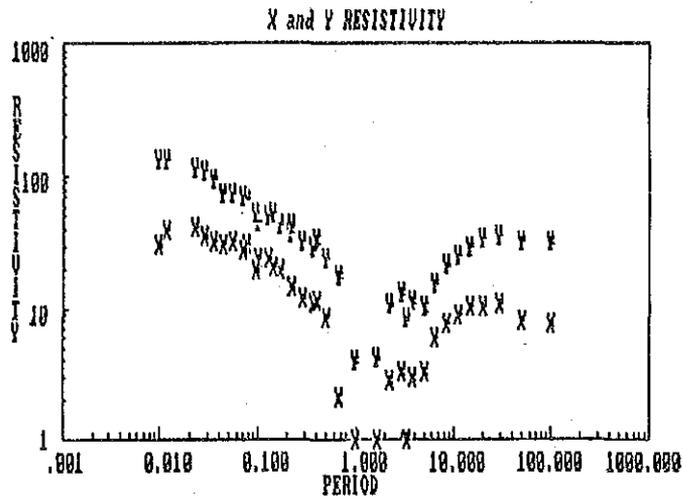


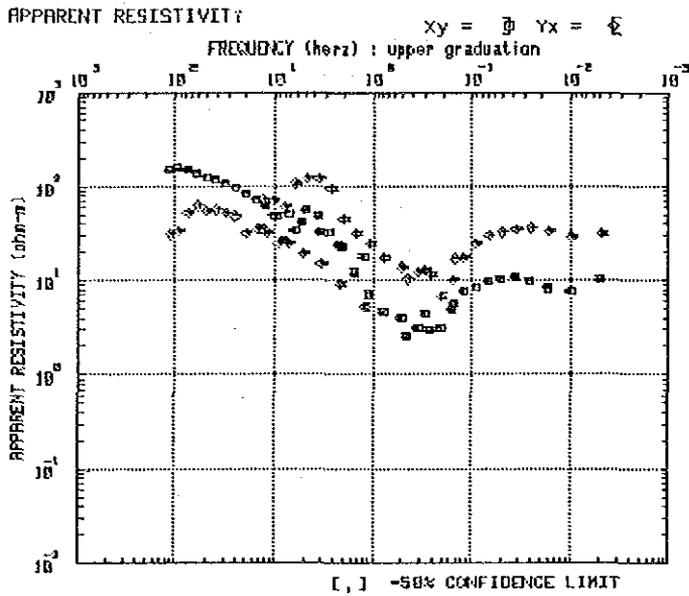
Fig. H. 1-40 Examples of Field Data Processing Result of Station 06



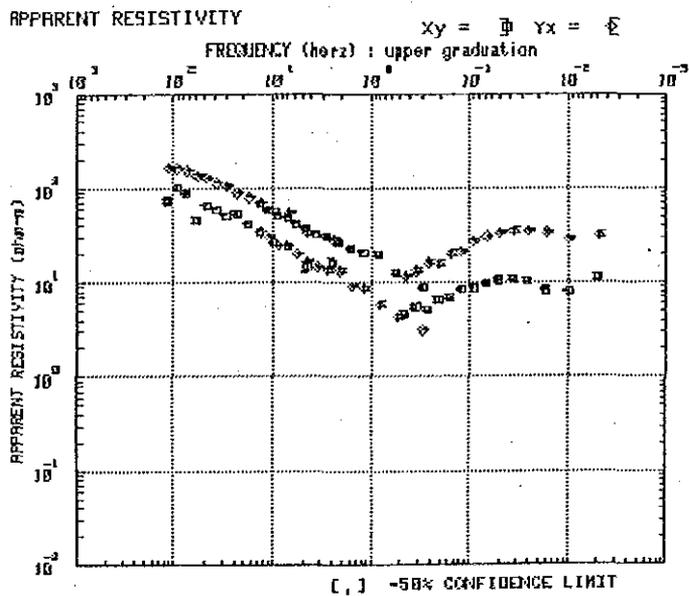




a) Single Data Processing  
Result using Field Processor  
(in Field)



b) Single Data Processing  
Result after editing using  
Data Processing System



c) Final Remote Reference  
Data Processing Result using  
Data Processing System

Fig. II. 1-41 Comparison with Field Processor and Final Data Processing of Station 07

