

## 1-2 物理探査

### 1-2-1 調査目的

バルサパンバ地区において実施された CSAMT 調査は、既存の調査により鉱化ポテンシャルが高いとされている地域の垂直及び平面的な比抵抗分布を明らかにすることにより、鉱床賦存状況を把握することを目的とし、さらに試錘孔位置決定の一助とするために実施された。

調査地域の地形は標高範囲が800m から3,000m と急峻であるが、面積36km<sup>2</sup>・測点数104点の調査を予定通り終了した。

### 1-2-2 調査方法

#### (a) CSAMT 法

CSAMT(Controlled-Source Audio Magneto-telluric)法は、Audio-frequency Magnetotelluric (AMT)法と Magnetotelluric(MT)法における問題点を解決するために Goldstein(1971)及び Goldstein and Strangway(1975)により導入された手法である。

MT 法は、よく知られた探査手法であり石油・地熱等の探査に広く用いられている。この手法では、およそ0.0005Hz から100Hz の広い範囲の周波数について、地球上で発生する自然の電場(E-field)と磁場(H-field)の大きさを測定する。この測定を可聴周波数帯(10Hz~20KHz)について行う場合、Audio-frequency Magnetotelluric(AMT)法とよばれる。MT 法も AMT 法も人工の信号源を必要としないという利点はあるが、自然界の信号は弱く変動も大きい。

これに対し、CSAMT 法では、地面に埋めた電極から制御された電流を流し、この信号源から十分に離れた調査地域において電場と磁場を測定する。

電磁波の透過深度は大地の比抵抗と電磁波の周波数の関数であり、次式により表される。

$$d=503 \sqrt{\rho/f}$$

d: 表皮深度 (Skin depth) (m)

$\rho$ : 比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

f: 周波数 (Hz)

上式で、d は表皮深度(Skin depth)と呼ばれ、電磁波が地表の値の約37%になる深度である。上式より低周波数の方が透過深度が大きく、より深部まで探査が可能であることがわかる。信号源と受信点間の距離が表皮深度(Skin depth)の3倍以上であれば、下記の Cagniard の式により、任意の周波数で測定された電場と磁場の大きさから大地の比抵抗が計算される。

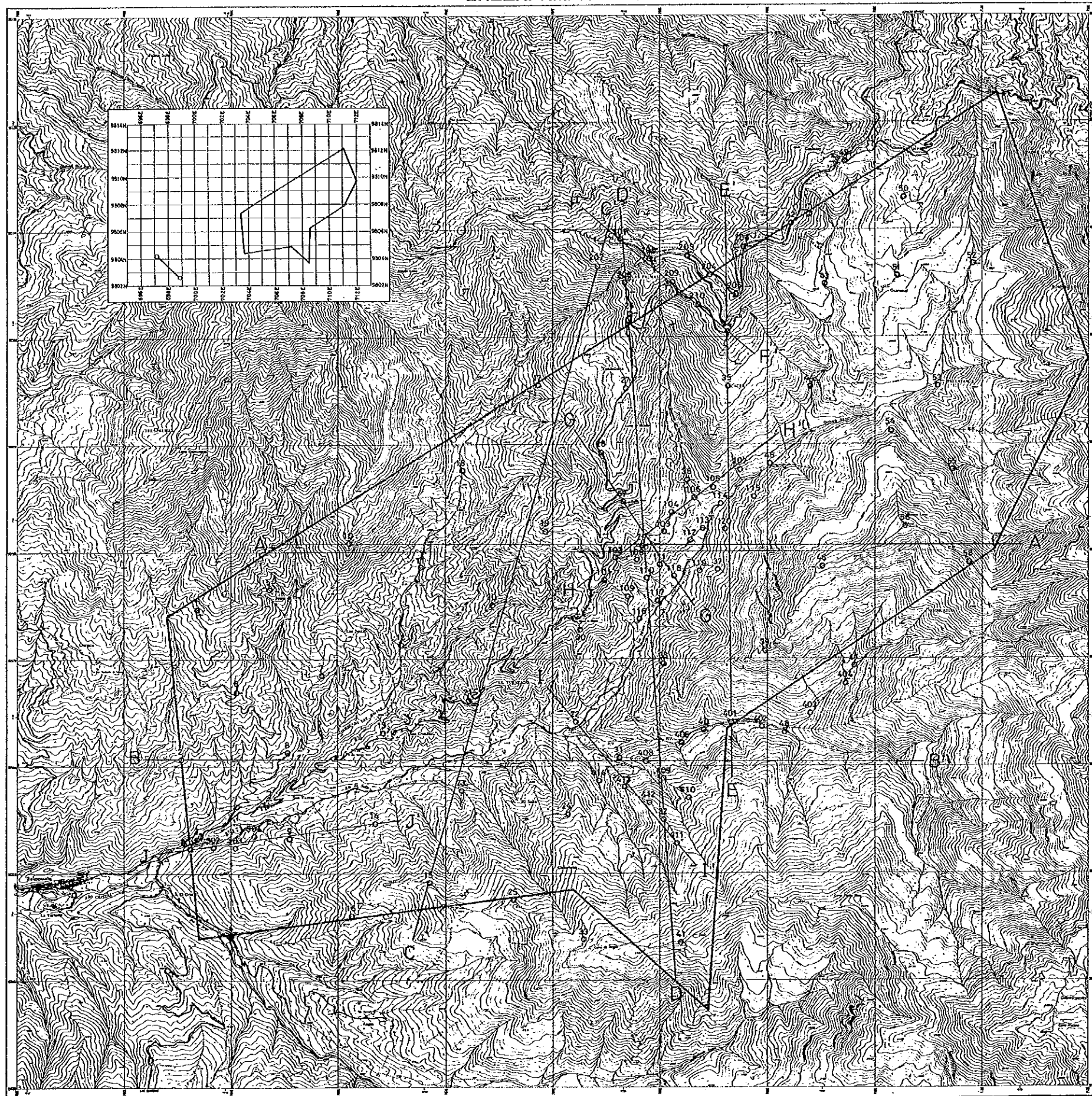
$$\rho_a=1/5f \cdot |E_x/H_y|^2$$

$\rho_a$ : 見掛比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

f: 周波数 (Hz)



BALZAPAMBA



LEGEND





-  Station and No.
-  Section
-  Survey Area
-  Current Electrode

Fig. II - 1 - 8 Location Map of Observed Stations of CSAMT Survey



Ex : 電場 (mV/Km)

Hy : 磁場 (gamma)

広範囲の周波数の電磁場を測定することにより、深度の関数として比抵抗の変化を知ることができる。

(b) 測定方法

電流電極は、受信点において電磁波が平面波として受信できるように、十分遠隔地に設定されなければならない。本調査では、調査地域から南西約5 km離れた Rio El Vergel 沿いに長さ約2.0kmの電極を設置し通電した。電極の方向は、N47°Wとした。調査地域北東部では電流電極と受信点の距離が8 km以上であったが、受信される信号が十分に強いので電流電極の位置を移動する必要がなかった (Fig. II-1-8)。

