

ボリビア国ラパス市
エル・アルト地区地下水開発計画

最 終 報 告 書

〈参 考〉

昭和62年12月

国際協力事業団

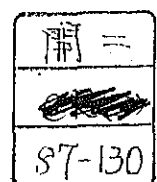
ボリビア国ラパス市
エル・アルト地区地下水開発計画

最終報告書

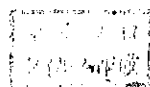
< 参 考 >

昭和62年12月

国際協力事業団



国際協力事業団	
受入 月日	88. 3. 22
	702
登録No.	17323
	61.8
	SDS



序 文

日本国政府は、ボリビア共和国政府の要請に基づき、ボリビア国ラパス市エル・アルト地区地下水開発計画調査を行うことを決定し、その実施を国際協力事業団に委託した。

当事業団は株式会社協和コンサルタンツの進藤昌明氏を団長とする調査団をボリビア国に派遣し、1987年1月から3月まで雨期調査、1987年7月から8月まで乾期調査を行った。

同調査団はボリビア国政府関係者と協議のうえ、現地調査を行った。また、調査団は帰国後、詳細な解析を行い、本報告書提出の運びとなった。

この報告書が本プロジェクトの今後の発展に寄与するとともに、両国の友好関係に貢献できれば幸である。

終わりに、本調査に際し、多大のご協力を頂いたボリビア国政府関係者に対し深く感謝の意を表する次第である。

昭和62年12月

国際協力事業団

総 裁 有田 圭輔

JICA LIBRARY



1041713[7]

伝 達 状

国際協力事業団

総裁 有田 圭輔 殿

ボリビア共和国ラパス市エル・アルト地区地下水開発調査報告書をここに提出致します。本報告書には、当該地域内で実施した地下水開発に係る自然条件と社会条件の調査内容、技術的解析と成果ならびにボリビア政府の要望を勘案し、実現可能な地下水開発計画案を記述しております。

本報告書提出に当たり、全調査期間にわたり、多大なる御協力と御支援をいただいた貴事業団、外務省、在ボリビア日本大使館の諸賢、ならびにボリビア政府緒機関の関係者各位に対し、心から感謝の意を表すものであります。

終わりに、本調査の成果がボリビア国における今後の地下水開発に、また、ひいては同国の発展のために、少なからず活用されるならば、これに優る光栄はないと存じる次第であります。

昭和62年12月

ボリビア共和国ラパス市エル・アルト
地 区 地 下 水 開 発 調 査 団

調査団長 進藤 昌明

要 約

1. 序論

本報告書は1987年1月から1988年1月に実施した、エル・アルト地区内及び周辺の地下水資源開発に関する現地での調査、日本で実施した現況分析と地下水収支の解析並びに地下水開発に関する基本方針等についてまとめたものである。

ラパス市の水供給を担当する上下水道公社（SAMAPA）は、長年に亘りトニー湖を主とした水源とする現況水道施設の増強と拡張に関する研究・調査を実施してきた。その結果、現況の水利権問題、膨大な建設費並びに建設に長期間を要することなどから、これを断念せざるを得なかった。しかしながら、SAMAPAは既存の地下帯水層の研究データを基に、水理地質的観点と技術的観点からエル・アルト地区での地下水開発は非常に有望であるとの認識をもっていた。

以上の背景から、SAMAPAは日本国政府に対し地下水賦存量の調査を含む『ラ・パス市エル・アルト地区の地下水開発計画』に関する調査の実施を要請した。

本調査は以下の3つにより構成されている。

P a r t 1 データの収集とレビュー

- ・ 社会・経済的背景調査
- ・ 既存開発計画
- ・ 自然条件
- ・ 水供給システムと組織
- ・ 地下水に関する既存調査データ

P a r t 2 現地調査

- ・ 現場踏査
- ・ 地質調査
- ・ 井戸揚水試験

P a r t 3 解析と評価

- ・ 地下水賦存量
- ・ 施設計画
- ・ 水需要量
- ・ 概略工事費積算と事業評価
- ・ 計画実施への提言

2. 背景

ラパス市はチョコヤップ川流域に発達した都市で、ボリビア共和国で最も大きく、また由緒ある都市である。ボリビアでは最近、都市人口が急激に伸びている。ラパス市の人口は既に飽和状態で、ラパス市に流入する住民はエル・アルト飛行場の周辺に居住するのを余儀なくされている。市当局はかかる状況に十分に対応できなく、特に既存施設に頼っている水供給は深刻な問題となっている。

計画地域はエル・アルト地区の約 70 Km^2 である。この範囲には既に、幾つもの集落が形成され、その人口は $240,000$ 人にもものぼる。地区内の人々への給水はエル・アルト地区から 37 Km 離れたトゥニー湖を水源とする給水システムによって賄われている。既存施設からの配水は各戸給水や共同水道栓によって行われ、現況総給水能力は、1日当たり約 $28,000 \text{ m}^3$ である。

現況の水道施設は降雨の季節変動に影響されている。さらにボリビアは近年、世界的規模で発生している小降雨気象の影響を受け、貯水池の水位が計画取水位を下回るような深刻な水不足に度々見舞われている。

一方、エル・アルト地区では、既存都市域の周辺にニュータウンが形成されてつつあり、ここも現況給水システムのサービス地区に組み込まれる。しかしながら、給水量の不足と施設未整備の為、新たな居住者は給水車による給水を受けざるを得ない状況である。

3. 調査地域

調査地域はラパス市、エル・アルト地区の計画給水地区、約 70 Km^2 を含む、総面積約 700 Km^2 である。

4. 調査の目的

本調査の目的はラパス市、エル・アルト地区の地下水資源開発の可能性を評価すること並びに本調査期間中に、ボリビア国政府技術者に対し、地下水開発に関する技術移転を実施するものである。

5. 調査内容

本調査は雨期のPhaes 1 調査と、乾期のPhaes 2 調査との2 期に分けて実施された。調査の内容はいかに示す通りである。

Phaes 1 調査

現地調査

現地踏査

データ収集

井戸調書の作成（4 3 井戸）

電気施設調査（6 4 地点）

地下水位観測

表流水観測

地質、水質試験用サンプル採取

国内解析

水質分析

土質試験

水収支解析のデータ準備・テストラン

Phaes 2 調査内容の再吟味

Phaes 2 調査

現地調査

揚水試験（3 カ所）

地下水位観測

表流水観測

地質・水質試験用サンプル採取

建設資工事・資機材の単価調査

国内解析

水質分析

土質試験

トリチウム試験による地下水の年代測定

水収支解析

施設計画

事業費積算

事業評価

6. 調査結果

調査の結果として以下のことが判明した。

滞水層；

モレーン層からの地下水を揚水することが望ましい。

地下水開発実施地区は北辺をチュアニ通り (Calle Chuani)、西辺をタカチラ (Takachira) 及び東辺をジュンツマ・パンパ (Junthuma Pampa) とする三角形地帯に限定すべきである。

水質；

セコ川周辺のエル・アルト地区と現在の市街地は使用できる水質である。ラパス層から揚水する深井戸、並びに地表付近まで上昇した地下水はいずれも使用すべきでない。

よって、井戸建設計画区域は上記、滞水層と水質からの所見を踏まえ決定する。

7. 水収支解析

エル・アルトとその周辺地区の揚水可能水量を計算する水収支計算モデルは、収集した水文、気象、地質等のデータと現地調査の諸結果に基づいて策定された。当初、計画井戸地点の地下水流とその流速は、調査地域西側に広がる急崖地の影響を受けて、複雑かつ急激に変化することが予想された。よって、地域の地下水の流動状況をより現実的に把握するため、電算解析の手法として、平面的な広がり要素を組み込んだ三次元解析を採用した。

電算解析の結果、連続揚水の実施により、地下水位は年々低下することが判明した。井戸地点での水位の低下量は1995年までに25 m、2000年までには35 mと推定された。また水位低下の影響は、2000年で井戸地点から半径1.5 kmの圏内に広がるものと予想される。以上から、本計画では目標年次の上限を2000年までとし、この間の安定的揚水を可能ならしめるべく、年間揚水量を決定すべきである。

モレーン層は平均80 mの層厚を有している。計画井戸深は、モレーン層厚に土砂溜め深さ10 mを加え、90 mとなる。1995年を目標年次とし、セコ川の南東区域に計画井戸を建設した場合、計画揚水量は26,700 m³/日となる。また同様に2005年までは、平均1,000 m³/日の揚水量を持つ27本の井戸から総量26,700 m³/日の揚水が可能であると結論付けられた。

8. 計画諸元

計画給水人口；

自然人口増、鉱山労働者の国内移住等を考慮すれば、中間目標年次、1995年のエル・アルト地区内人口は385,000人、最終目標年次である2000年には495,000人と推定される。

計画給水量；

1995年の日最大給水量は155リットル/人、2000年には160リットル/人になるものと推定される。総給水量は以下の通りである。

1995年	26,700 m ³ /日
2000年	46,200 m ³ /日

9. 計画素案

エル・アルト地区に計画する地下水開発実施区域は、水理・地質的条件から、セコ川の南東に12km、同北西に10kmの範囲で、総延長23kmに広がっている。

水収支の結果並びに地下水開発の技術的可能性から、計画揚水量はセコ川の南東区域で約30,000m³/日、同北西区域で約25,000m³/日とする。

10. 計画施設

計画で実施されるべき主たる施設は以下の通りである。

取水井戸
導水施設
ポンプステーション
電力配給施設
建設用資機材
建設用燃料

11. 事業費積算

事業実施目標は、第1期完了を1995年、第2期完了を2000年とし、2期工事にて分けて実施する。

取水施設の建設費は第1期分として約18億円、第2期分として約11億円と見込まれる。
なを、これら取水施設に配水施設を加え、総事業費が確定されるものである。

12. 事業評価

事業評価は社会的、技術的、経済的及び環境への影響等の要素を勘案して為された。

セコ川の南東に建設される第1期の計画井戸と既存の給水施設によって、計画人口の385,000人が給水される。この施設に、第2期に計画されるセコ川の北西域の井戸を加えれば、量的には目標年次2000年の水需要に対応する。しかしながら、水質面からはミルーニ鉱山の影響に配慮する必要がある。

