No. 7

メキシコ合衆国ラ・プリマベーラ
地熱開発計画調査

中間報告書

昭和61年9月

国際協力事業団

615
643
MPN
LIBRA

企計資
[redacted]
86-124

JICA LIBRARY
1029939[4]
15826

メキシコ合衆国ラ・プリマベーラ
地熱開発計画調査

中間報告書

昭和61年9月

国際協力事業団

国際協力事業団	
受入月日 '87.1.20	615
	643
登録No. 15826	MPN

ま え が き

ＪＩＣＡ調査団によるメキシコ合衆国ラ・プリマベーラ地熱地域のフルスケール調査は、昭和６０年６月から昭和６１年２月までの間に現地において行われ、その後のデータ解析および解釈によって当地域の地熱貯留層構造と拡がりが明らかとなった。さらに、最終的には調査井の掘削ターゲットを選定した。

これらの結果をふまえ、昭和６１年７月２１日から８月３日の間に、C.F.E. に赴き調査結果を報告し、討論すると共に、現地においてターゲット地点を決定した。

本報告書では、フルスケール調査結果の詳細を述べると共に、地熱貯留層に関する知見、次段階調査への提言および調査井の掘削ターゲットについて取りまとめたものである。本報告書を作成するにあたり、現地調査において多大なる協力をいただいたC.F.E. の関係各位に対し、深甚の謝意を表する。

目　　次

まえがき

Ⅰ．総　説 …… 1

Ⅰ－1　調査目的 …… 1

Ⅰ－2　現地調査期間 …… 1

Ⅰ－3　調査結果の要点 …… 1

(1)　層　序 …… 1

(2)　フラクチャーの分布 …… 2

(3)　坑井内逸泥箇所 …… 2

(4)　地層の透水性 …… 2

(5)　地下温度の分布 …… 3

(6)　地熱流体の化学性状とその流動状態 …… 3

Ⅱ．調査結果 …… 7

Ⅱ－1　地質調査 …… 7

(1)　地熱徴候地域周辺の地質 …… 7

(2)　フラクチャー調査 …… 8

(3)　地表変質帯調査 …… 9

(4)　コア・カッティングスの調査 …… 10

Ⅱ－2　地化学調査 …… 35

(1)　土壌水銀調査 …… 35

(2)　坑井流体調査 …… 35

Ⅱ－3　重力探査 …… 48

(1)　測定およびデータ処理 …… 48

(2)　Sierra La Primavera 地域のブーゲー異常分布の特徴 …… 48

(3)　2次元断面解析 …… 49

(4)　広域のブーゲー異常分布の特徴 …… 50

Ⅱ－4　電気探査（MT法） …… 66

(1)　測定およびデータ処理 …… 66

(2)　モデルインバージョン解析と構造指標 …… 66

(3) 水平断面解析 …… 67
(4) 垂直断面解析 …… 68
Ⅱ－5 坑井試験 …… 100
(1) 測定方法および測定状況 …… 100
(2) ＰＲ－１の測定結果 …… 100
(3) ＰＲ－８の測定結果 …… 101
(4) 透水量係数の算出 …… 101
Ⅱ－6 地熱貯留層に関する知見 …… 111
(1) 貯留層構造 …… 111
(2) 貯留層の拡がり …… 111

Ⅲ. 次段階調査への提言 …… 115
Ⅲ－1 調査井掘削の目的 …… 115
Ⅲ－2 ターゲット選定の理由 …… 115
Ⅲ－3 調査井掘削に伴う調査計画 …… 116

ま と め …… 123

添付資料 コアの残留磁気と応力場復元の原資料

図・表リスト

Page

Fig. 1. Locality map of survey area 5

2. Geological profile and stress trajectory 13

3. Geological map 15

4. Principal stress axis of each measuring point
σ_1 : maximum principal stress axis 17

5. Tensional fracture map 19

6. Orientation of tensional fracture in the 21
Tala Tuff at 35 measuring points

7. Zoning map of rock alternation 23

8. Columnar section of well PR-1 25

9. Columnar section of well PR-2 27

10. Columnar section of well PR-5 29

11. Columnar section of well PR-8 31

12. Profile of minimum homogenization 33
temperature

13. Cumulative frequency of Hg content 38
in soil sample

14. Distribution map of Hg concentration 39
in soil

15. Relationship between enthalpy and chloride 41
concentration in deep hot water

16. Oxygen-18 and Deuterium compositions of 42
PR-1, PR-8 hot water and hot springs

17. Relationship between He/Ar and N_2/Ar ratio 43
in geothermal gases discharge from
PR-1 and PR-8

18. Bouguer anomaly map ρ = 2.00g/cm^3 53

19. Third-order trend surface 55

20. Residual of third-order trend surface 57

Fig. 21. 2-dimentional gravity analysis, lines A-A' B-B' and C-C' show in Fig. 17 59

22. Structural analizing map of gravity survey 61

23. Regional Bouguer anomaly map ρ = 2.20g/cm^3 63

24. Location and line map of MT survey 71

25. Outline of MT data acquisition system 73

26. Comparison with field processor and final data processing, station 07 74

27. Flowchart of 1-D model inversion 75

28. Example of 1-D model inversion result, station 05 76

29. Distribution map of Tipper magnitude, period = 30 sec. 77

30. Distribution map of Skew, period = 30 sec. 79

31. Apparent resistivity map (TE mode), period = 30 sec. 81

32. Resistivity map (TE mode), Om above sea level 83

33. Resistivity map (TE mode), 500m below sea level 85

34. Apparent resistivity pseudo-cross section (TE mode), line 3 87

35. Resistivity cross section (TE mode), line 3 89

36. 1-D model cross section, line B. 91

37. 1-D model cross section, line 3. 93

38. 2-D model cross section, line B. 95

39. 2-D model cross section, line 3. 97

40. Downhole temperature and pressure curves of PR-1 in the productive condition. 104

41. Downhole temperature and pressure curves of PR-8 in the productive condition 105

Fig. 42. Conceptual geothermal reservoir model in La Primavera 113

43. Map showing various parameters for well target selection ... 119

44. Well layout of PR-11 121

Table 1. Remanent Magnetization of cores 34

2. Mercury concentration value in soil 44

3. Chemical composition of well discharge sample .. 45

4. Chemical geothermometer 47

5. Densities of rock samples 65

6. Recording band width, parameter and duration of MT survey 99

7. Situation of the well test for PR-1 106

8. Situation of the well test for PR-8 106

9. Results of measurement for PR-1 107

10. Results of measurement for PR-8 108

11. List of parameters used in calculation of kh for PR-1 109

12. List of parameters used in calculation of kh for PR-8 110

13. Results of calculation of kh 110

14. Respective undertaking for the exploration wells 122

I. 総　　説

Ⅰ. 総　　説

Ⅰ－1　調査目的

ラ・プリマベーラ地域における地熱開発計画調査の目的は、地質調査、地化学調査、重力探査、電気探査（ＭＴ法）の結果とC.F.E.が掘削した調査井から得られた資料および坑井試験等の結果を総合的に解析し、ラ・プリマベーラ地域の地熱貯留層を評価し、地熱発電開発規模を策定することにある。

Ⅰ－2　現地調査期間

６月１２日～８月　９日	地　質　調　査　（地質担当４名）
７月２４日～９月２０日	第１回地化学調査（地化学担当２名）
	重　力　探　査　（重力担当２名）
１１月２７日～１月３１日	電気探査(ＭＴ法)（電気探査担当３名）
１月２１日～２月１４日	第２回地化学調査（地化学担当１名）
１月２１日～２月２７日	坑　井　試　験　（試験担当２名）

Ⅰ－3　調査結果の要点

調査地域位置図をFig. 1に示す。

(1)　層　　序

ＰＲ－９＃2,840～2,980mには花崗閃緑岩および石英モンゾニ岩の"基盤岩類"が認められ、その上位にはCordilleran Volcanicsに属する玄武岩質安山岩、流紋岩あるいは同質凝灰岩が約2,500mの厚さで重なっている。このVolcanicsの上位には、Sierra La Primaveraカルデラの形成に伴って生じた火砕流堆積物（Tala Tuff）が約500mの厚さで載っている。Tala Tuffの上位には、陥没により形成されたカルデラ湖に堆積した湖成層が拡がり、特徴的な巨大軽石層を含んでいる。

カルデラドームに起因する流紋岩が湖成層の下位および上位にあり、本地域北半分に広く分布している。

(2) フラクチャーの分布

本地域の地表地質はNE－SW性の正断層によって切られ、地表でみられる酸性変質帯の方向および土壌水銀の高濃度分布もこのNE－SW性に一致している。このNE－SW性のフラクチャーが地下深部まで延びているかどうか検討した結果、地下1,000m程度まで地表でうけた応力場と調和的な応力場を示すことから、Cordilleran Volcanics 上部まで上記のフラクチャーを延長してよいと判断された。

本地域の主たる地熱貯留層に当るCordilleran Volcanics 下部のフラクチャーについては、カルデラ周辺に露出する同地層の調査の結果からNW－SE性のフラクチャーが主であることが判明した。この事は、MT法による電気探査によって得られた深部の低比抵抗帯が、PR－8の南側でNW－SE性の方向を示すこととも一致している。すなわち、地下1,000m以深ではNE－SW性ではなく、逆にNW－SE性のフラクチャーが卓越しているとみなされる。このNW－SE性の深部のフラクチャーは、カルデラ形成後のresurgent uplift の頂部がこの付近に位置し、uplift の影響の強い高角のフラクチャーで構成されているものと考えられる。

なお、地表でみられるNW－SE性の断層はこの深部フラクチャーと違う性質のフラクチャーであり、両者が連結しているかどうかは不明である。

(3) 坑井内逸泥箇所

これまで掘さくされた坑井の逸泥は、Tala Tuff 中とCordilleran Volcanics 下部に多く発生している。Tala Tuff 中の逸泥箇所に当るフラクチャーに規則性が認められないので、このフラクチャーは火砕流が冷却する時の熱応力によって生じたものとみなされる。Cordilleran Volcanics 中の逸泥は、(2)で述べたNW－SE性のフラクチャーに遭遇することによって引き起されたものである。現在、蒸気を噴出しているフラクチャーは、本Volcanics 中の1,800m台の全量逸泥と対応している。

(4) 地層の透水性

坑井試験の段階的圧力測定から坑井周辺の透水量係数を算出したところ、PR－1では $Kh = 7.6 \times 10^{-13} m^3$，PR－8では $Kh = 2.1 \times 10^{-13} m^3$ という値が得られた。各々の値を絶対値としてみると1 darcy・m（$10^{-12} m^3$）以下であり著しく透水性が良いとはいいがたい。このようにPR－1，PR－8の両坑井とも透水性が特に大きくないにも拘らず優勢な蒸気（PR－1：坑口圧36kg／cm²Gで総流量97 t／H，PR－8：坑口圧7kg／cm²Gで総流量105 t／H）が得られているのは極めて高温の流体のためと考えられる。

(5) 地下温度の分布

各坑井の坑内温度測定およびカッティングスを用いての流体包有物の最低充填温度測定結果によると、ＰＲ－１，ＰＲ－８付近に300°C近くの高温のupflow帯が認められた。当地域の地熱流体はこの付近の地下深部から上昇していることがわかる。なお、ＰＲ－１，ＰＲ－８の坑井試験の結果から両坑井ともに噴気流体は坑井近傍の地層内でフラッシュし、坑井内では二相フラッシュ流であることも判明した。

(6) 地熱流体の化学性状とその流動状態

地下での熱水の流動状態を推測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塩素濃度の関係を求めたところ、ＰＲ－１近傍に存在する深部熱水がＰＲ－１からＰＲ－８→ＰＲ－５→ＰＲ－４へと流動する間にエンタルピーおよび塩素濃度の低い地下水と混合する状態にあることが判明した。なお、ＰＲ－２については独立した熱水貯留によるものと考えられる。

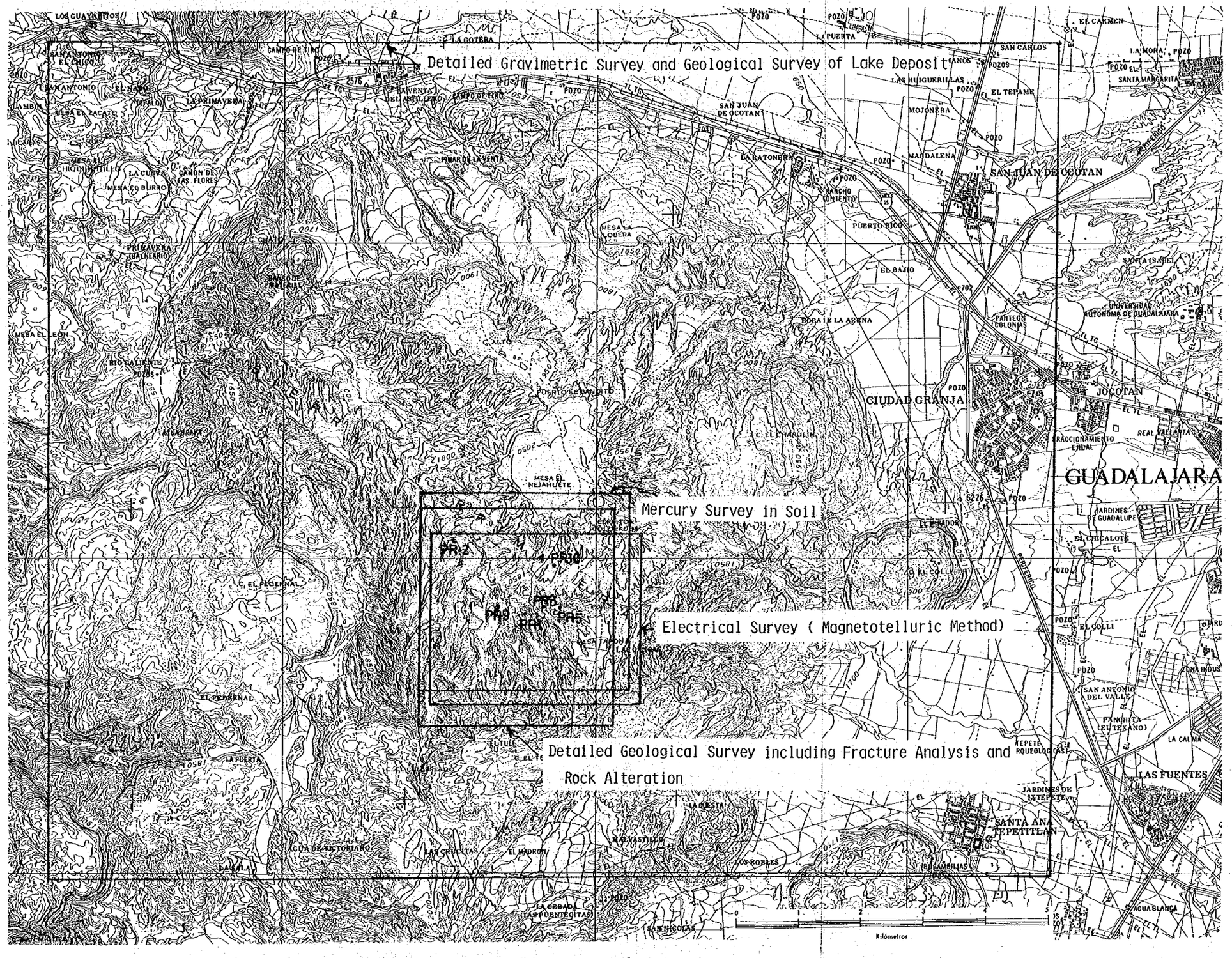


Fig. 1. Locality map of survey area

Ⅱ. 調 査 結 果

Ⅱ. 調 査 結 果

Ⅱ－1 地 質 調 査

地質調査では、フィールド調査と坑井のコア、カッティングス調査の２種類の調査を実施した。フィールドでは主要ルートの２千分の１ルートマップを作成し、これに基づいてフラクチャー解析、変質帯調査、湖成層の堆積調査を実施した。さらに本地域の主要貯留層となる第三系の岩質と構造を知るために、広域地質調査も実施した。