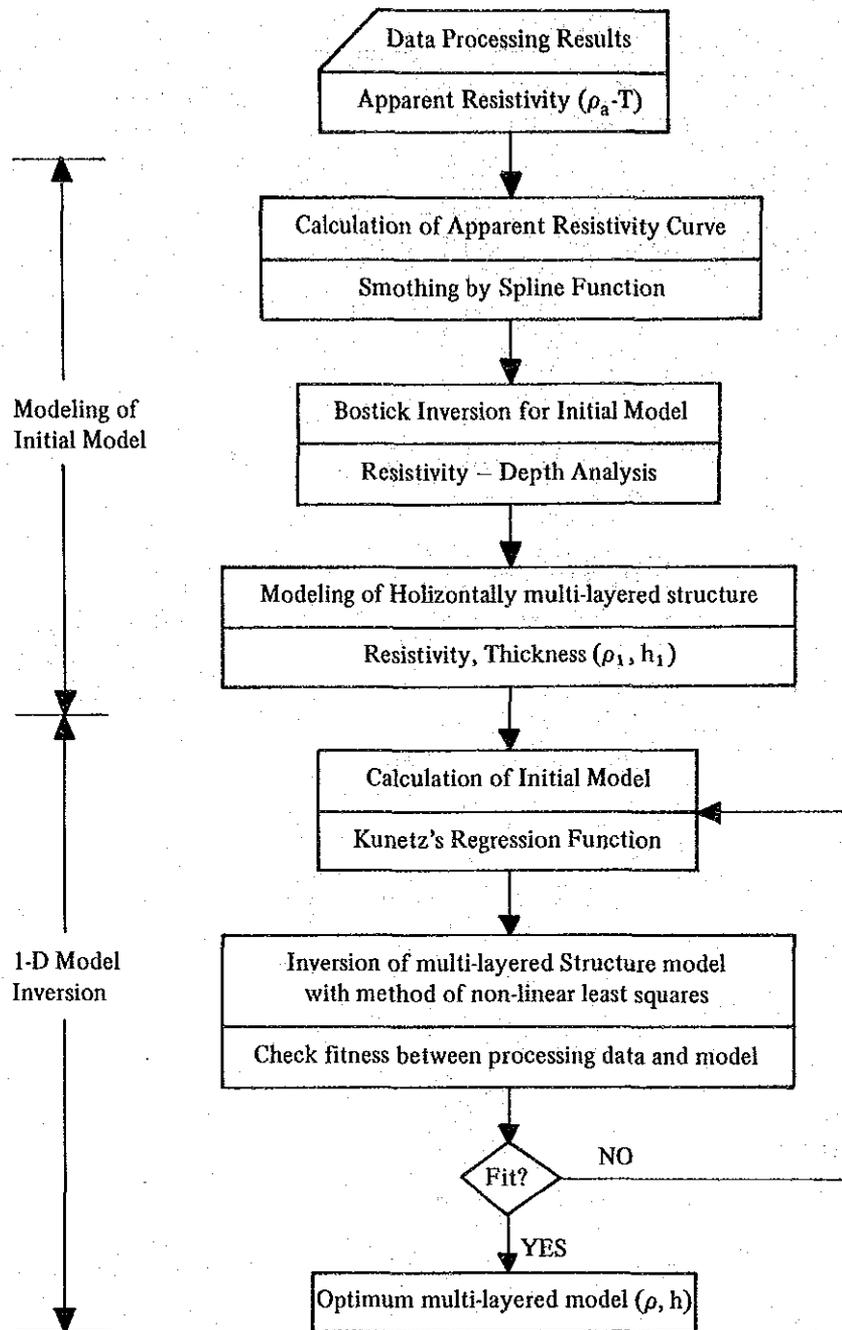


Fig. II. 1-42 Flowchart of 1-D Model Inversion