現況の表流水を水源とするシステムは、既に十分に開発されている。今後、新たな水源を開発するためには、ダム建設やチチカカ湖からポンプ送水するなどの抜本的解決策を必要としている。しかしこれらの事業は、ボリビアの現況から判断すれば、地形的条件、膨大な建設費の財源問題さらに長期に亘る建設期間等から、その実現性は非常に小さいと言わざるを得ない。

一方、地下水開発計画は、前述の表流水開発計画に比して、建設にかかる費用が安価で、工事期間も短い。よって、地下水開発計画を本地域で実施する利点は明らかである。さらにラパス地区の既存給水システムに対しても、一年を通した安定的給水確保の補助水源としても利用できる利点がある。

事業評価の結論として、『地下水開発計画』の実施は本地区に最適な事業であると言える。また本事業の早期実現は、ボリビア国の国家優先政策である地域住民の民生安定に貢献する事は言を待たない。

目 次

	頁
位置図	
要 約	
1 調査の流れ -----	1
1. 1 事前調査 -----	1
1. 2 本格調査 -----	2
2 調査対象地域 -----	3
2. 1 地形・地質 -----	3
2. 2 気象・水文 -----	4
2. 3 給水体系 -----	4
2. 4 既存地下水利用体系 -----	7
3 調査結果 -----	8
3. 1 地形・地質, 水文地質 -----	8
3. 1. 1 地形・地質踏査 -----	8
3. 1. 2 物理探査 -----	11
3. 1. 3 揚水試験 -----	14
3. 2 気象・水文 -----	23
3. 2. 1 気象諸元 -----	23
3. 2. 2 地下水位観測 -----	24
3. 2. 3 表流水観測 -----	30
3. 3 井戸台帳 -----	33
3. 4 水質分析 -----	38
3. 4. 1 調査の目的と方法 -----	38
3. 4. 2 分析結果 -----	41
3. 5 水収支 -----	56
3. 5. 1 解析方法 -----	56
3. 5. 2 現地調査 -----	57

4	最適揚水計画	62
4. 1	開発可能量の検討	62
4. 1. 1	検討方針	62
4. 1. 2	検討条件	62
4. 2	最適揚水計画	63
4. 2. 1	自然条件	63
1)	滞水層	63
2)	水質	65
4. 2. 2	社会条件	67
1)	給水対象領域	67
2)	既存給水体系との整合	68
3)	井戸群の配置	70
4)	揚水量の割り当て	71
4. 2. 3	地下水流動予測	73
1)	計算条件	73
2)	計算経過	79
3)	計算結果	79
5	事業計画	86
5. 1	施設計画案	86
5. 1. 1	計画給水人口	86
5. 1. 2	計画給水量	86
5. 1. 3	施設計画案	86
5. 1. 4	計画施設	87
5. 2	事業費	89
5. 3	事業評価	90
5. 3. 1	事業の社会的評価	90
5. 3. 2	事業の技術的・経済的評価	91
5. 3. 3	環境評価	92

1 調査の流れ

1. 1 事前調査

1986年6月23日付のボリビア共和国の要請に基づき、ラパス市エル・アルト地区における生活用水供給を目的とした地下水開発計画を策定するために、本格調査に先立ち、現地踏査、現地資料収集、及びS/W協議・署名を行った。

調査団はJICA社会開発協力部開発調査2課松谷広志を総括団長として、1986年9月29日より10月16日までボリビア国に派遣された。現地調査結果に基づいて、首都圏水道・下水道公社（SAMAPA）とS/Wに関する協議を行い、双方合意に達し、10月10日企画調整省の次官室においてSAMAPAと協議議事録を取り交わした。

S/W協議の主要な項目は以下のとおりであった。

① 計画対象地域

計画対象地域については、エル・アルト地域のうち空港地域を除く約71.5 km²とする。また調査対象地域については、計画対象地域の周辺約700 km²とする。（調査位置図 参照）

② ボリビア国地質調査所（Servicio Geologico de Bolivia）の調査への参加

③ 物理探査

地質調査では物理探査を行うこととし、その方法は電気探査とする。

④ 既存井戸の管頂水準測量、地下水位観測

地下水位観測のための観測井戸の管頂の水準測量はボリビア側が行うものし、日本側はこれを指導する。

⑤ 調査車両の準備

調査に必要な車両（四輪駆動車）については、SAMAPA所有のものでは不十分であり、稼働状況から日本側で用意する。

⑥ 将来の実施

本格調査が終了した後の実施に関する、ボリビア側からの質問に対し、日本側は、本格調査終了後、ボリビア側が実施を日本側に要請する場合には検討する可能性があることを示唆した。

⑦ 地下水取水施設の動力源

調査の中で取水施設の動力源を検討する際には、内燃機関と風力エネルギーをあわせて検討する。

⑧ 調査の開始時期

本調査の開始の時期は1987年のできるだけ早い時期とする。

1. 2 本格調査

本格調査は1987年1月31日から1987年3月31日までの60日間の雨期調査と、1987年7月1日から8月8日までの40日間の乾期調査とに分けて実施した。

本調査のボリビア側の実施主体はSAMAPAである。SAMAPAの組織図は付録16に示した様に機関の長は市長であるが、実質的な長はGerencia General (ジェネラルマネージャー)である。技術部には、水理、衛生、電子、機械を専門とする上級技術者が8名在職し、20名たらずの中級技術者が配置されている。建設工事に従事する労働者は約400名いる。また中央試験室に2名の化学者が、各浄水場には1名ずつ中級化学者がいる。

本調査にあたっては、技術局長(Gerencia Technica)と計画部長(Dpto Planificacion)がカウンターパートの責任者となった。

地質、地下水、電気探査のカウンターパートはSAMAPAとGEOBOL (水理地質公社)が担当した。GEOBOLの組織図は付録17に示す通りである。また、既存井戸の水位測定のための管頂高および電気探査地点の地盤高の水準測量はSAMAPAが行った。

2 調査対象地域

計画地域は、ラパス市西方の高原台地に位置するエル・アルト地区である。この地区にはエル・アルト空港があり、その周辺を1970年代に開けた住宅地がとりこみ、さらに外側には最近になって開けた新興住宅地が発達している。計画地域の面積は空港を除く約70km²である。本格調査で実施される地下水資源の評価は調査地域を対象として行った。

この調査地域は、計画地域の西方に広がる約660km²の地域で、そのほとんどは地形的には高原台地に属している。この地域は計画地域の地質・地下水・水文などの自然条件を把握するため、より広範囲な調査が必要とされるために設定された。計画地域は、住宅はまばらで、未利用地が多く一部が農地となっている。しかし、水利条件がよくないことや、礫の多い土壌条件などからみて農業生産力は低いものと推定される。とくに乾期には表流水のほとんどが伏流し、かんがい用には利用できなくなるため、調査対象地域内で比較的多く農地として開発されているのはViachaに近い南部のみである。

2. 1 地形・地質

調査対象地域はアルティプラーノの縁辺部にあたり、大部分が標高3,900～4,200m程度の極めて緩やかな地形を呈している。大局的には計画対象地域東の急崖及びエル・アルトから西方へ延びる道路によって、溪谷地帯、山麓緩斜面及び山岳地帯、沖積平地（高原平地）の3つの地域に分けられる。調査対象地域の地質は、古世代シルル紀のカタビ層を基盤とし、これを覆って第三紀のラパス層、第四紀の氷河～河成末区分層や氷河堆積層等が分布する。カタビ層は北北西～南南東方向の地質構造を示し、ラパス市街地に露出しないことからエル・アルト地区では深度500～600m以深に分布すると推定される。ラパス層は細粒の砂岩～シルト岩を主とし、方向はほぼ水平の地質構造を示している。第四紀は大部分が礫層で一部に砂層、粘度層を挟む。有料道路切土面に露出する氷河～河成末区分層は比較的締まっているが、それより上位の氷河堆積層や沖積層は全体にルーズである。

2. 2 気象・水文

エル・アルト地区を含む北部高原台地は、チチカカ湖に流入する河川系流域に属している。これらの河川系は、西部より Khullu Cachi, Sehuenca, Huancase, Seco 等の河川が北部山地から南西方向に流出している。これらの河川のほとんどが、その下流部で北西方向に流れる Rio Castari に合流して、チチカカ湖に流入している。すなわち、高原台地の水文状況は次に述べる特徴を持っている。