坑井のコア、カッティングス調査としては、既存５坑井（ＰＲ－１，２，５，８，ＲＣ－１）から適宜選び出し、コアの密度、孔隙率、熱伝導率、カッティングスの帯磁率、Hg，Asを中心とした化学分析、Ｘ線回折分析および流体包有物調査を実施した。

(1) 地熱徴候地域周辺の地質

ＰＲ－９井2,840～2,986ｍには花崗閃緑岩および石英モンゾニ岩が認められた。これらの岩石は、本地域南西方の太平洋岸に広く分布している中生代～新第三紀の花崗岩類に由来すると考えられる。これら"基盤岩類"の上位には、玄武岩質安山岩と流紋岩溶岩あるいは同質凝灰岩から成る"Sierra Madre Occidental"に属する火山噴出物が約2,500ｍと厚く堆積している。ＰＲ－１、９００ｍ付近の石質凝灰岩は、グアダラハラ市北方に分布するCordilleran Volcanics（CLOUGH，1981）の中程度に溶結した火砕流堆積物と酷似しているので、両者は同一の地層に属すると推定される。

Tala Tuffは、Sierra La Primaveraカルデラ形成に伴って生じた約95,000年前の火砕流堆積物であり、Cordilleran Volcanicsの上位に、約５００ｍの厚さで重なっている（Fig.２）。今回の調査と坑井資料によると、Tala Tuffは11枚以上のflow unitに区分され、カルデラ陥没が一挙に起きたのではなく、噴出と陥没が同時に進行していったと推定される。Tala Tuffは、中心部ほど溶結度が高く、上部と下部に非溶結部が存在する。この非溶結部には層理が認められ、surge様の堆積物となっている。また、基底部には降下軽石層が存在する。

本地域北半分には、湖成層の下位でTala Tuffの上位に流紋岩溶岩が分布している。分布は局所的であり、０～１００ｍの厚さで東方にいくほど厚い。本流紋岩はMAHOOD（1980）のolder ring domesの流紋岩よりもさらに古く、陥没中央部に生じた溶岩円頂丘に起因すると考えられる。Fig.２と３ではCerritos Colorados Rhyoliteと呼称した。流紋岩はさらに湖成層の上位にも存在している。これは、Mesa EL Nejahueteから供給されたolder ring domesに属する流紋岩で、本地域北方に広く分布している。

Tala Tuff の上位には、陥没により形成されたカルデラ湖内に堆積した湖成層が堆積している。湖成層は主として未固結砂岩、軽石凝灰岩、礫から成り層相変化に富む上部と、巨大軽石層、シルト岩、砂岩から成りより固結度の高い下部に区分される。上部の厚さは50 m 以上、下部の厚さは5～30 m でその境界は一部平行不整合である。不整合の存在は、溶岩円頂丘形成や隆起に伴う湖の陸化、層相変化は、湖に堆積している間の火山活動や隆起・沈降に伴う動揺を表わしている。Fig. 2 と 3 では本湖成層を Arroyo EL Caracol Formation と呼称した。

(2) フラクチャー調査

Fig. 3 には 2,000 分の 1 route map に基づいて mappable な断層を図示した。断層はNE－SW性の正断層が卓越し、これらはNW－SE性の横ずれ的断層によって切られている。この他、PR－2近傍には逆断層が認められる。これらの断層系は、Mesa EL Nejahuete 流紋岩を切っているので、このドーム形成（数万年前）の後に作られたと考えられる。

地表で認められるフラクチャーを地下にどのように延長すべきかという事に主眼をおいて、まず、露頭で見られる共役小断層、スリッケンサイドおよび引張りフラクチャーによって古応力場を復元した（復元方法はRAGAN，1968参照）。地熱徴候地周辺にて、古応力図を描くと Fig. 4 のようになる。この図からわかるように、最大圧縮主応力（σ_1）は垂直に近く、最小圧縮主応力（σ_3）はNW－SE方向で水平に近い。この事は、本地域においてNE－SWの走向を持つ正断層が発達しやすいことを意味する。また、σ_1の傾斜に着目して bending を考えるとNW－SE方向の背斜、向斜が描ける。これは、小断層形成等が隆起あるいは沈降と関係し、その動きの軸がNW－SE方向であった事を示している。

地熱井から採取したコアには、スリッケンサイドや脈を伴ったフラクチャーが見られる。コアが定方位で採取できないので、一般にフラクチャーの方向性を云々することはできない。しかし、地球磁場が現在に近い最近の岩石では、コアの自然残留磁気を測定すれば、フラクチャーの方向性を吟味できる。そこで、今回は地熱井のコア8個について仮の磁北を決めて採取したのち、無定位磁力計にて自然残留磁気を測定し、真の磁北を求めた。この磁北を基に観察したフラクチャーの応力場を復元し、Table 1 および Fig. 2 に示した。これらの図表からわかるように、PR－2，1,360 m 以外の主応力方向は、地表で得られた主応力方向と調和している。この事は、地表調査で判明したフラクチャーは、Cordilleran Volcanics 上部までは延長することができることを示している。（詳細は添付資料参照）

ところで、本地域の主たる地熱貯留層は、Cordilleran Volcanics 下部を構成するフラクチャーなので、このフラクチャーの性質を知ることが最も重要である。しかし、本地域にはCordilleran Volcanicsは分布していないので、Sierra La Primaveraカルデラ周辺に分布するCordilleran Volcanicsの構造を調べ、その特徴を内挿しようと試みた。カルデラ北東方Santiago川沿いの本Volcanicsには、NW－SE、NNE－SSW、ENE－WSW系の断裂が多く、北西方のSanta Rosaダム付近ではNW－SE方向の断裂が卓越している。一方、カルデラ南西～南方では、NW－SE方向に加え、NS性及びEW性の断裂も多く認められる。このように全地域にわたって卓越しているフラクチャーはNW－SE方向である。また、La Vega西方に分布している中生界の走向・傾斜がN65～70°W、50°Nであり、本カルデラを含むTequila火山、Tepetiltic火山など第四紀火山の配列がNW－SEであることを考えると、本地域の火山活動が、地下深部にあるNW－SE系のフラクチャーを通じて生じたものと推定される。

MAHOOD（1980）は巨大軽石層基底の構造等高が本地域中央部で最も高いことを指摘しているが、これは、カルデラ形成後のresurgent upliftの頂部がこの付近に位置していることを示す。応力場復元による背斜状曲げが、このupliftで形成されたとすると、upliftの影響の少ない地表近くでは共役せん断断層、upliftの影響の強い地下深部では高角の単一フラクチャーが出きやすいと考えられる。PR－1，5，8，の地下深部における大きな逸泥はこのフラクチャーであり、共役断層で温泉・噴気等の地熱徴候を伴う断層はこのフラクチャーに連結していると考えられる。

なお、地表での引張りフラクチャー分布を作成するとFig.5に示すようになる。引張りフラクチャーはPR－1とPR－8の間によく発達しており、小断層解析から得られた背斜状曲げ構造と一致している。Tala Tuff中の引張りフラクチャーのorientationを調べるとFig.6のようになる。Fig.6はフラクチャーが一定の方向性を持っていないことを示すので、フラクチャーには火砕流冷却時の熱応力に伴って生じたものも含まれている。

(3) 地表変質帯調査

地表変質帯調査は、噴気箇所を中心に実施した。現地で噴気の分布や変質の特徴等を観察した後、採取した代表的変質岩試料82個を粉末X線回析法によって変質鉱物の同定及び変質分帯の設定を行った。

確認された変質鉱物は石英・クリストバル石・リンケイ石・カオリナイト・ハロイサイト・モンモリロナイト・絹雲母・明ばん石・ギブサイト及び黄鉄鉱である。これらの変質鉱物のうちで、カオリナイト及び明ばん石の出現する帯をそれぞれカオリナイト帯、明ば

ん石帯と呼ぶ。

Fig.7に示すように、当地域の噴気に伴う酸性変質の多くはカオリナイト帯であり、PR－5，PR－8付近を中心としてNE－SWの方向性を示して主に分布する。明ばん石帯の分布は非常に限られ、PR－8の北西約150m付近とPR－2の東約200m付近にカオリナイト帯に囲まれて分布する。

(4) コア・カッティングスの調査

既存坑井のコアおよびカッティングスの各種調査を実施し、Fig.8～11にとりまとめた。これらの結果のうち、特に重要な点について述べる。

まず、PR－1，PR－2およびPR－8の1,000m以深のカッティングスのHgとAsの化学分析を実施したところ、これらの元素は地下のフラクチャー箇所をかなり反映することが判明した。すなわち、PR－1では1,630mのHgとAsの高濃度は1,620m付近の逸泥を反映する。また、1,490mのHgとAsの高濃度も1,445m付近の全量逸泥を反映している可能性が大きい。PR－2でのHgは1,950m付近、Asは1,800m付近から深部に向けて高くなっているが、この濃度傾向は1,822m以深の連続的小規模逸泥を反映する。PR－8のHgとAsは類似の傾向を示し、1,340、1,460、1,560、1,610～1,690、1,740、1,810～1,850mにピークが認められる。これらは1,328、1,436、1,564～1,569、1,640～1,643、1,752、1,790～1,793m付近の逸泥に対応する。一方、1,130mのAsの高濃度は1,100m付近の逸泥を反映すると考えられる。このように、フラクチャー判定には、特にHgとAsが有用であったが、これは火山性起源のHgとAsが岩石中のフラクチャーに濃縮し保存されていることを意味する。

火成岩中に高温熱水が浸入すればmagnetiteはpyriteに転移しやすい。すなわち、透水性に富むほど帯磁率が低くなるのではないかという予想のもとに、PR－1，PR－2，PR－8，RC－1の1,000m以深の帯磁率の測定を実施した。その結果、PR－8では低帯磁率部分と坑井掘削中の逸泥はよく対応しているが、他の坑井では岩質と相関し、新鮮な岩石では高帯磁率を、白色粘土化変質部では低帯磁率を示す。

次に、PR－1，PR－2，PR－5，PR－8およびRC－1のカッティングスから流体包有物の充塡温度に向く石英・方解石・アンケライトを選択し、加熱顕微鏡を用いて測定した。以下、坑井毎にその結果を述べる。

PR－1：最低充塡温度は1,100m以浅では静止状態の検層温度（スタンディングタイムS.T408時間）に近いが、これは以深では42～45°C程低く、1,500m以深の最低充塡温度は260～284°Cを示す。流体包有物には気相包有物と液体包有物の共存が認められ、包有物生成時に地熱流体の一部は沸騰現象

を生じていたと推定される。

ＰＲ－２：最低充塡温度は６８０ｍの１１８℃から1,780ｍの１５０℃へと深部へ向けて漸増するが、それ以深で急激に温度は上昇し坑底付近の1,985ｍで２４０℃を示す。

ＰＲ－５：８９５ｍ以深はカッティングスが欠如しており、測定はそれ以浅で実施した。最低充塡温度は350ｍの１０４℃から５８０ｍの１４４℃へと急増するが、それ以深７５０ｍまでは若干の低下が見られる。７５０ｍから８００ｍにかけては温度は急上昇している。

ＰＲ－８：主要な流入深度と考えられる1,800ｍ付近で検層温度に低下が見られる。しかし、この部分及び1,250ｍを除けば、検層温度カーブと流体包有物の最低充塡温度の分布が同様な形であること、さらに1,630ｍでは両者がかなり近い値を示すことなどから、最低充塡温度の分布が、掘削以前の地下温度分布に近いことが推測される。当坑井の最低充塡温度の最高値は1,790ｍの２９２℃であり、ＰＲ－１同様包有物生成時に地熱流体の一部は沸騰していたと考えられる。

ＲＣ－１：最低充塡温度は８９０ｍの７８℃から1,855ｍの１２２℃へと深部へ向けて漸増する。最低充塡温度の最高値は坑底付近の1,855ｍの１２２℃であり、非常に低温である。

各坑井の最低充塡温度の断面分布解析結果から、当地熱地域における沸騰地熱流体は、ＰＲ－１，ＰＲ－８，ＰＲ－５付近の地下深部より上昇していることが推定される（Fig. 12）。