測点については、まず36km<sup>2</sup>の調査地域全体に均等に58点を配し、その後、鉱化帯の確認された4精査地域に46点を配した。

受信点においては、遠隔地に設置された電流電極から送信される各周波数の信号について電場と磁場を測定する。Fig. II-1-9に測定の概念図を示す。電場は電流電極に平行な非分極電極を用いたダイポールにより測定する。磁場は、水平磁場測定用コイルを電場測定用のダイポールのほぼ中央で地面に設置して測定する。ただし、オペレータの動作による誘導ノイズをおさえるだけでなく、レーシバとの信号の干渉をさけるために、コイルは、電場ダイポールの電線や受信機から数メートル離して設置した。

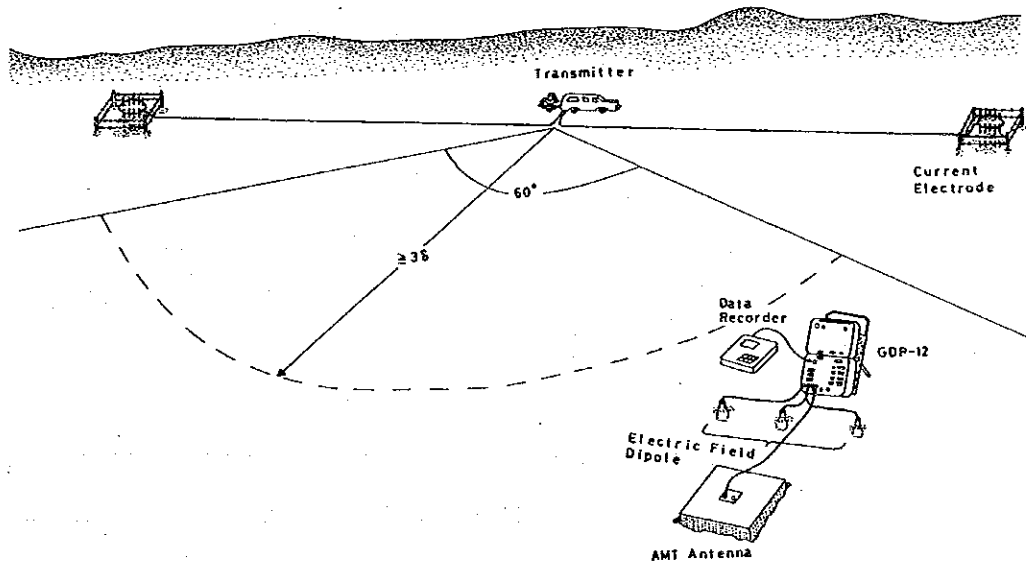


Fig. II-1-9 Schematic Map of CSAMT Survey

電場、磁場及び位相差について、デジタル・スタッキング、フィルター処理、計算処理がその場で行われ前述の Cagniard の式により各周波数の見掛比抵抗が同時に計算される。処理されたデータは、受信機に接続されたデータレコーダの不揮発性メモリに転送され保存される。測定は、各周波数について信頼できるデータが得られるまで最低3回以上行った。メモリに保存されたデータブロックの内容は次の通りである。

ST	: 測点番号	
FRQ	: 周波数番号	
HZ	: 周波数	
GAINTS	: ゲイン	
FILTER	: ノッチフィルター	
STKS	: スタッキング回数	
A-SP	: ダイポール長	
COIL	: コイル チャンネル	
GAIN	: コイル ゲイン	
CRNT	: 送電電流値	(Ampere)
ME	: 測定された電位	(Volt)
PE	: 電場の位相	(radian)
MH	: 測定された誘導電位	(Volt)
PH	: 磁場の位相	(radian)
E	: 電場の大きさ	(Volt/meter)
H	: 磁場の大きさ	(Kilo gamma)
RHO	: Cagniard の見掛比抵抗	( $\Omega \cdot m$ )
PD	: 電場と磁場の位相差	(radian)

本調査では、十分な深度まで情報が得られるように、以下の AMT 帯の10周波数を使用した。即ち、4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1,024, 2,048Hz である。測定された見掛比抵抗と周波数を対数表示でプロットすることにより見掛比抵抗曲線が得られる。

#### (c) 測定機器

調査は、Zonge Engineering & Research Organization, Inc (U. S. A.) 製の CSAMT 測定機器一式により実施したこのシステムは、各周波数の電場と磁場の大きさだけでなく位相も測定可能である。

測定機器は、下記の通りである。

##### 1) 送信機系

a) エンジン ジェネレーター (ZMG-20)

- 出力 20KV, 400Hz
- b) トランスミッター(GGT5)
- 最大出力 10KW
- 最大出力電流 10A
- 最大出力電圧 1,000V
- c) トランスミッター コントローラ (XMT-12)
- 制御周波数範囲 1~2,048Hz

## 2) 受信機系

- a) データ プロセッサ (GDP-12/2GB)
- 周波数範囲 1~2,048Hz
- A/D コンバータ, 50/60Hz ノッチフィルタ, 16Kbyte RAM
- 最小入力電位  $0.2\mu\text{V}$
- b) データレコーダ (DR-1)
- 500Kbyte RAM, RS-232C インターフェース
- c) アンテナコイル (ANT/2)
- 2軸フェライトコイル
- コイル感度  $0.2\text{mV}/\text{gamma}$

## 1-2-3 解析方法

見掛比抵抗は、前述の Cagniard の式により電場と磁場の大きさの比から計算される。ただし、この式は、厳密には電磁場が平面波である地域、すなわち、送信電極と受信点との距離が十分大きい地域でのみなりたつ。一般に、CSAMT 探査では、有効な測定を行うのに十分な強さの電場と磁場を得る必要があり、この送信電極と受信点との距離は制約を受ける。即ち、“平面波”の仮定が妥当な遠隔地点では信号強度が弱く、一方、信号が強い地点（送信電極の近く）では“平面波”の仮定が妥当でなくなる。

送信電極と受信点との距離が表皮深度の3倍より小さい場合、電磁場は“平面波”ではなく、その領域は“ニアフィールド”とよばれている。この“ニアフィールド”では、Cagniard の式による見掛比抵抗は実際の比抵抗より大きくなる。Fig. II-1-10に均質な大地について理論的に計算された Cagniard 見掛比抵抗曲線を示す。“ニアフィールド”における見掛比抵抗曲線は、45度の勾配に示している。これは、周波数が1/2になるごとに見掛比抵抗が2倍になるということを意味する。

“ファーフィールド”から“ニアフィールド”に徐々に変化する地域は“トランジションゾーン”と呼ばれる。

実際の大地は均質ではないので、各周波数で得られた見掛け比抵抗は、地下の真の比抵抗を示しているわけではない。従って、地下の比抵抗構造を解析するために“ニアフィールド”を考慮にいたした1次元多層構造解析を行う。即ち、受信点と送信電極の位置の座標を考慮にいたした上で、多層モデルを仮定し、理論曲線を計算する。この理論曲線を試行錯誤により測定値に一致させることにより初期モデルをきめる。その後、最小自乗法を繰返すことにより、最適な多層モデルを決定する。