・北方山地から南西方向に向かう水系

河川は、山地の氷河、万年雪の融氷や降雨より供給され、通年にて流量を保っている。しかし、平野部に入ると表流水は地下水に伏流して涸沢となる。

・北西方向に向かう水系

河川の方法は、第三紀層や古生代層の地質構造に規制されている。河川は降水や地下水により供給され、通年して流出している。

降雨量および蒸発量の観測は S A M A P A により Milluni、Tuni、Condriiri 貯水池等で行われている。

高原台地の降水量は、一般に北部で多く南部に向かうに従い少なくなる（北部山地では 7 0 0 mm/年以上、南部では 5 5 0 mm/年前後）。

また蒸発量は 1 0 0 ～ 1 3 0 mm/月の値が得られている。

2. 3 給水体系

ラパス市エル・アルト地区の現在の給水は S A M A P A により実施されている。ラパス市の給水システムは三つに分かれており、その水源はいずれも地表水を貯水したダムから得られている。その三つのシステムは、エル・アルト、アチャチカラ、パンパハシであり、それぞれ次のような水源および浄水場を持っている。（詳細は付録 6 既存水道施設概要図 参照）

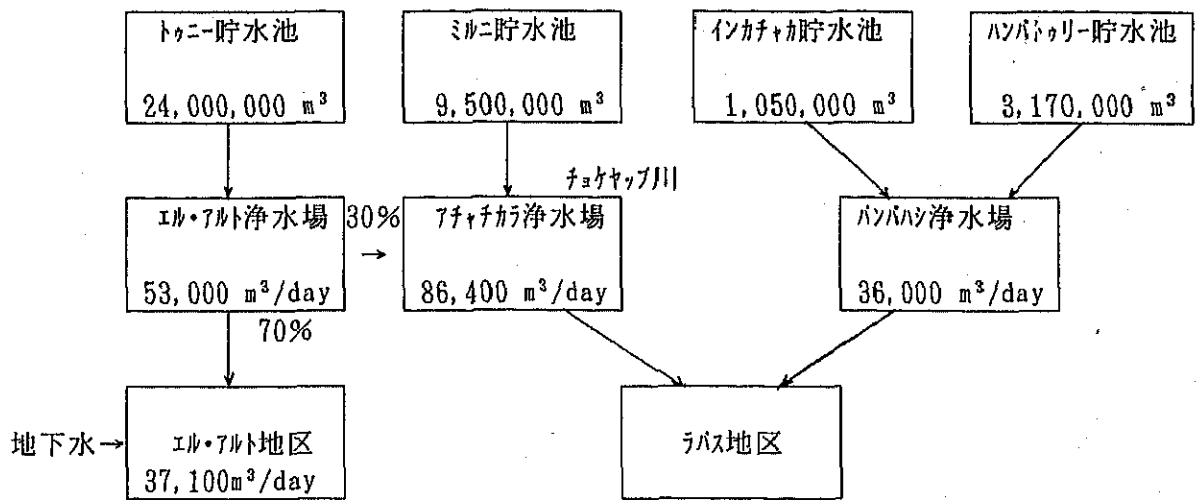


図 2.3-1 給水システム

これらシステムのうち、本調査の対象地域に関連するものは、エル・アルトシステムである。他のシステムは、ラパス市に属する。

エル・アルトシステムにおける給水地域のうち、エル・アルト浄水場からの給水が届かない地区では、個別に掘削された井戸や湧水により飲料水を得ており、給水車による給水も行われている。

ラパス地区では、専用のアチャチカラ浄水場とパンパハン浄水場の水に加えエル・アルト浄水場からも分水を受けているが、時間給水地区や無給水地区もあり、十分な供給状況ではない。

またミルニ貯水池の源水は、鉱山廃水の影響を受けて水質が劣悪な為、これを浄化するのに多くの電力と薬品を使用しており（詳細は付録 7 浄水場月別稼働表 参照）、これに要す費用が S A M A P A の財政を圧迫し新規事業に投資する余裕は全くない状況にある。また 4 貯水池に流入する河川水はすでに十分活用されており、貯水容量を増加させるために他の貯水池を新たに建設したり、水源を更に増加させる方策は事業費が大規模となるため、現在のボリビア国の経済状態からみて、早急に実現出来ない現状にある。よってエル・アルト地区においては、現在の逼迫した水不足を解消し、かつ今後急激に増加する人口に対する水源として地下水依存が唯一可能な対策となっている。

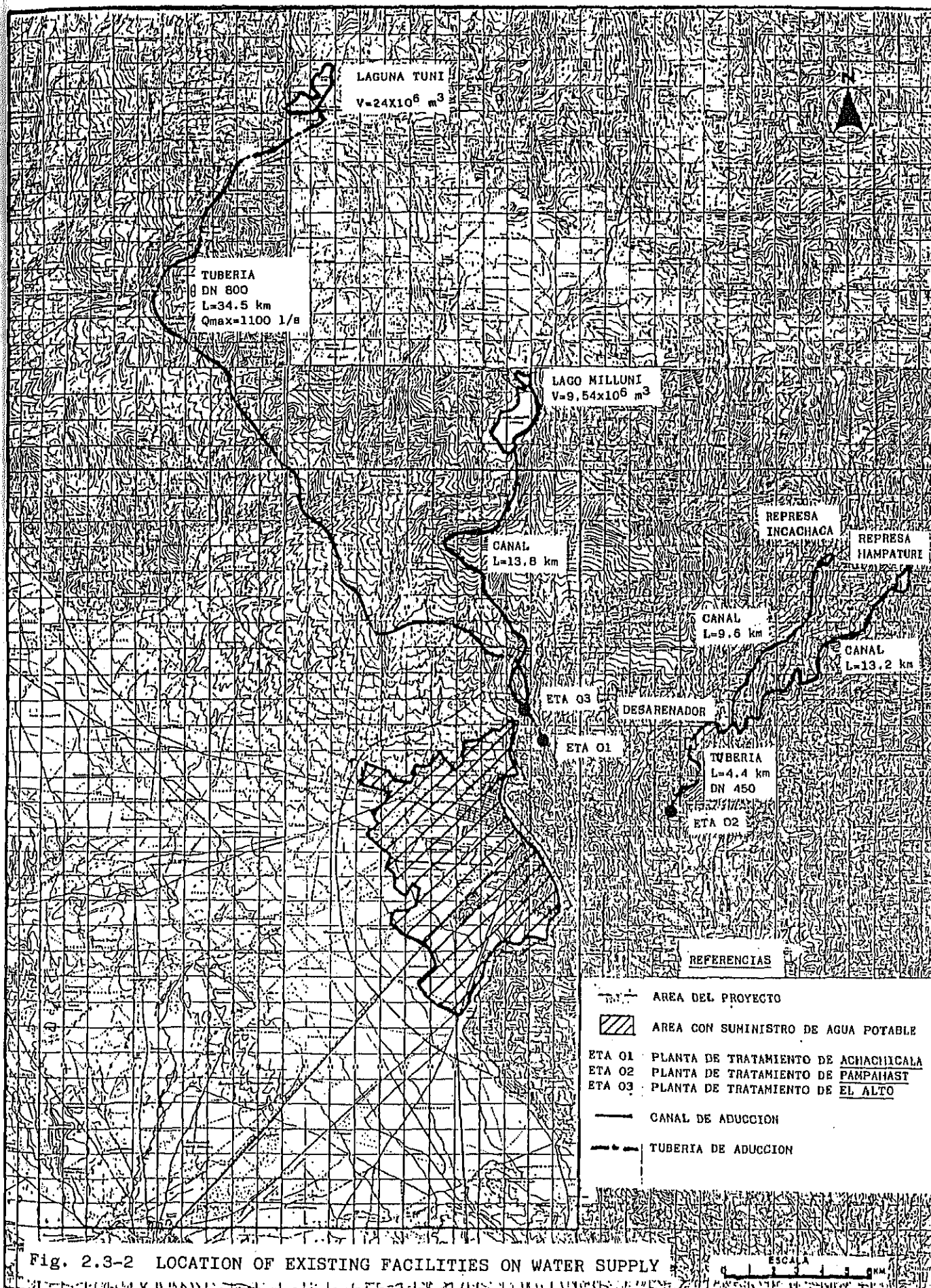


Fig. 2.3-2 LOCATION OF EXISTING FACILITIES ON WATER SUPPLY

2. 4 既存地下水利用体系

調査対象地区であるエル・アルト地区を含めた高原台地での地下水調査に関して、G E O B O L は U N D P（国連開発計画）の協力を得て、北部高原台地とオルロの地下水資源についての調査を行い、1973年に「LOS RECURSOS DE AGUA DEL ALTIPLANO NORTE Y DEL AREA DE ORURO」を刊行した。この報告書には、エル・アルト地区の地形・地質・水質・地下水について記述がなされ、当地区における帯水層の性質、地下水挙動、広域水収支等から地下水開発の可能性のポテンシャルが高いとの評価を与えている。

この結果を踏まえてG E O B O L はエル・アルト地区においては約40本の深井戸を現在までに建設し、井戸建設に関連した技術力を向上させてきた。しかしながら地下水開発に関する十分な技術的能力を持つには至っていないため、井戸完成後予定水量を確保できなかったり、水量からみた井戸寿命が短かったりする例が多く、長期展望にたった地下水開発立案は出来ないものと判断せざるを得ない状況にある。

したがって、今後全国ベースで地下水の利用が望まれるボリビア国に対して本調査を通じて地下水開発に関する技術を移転することは同国にとって大変有意義な事と思われる。

3 調査結果

3. 1 地形・地質、水文地質

3. 1. 1 地形、地質踏査

地形・地質調査は、既存の地形図（1/50,000）および地質図「ラパス」（1/100,000 1967 ボリビア地質調査所）を参考に地表踏査を行い、特に計画対象地域の東縁を画する急崖部について露頭調査を実施し、地質平面図（図 3.1.1-1）及び地質断面図（図 3.1.1-2）を作成した。