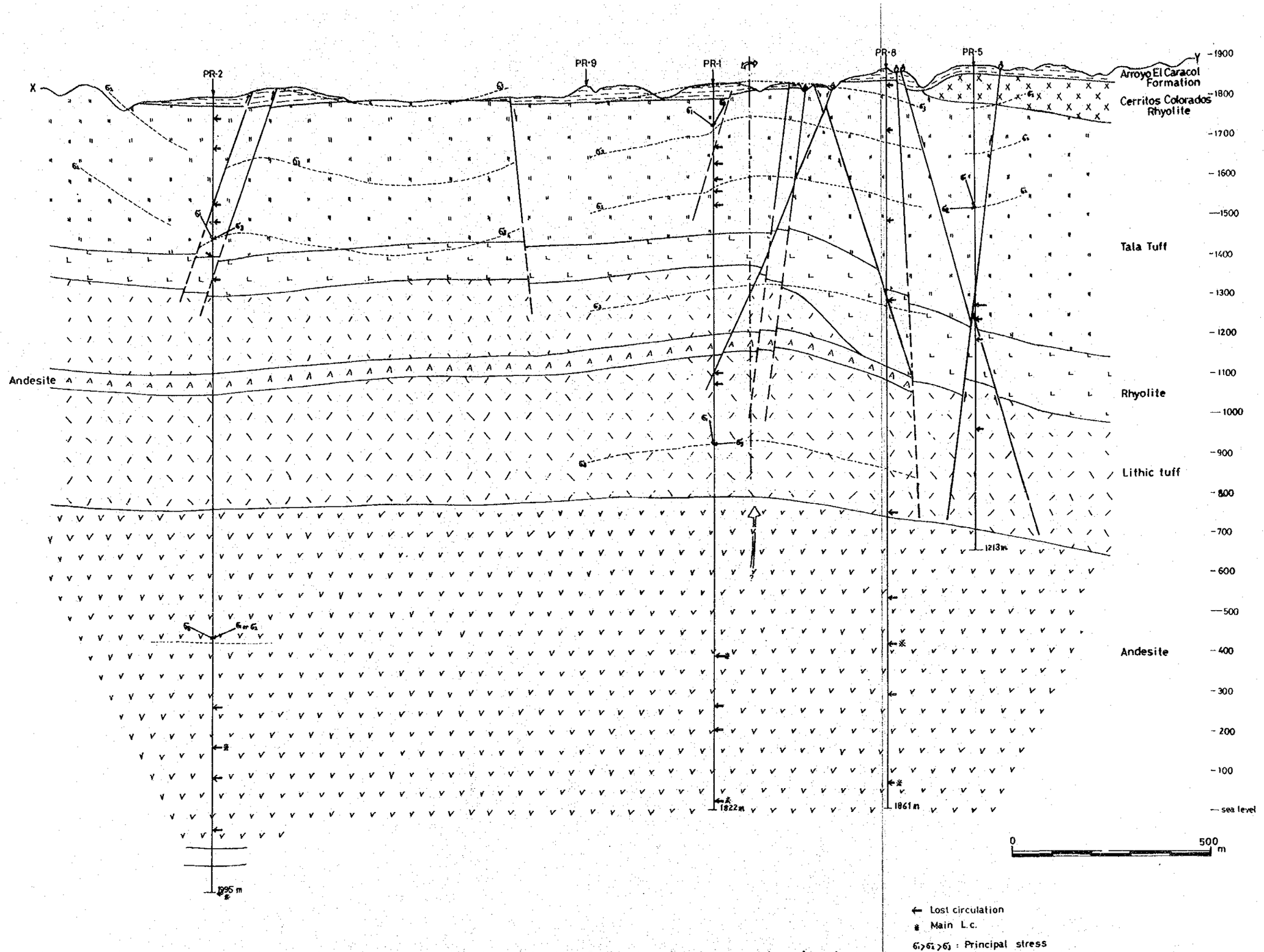


Fig. 2. Geological profile and stress trajectory

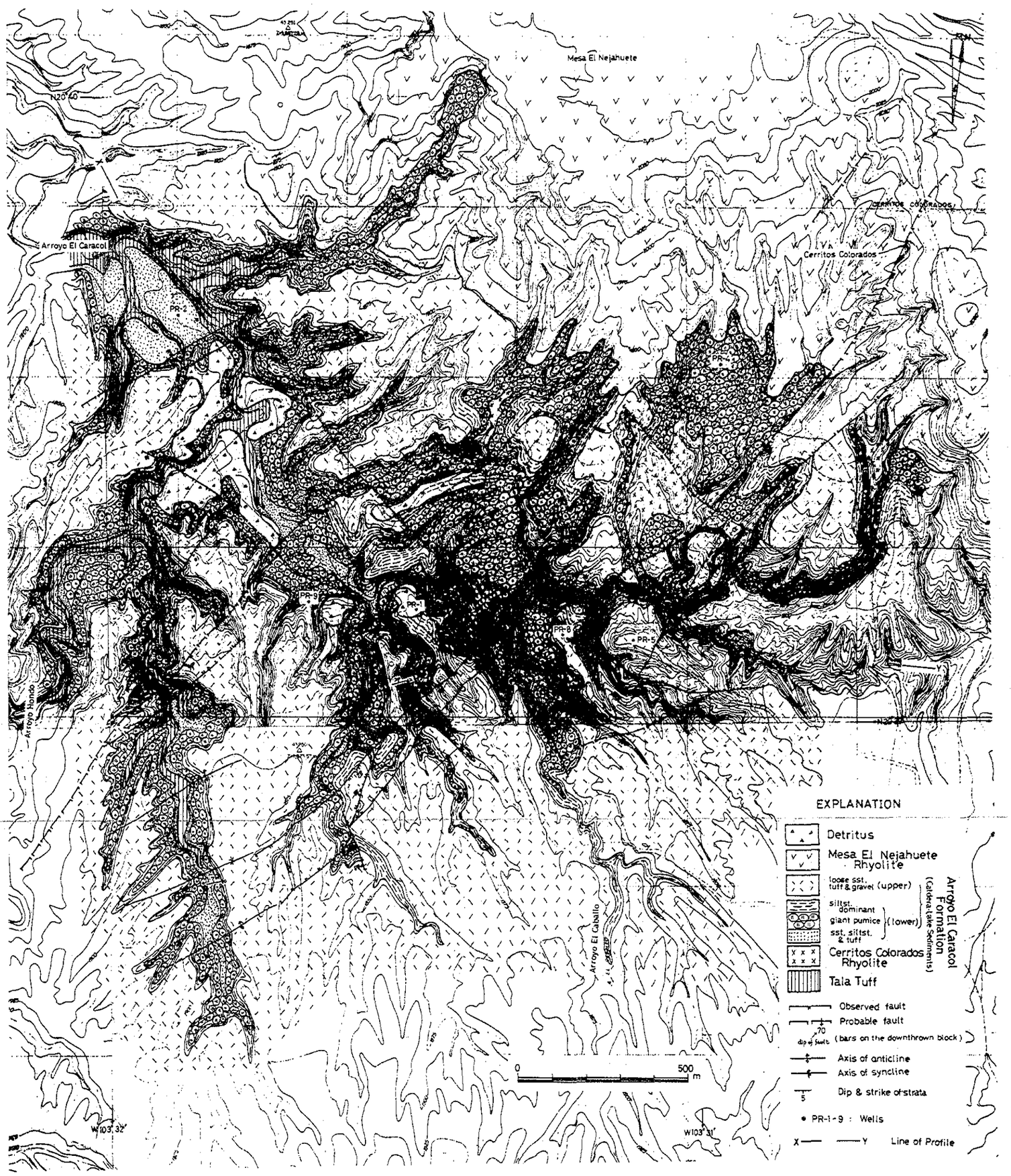


Fig. 3. Geological map

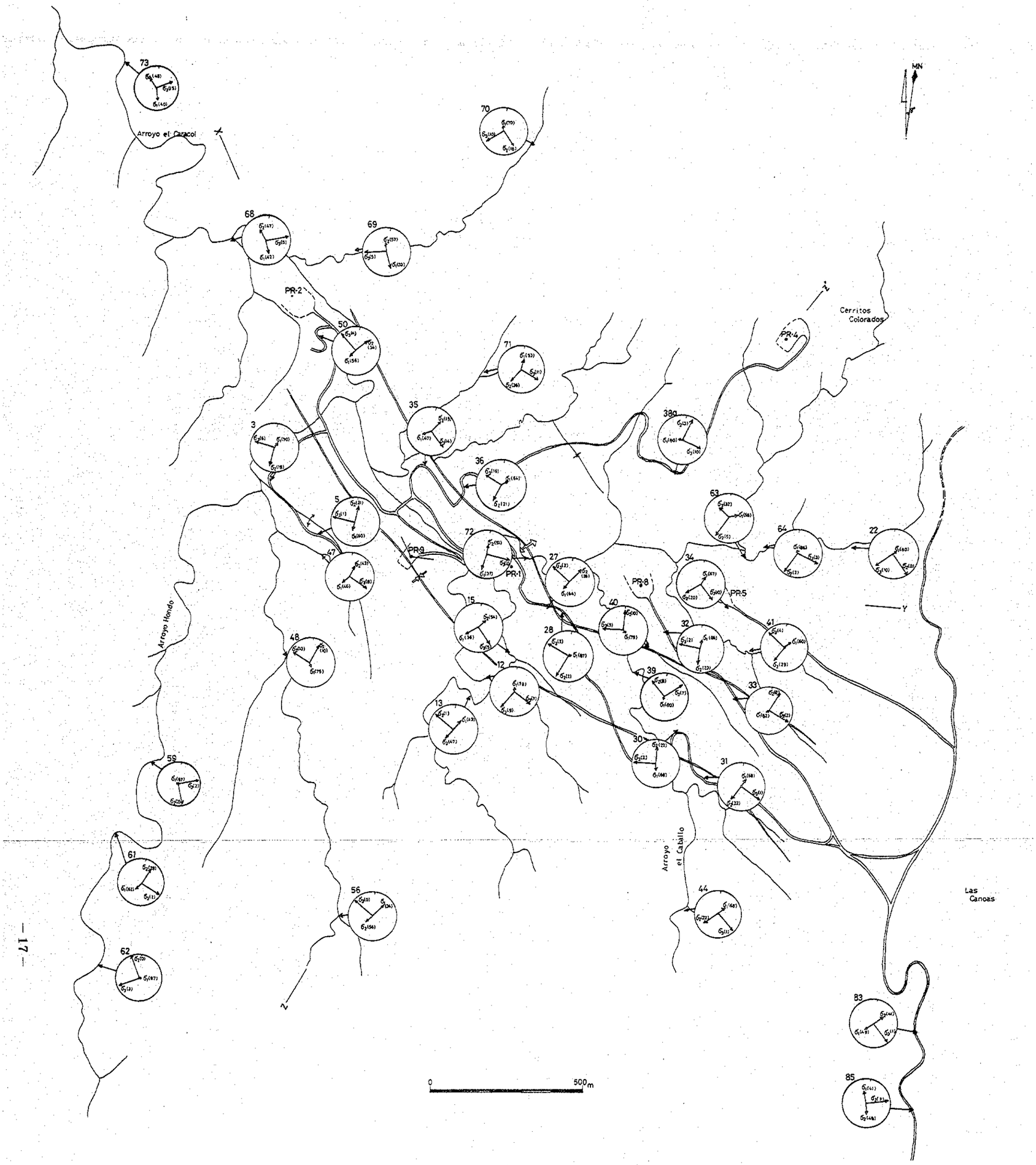


Fig. 4. Principal stress axis of each measuring point
σ_1 : maximum principal stress axis