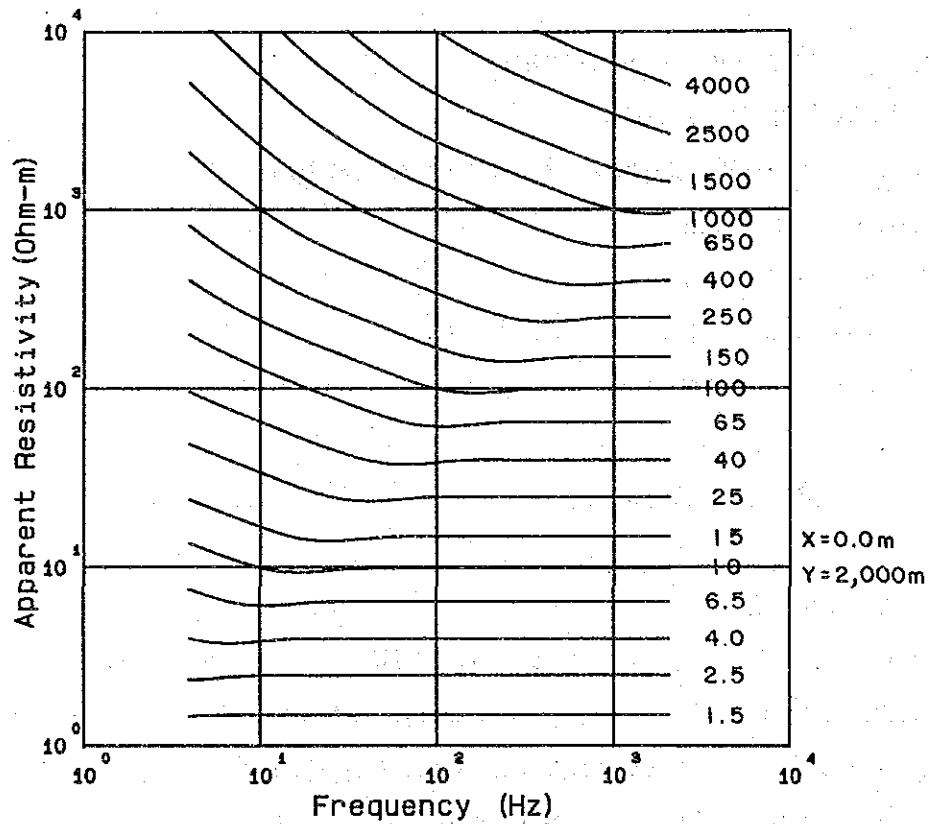


Fig. II - 1 - 10 Example of the Curve by 1-D Analysis



#### 1-2-4 調査・解析結果

##### (a) 岩石試料測定結果

地質により区分された岩石とその比抵抗を一義的に関係つけることは難しいが、Table II-1-5に示すように、一般に新鮮な火成岩、変成岩などの比抵抗は高く、 $10,000\Omega\cdot m$ 以上を示すが、風化などの変質の程度によりかなり比抵抗が変化する。

調査地域の地質は Macuchi 層と花崗閃緑岩の2つに大別される。Macuchi 層は、安山岩、同質凝灰岩、含石英安山岩及び同質凝灰岩よりなり、一部ホルンフェルス化している。

調査地域内で採取した岩石サンプル及び MJE-1, 2, 3 孔のコアの物性測定 (比抵抗, FE 値) の結果では、珪化した岩石、ホルンフェルス化した安山岩及び花崗閃緑岩の比抵抗は高く ( $5,000\sim 10,000\Omega\cdot m$  以上)、含石英安山岩、含石英安山岩質凝灰岩、風化・鉍化変質を受けた安山岩溶岩、花崗閃緑岩は中比抵抗 ( $1,000\sim 2,500\Omega\cdot m$ )、安山岩質凝灰岩類、粘土化した岩石は低比抵抗 ( $1,000\Omega\cdot m$  以下) である。

MJE-1, 2, 3 号孔から採取した硫化物を含むボーリングコア (花崗閃緑岩) は、全般に、新鮮な岩石に比べ低い比抵抗値を示す。

一般に、採取された岩石試料の比抵抗は、現地で測定した地山の比抵抗より高めになるが、サンプル測定結果並びに各測点での一次元比抵抗解析による表層 (第一層) の比抵抗値と表層の岩石の種類を対応させると、調査地域の岩石の比抵抗は大きく次のように分類される。ただし、割れ目の度合い、割れ目を満たす地下水の性質により比抵抗が変化することがある。

ホルンフェルス化した安山岩	$10,000\Omega\cdot m$ 以上
新鮮な花崗閃緑岩、細粒閃緑岩	$5,000\sim 10,000\Omega\cdot m$
変質を受けた花崗閃緑岩	$1,000\sim 1,500\Omega\cdot m$
Macuchi 層 (ホルンフェルスを除く)	$1,000\sim 1,500\Omega\cdot m$
酸性変質を受けた (カオリン) 岩石	$1,000\Omega\cdot m$ 以下

El Torneado 鉍徴地で実施された MJE-1, 2, 3 孔からのコアの室内測定による PFE 値 ( $0.3\sim 3.0$  Hz を使用) と硫化物含有量の関係は、硫化物の含有量が多い (肉眼観察による) ほど FE 値が高い傾向にあり、硫化物含有量  $2\sim 3\%$  とされるものは、 $5\sim 7\%$  の PFE 値を示す。

一方、高 FE 値を示す地表採取試料の中で、「測点28」試料は硫化物含有量が大きいが、他の試料は微量である。しかしながら、これらの試料には細脈状のリモナイト、石英が認められ、微粒の黄鉄鉍の残存している可能性がある。

1980年に MRME/DGGM が同地区で実施した時間領域 IP 法での分極率 (電流切断前の電位  $1V$  に対する残留電位での表示値) は MJE-2, 3 孔付近では約  $50mV$  である (MJE-1 孔付近では測定されていない)。一方、硫化物を含まない新鮮な岩石サンプルの FE 値は、一部を除いて  $2\%$  以下を示す。

Table II - 1 - 5 List of Resistivity and FE of Rock Samples

Sample No.	Location	Rock name	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	FE (%)
1	Station 4	granodiorite	1,530	1.0
2	Station 5	holnfels	227,000	1.5
3	Station 11	holnfels	100,900	2.6
4	Station 14	fine-grained granodiorite	12,200	4.6
5	Station 24	fine-grained granodiorite (silicification)	6,390	4.0
6	Station 28	holnfels	127,000	3.0
7	Station 33	quartz bearing andesitic tuff (silicification)	15,000	2.1
8	Station 36	quartz bearing andesitic tuff	2,760	2.3
9	Station 39	holnfels	23,600	2.5
10	Station 41	quartz bearing andesite lava	113,000	2.6
11	Station 44	andesite lava (silicification)	805	1.6
12	Station 46	quartz bearing andesitic tuff	7,290	1.3
13	Station 49	quartz bearing andesitic tuff	2,120	2.4
14	Station 55	andesite lava (silicification)	11,500	1.5
15	Station 202	quartz bearing andesitic tuff	139	3.1
16	Station 401	granodiorite	7,720	3.2
17	Station 405	granodiorite	16,150	3.6
18	Station 413	grossular-quartz vein	2,660	0.5
19	MJE-1 200.0 m	granodiorite	5,320	2.9
20	MJE-1 300.0 m	granodiorite	2,270	5.4
21	MJE-2 100.4 m	granodiorite	896	1.8
22	MJE-2 190.0 m	granodiorite	1,500	4.6
23	MJE-2 300.0 m	granodiorite	13,170	0.6
24	MJE-2 273.5 m	granodiorite	1,060	7.3
25	MJE-2 291.0 m	granodiorite	3,830	5.4