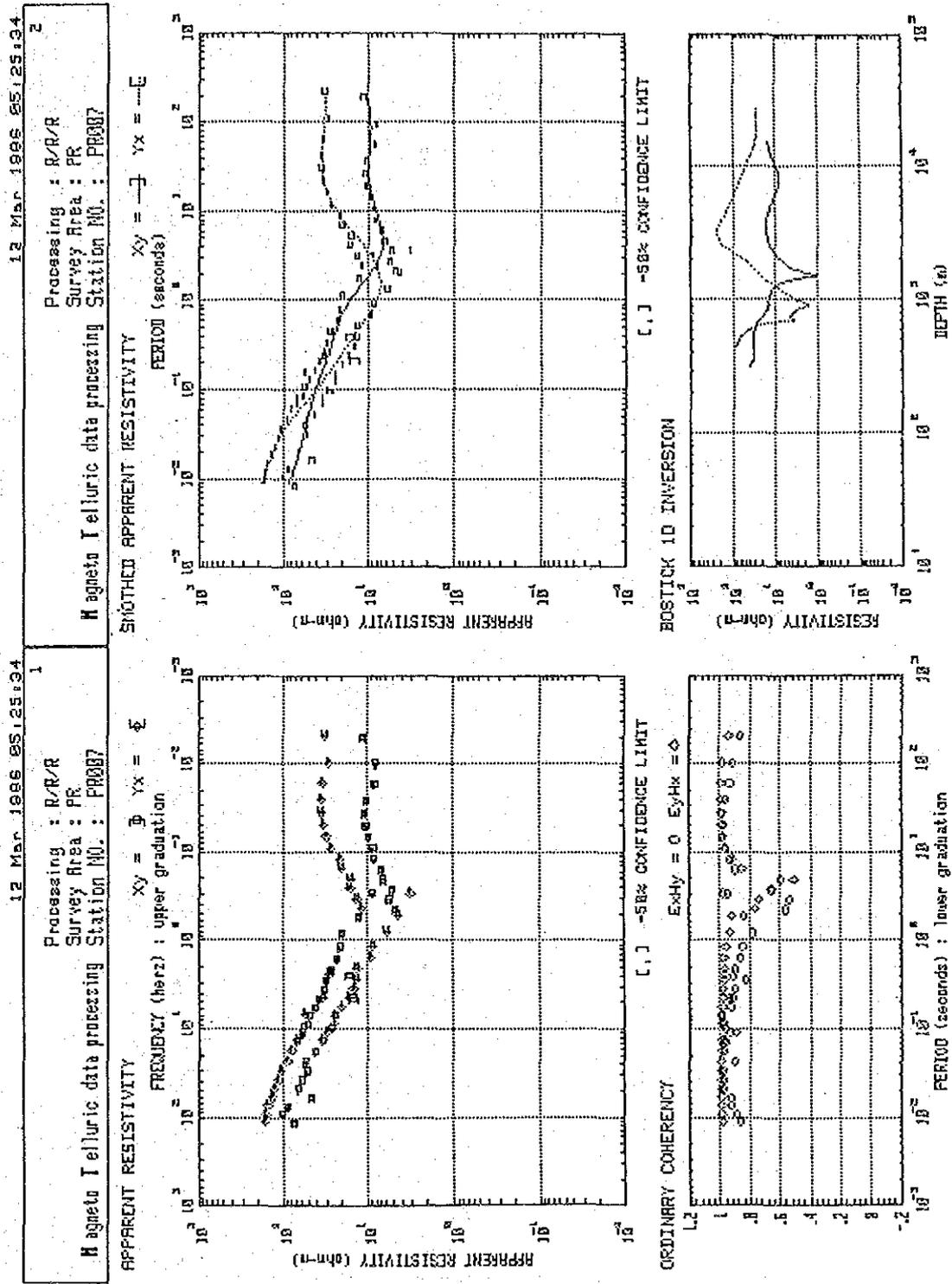
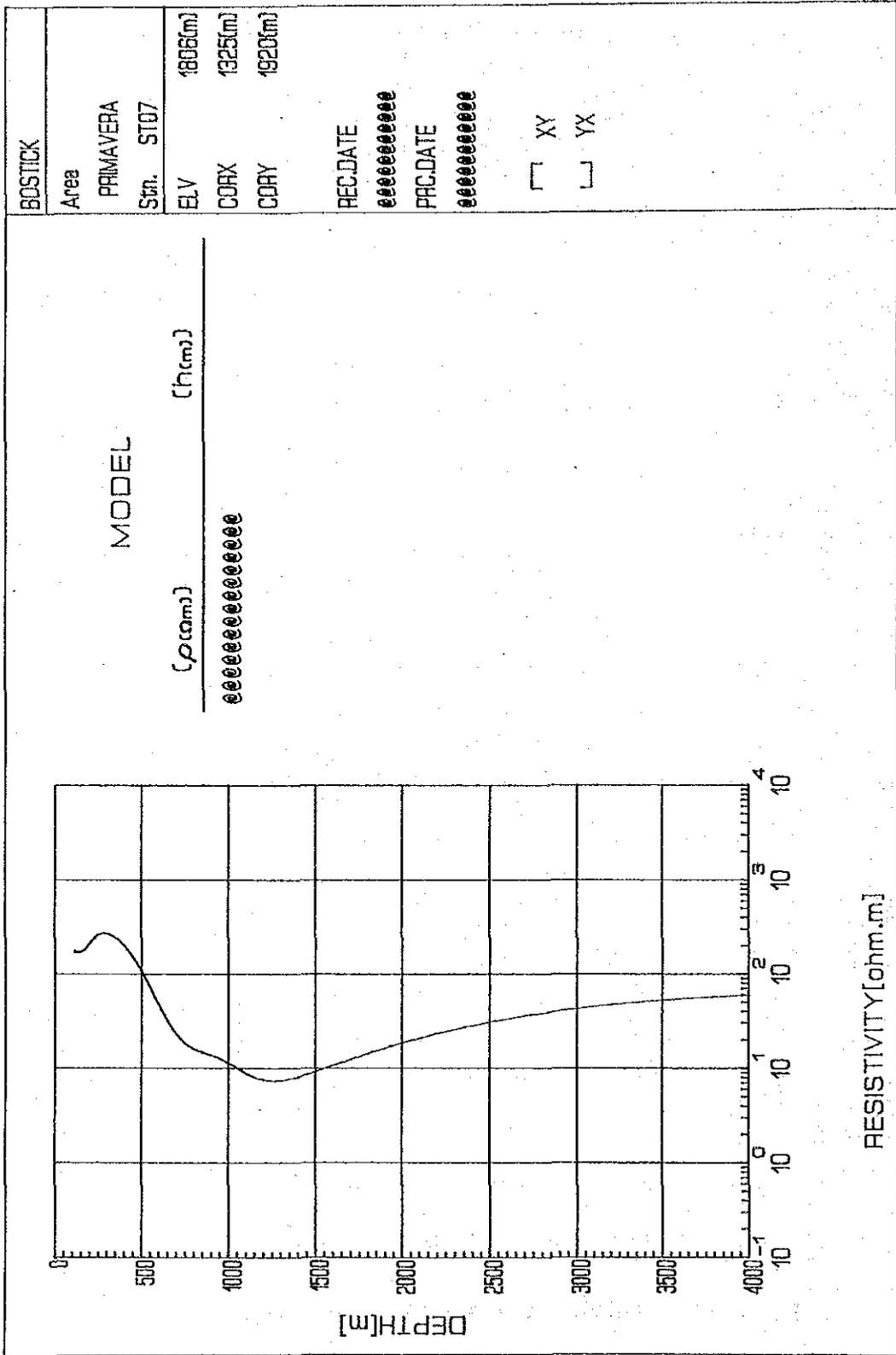