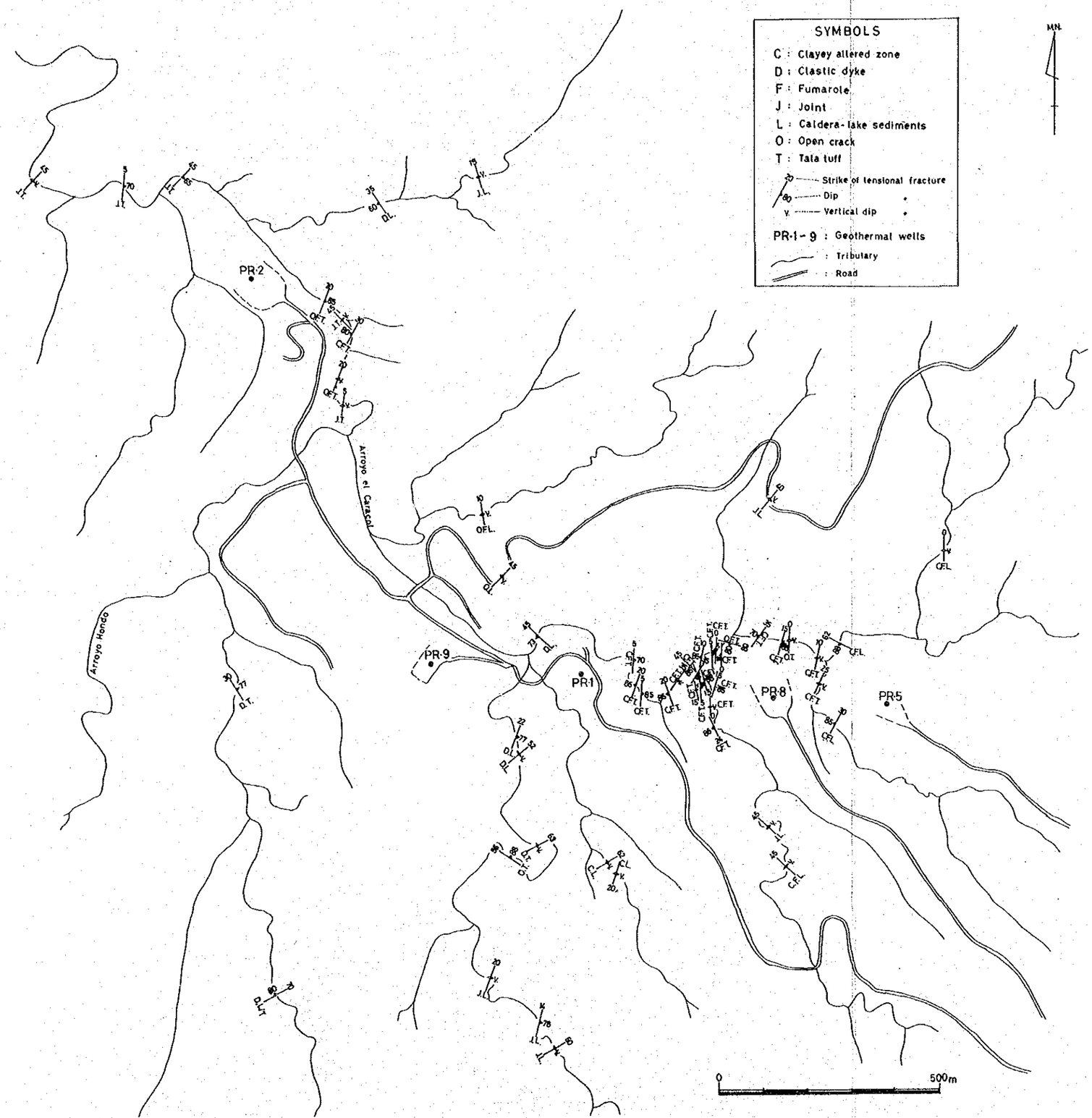


Fig. 5. Tensional fracture map

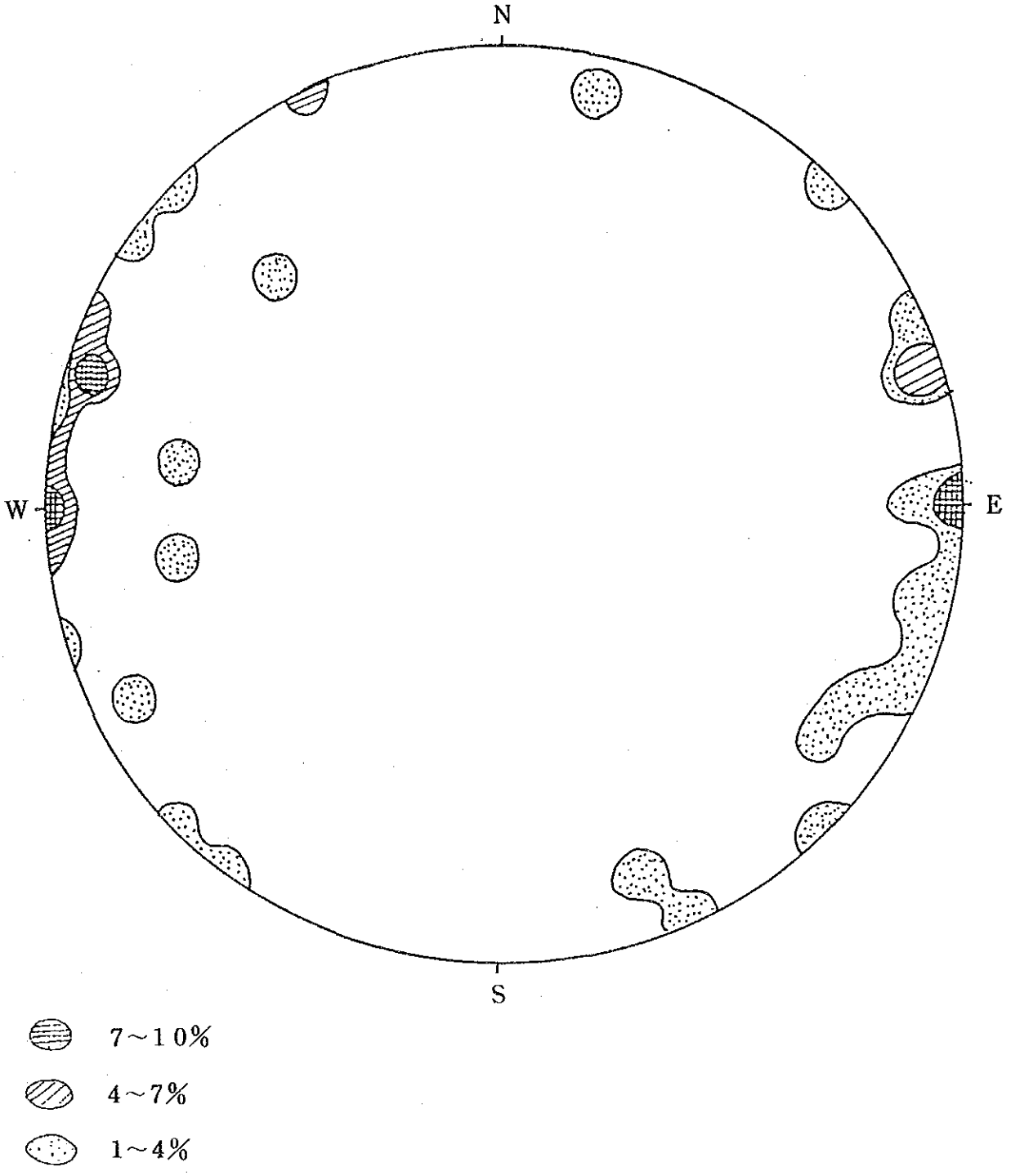


Fig. 6. Orientation of tensional fracture in the Tala Tuff at 35 measuring points