し、時間領域 IP 法によるバックグラウンドの分極率は約20mV であることから、周波数領域 IP 法によるサンプル測定結果の FE 値と MRME/DGGM の調査による時間領域 IP の分極率とはかなり整合性が良いといえる。

時間領域 IP 法の結果と地質調査の結果を比較検討すると、分極率40mV 以上の IP 異常域は同鉱化帯の分布域を中心にして北東方向に延びる傾向があり、南に向かって急激に分極率が小さくなっている。北側は IP 測線が短いため IP 異常域の分布が定かではない。MJE-2, 3 孔は、分極率50mV 以上の IP 異常域に位置し、両孔付近では硫化物を伴う鉱化変質が強いことを示唆している。しかしながら、IP 異常域が、地表に露出する鉱化帯分布域より広く認められることから、鉱化帯周辺の母岩に硫化物の鉱染が広く及んでいることが考えられる。

#### (b) 見掛比抵抗平面図

各測点で測定された見掛比抵抗値を用い、周波数ごとに見掛比抵抗平面図を作成した。電磁波は、低周波数になるほど減衰が小さく、目安となる探査深度 (Skin depth) が  $d=503 \sqrt{\rho/f}$  で与えられるように、低周波数の見掛比抵抗平面図ほど深部の比抵抗構造を反映している。本文中には、周波数による見掛比抵抗の変化を考慮し、1,024Hz、256Hz、64Hz 及び16Hz の4種類の見掛比抵抗平面図 (Fig. II-1-11~Fig. II-1-14) を示す。

主な鉱徴地では、低見掛比抵抗と高見掛比抵抗の対がみられ、この特徴が鉱化・変質に関係するものと考えられる。

また、高見掛比抵抗、低見掛比抵抗は NE-SW 方向に延びる傾向がみられ、この地域全体に卓越する地質構造の方向性を反映していると考えられる。

測点38, 39, 46, 56, 58など Bunque Roma 付近の尾根上の測点では全般に低見掛比抵抗を示しているが、鉱化・変質帯は認められていない。一般に、尾根上の測定では地形の影響が現れ、定性的ではあるが、測定値は実際より小さくなることが知られている。さらに、尾根の方向が最も地形の影響を受けやすい電流電極にほぼ直角であることから、この低見掛比抵抗は地形の影響によるものであり鉱化・変質とは関係がないと考えられる。

#### (c) 比抵抗構造平面図

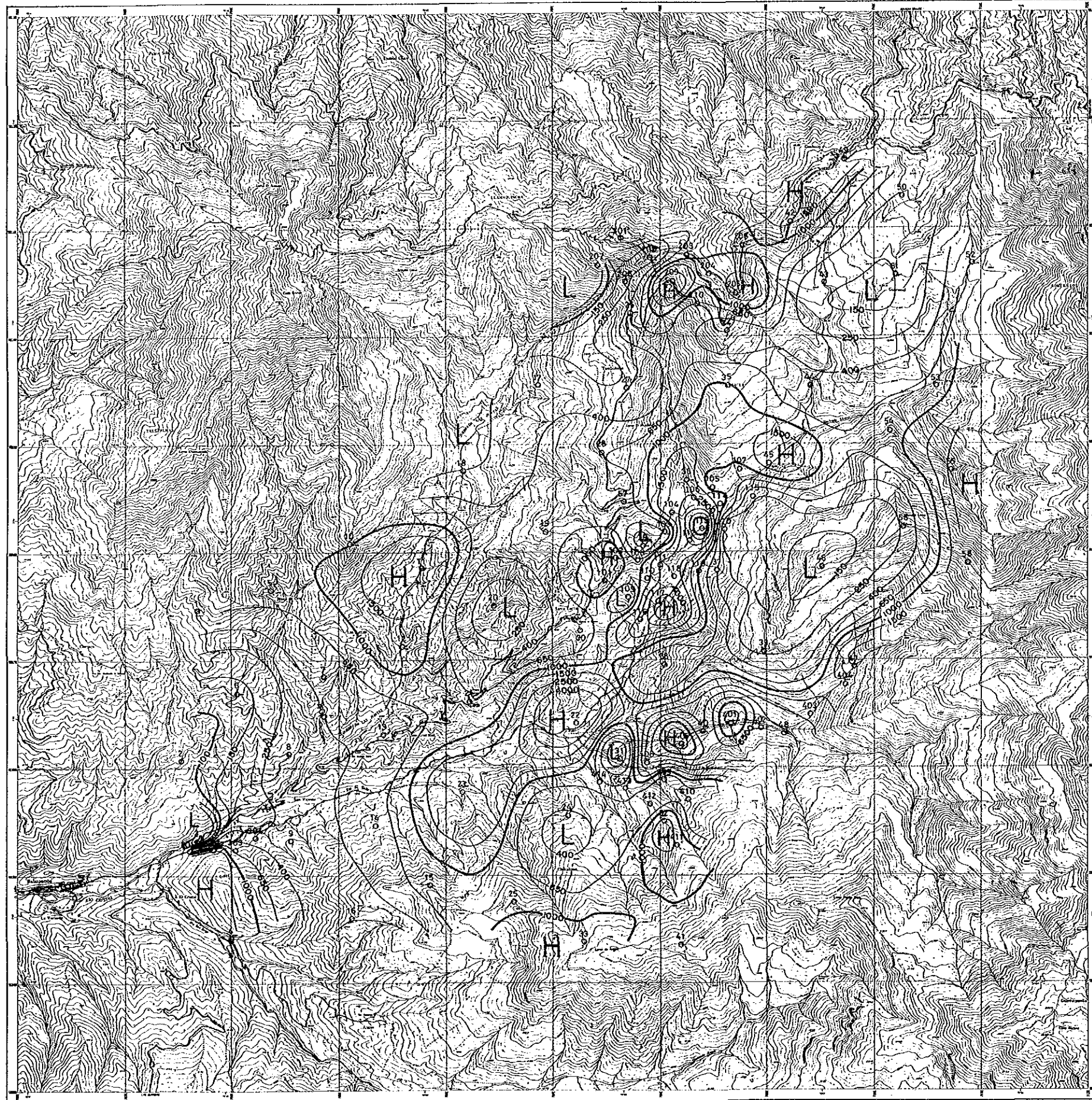
各測点ごとに実施した一次元多層構造解析より得られた層厚・比抵抗をもとに、地表下一定深度での比抵抗構造平面図を作成した。作成した平面図の深度は、地表下100m, 200m, 500m 及び1,000 m である (Fig. II-1-15~Fig. II-1-18)。