調査対象地域はおおむね標高約 4,000 m の平坦な高原台地であり、ラパス市街地はこの高原台地に形成されたチヨケヤブ川の溪谷に発達している。地質は古生代のシルル系～デボン系を基盤とし、その上位に新生代新第三紀鮮新世のラパス層が分布している。ラパス層はラパス市周辺の溪谷地帯に露出しており、全般に細粒分に富み難透水性の地層である。ラパス層の上位は第四紀更新氷河期の氷河堆積物や融氷流水堆積物が分布しているが、このうち最下位の氷河－河成未区分層に含まれる砂礫層は滞水層を形成している。

本地質図は既に発表されているラパス周辺地質図とは多少異なるが、G E O B O L のアルフレッド技師と同行し、同氏の同意の上作成したものである。なお、作成に当たっては下記に留意した。

・既存資料検討

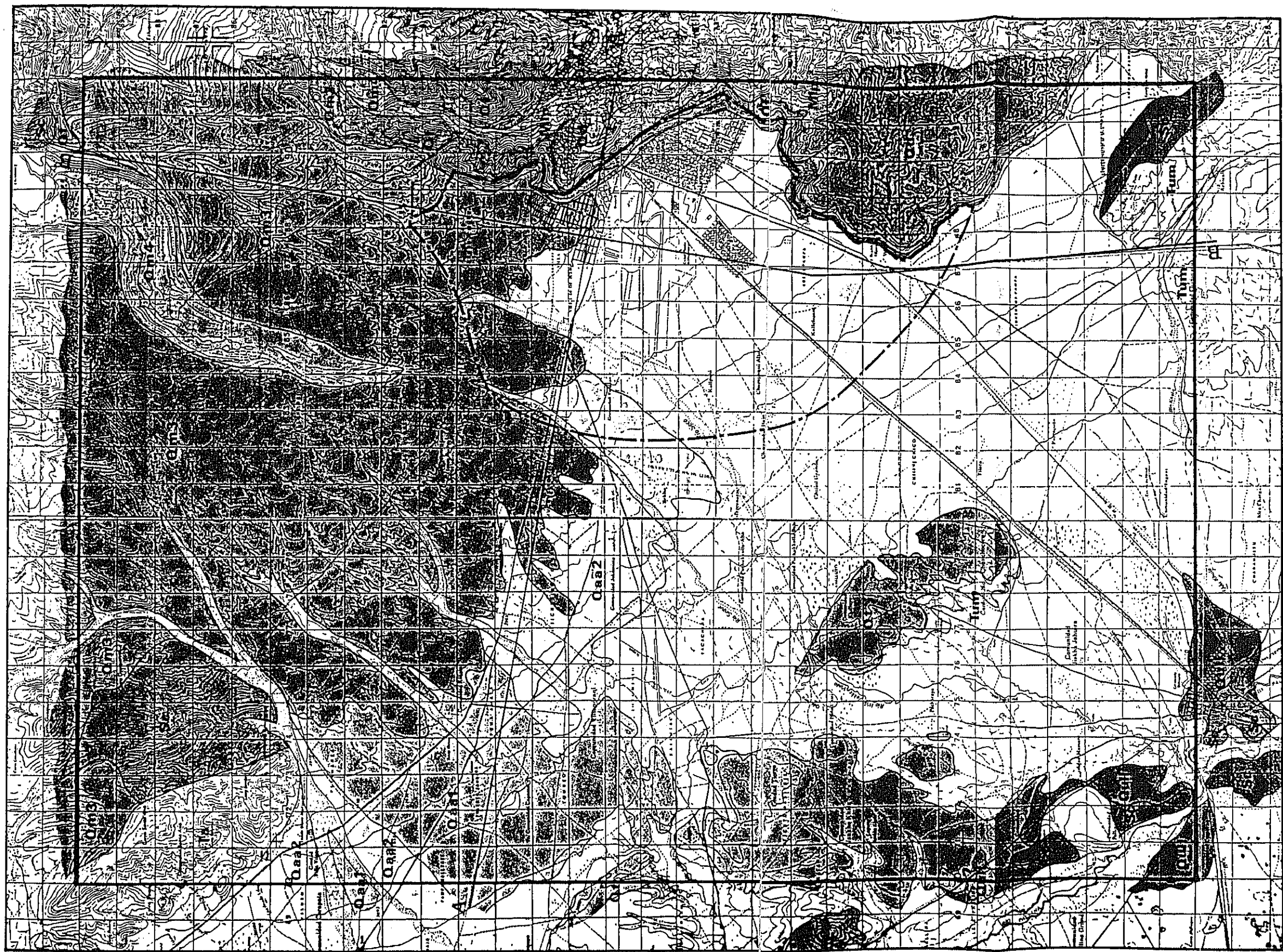
既存資料を検討し、調査対象地域の地質分布、岩質、地質構造、地形の概要を把握した。

・空中写真判読

1983年撮影の空中写真を立体視することにより、調査対象地域の地形区分、崩壊地、リニアメント等を把握した。

・地表地質調査

調査対象地域内の主要露頭について、岩質・地層の走向傾斜、断面の有無等を調査してルートマップを作成し、重要露頭については写真撮影を行い再確認した。



REFERENCIAS

- | | |
|--------------|--|
| Qa | Depositos aluviales |
| Qaa2 | Deslizamientos de terreno |
| Qaa1 | Detritos y canchales |
| Qaa4 | Terrazas |
| Qaa5 | Aluviales modernos (2) |
| Qaa6 | Aluviales antiguos (1) |
| Qaa7 | Morenas de la IV glaciación |
| Qaa8 | Morenas de la III glaciación |
| Qaa9 | Glacial y fluvio-glacial no diferenciado |
| Qaa10 | Formación Ulloma |
- (Terrazas del antiguo Lago Boliviano, intercalaciones de arcillos, arenas, localmente gruesas y turvas)

- | | |
|------------|--|
| Tum | Formación Umla |
| Mip | (Arcillas margosas y arenitas cremas con intercalaciones de tobas) |
| Ta | Formación La Paz |
| Sc | (Conglomerados y areniscas rojas) |
| Sc | Formación Cutavi |
| Sc | (Alternancia de areniscas cuarcíticas lutitas) |

STIGNS CONVENCIONALES GEOLOGICOS

A—A' Perfil geológico transversal

Fig 3.1.1-1 GEOLOGICAL MAP

REFERENCIALS

QUATERNARIO	Qa	Depositos aluviales
	Qd	Deslizamientos de terreno
	Qaa2	Abanicos aluviales modernos(2)
	Qaa1	Abanicos aluviales antiguos(1)
	Qm4	Morrenas de la glaciacion
	Qm3	Morrenas de la glaciacion
TERTIARIO	Qf	Glacial y fluvio-glacial no diferenciado
	Tum	Formacion Unala
	Mlp	Formacion La Paz
SILURICO	Sc	Formacion Catavi