Fig. II. 1-43 Process of 1-D Model Inversion (Station 07)



BDSTICK

Area  
PRIMAVERA  
Sta. ST07

ELV 1886(m)  
CORX 1325(m)  
CORY 1920(m)

REC.DATE  
eeeeeeeeeeee

PAC.DATE  
eeeeeeeeeeee

XY  
 YX

May 12 1986

Sta. ST07

Fig. II. 1-44 An Example of Result of 1-D Model Inversion (Station 07)



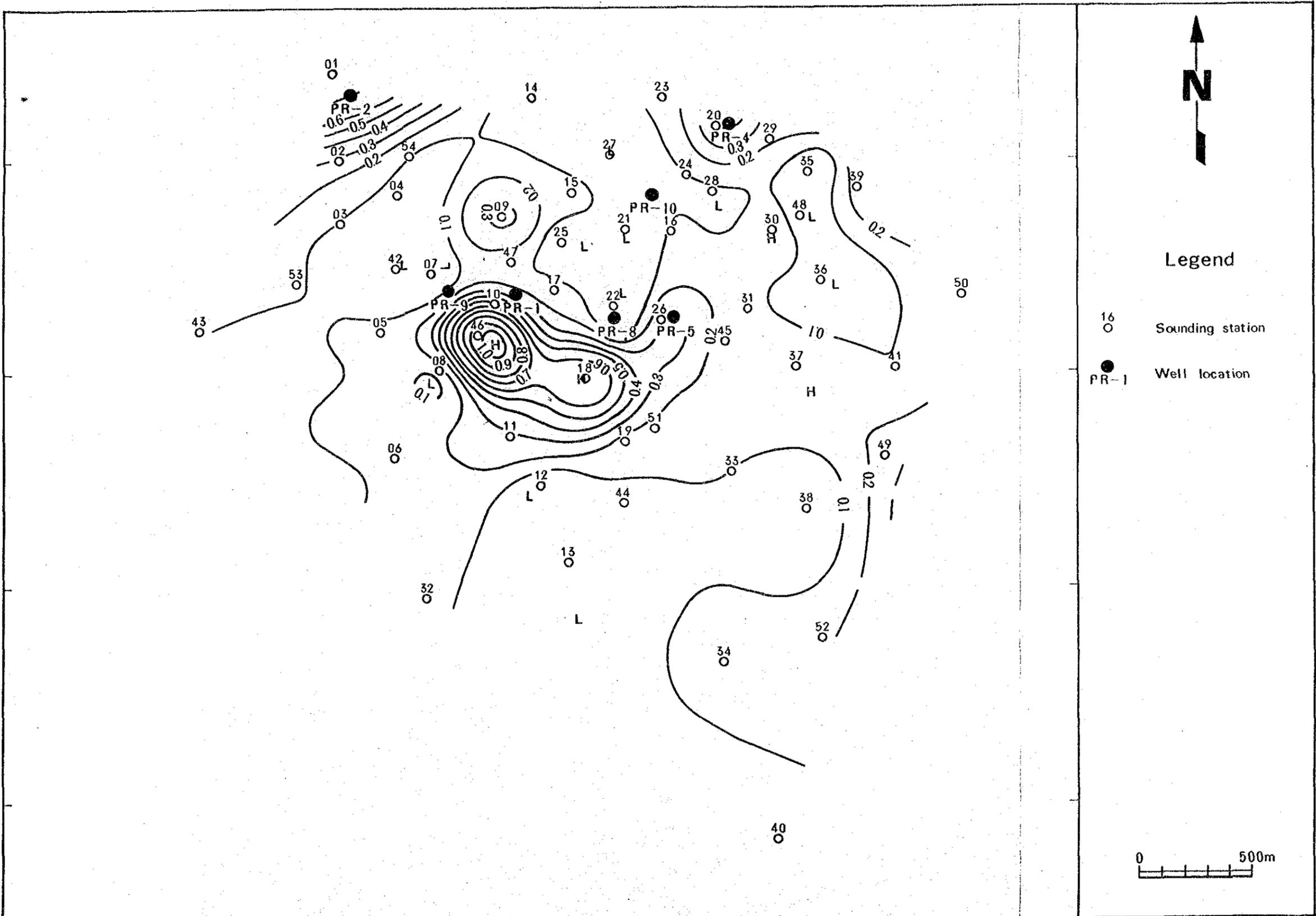