主な鉱徴地付近の比抵抗構造の特徴として、鉱徴地は低比抵抗と高比抵抗が対になった境界部に位置する傾向がみられる。すなわち、El Torneo 鉱化帯では測点29と108、Osohuayco 鉱化帯では測点31と408、El Cristal 鉱化帯では測点3, 301及び302、また Las Palmas 変質帯では測点202, 203及び209がその境界にあたる。この境界部は Las Palmas 変質帯を除いて、いずれも花崗閃緑岩





BALZAPAMBA



LEGEND



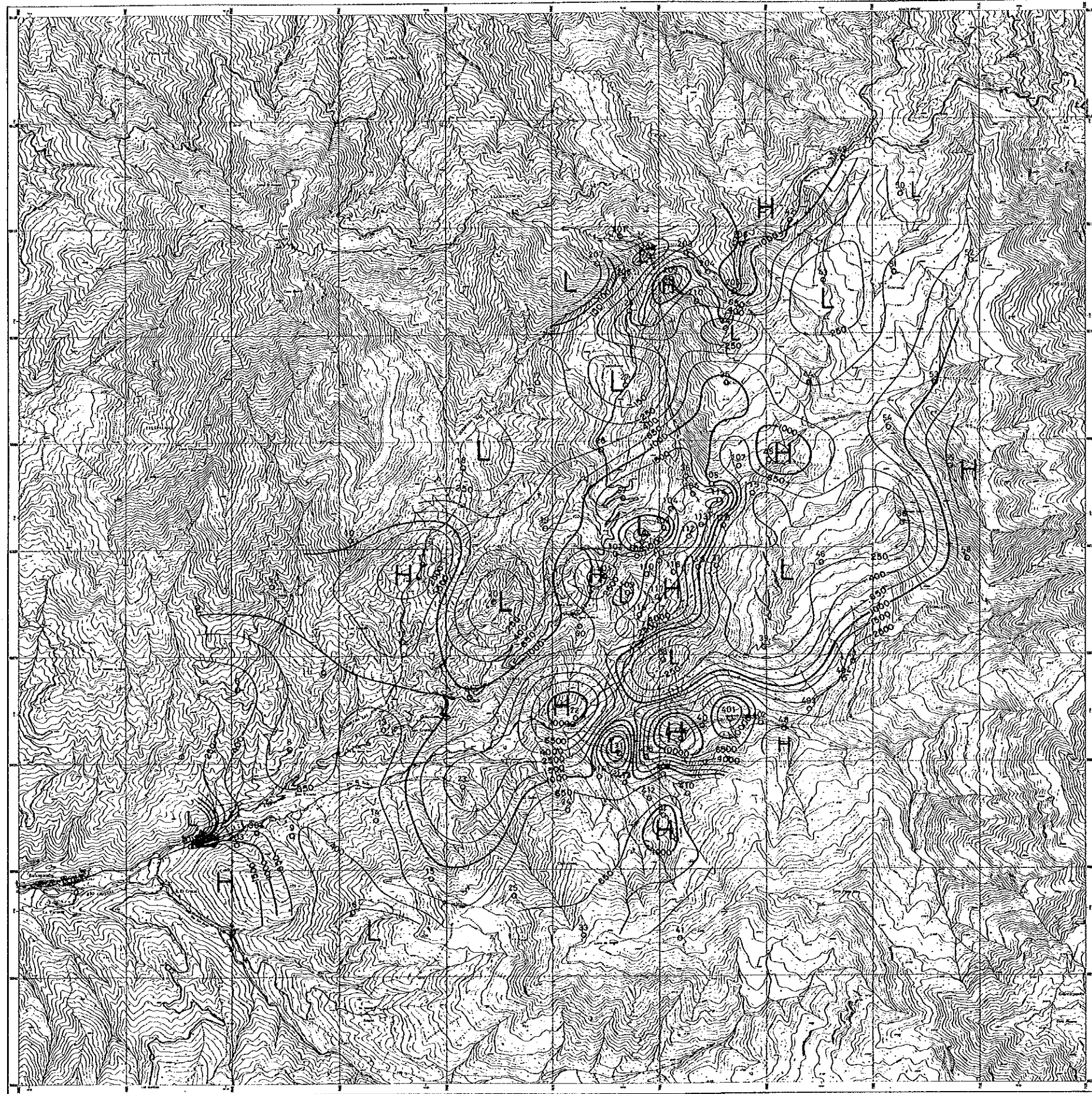
-  Station and No.
-  Apparent Resistivity Contour ( $\Omega\cdot m$ )
- H** High Apparent Resistivity
- L** Low Apparent Resistivity

Fig. II-1-11 Apparent Resistivity Plan Map(1,024Hz)





BALZAPAMBA



LEGEND





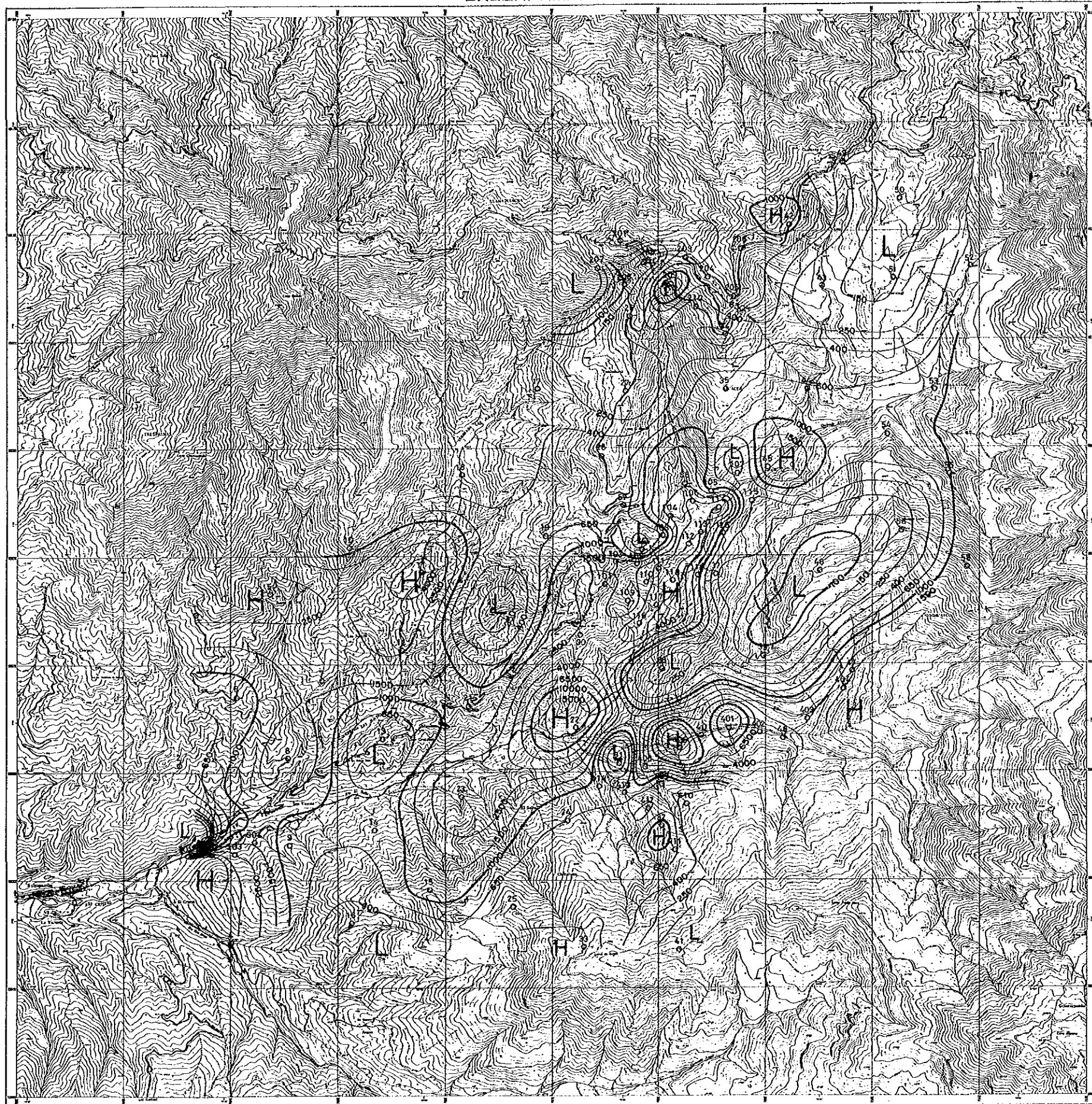
-  Station and No.
-  Apparent Resistivity Contour ( $\Omega \cdot m$ )
-  High Apparent Resistivity
-  Low Apparent Resistivity