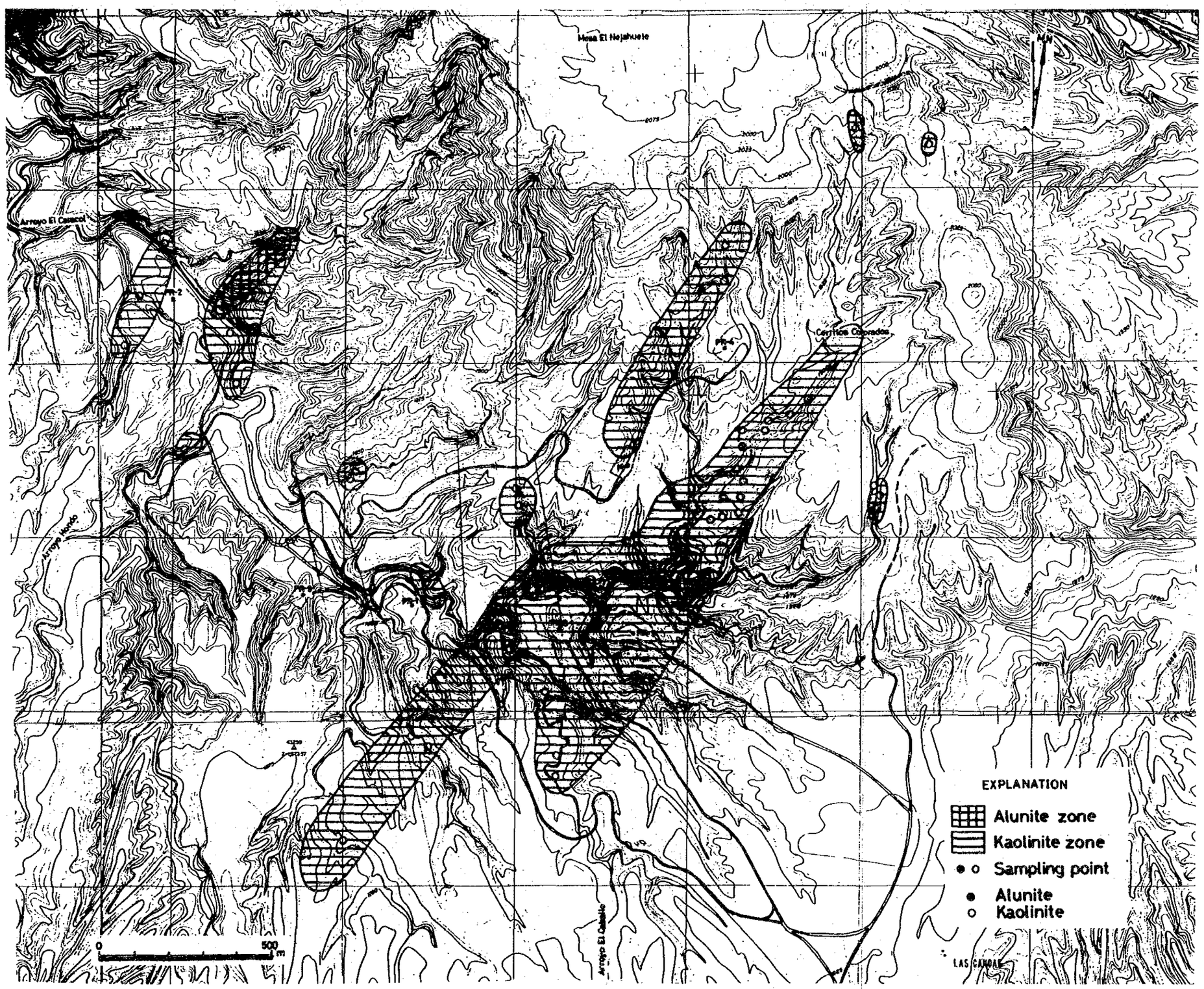


Fig. 7. Zoning map of rock alternation

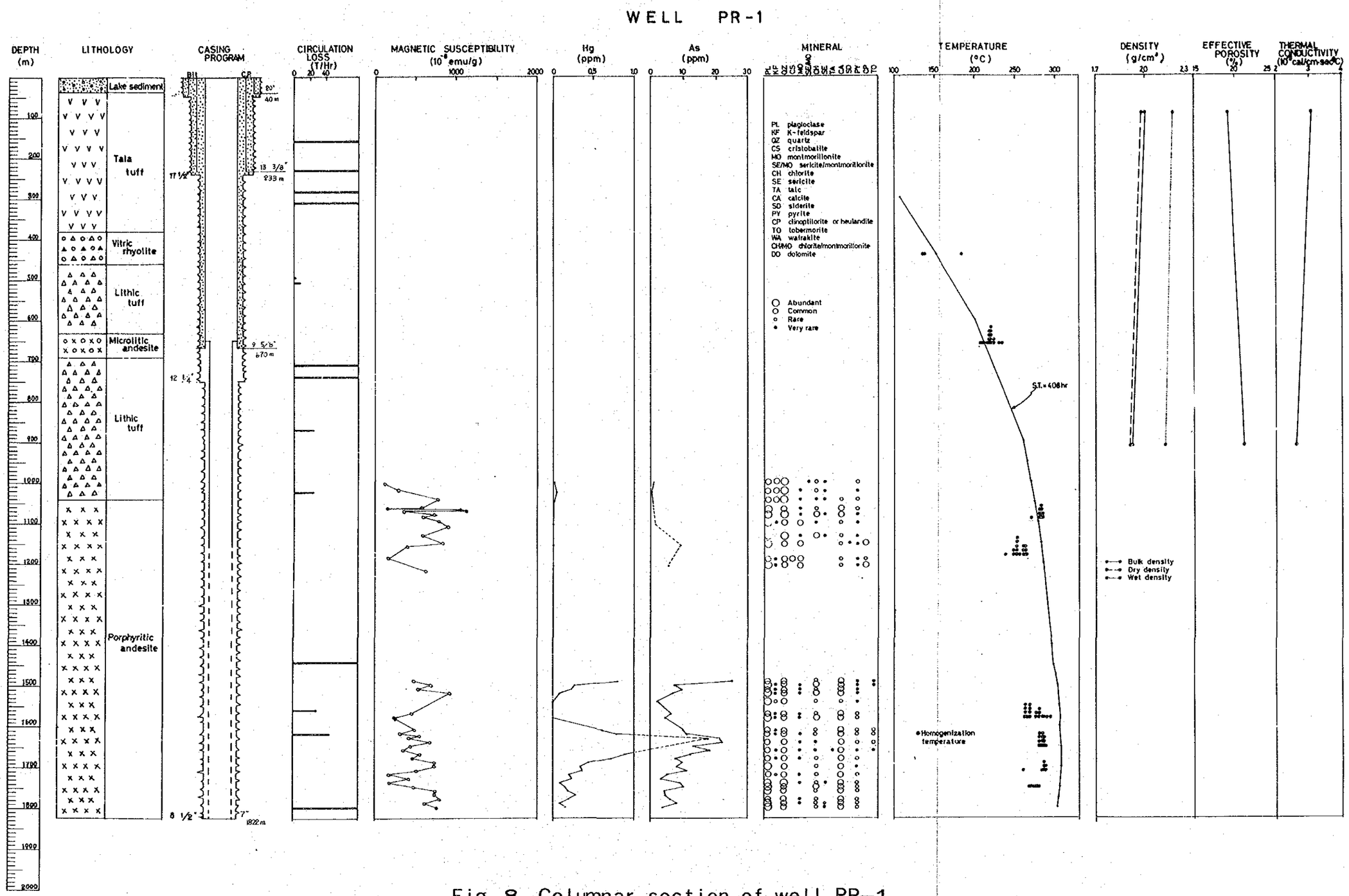


Fig. 8. Columnar section of well PR-1

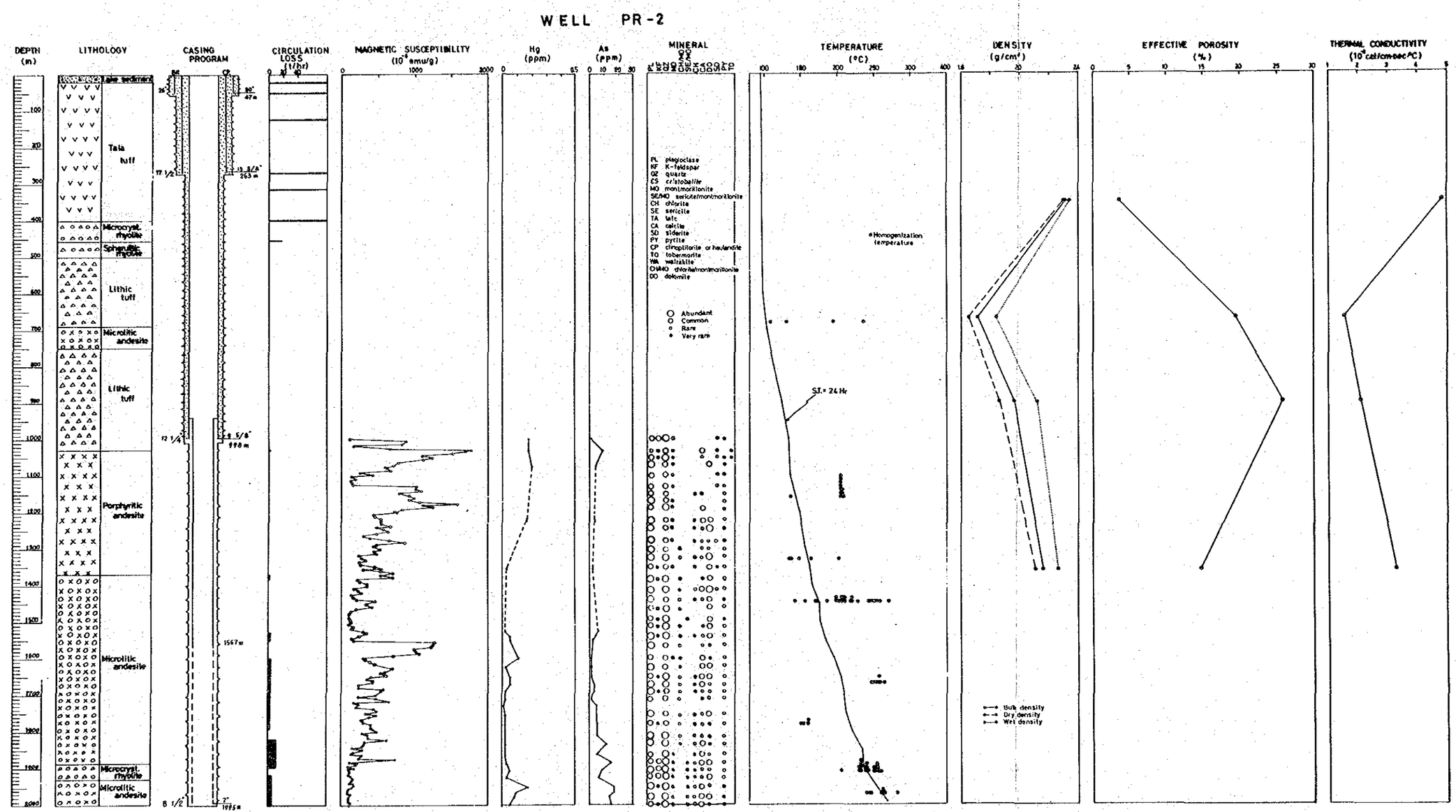


Fig. 9. Columnar section of well PR-2

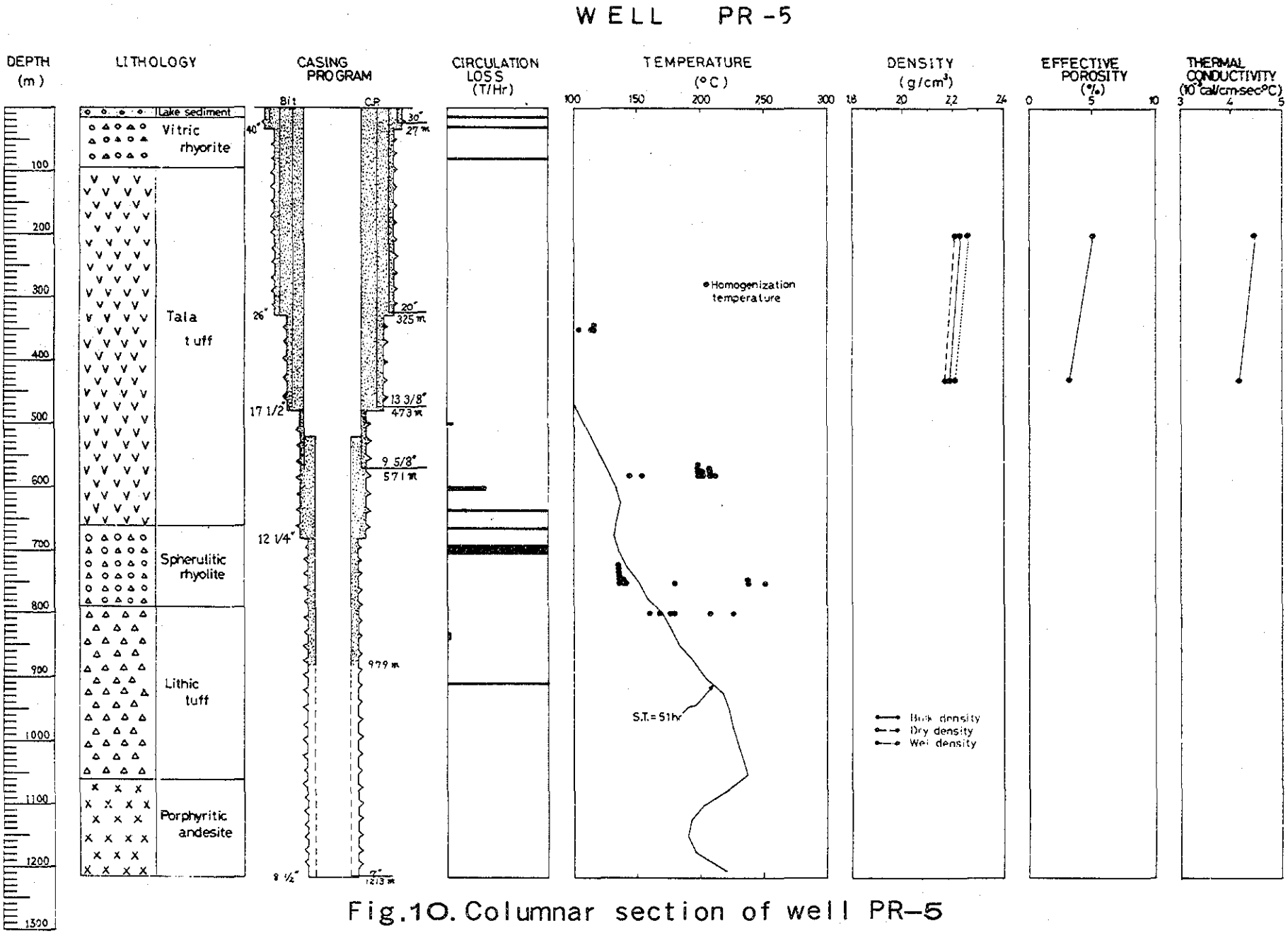


Fig.10. Columnar section of well PR-5

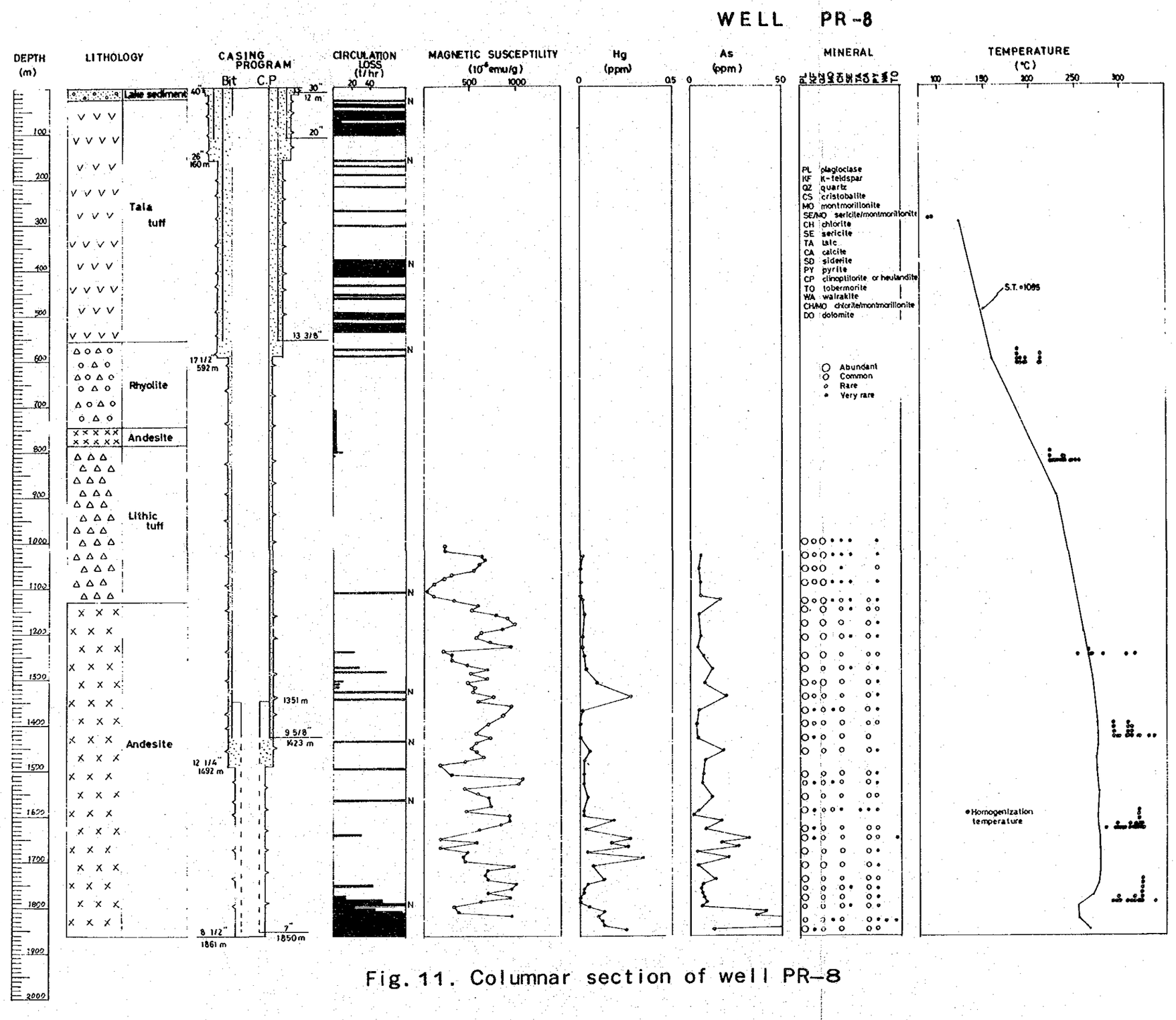


Fig. 11. Columnar section of well PR-8

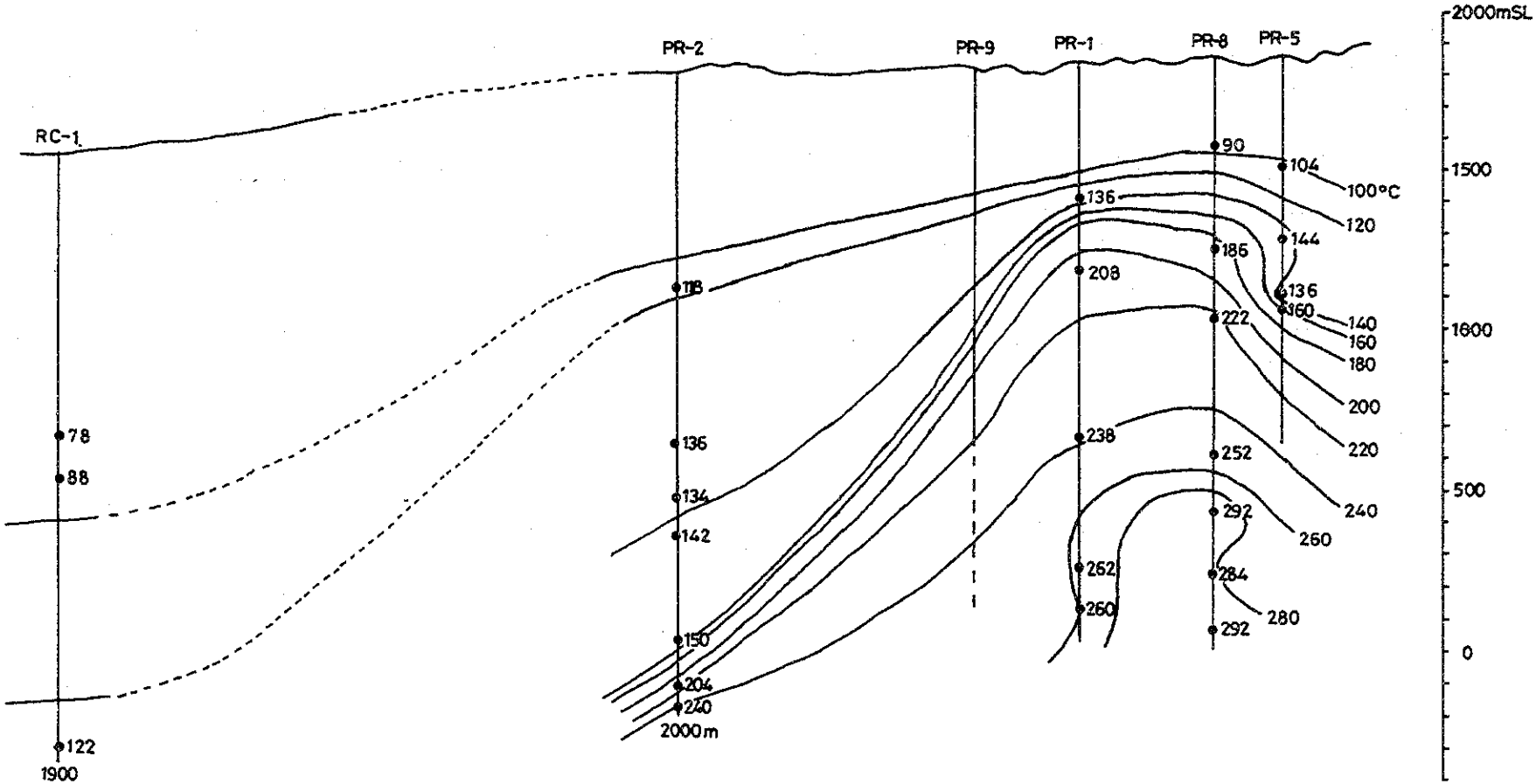


Fig. 12. Profile of minimum homogenization temperature

Table 1. Remanent Magnetization of cores

	Well number Depth of core Rock name	Demagnetization mT	Strength of magnetization KA/m×10^{-3}	Declination of assumed north (Clockwise)	Strike, dip and slip direction of fracture	Principal stress axis
1	PR-1 93m Welded tuff	0 10 20 30	2.25 2.25 2.21 2.00	259° 259 260 258	Vein N70° W 32° NE	σ1:N82° E, 30° W σ2 N82° E, 60° E σ3 N8° E, 0°
2	PR-1 910m 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°	σ1:N56° E, 84° W σ2:N22° E, 5° NE σ3:N69° W, 3° E
3	PR-1 915m Welded tuff	0 10 20 30	1.49 1.52 1.50 1.43	170° 170 169 168	Slicken-side S4° W 64° N 87°	σ1:N60° E, 86° W σ2:N11° W, 2° N σ3:N78° E, 3° E
4	PR-2 350m 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°	σ1:N19° W, 60° S σ2:N71° E, 0° σ3:N19° W, 30° N
5	PR-2 1360m 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	σ1:N81° W, 38° E σ2:N46° E, 38° SW σ3:N18° W, 29° N
6	PR-4 300m Welded tuff	0 10 20 30	4.17 3.51 2.86 2.26	19° 19 18 17	Vein N10° E 85° SE	σ1:N58° W, 85° E σ2:N63° E, 5° W σ3:N27° E, 0°
7	PR-5 350m Welded tuff	0 10 20 30	4.17 3.43 2.58 2.07	85° 88 88 85	Slicken-side NS 80° E 90°	σ1:N 5° W, 70° N σ2:N85° E, 0° σ3:N 5° W, 20° S
8	PC-1 700m Andesite	0 10 20 30	9.24 9.18 8.63 7.12	198° 198 199 198	Slicken-side N37° W 54° S 60°	σ1:N36° W, 74° S σ2:N 8° W, 15° N σ3:N81° E, 3° W

Ⅱ－2　地化学調査

第1回の地化学調査では、既存の地熱坑井掘削地点を含む9.6 km^2の範囲で土壌水銀調査を行い、272地点の土壌試料について水銀を分析した。

第2回目の調査では、メキシコ側が掘削したPR－1坑及びPR－8坑の蒸気、蒸気凝縮水及び熱水を採取し、化学分析及び同位体分析を実施した。

なお、蒸気及び蒸気凝縮水の試料は、地熱井の二相流ラインに取り付けた小型セパレーターを用いて熱水から分離採取し、熱水試料は大気圧下で採取した。

(1)　土壌水銀調査

地熱徴候地域を中心とし、東西3.2 km、南北3.0 km（範囲9.6 km^2）の中に格子状に272地点を設定し、1 m深度の土壌試料を採取し、土壌中の水銀濃度を測定した（Fig.14）。土壌水銀の分析結果をTable 2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、水銀濃度累積頻度分布図（Fig.13）を作成した。この図によると、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.14）を作成した。

Fig.14によれば、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。また、東部地区の高濃度を示す地点を結ぶと、NE－SWの方向性を示すが、これらの地点は必ずしも連続して分布している訳ではない。Fig.14から明らかなように、調査地域内では土壌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すが、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る。

(2)　坑井流体調査

PR－1およびPR－8の蒸気、蒸気凝縮水および熱水の成分を分析し、この化学性状から地熱貯留機構の考察を試みた。上記の分析結果をTable 3に示す。

まず、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 4）。４種類の地化学温度計の値は、ＰＲ－１について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°Ｃ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°Ｃ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°Ｃ　ＰＲ－８では、深度1,800ｍで２３５°Ｃ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、二相流の状態で坑井内を流動してい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。