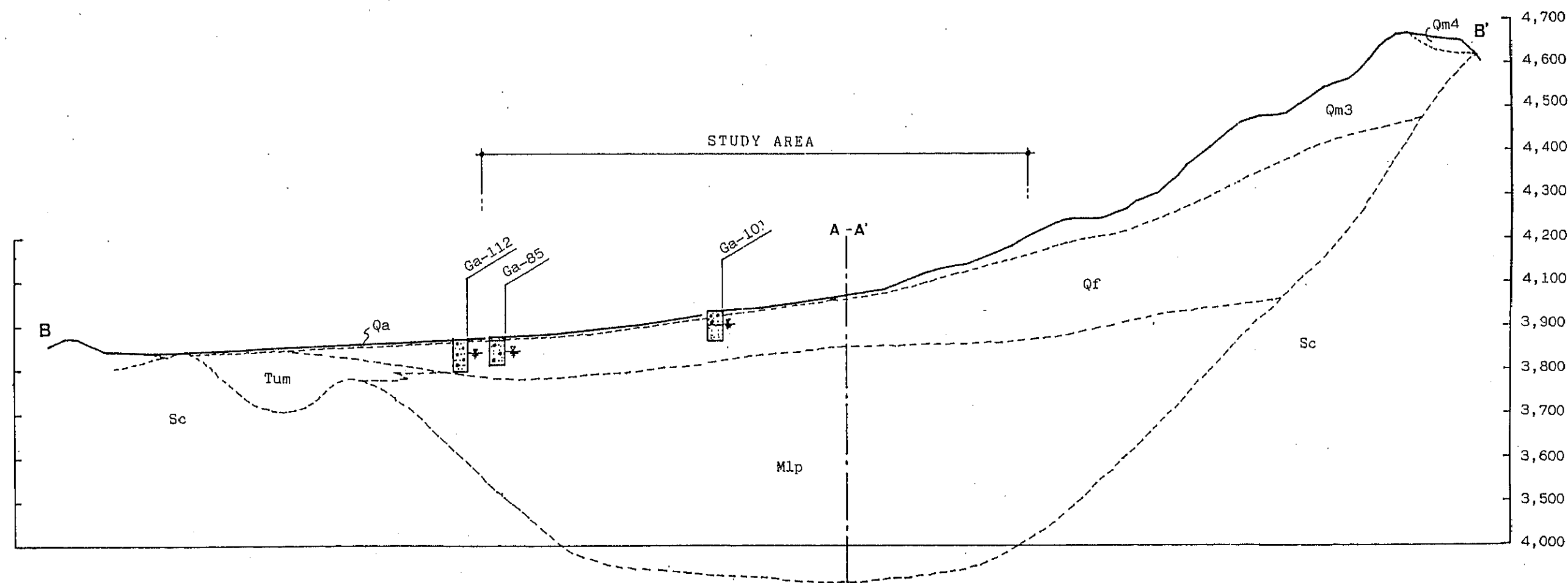
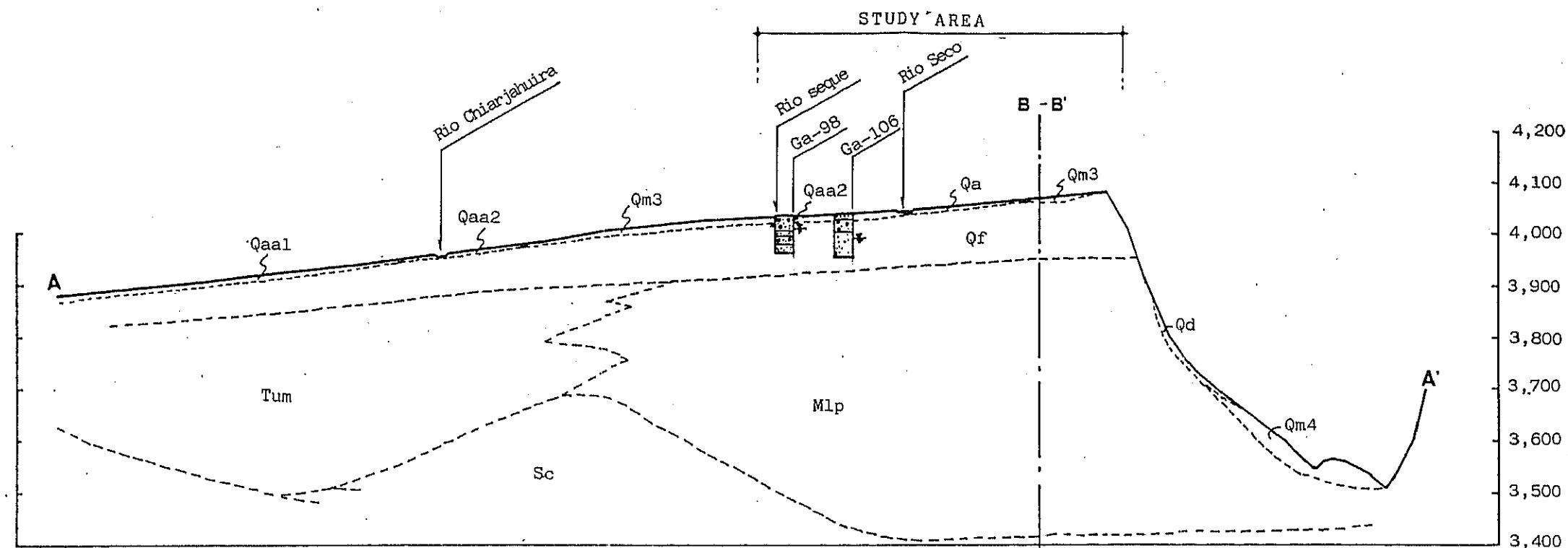


Fig. 3.1.1-2 GEOLOGICAL PROFILE

(scale H=1:100,000 V=1:10,000)

3. 1. 2 物理探査

計画対象地区の東西方向 17 km、南北方向 28 km の 470 km²において 64 点の電気探査を実施した。

日本側が準備した、交換直流型、探査深度 200 m の電気探査器を使用し、シュランベルジャー 4 極法による垂直探査を行った。

電流電極間隔

2, 4, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 120, 150, 200, 300, 400 (m)

電位電極間隔

1, 3, 10, 25 (m)

ボリビア国入国後 G E O B O L 技師と協議し、関係資料を整理した結果、1977 年にエルト地区南部において G E O B O L と B R C M との共同作業により電気探査を実施して作成された詳細な報告書を手に入れた。

エル・アルト地区南部にはもともと現存する井戸数が少なく、1977 年以来大規模な開発は行われておらず、1973 年の地下水位測定と現在の地下水位はほとんど変化が無いことも現地踏査の結果判明した。しかしながら地下水の供給源である北部については調査資料が無く、エル・アルト地区全体の地下水位動向を把握しかねる状況であったため、G E O B O L 技術者と協議し、インセプションレポートで了解を得た調査地点に再検討を加えた結果、本調査においては北部を重点的に調査することとした。南部については 1977 年調査結果との変化もしくは差異を把握する目的から数点を選定して測定することとした。電気探査の調査点は図 3.1.2-1 電気探査位置図に示すとおりである。

調査以前には当地区の地下水水位は、ほぼ地表勾配に平行していると予想されたが、調査の結果、地下水の勾配は地表勾配とは関係無く、エル・アルト地区では多少水位が高いものの、おおむね水平面に近いことが判明した。このことから、当地区はチチカカ湖を中心とする地下水盆の範囲内であろうと判断される。