Fig. II - 1 - 12 Apparent Resistivity Plan Map ( 256Hz)





BALZAPAMBA



LEGEND





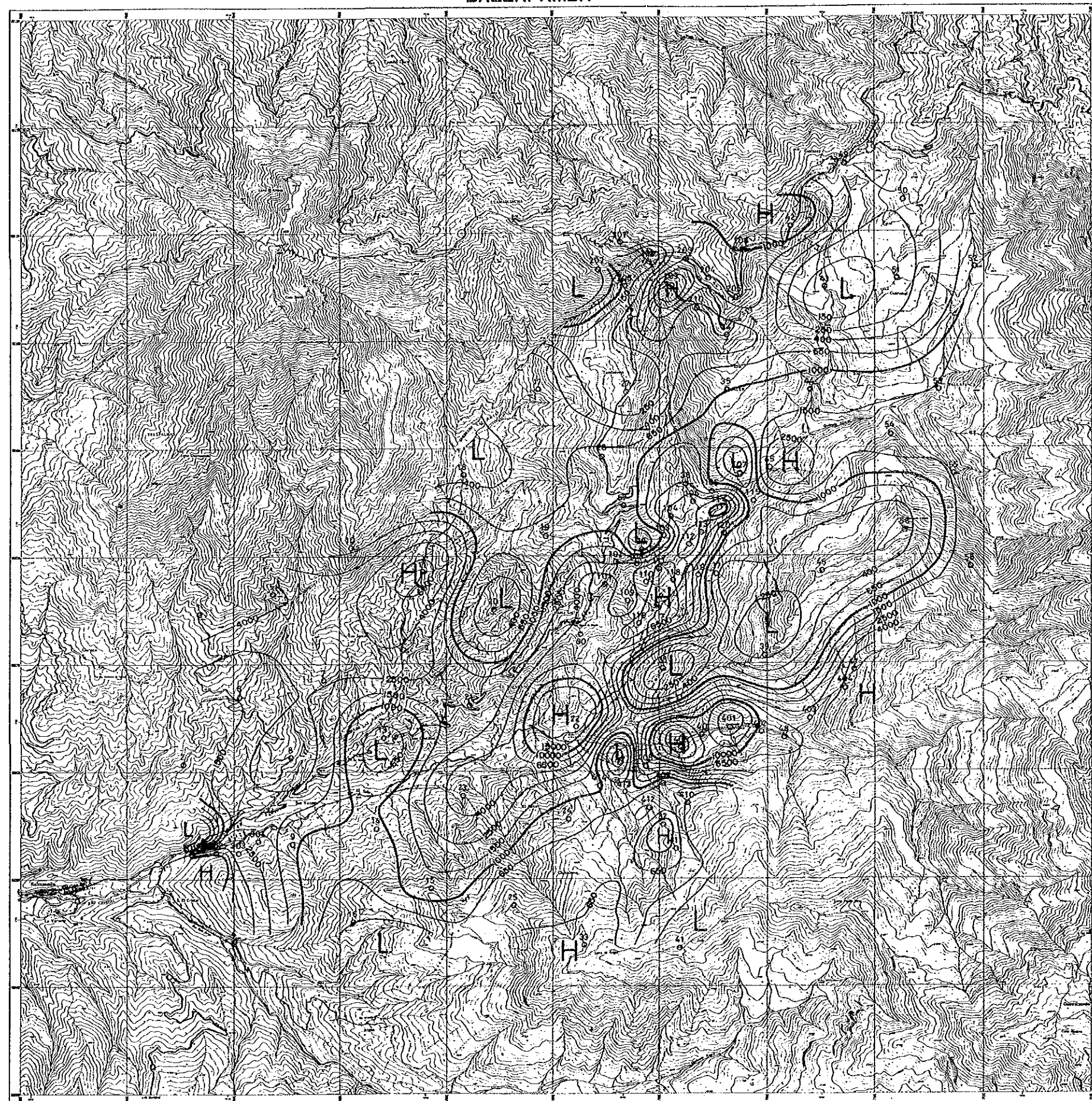
-  Station and No.
-  Apparent Resistivity Contour (0-m)
-  High Apparent Resistivity
-  Low Apparent Resistivity



Fig. II - 1 - 13 Apparent Resistivity Plan Map ( 64Hz)



BALZAPAMBA



LEGEND



-  Station and No.
-  Apparent Resistivity Contour ( $\Omega\cdot m$ )
- H** High Apparent Resistivity
- L** Low Apparent Resistivity