Fig. II. 1-45 Distribution Map of Tipper Magnitude, period=30 sec



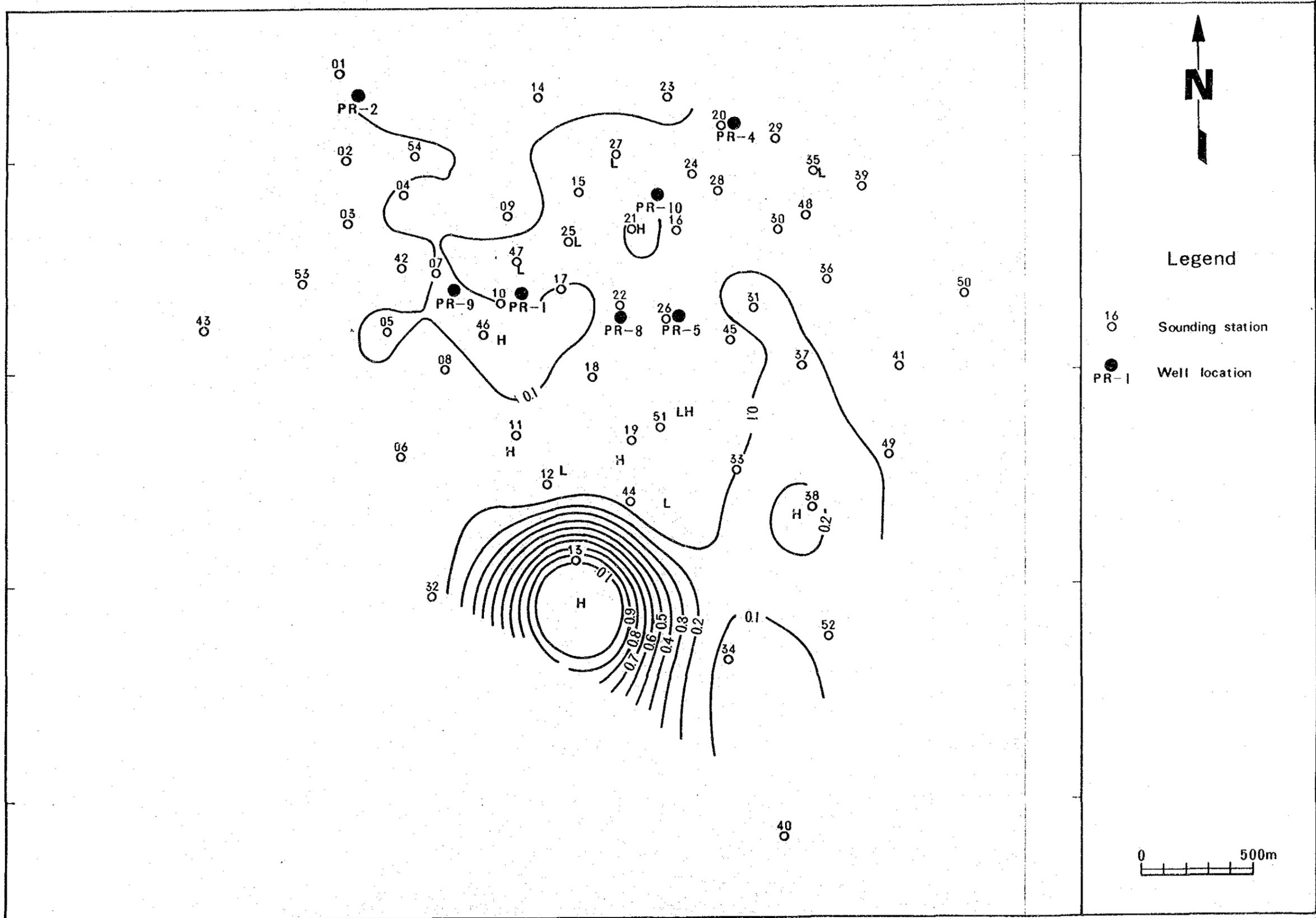


Fig. II. 1-46 Distribution Map of Skew, period=30 sec



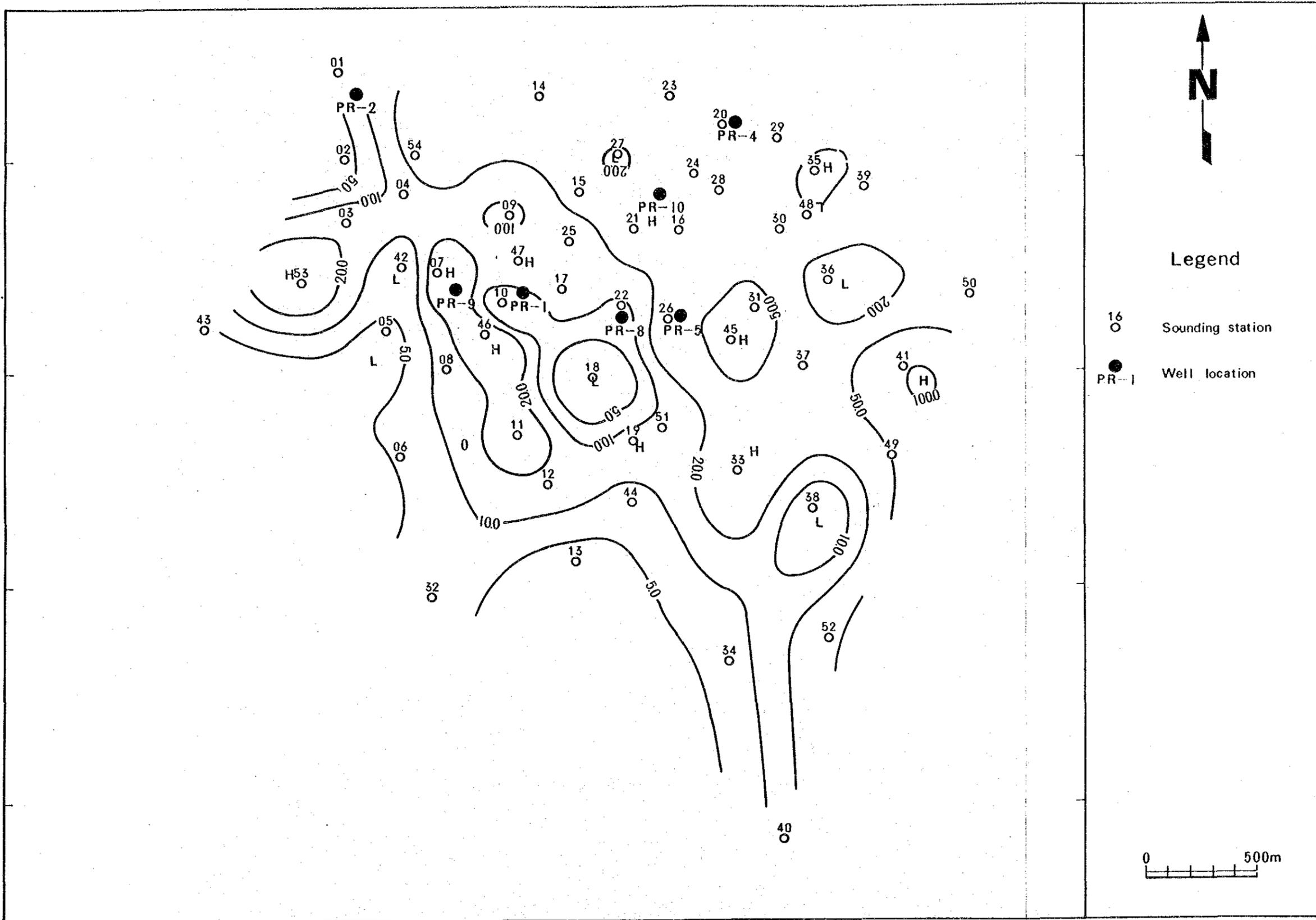


Fig. II. 1-47 Apparent Resistivity Map (TE mode), period=30 sec



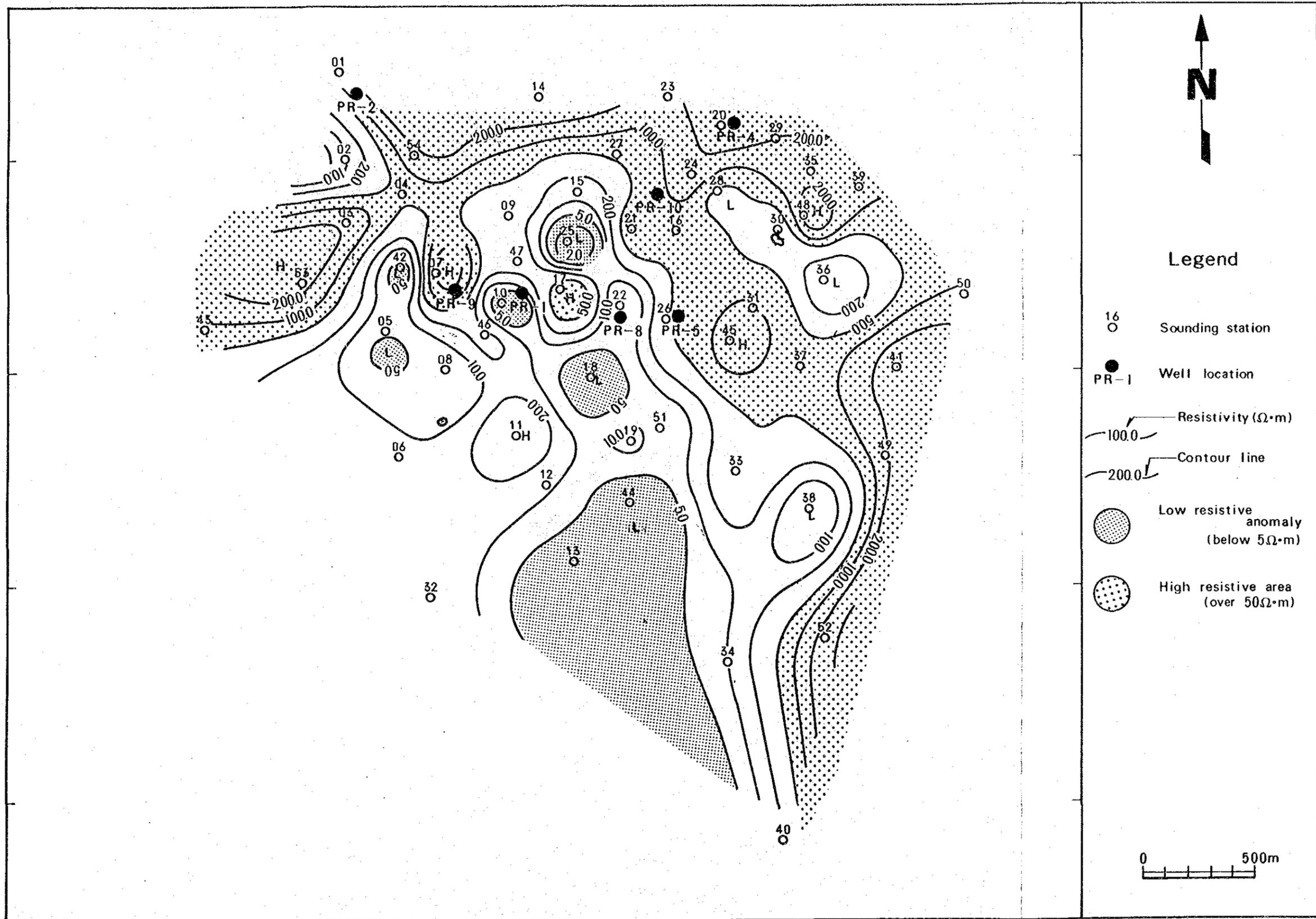


Fig. II. 1-48 Resistivity Map (TE mode; SL 1,500m)