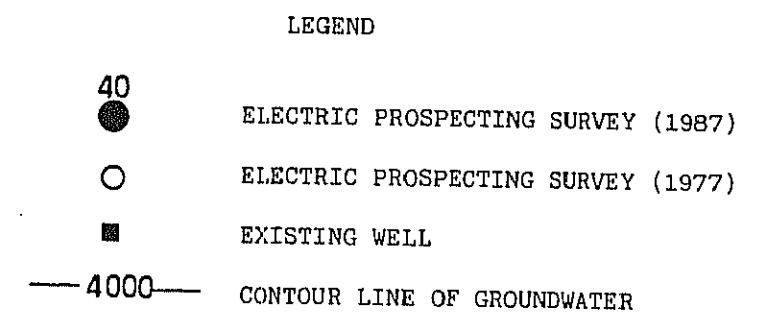
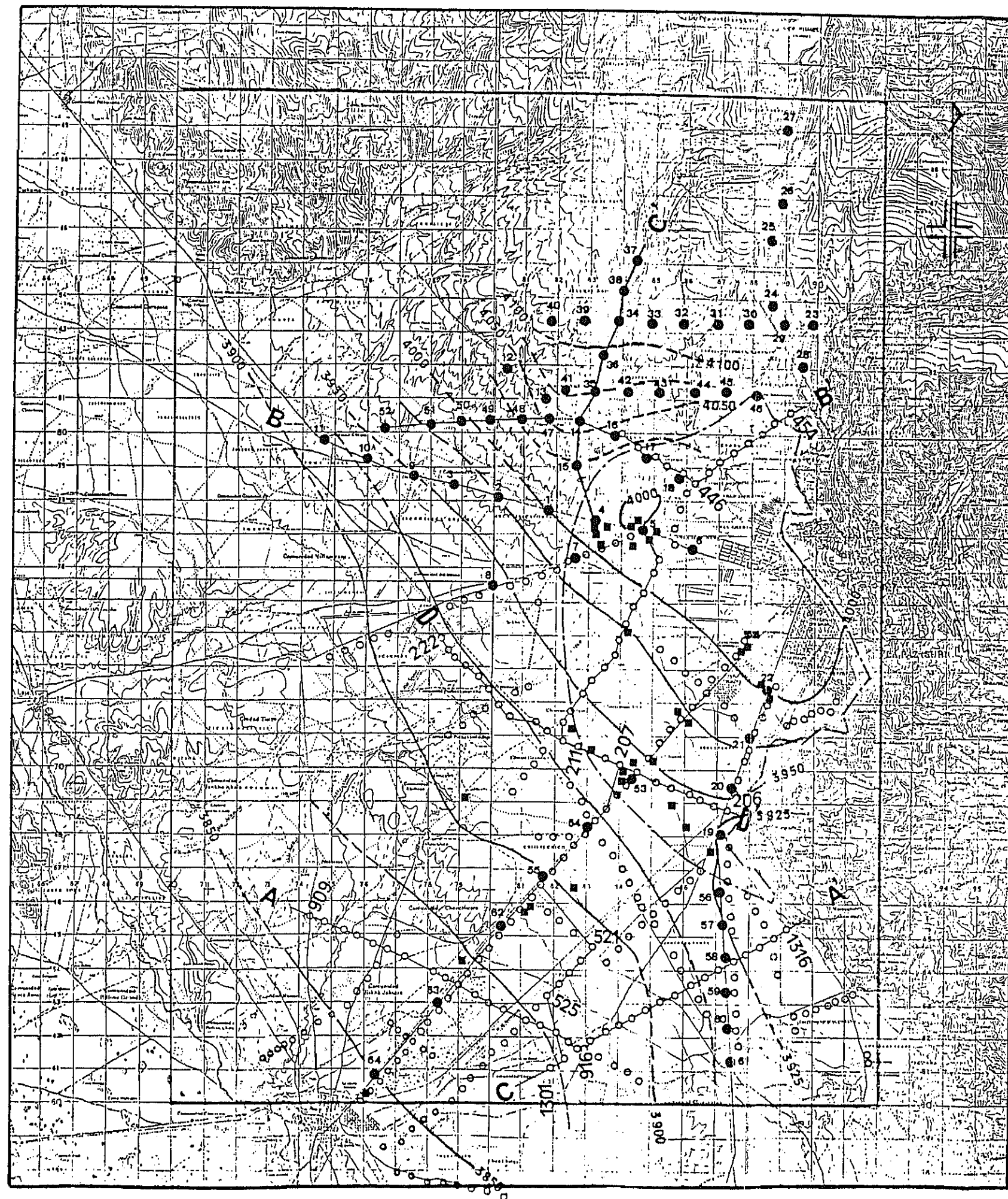
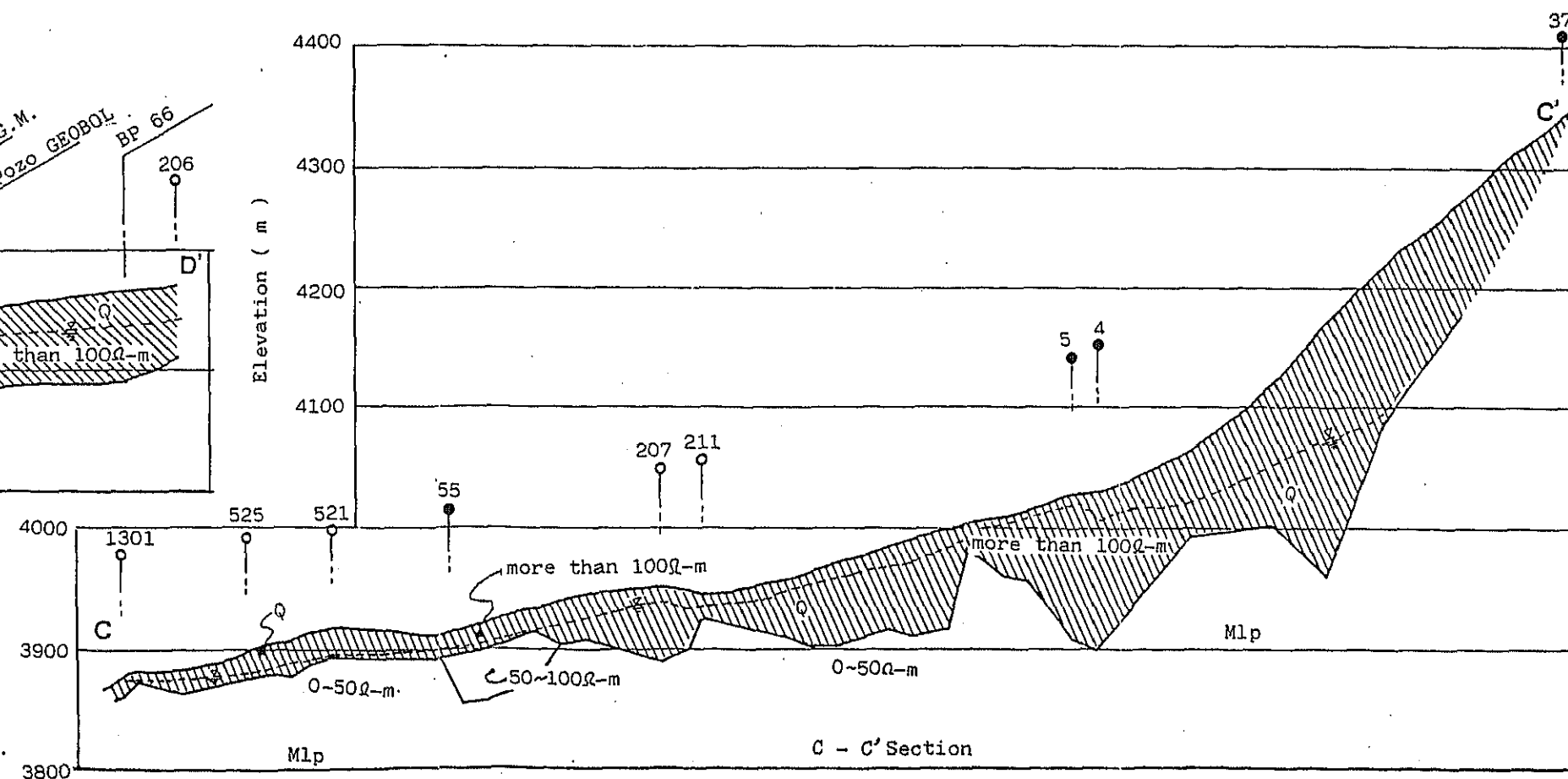
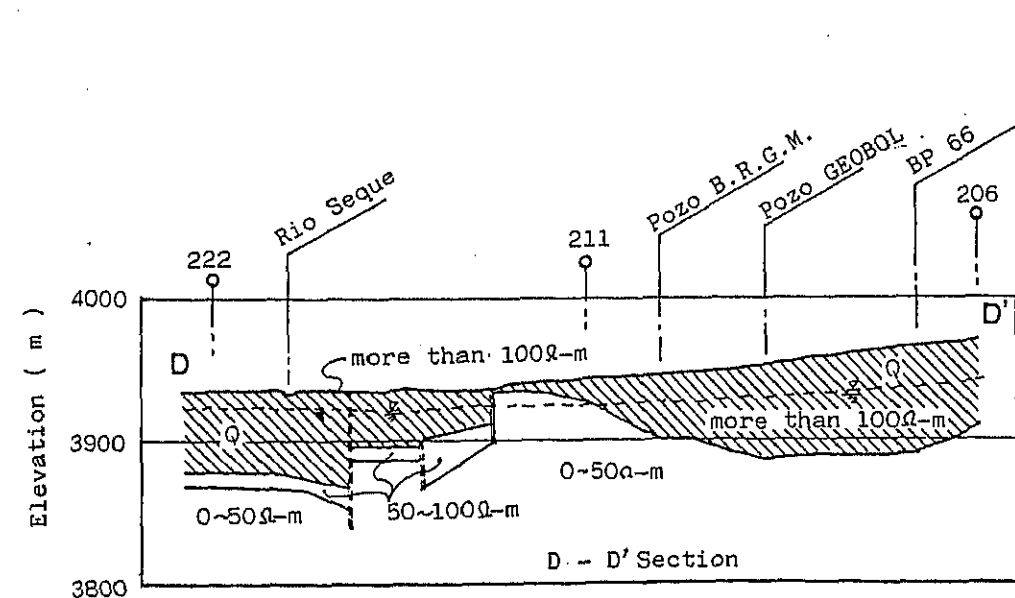
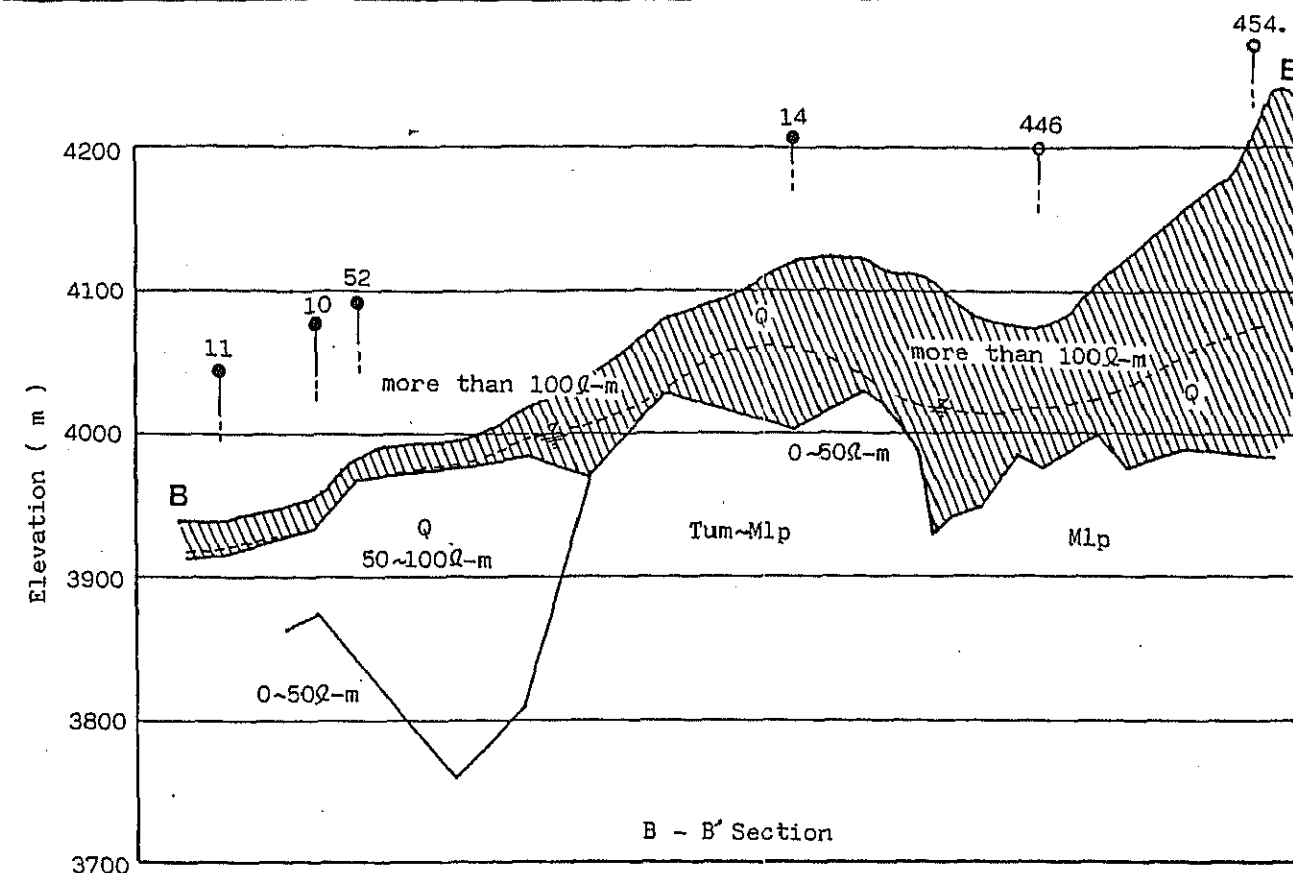
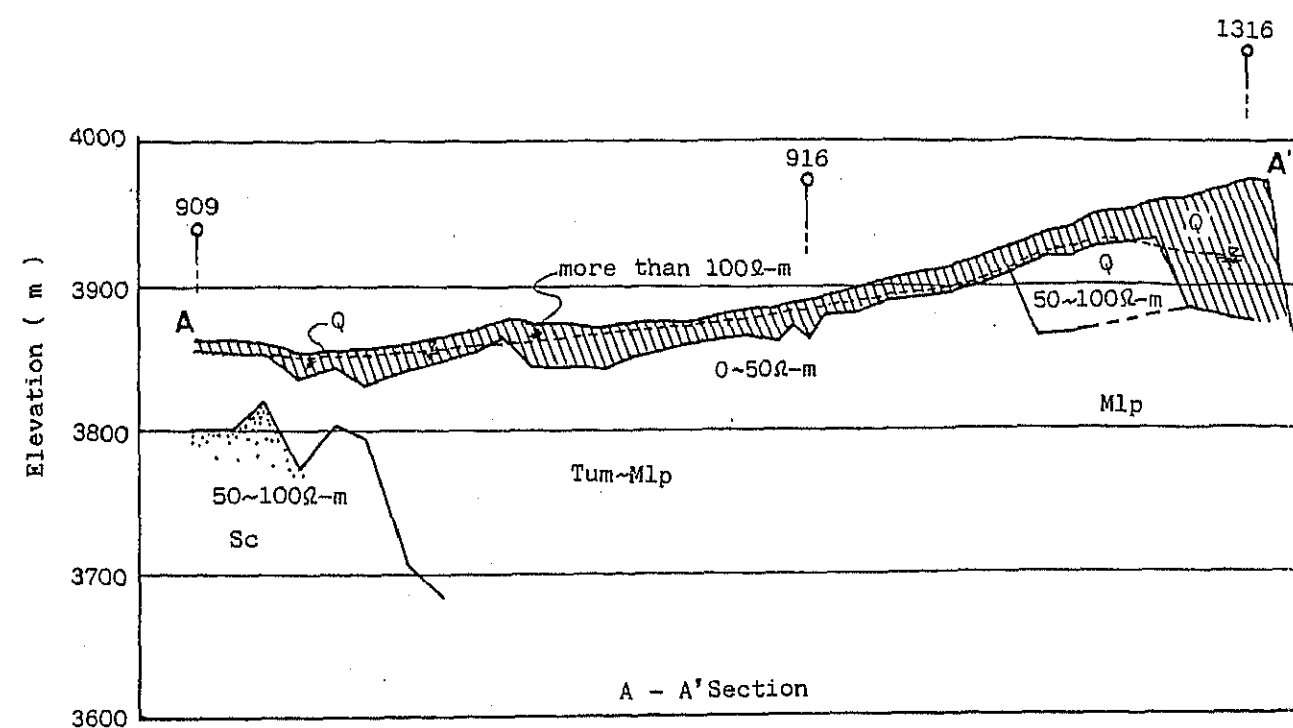