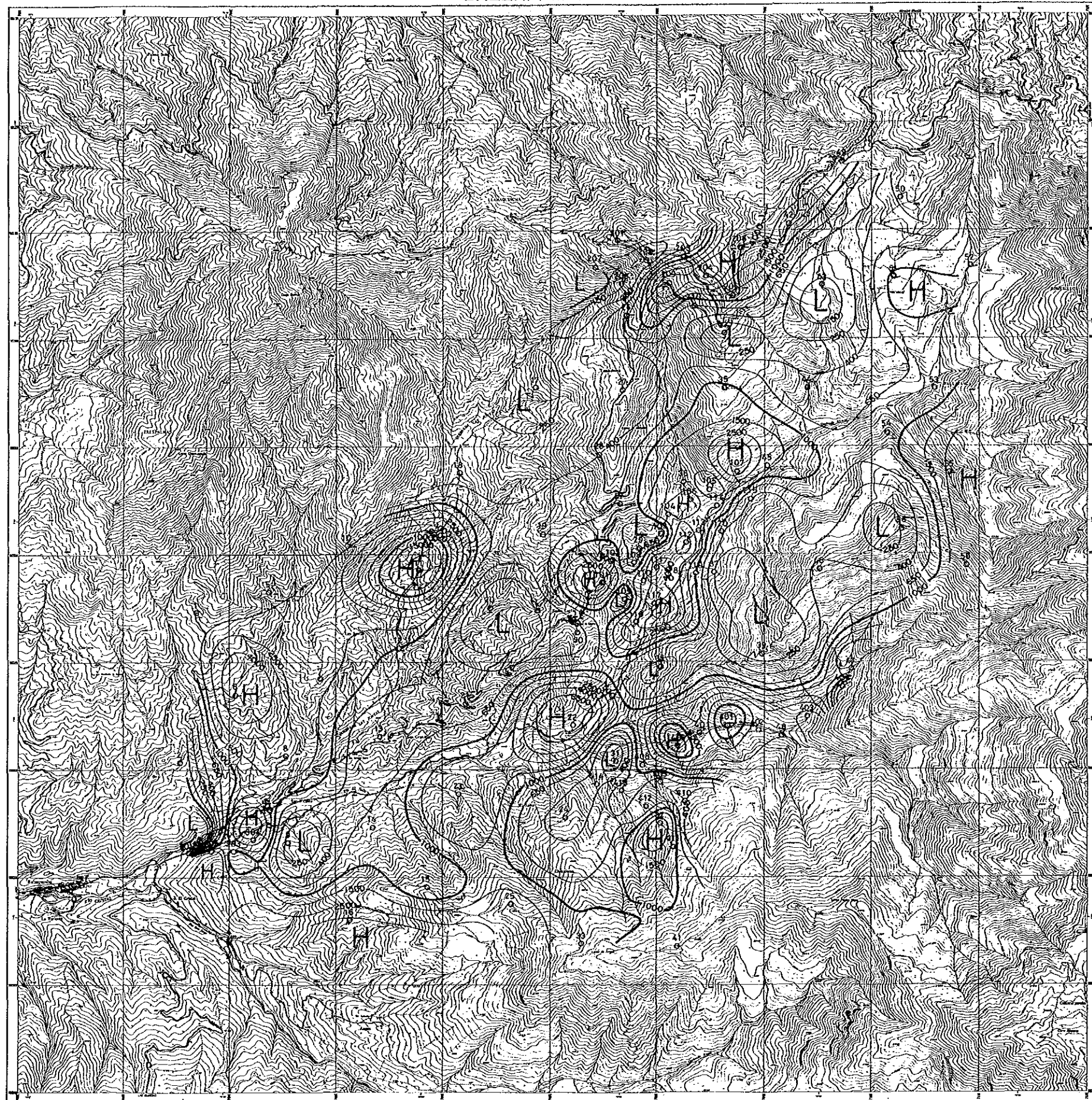


Fig. II - 1 - 14 Apparent Resistivity Plan Map( 16Hz)





BALZAPAMBA



LEGEND

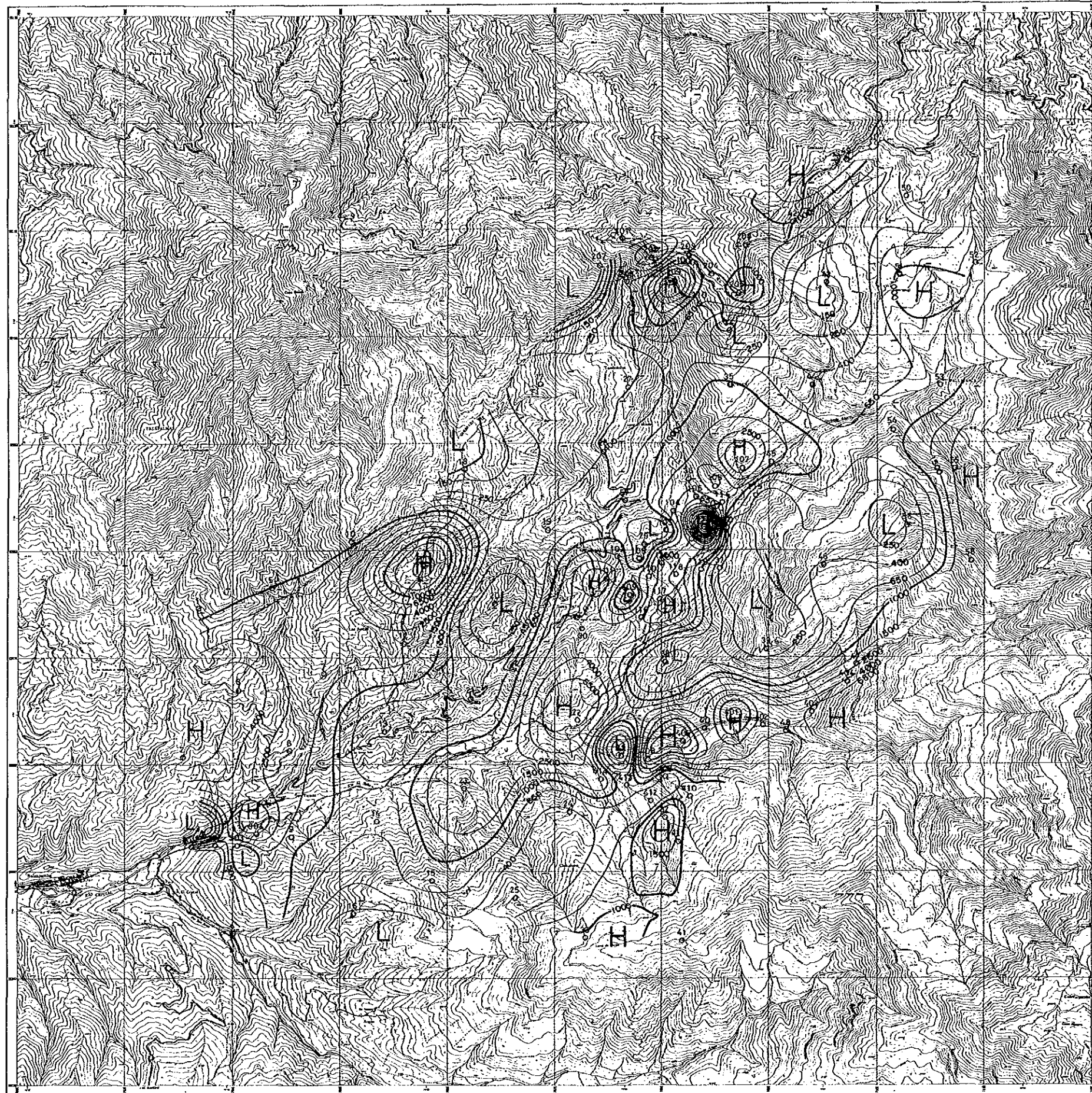
- 23  
0 Station and No.
- 55  
100 Analyzed Resistivity Contour ( $\Omega \cdot m$ )
- H High Analyzed Resistivity
- L Low Analyzed Resistivity



Fig. II - 1 - 15 Analyzed Resistivity Plan Map ( 100m depth)



BALZAPAMBA



LEGEND





-  Station and No.
-  Analyzed Resistivity Contour ( $\Omega \cdot m$ )
-  H High Analyzed Resistivity
-  L Low Analyzed Resistivity