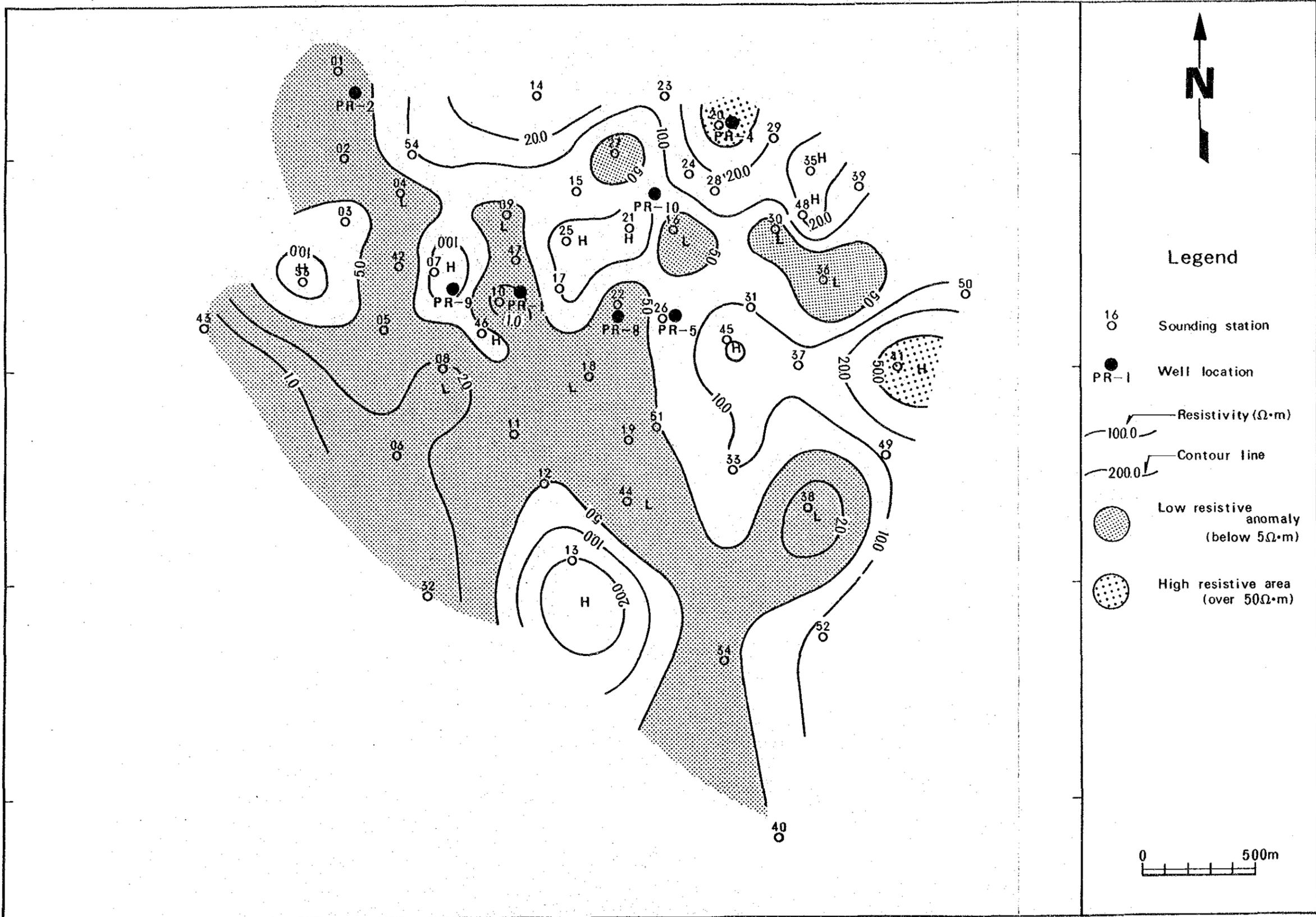


Fig. II. 1-49 Resistivity Map (TE mode; SL 1,000m)