Fig. 3.1.2-1 MAP OF CONTOUR ON GROUNDWATER



REFERENCIALS

- Q Quaternario
- Tum Formacion Umala
- Mlp Formacion La Paz
- Sc Formacion Catavi
- Electric Resistivity: more than 100 Ω-m
- Ground water level
- Electric Prospecting Point (Executed in 1987)
- Electric Prospecting Point (Executed before)

Fig. 3.1.2-2 GEOLOGICAL SECTIONS ESTIMATED ON THE ELECTRIC PROSPECTING SURVEY

SCALE 1:100,000
0 1 2 3 4 5 km

3. 1. 3 揚水試験

1) 揚水試験の目的と方法

揚水試験は井戸の適正な揚水量を決定するために必要な地盤の透水係数を求めることにある。揚水試験は段階揚水試験と滞水層試験および群井試験等があるが、本調査においては段階揚水試験を行いこれにより、滞水層の透水係数を求めることとした。

試験方法は揚水量を幾つかの段階に分けて、一つの段階である時間揚水を継続して水位が安定するまで揚水を継続し、この作業を何回か繰り返して揚水量と水位低下量をとの関係グラフにプロットする。通常その曲線は変曲点をもった形で表され、この変曲点に当たる揚水量を限界揚水量といい、この限界揚水量により、その井戸の地下水域の水収支の均衡を崩さず長期的に揚水できる揚水量すなわち安全揚水量を求めることができる。今回の揚水試験は、今後その周辺で井戸を築造するためのデータを入手することが目的である。調査井戸は既存井であることから、滞水層の湧出能力が試験用ポンプの能力を上回る場合は変曲点までに至らず、限界揚水量を求めることはできない。しかしながらこの場合においても透水係数を求めることができることから、本試験により得られた水理定数を利用し、計画しようとする井戸の口径を仮定して揚水量を算出し、計画取水量、比湧出量等を勘案して、計画井の口径と揚水ポンプの容量を想定できることとなる。

2) 準備作業

試験を実施する前に、現地の既存井戸に対し調査を行い、水理地質的および水質の変動をみて、大局的な見地から下に示す一般的注意事項を加味して選定すべきであるが、全ての井戸が個人または法人の所有であるため、揚水試験が可能な井戸は井戸一覧表（表 3. 1. 3 - 1）に示す7本であった。

位置を選定するときの一般的注意事項

- ・地下水面があまり浅くないこと
- ・なるべく広い場所が確保できること

- ・水路、湖沼、堤防からなるべく離れた場所であつ排水し易いこと
- ・近くにはほかの揚水井がないこと
- ・電気の得易い場所であること

表 3.1.3-1 揚水試験が可能な井戸一覧表

井戸番号	名 称	径	井戸深	水 位	電力	ポンプ	稼働状況	実施
22	INFOL	8 ⁵ / ₈ "	52m	-12.9m	○	○	△	○
29	CENACO	6 ⁵ / ₈ "	64m	-19.4m	○	-	○	○
31	INSA PP-1	8 ⁵ / ₈ "	62m	- 9.0m	-	-	○	
38	CORDEPAZ	8"	48m	- 1.7m	-	-	○	
39	SANAPA	6"	40m	-13.3m	-	○	○	○
41	AASANA	8"	53m	- 2.4m	-	-	△	
42	CONVI	6"	60m	-25.0m	○	-	○	

上表のうち、井戸番号 31, 38, 41 は電力供給はないが、揚水試験をする上で大局的見地、一般的注意事項上最も望ましい位置と考え、ボリビア国側が用意した発電機を現地に搬入し、ポンプ設置をして運転開始した。しかしながら、発電機能力が不十分だったことと、他の省庁等所有発電機の調査をした結果、十分な能力を有する発電機がなかったことから発電機使用による揚水試験を断念し、商用電力を使用できる井戸番号 22, 29, 39, 42 のうち井戸番号 22, 29, 39 について揚水テストを実施することとし準備作業に着手した。

揚水量測定装置

水量を測定する装置は、水量が少ない時は 60°ノッチ、水量が多い時は 90°ノッチを使用するが、今回の場合日本側が準備したポンプの容量が最大 15ℓ/sec. であるため 90°JIS規格ノッチを日本より持ち込み、調査団が持参した設計図で 1ℓ/sec. 毎のメジャーを設置したノッチ箱を作成した。

使用したメジャーの公式は以下のとおり

$$Q = C H^{5/2} \text{ ----- 式-1}$$

ここに Q : 流量 ℓ/sec.

C : 係数 0.014

H : 越流水深 m

水位測定装置

水位測定は日本より持参したマグネットベルによる電気式水位計を使用した。

準備段階のテストでは測定器が井戸のケーブルクリップやワイヤーに引っ掛かる場合もあったので揚水管位置を多少修正したり、練習したりして水位の測定は正確な数値が得られるよう留意した。

揚水ポンプ

揚水ポンプは日本側が準備したポンプを使用することを原則としてボリビア国入国後、水封水の追加、接続パイプのネジ切り等必要な処置を経て現場での揚水試験に先立ちポンプ性能テスト（エルアルト浄水場にて）、バルブの水量コントロール状況の確認、プレッシャーゲージの確認、水位低下のブレーカーの確認等を行った。

3) 観測作業

観測作業を実施した3井のうち、ポンプ設置済みのNo.22 INFOL とNo.39 のSAMAPA は既存ポンプを使用し、No.29 CENACO は日本側が準備したポンプを使用した。またINFOL、SAMAPA 共スルースバルブ、プレッシャーゲージ等が不完全であったため揚水テストは日本側が準備した曲管、エア弁、プレッシャーゲージ、スルースバルブを設置し観測した。揚水試験開始はスルースバルブ全閉で運転し、プレッシャーを確認し次第にバルブを開閉し、ノッチによる水量とプレッシャーの両方を観測してバルブ操作による揚水量の一定化を計った。

INFOL : 現在工場を建設中で土曜日、日曜日を除いて観測作業ができない状況であったため、土曜日にパイプの付け替え、排水路の築造、泥水排除、予備観測を実施し、日曜日は使用許可を受けた早朝より夕方まで揚水試験を実施した。また既存ポンプの撤去を試みたが、高架水槽架台直下に井戸があり、ポンプ引き上げが不可能であったため、既存ポンプをやむなく使用することとした。予備観測においてポンプ能力による最大揚水量は 5 l/sec 、以下であることを確認したので本観測における段階を 1 l/sec から順次 1 l/sec 、ずつ増加させ、最終をポンプの可能な最大揚水量で測定し、復旧試験をすることとした。揚水試験結果は図 3.1.3-1 の通りである。