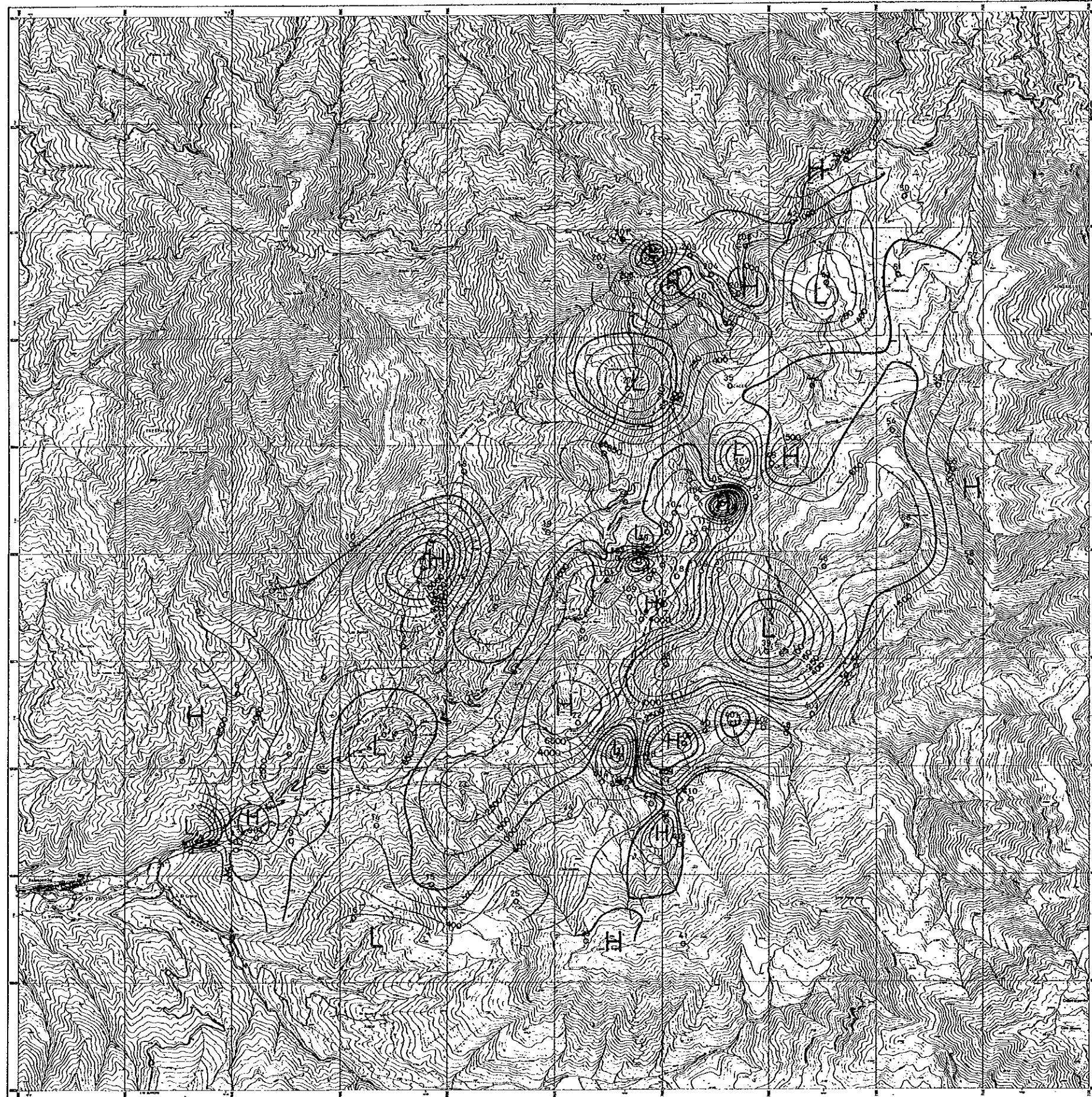


Fig. II-1-16 Analyzed Resistivity Plan Map( 200m depth)





BALZAPAMBA



LEGEND



-  Station and No.
-  Analyzed Resistivity Contour ( $\Omega\cdot m$ )
- H** High Analyzed Resistivity
- L** Low Analyzed Resistivity



Fig. II - 1 - 17 Analyzed Resistivity Plan Map( 500m depth)







と Macuchi 層の境界部に相当し、その付近にみられる鉱化・変質帯はこの境界部の低比抵抗側にみられる。

この境界部の低比抵抗は El Torneado 鉱化帯では、測点29のみ深部までみられ、Osohuayco 鉱化帯では測点409,410の地表から南東方向に測点32,411の深部まで延びている。一方、El Cristal 鉱化帯、Las Palmas 変質帯では、低比抵抗は深部になるとはっきりせず、特に、Las Palmas 変質帯の深部では比抵抗は低くない。したがって、同地区の鉱化・変質は浅部に限られている可能性が大きい。さらに、上記の鉱徴地以外に、低比抵抗と高比抵抗が対になった境界部として測点11、19及び20が挙げられる。この境界部には Las Juntas 変質帯がみられ興味深い地区であるが、高比抵抗を示しているのが測点11の一点のみであり、また、精査地域ではないため詳細な比抵抗構造は不明である。

測点38、39、46、56、58など Bunque Roma 付近の尾根上の測点は全般に低比抵抗を示しているが、鉱化・変質帯は認められない。これは、見掛比抵抗平面図で述べたように、地形の影響によるものであり鉱化・変質とは関係がないと考えられる。

また、調査地域西部の花崗閃緑岩の分布域の比抵抗が $1,000\Omega\cdot m$ 前後と低いのは主に風化によるものと思われる。

一方、見掛比抵抗平面図と同様に、高・低両比抵抗が NE-SW 方向に延びて分布する傾向がみられる。本地域には NNE-SSW～NE-SW 系及び NNW-SSE 系の断層構造が発達しており、この方向性は本地域全体に卓越する地質構造の方向性を反映していると考えられる。

#### (d) 測定結果断面

調査地域内に10本の断面線を設定した。各断面図には見掛比抵抗断面と比抵抗構造断面を示している。

#### A 断面(Fig. II-1-19)

本断面は、調査地域のほぼ中央を東西に切り、El Torneado 鉱徴地を通る断面である。

見掛比抵抗断面図でも明瞭であるが、測点29、103には $500\Omega\cdot m$ 前後の低比抵抗がみられる。両測点周辺の地質は、花崗閃緑岩であり、その比抵抗は、岩石試料測定結果及び地質図と解析比抵抗との対比から $5,000\sim 10,000\Omega\cdot m$ 程度と推定される。したがって、 $500\Omega\cdot m$ 前後の比抵抗は花崗閃緑岩としては、極端に低い比抵抗であり、測点29、103では、粘土化変質を受けていることが考えられ、鉱化帯の賦存の可能性も大きい。特に、測点29では、浅部に厚さ約40m、約 $120\Omega\cdot m$ という非常に低い比抵抗層があり、深部でも $560\Omega\cdot m$ の低比抵抗となっていることから、鉱床賦存の可能性は極めて大きいと考えられる。実際、測点29付近で実施した MJE-3 孔のボーリング調査では、潜頭性鉱化帯が捕捉されている。一方、変質が及んでいないと考えられる東側の測点112、113では $5,000\sim 10,000\Omega\cdot m$ の高比抵抗を示している。