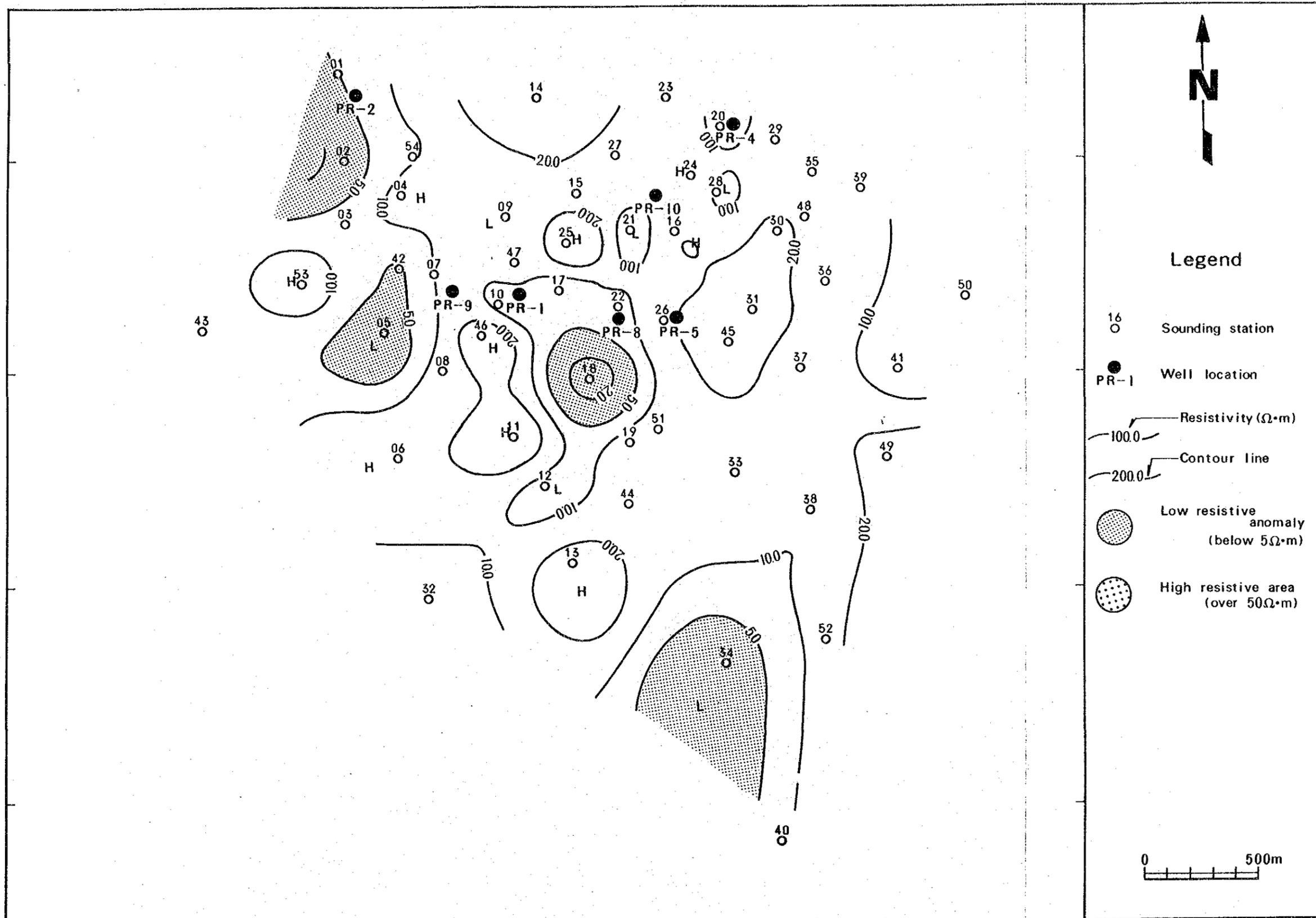


Fig. II. 1-50 Resistivity Map (TE mode; SL 0m)



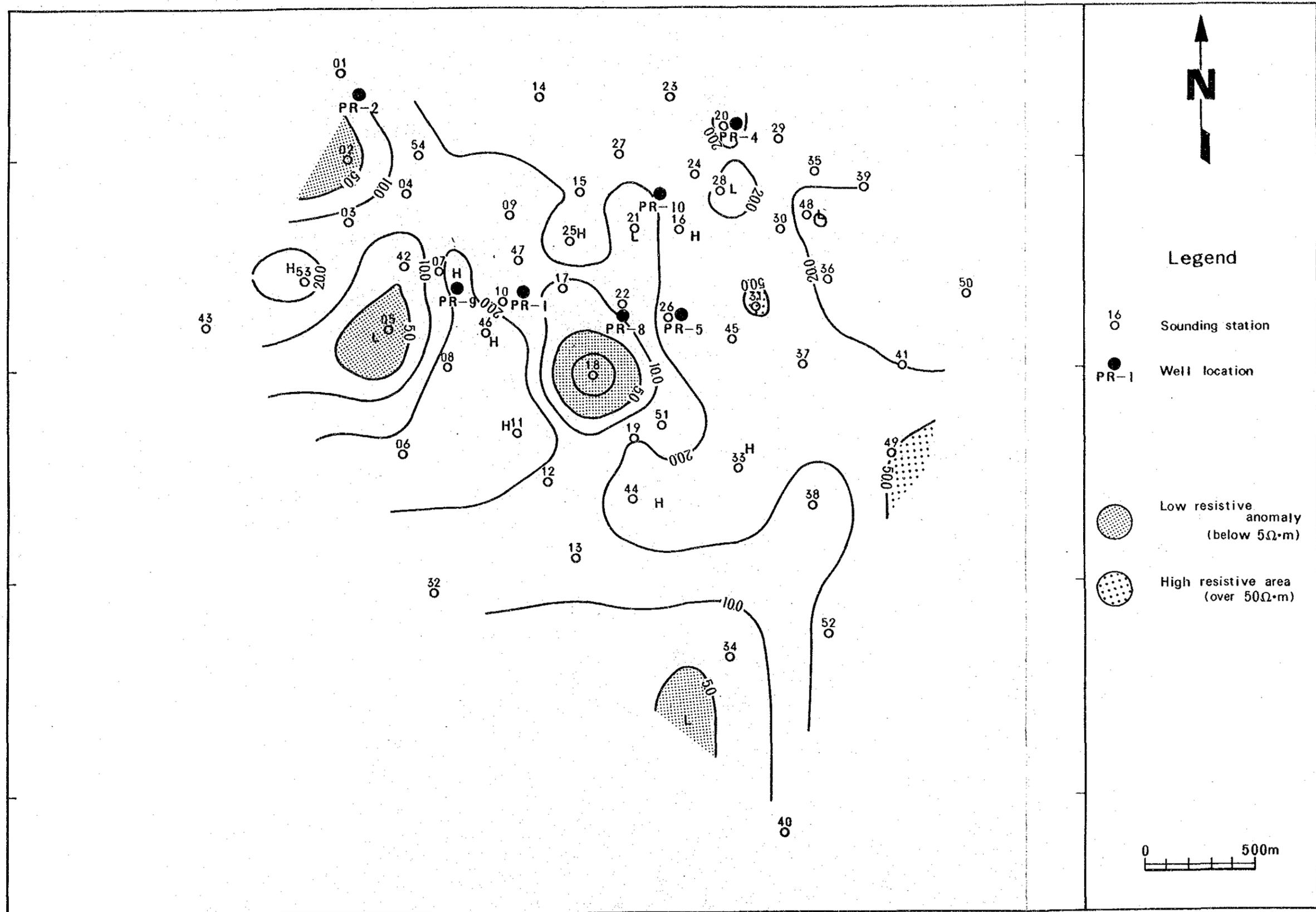


Fig. II. 1-51 Resistivity Map (TE mode; SL -500m)