次に、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. 15）。図中、ＰＲ－２，ＰＲ－４およびＰＲ－５のデータはＣ.Ｆ.Ｅ. の測定結果を使用した。Fig. 15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ので、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と浅いために、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。

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. 16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、Ｃ.Ｆ.Ｅ. 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る。

最後に、蒸気中のHe、ArおよびN₂についての考察を試みた。Fig.17から明らかなように、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 vaga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・プリマベーラの地熱井は、温泉ガスと比較して、より深部ガスの性質に近いものであると考えられる。

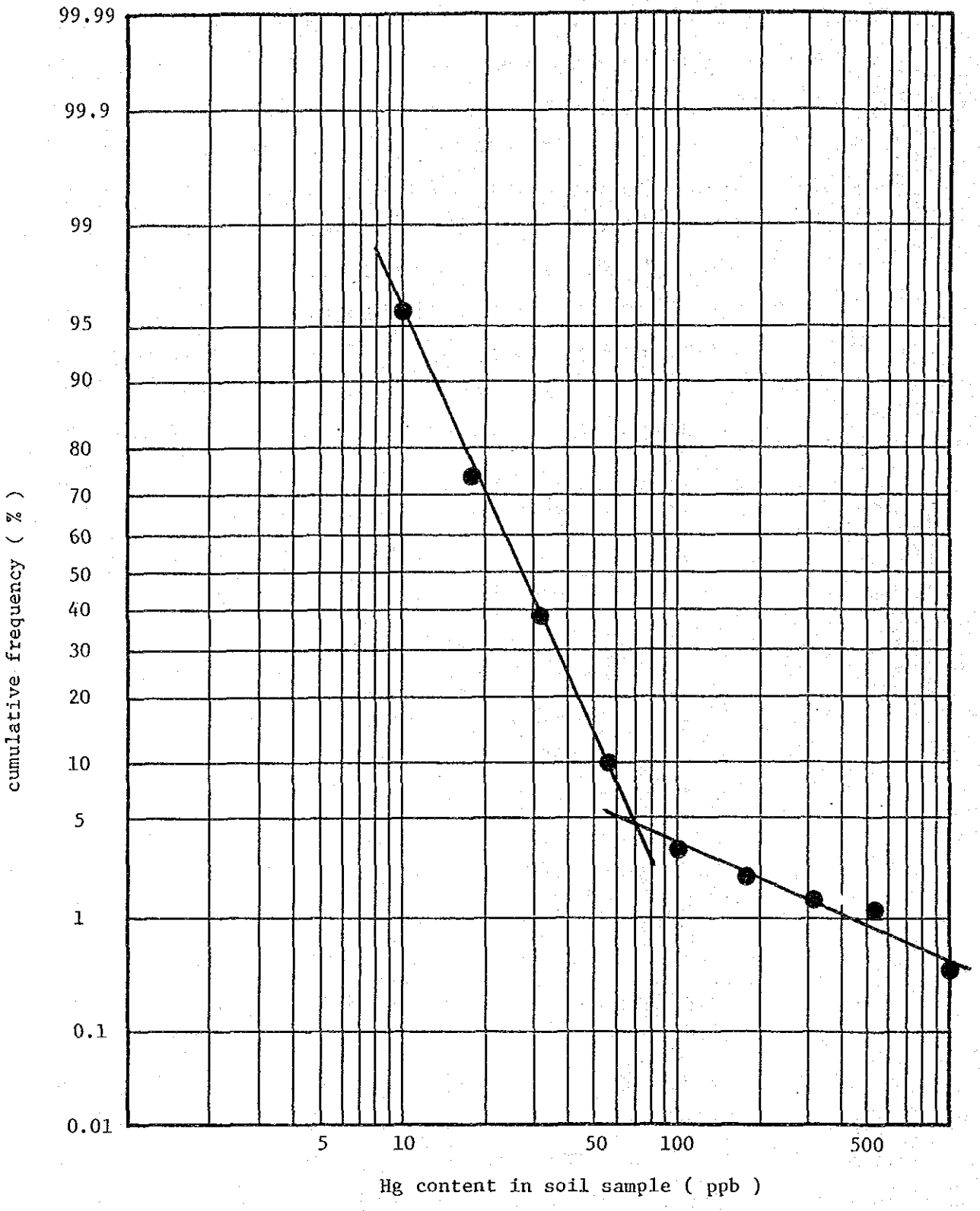
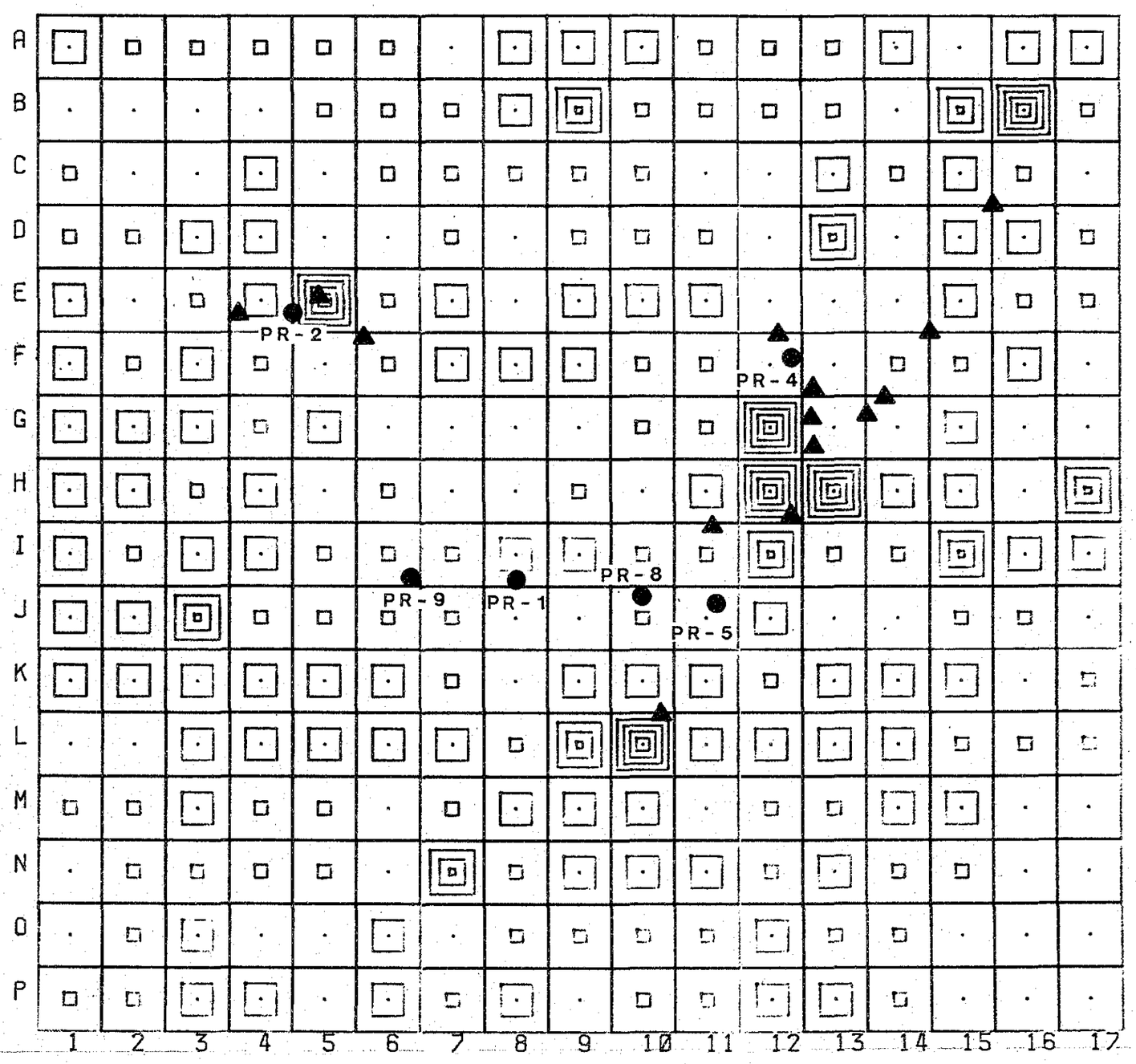
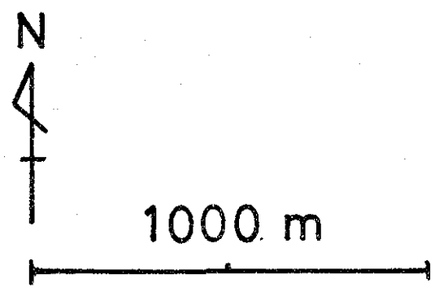


Fig. 13. Cumulative frequency of Hg content in soil sample





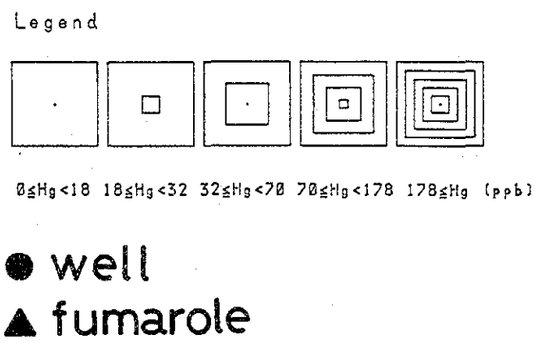


Fig. 14. Distribution map of Hg concentration in soil

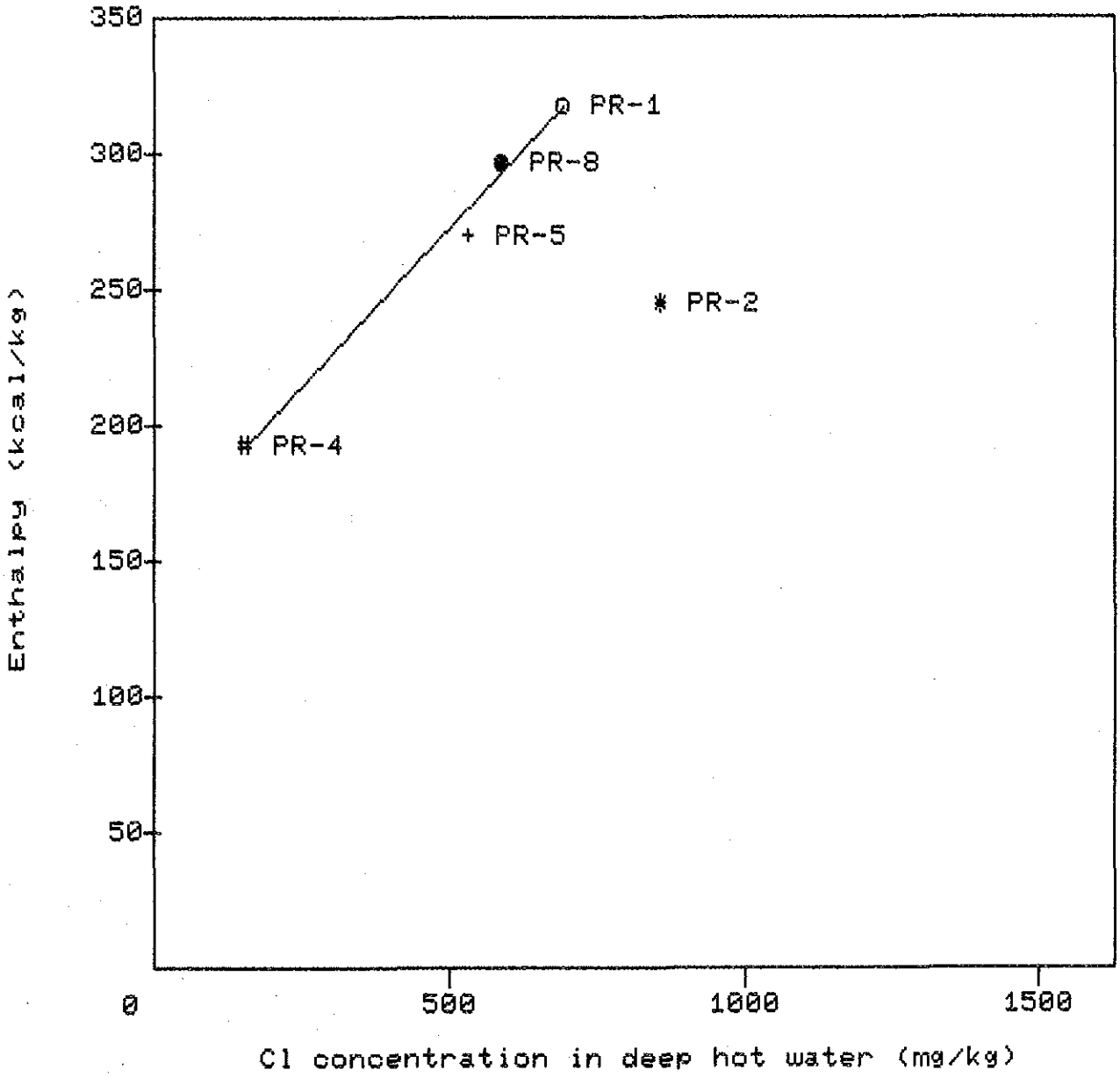


Fig. 15. Relationship between enthalpy and chloride concentration in deep hot water