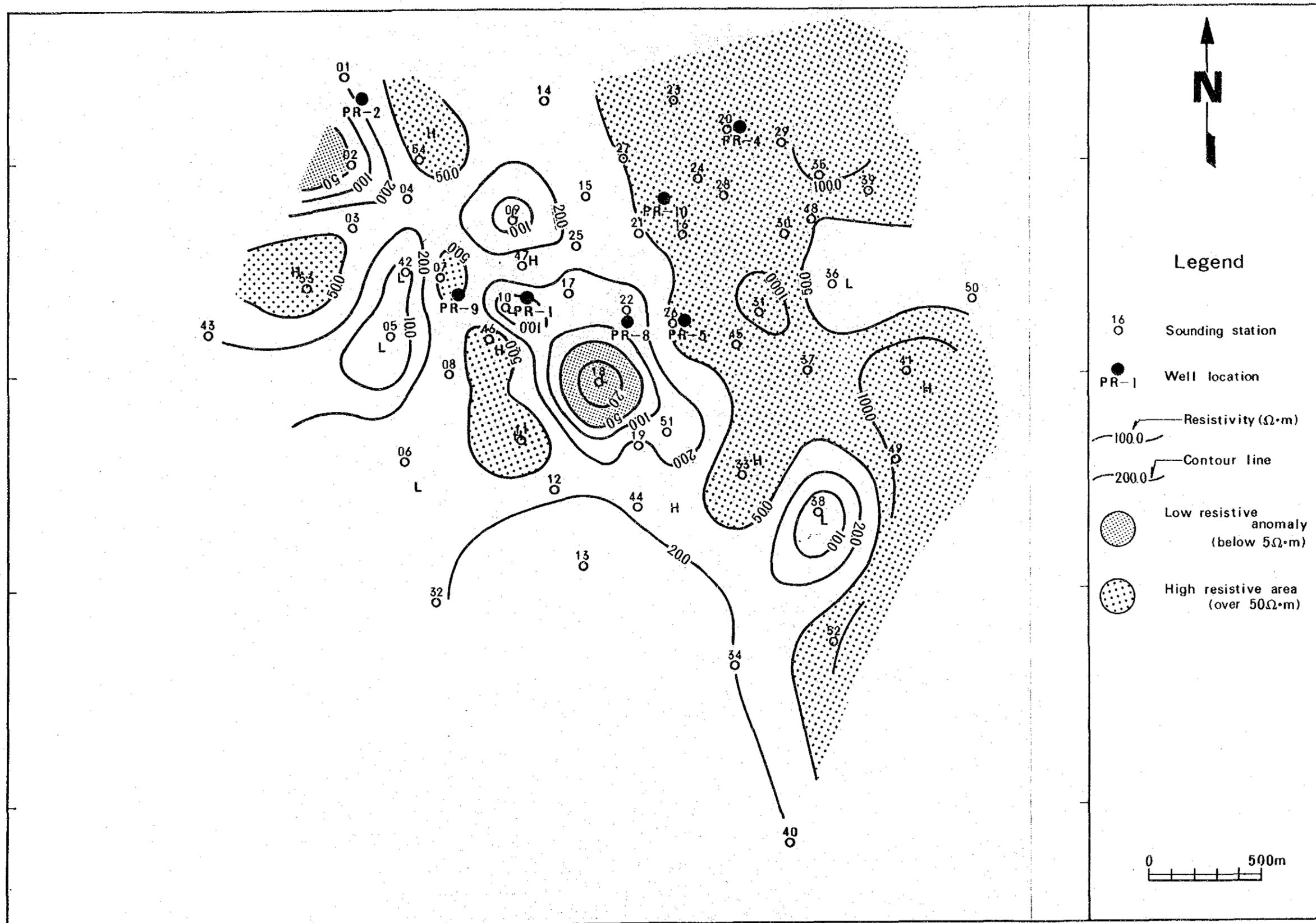


Fig. II. 1-52 Resistivity Map (TE mode; SL -3,000m)





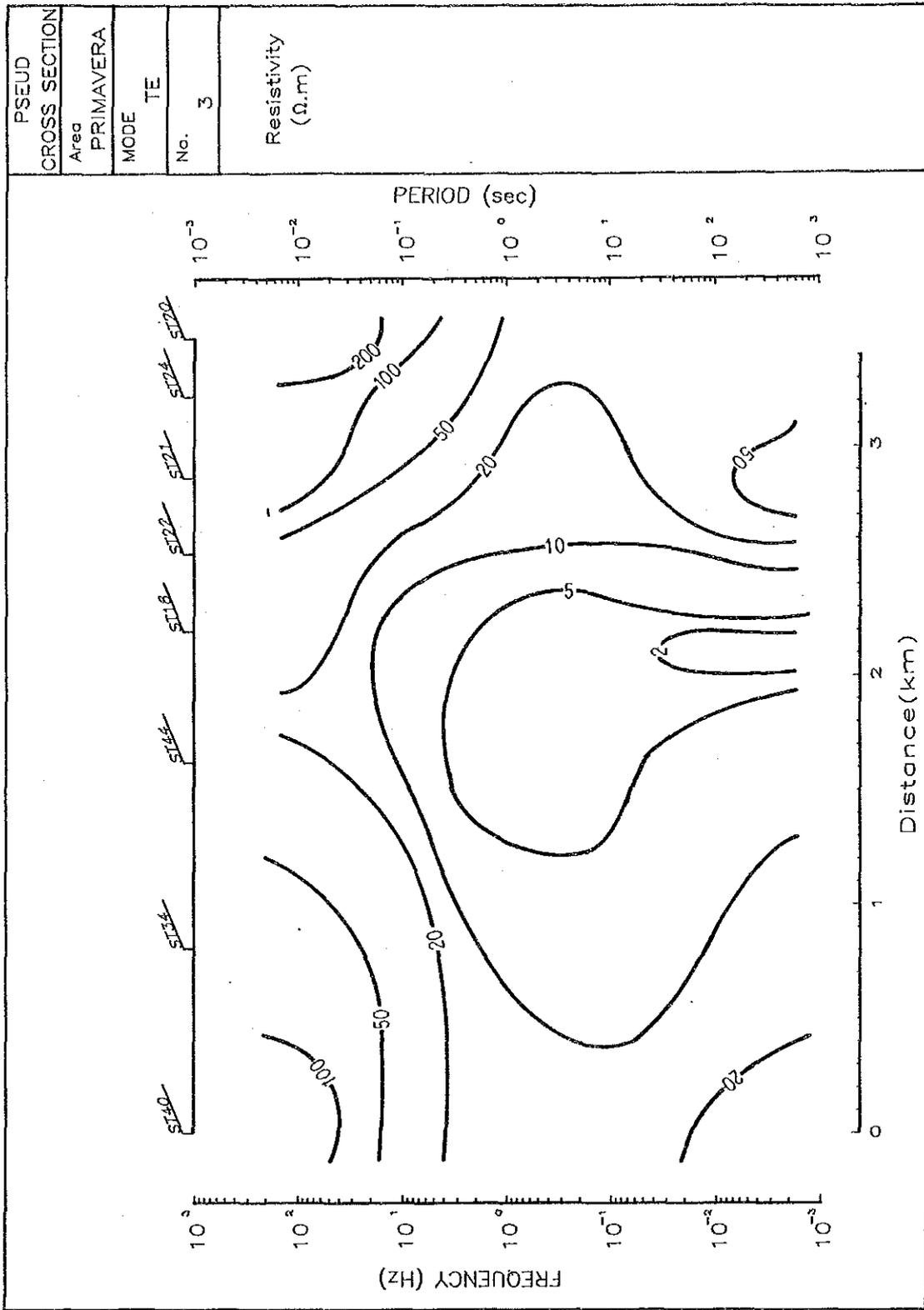


Fig. II. 1-53 Pseudo-Cross Section of Apparent Resistivity (TE mode), Line 3