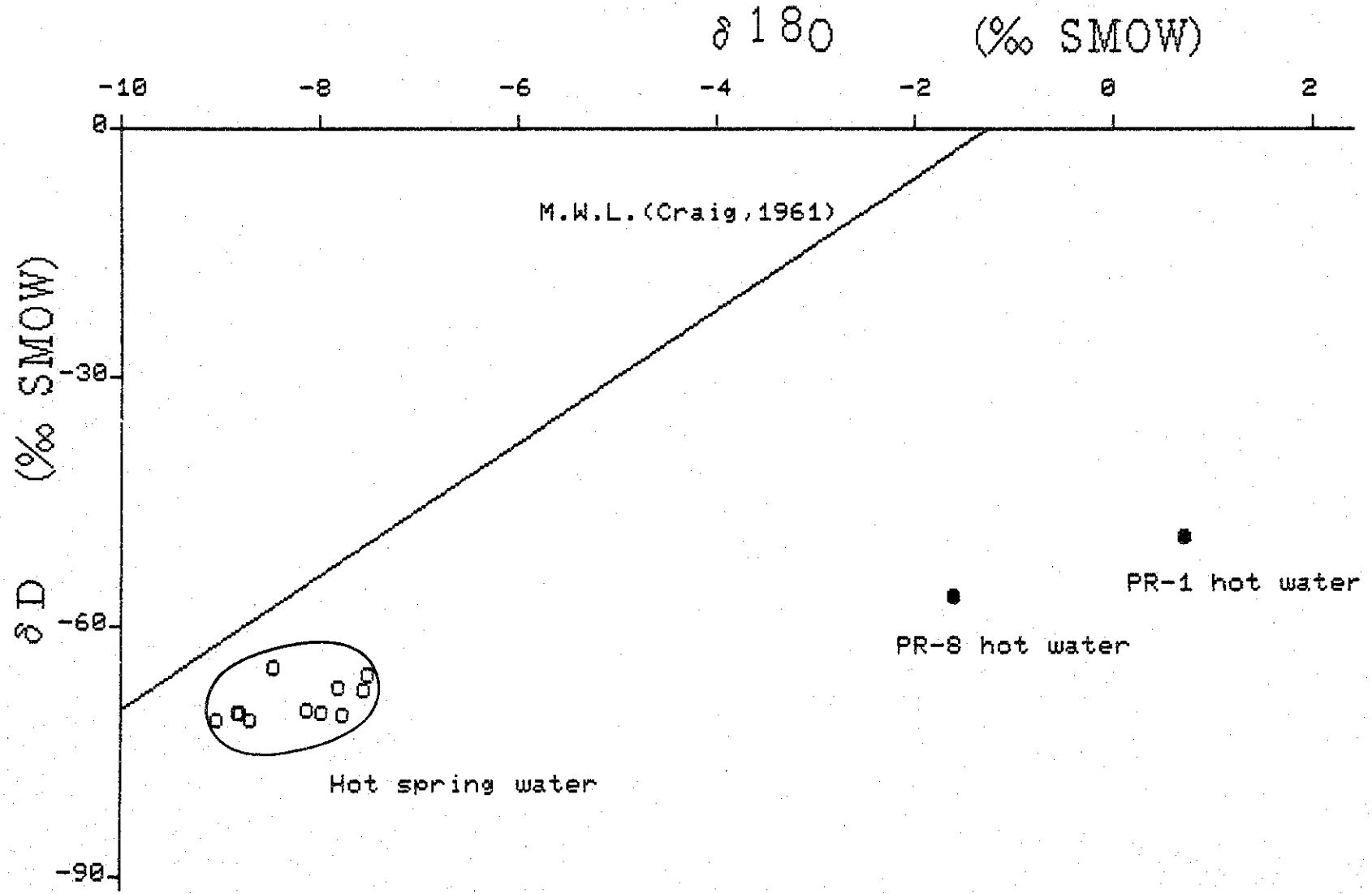


Fig. 16. Oxygen-18 and Deuterium compositions of PR-1, PR-8 hot water and hot springs

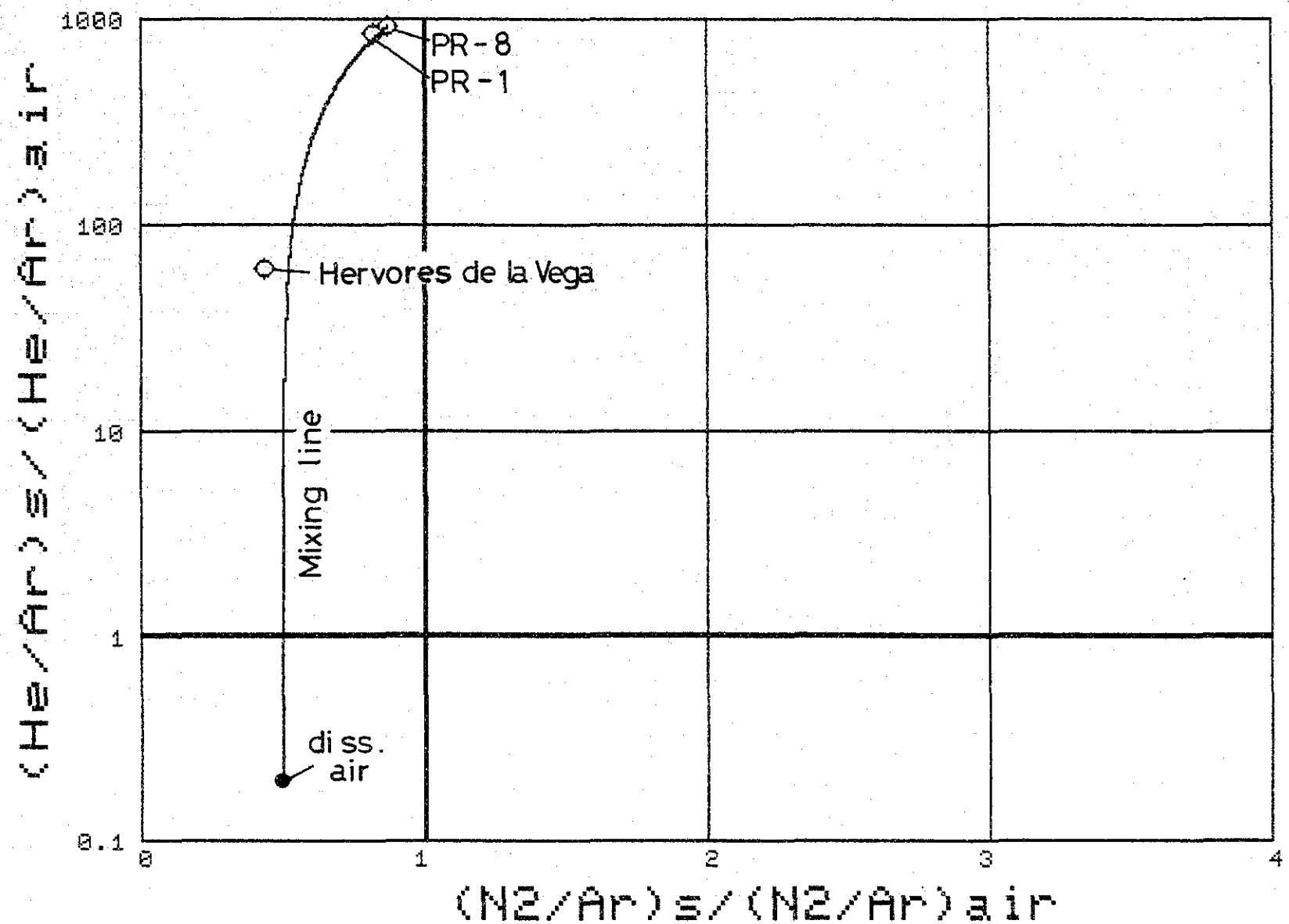


Fig. 17. Relationship between He/Ar and N_2/Ar ratio in geothermal gases discharge from PR-1 and PR-8

Table 2. 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

Table 3. Chemical composition of well discharge sample

(a) Chemical composition of steam condensed water.

Component	Unit	PR-1	PR-8
Electrical conductivity	μS/cm	2360	3180
pH	---	4.90	6.00
Cl	mg/l	0.06	667
NH_4	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/cm²G	7.7 Kg/cm²G
Total gas in steam (vol%)		2.20	3.46
Gas composition	H_2S (vol%)	0.7	0.1
	CO_2 (vol%)	98.6	98.9
	H_2 (ppm)	1860	3310
	N_2 (ppm)	1740	2160
	CH_4 (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	μS/cm	4060	4340
Total dissolved solids	mg/l	3830	3670
pH	---	7.80	8.60
Cl	mg/l	1160	929
SO_4	mg/l	44.4	109
H_2CO_3	mg/l	2.7	1.4
HCO_3^-	mg/l	71.2	227
CO_3^{2-}	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_2	mg/l	1090	927
Li	mg/l	6.52	6.40
B	mg/l	174	125
F	mg/l	8.4	7.9
NH_4	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
$^{18}O/^{16}O$	‰(SMOW)	+0.7	-1.6
Tritium	T.U.	<0.23	<0.21

Table 4. Chemical geothermometer

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

Ⅱ－3 重力探査

重力探査では、La Coste & Romberg社製のG型重力計No.178を使用して重力測定を実施した。なお、標高についてはレベルによる水準測量及びPaulin精密高度計による測定を実施した。

(1) 測定およびデータ処理

Sierra La Primavera地域（238㎢）において306点、同地域を含む広域の14,000㎢において156点の重力測定を実施した。測点の位置についてはFig.18および22を参照のこと。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.グアダラハラ事務所内に起点（No.1000）を設け、978,188.034mgalと決定した。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。水準測量としては、Sierra La Primavera地域の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が、残りの点についてはPaulin精密高度計によって標高を測定した。

データ処理は、まず重力計のダイア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。Sierra La Primavera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。

(2) Sierra La Primavera地域のブーゲー異常分布の特徴

まず、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Table 5のようになる。Table 5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Cordilleran Volcanics中の凝灰岩と安山岩との間にある。本地域の地形を形成している第四系の平均密度はTable 5によると2.12g／㎤であり、湖成層の密度はもっと低いので、ブーゲー異常図で解析に用いる図面は補正密度$\rho = 2.00$g／㎤のものとした（Fig.18）。

Fig. 18によると、調査地域のブーゲー異常値は−109mgalから−126mgal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。−120mgal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、西縁部及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. 18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. 19と20には3次の解析結果を示す。Fig. 19は、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。

(3) 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. 18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. 21に示したが、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（$\rho = 2.20\,g/cm^3$）はRhyolite, Tala Tuff, Cordilleran Volcanics上部、第2層（$\rho = 2.40\,g/cm^3$）はCordilleran Volcanics下部の安山岩、第3層（$\rho = 2.70\,g/cm^3$）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（$\rho = 1.60\,g/cm^3$）、Rhyolite（$\rho = 2.00\,g/cm^3$）およびTala Tuff（$\rho = 2.00\,g/cm^3$）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。また、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）を示したが、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. 21でも明らかなように、カルデラ壁の落差を500〜600 m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の付近）における局所高重力異常は、高密度層が約400 m隆起したとすると説明がつく。MAHOOD（1980）によればresurgentによる再隆起量が260 m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. 18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. 18および21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（$\rho = 1.60\,g/cm^3$）が補正密度（$\rho = 2.00\,g/cm^3$）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、地形の低所でか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. 21において$\rho = 2.00\,g/cm^3$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、$\rho = 2.00\,g/cm^3$に相当するTala Tuff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. 22に示すような構造図が得られる。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resurgent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。

(4) 広域のブーゲー異常分布の特徴

Sierra La Primavera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. 23に補正密度$\rho = 2.20\,g/cm^3$の広域ブーゲー異常図を示す。Fig. 23によると、−110mgal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。メキシコ電力庁（C.F.E.）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及び花崗類が分布している。また、古第三系及び新第三系中新統（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。鮮新統及び第四系は、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、Table 5に示した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−SE性およびNS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−SE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−SE性あるいはNS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NE−SW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）に左右されていると

推測される。

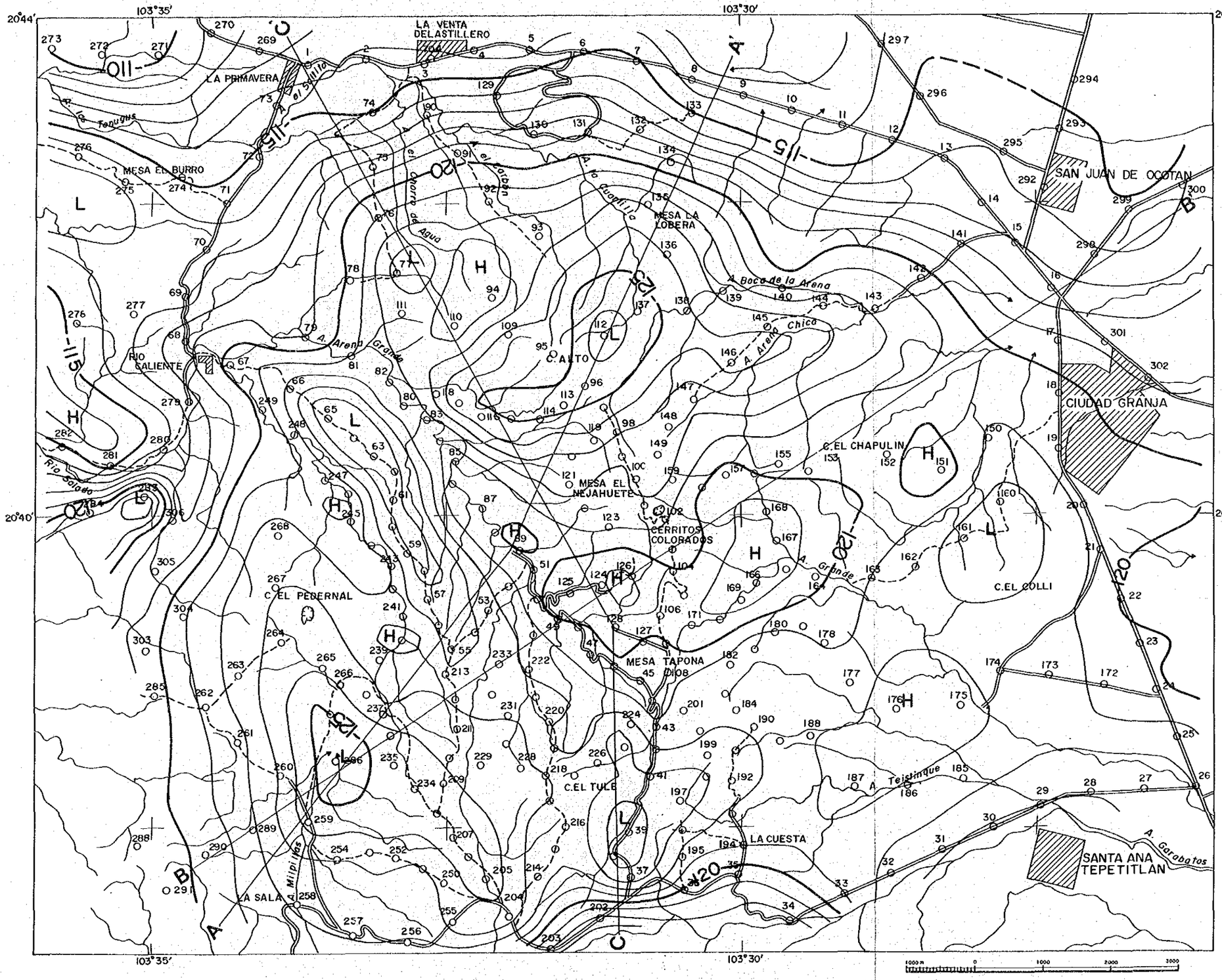


Fig. 18. Bouguer anomaly map $\rho = 2.00 g/cm^3$

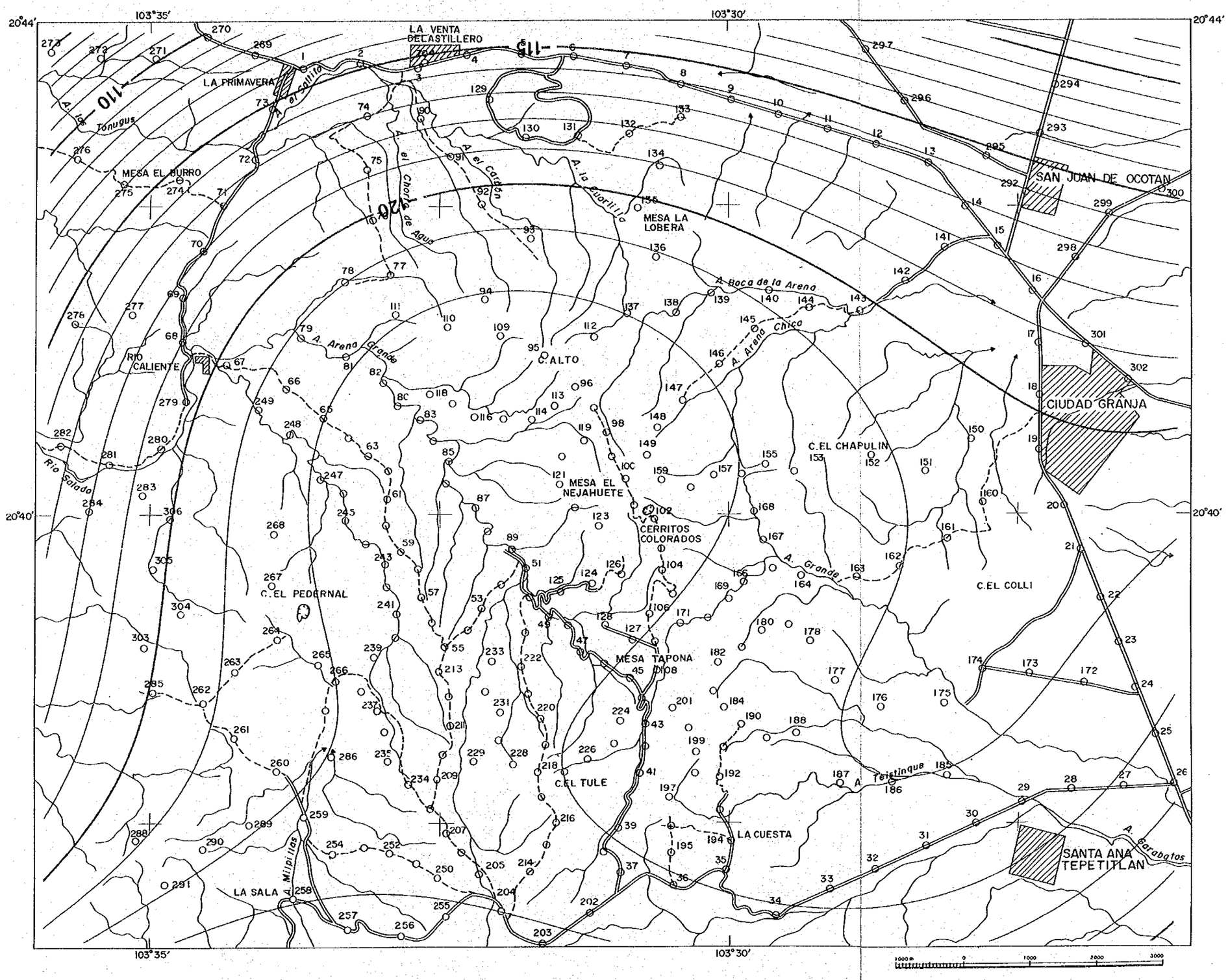


Fig. 19. Third-order trend surface

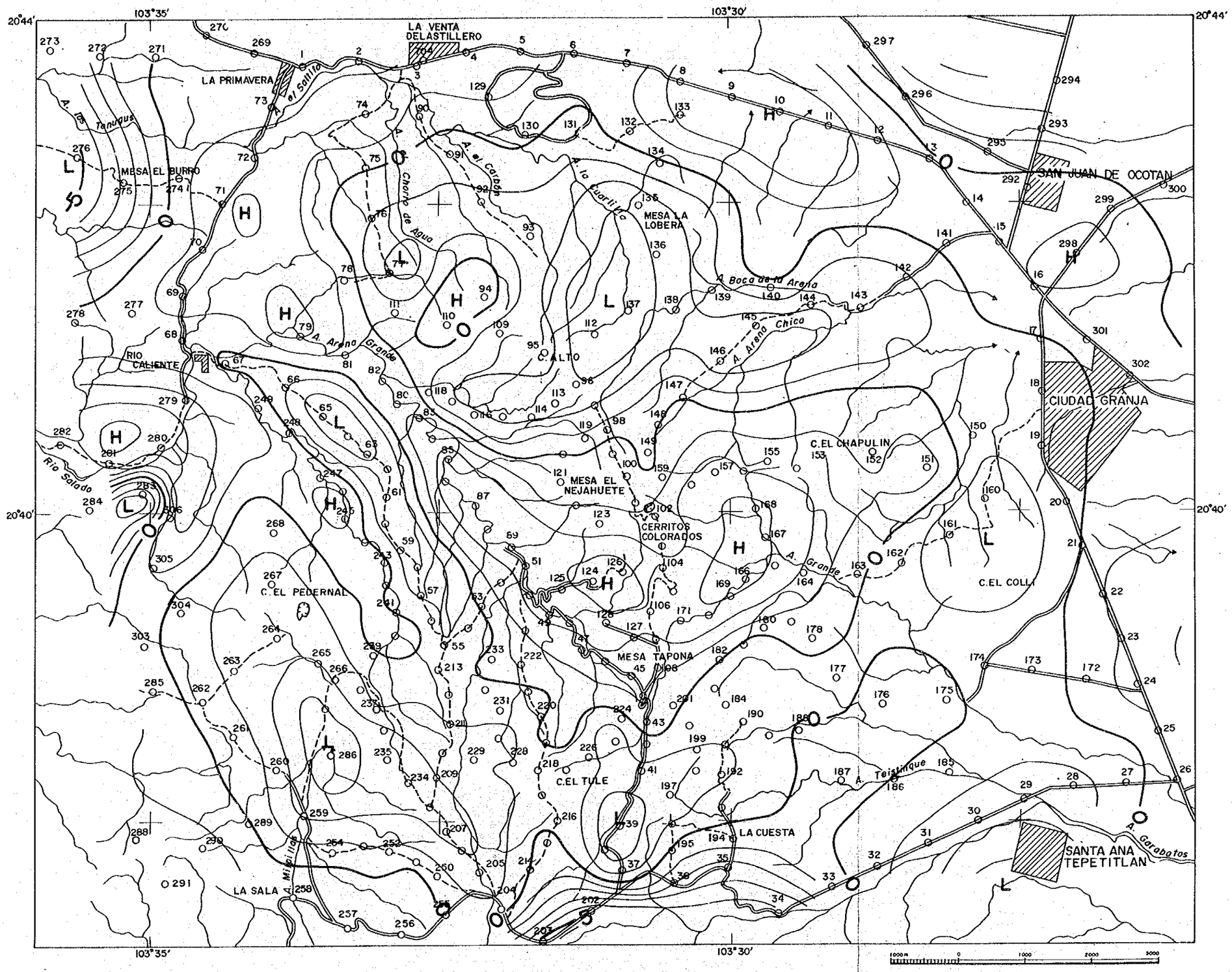


Fig. 20. Residual of third-order trend surface

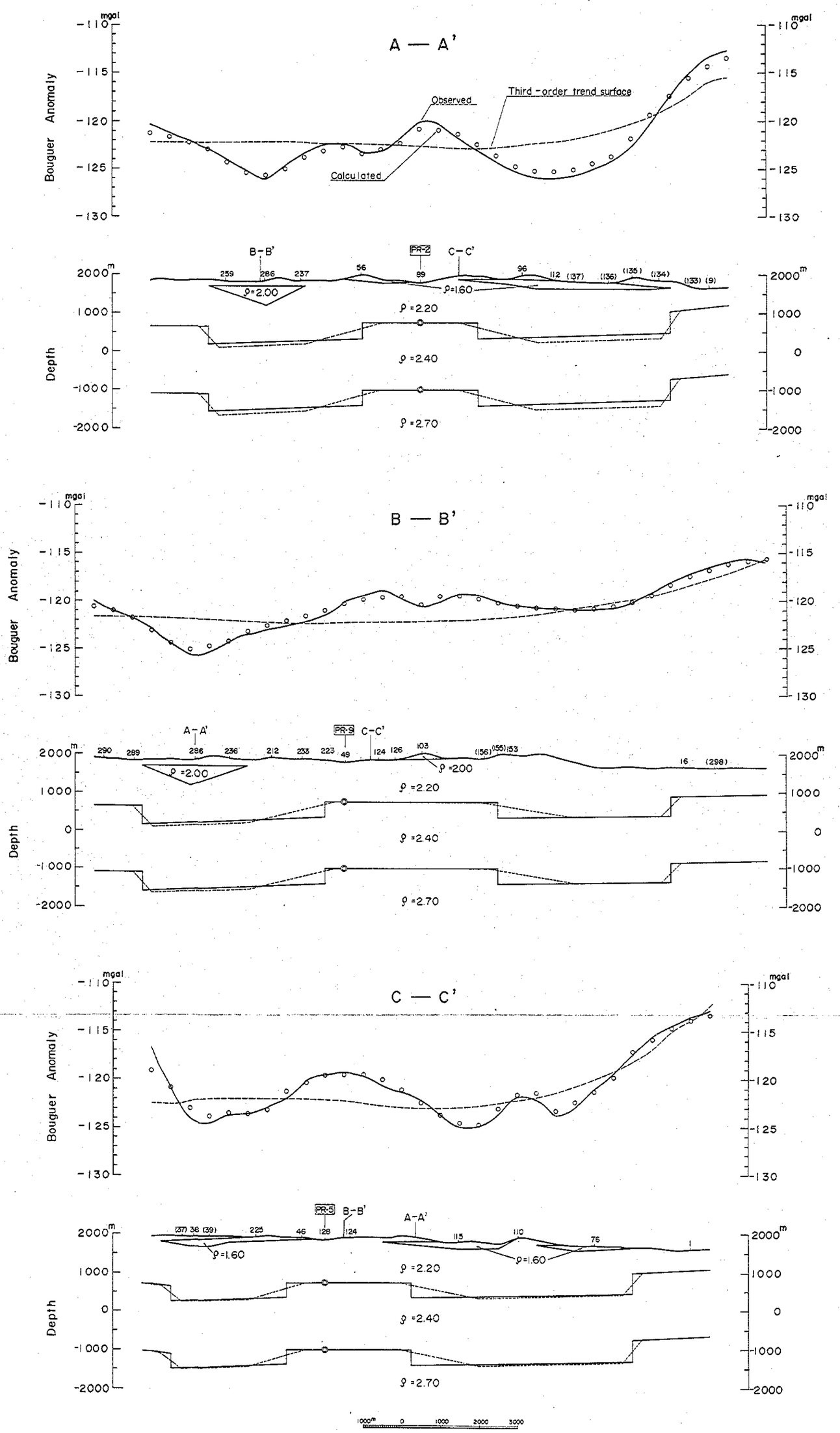


Fig. 21. 2-dimentional gravity analysis, lines A-A' B-B' and C-C' show in Fig. 17

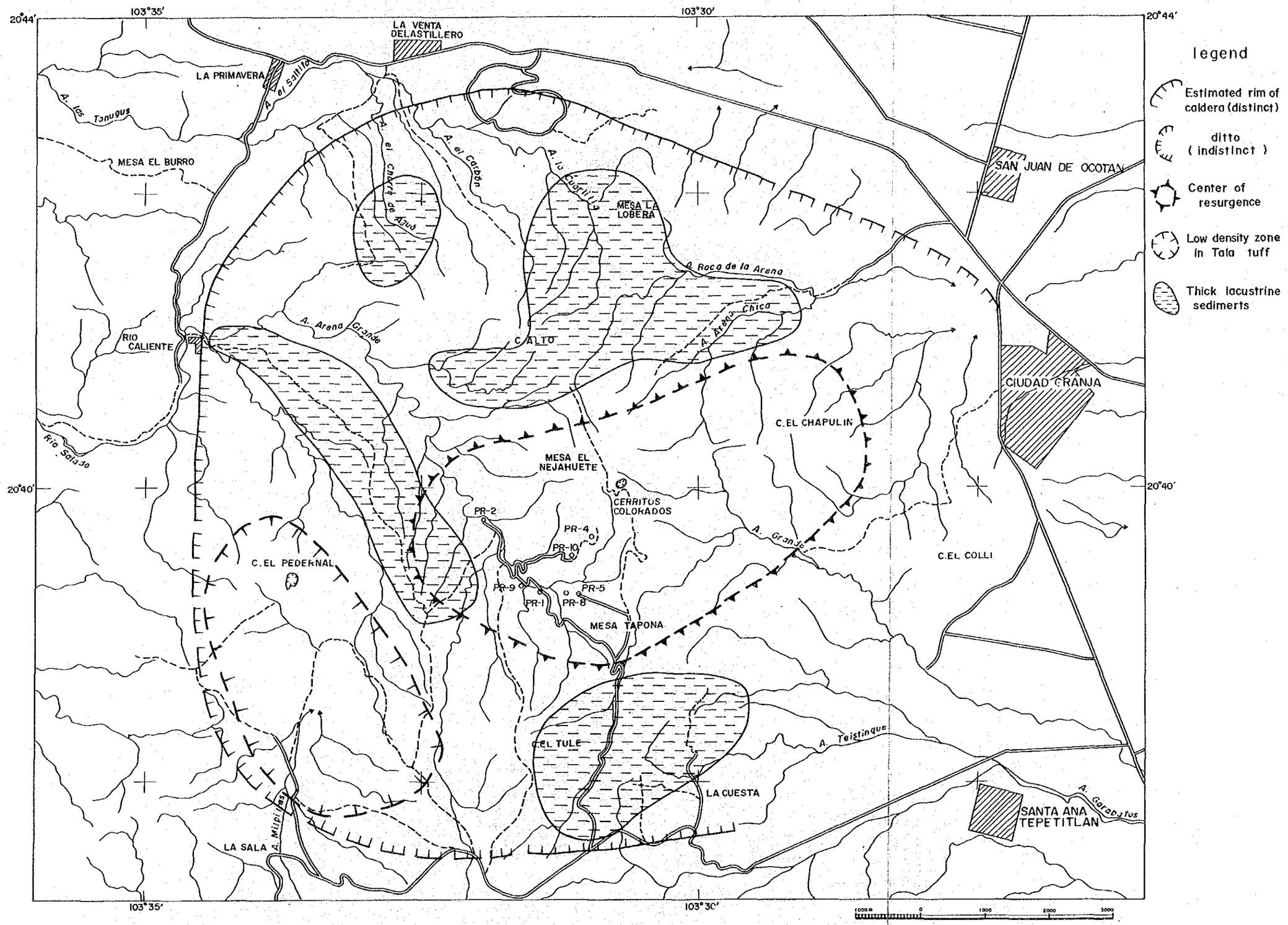


Fig. 22. Structural analizing map of gravity survey