CENACO : 現在用地は国有財産の倉庫として使われているが、管理人は飲料水を買水に頼り、それ以外の水を必要としていないため、ポンプが撤去され放置された状況にあった。日本側が準備したポンプを設置し予備観測を実施したところ、長期間使用していなかったため第一日を排泥、清掃、予備観測とした。揚水ポンプはストレーナ位置まで 3.7 m 下げて設置し、動水位の最低水位 3.7 m を目標に INFOL と同様 1 l/sec から順次 1 l/sec 、ずつ増加させ、 3.7 m 付近の揚水量を最終段階揚水量とすることとして揚水試験を実施した。最終段階は 36.9 m で排砂量もかなり認められた。その揚水試験結果は図 3.1.3-2 の通りである。

SAMAPA : 現在工事を完了し今後配管を接続し使用する直前であった。本井戸は Rio Seco の河道内の高水敷上に位置し、他に比べ流入細砂量も少ないものと判断され、ストレーナが $\text{GL}-2.7 \text{ m}$ にセットされているにもかかわらず、ポンプは $\text{GL}-3.0 \text{ m}$ にセットされていたので他の揚水テストと同様 1 l/sec から順次 1 l/sec 、ずつ増加させポンプの最大揚水量もしくは砂流入の危険揚水量に至るまでこれを継続することとし、揚水量 4.21 l/sec 、水位 -25.5 m をもって最終段階を終了した。その揚水試験結果は図 3.1.3-3 のとおりである。

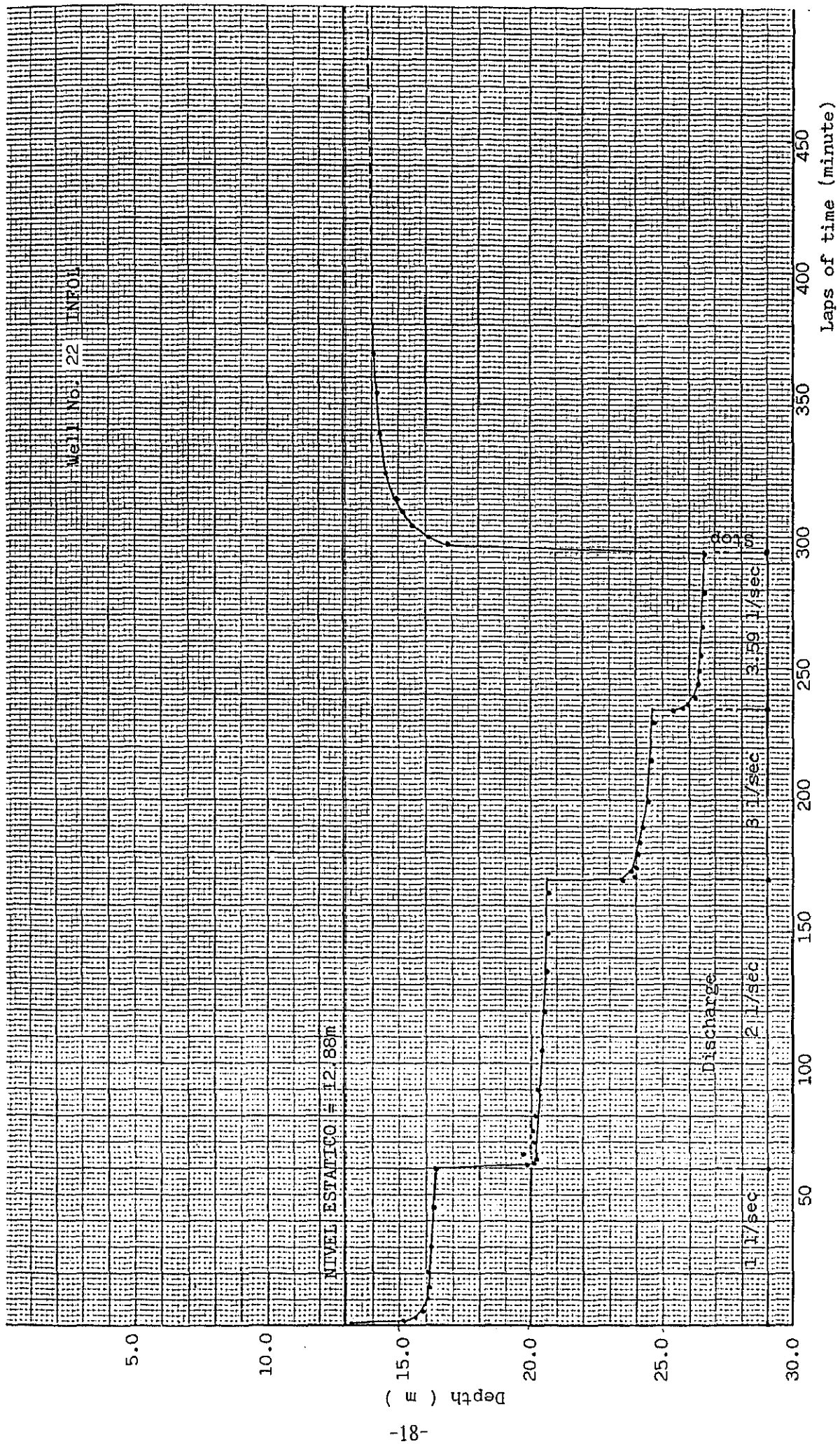


fig. 3.1.3-1 RESULT OF PUMPING TEST (1)

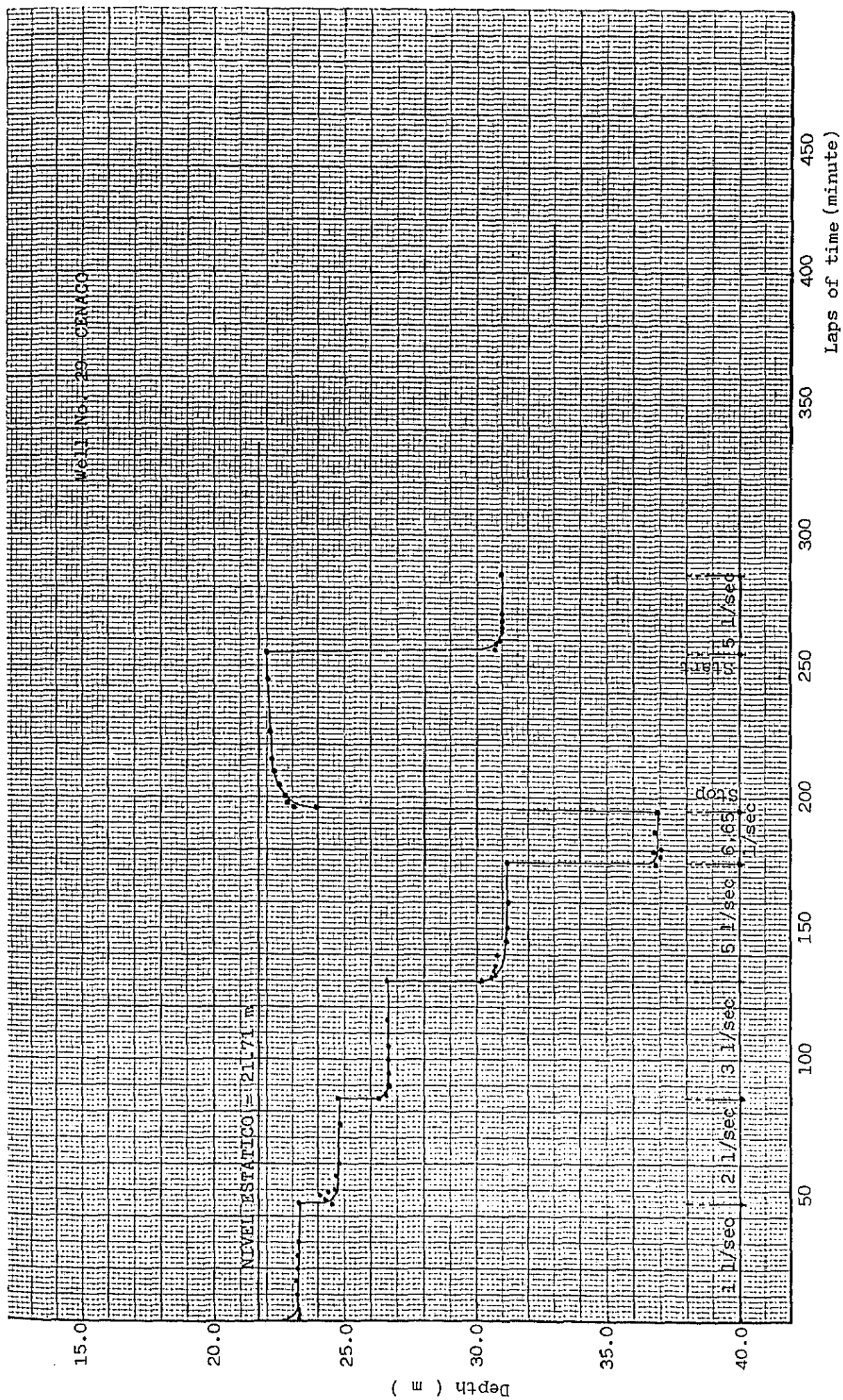


fig. 3.1.3-2 RESULT OF PUMPING TEST (2)

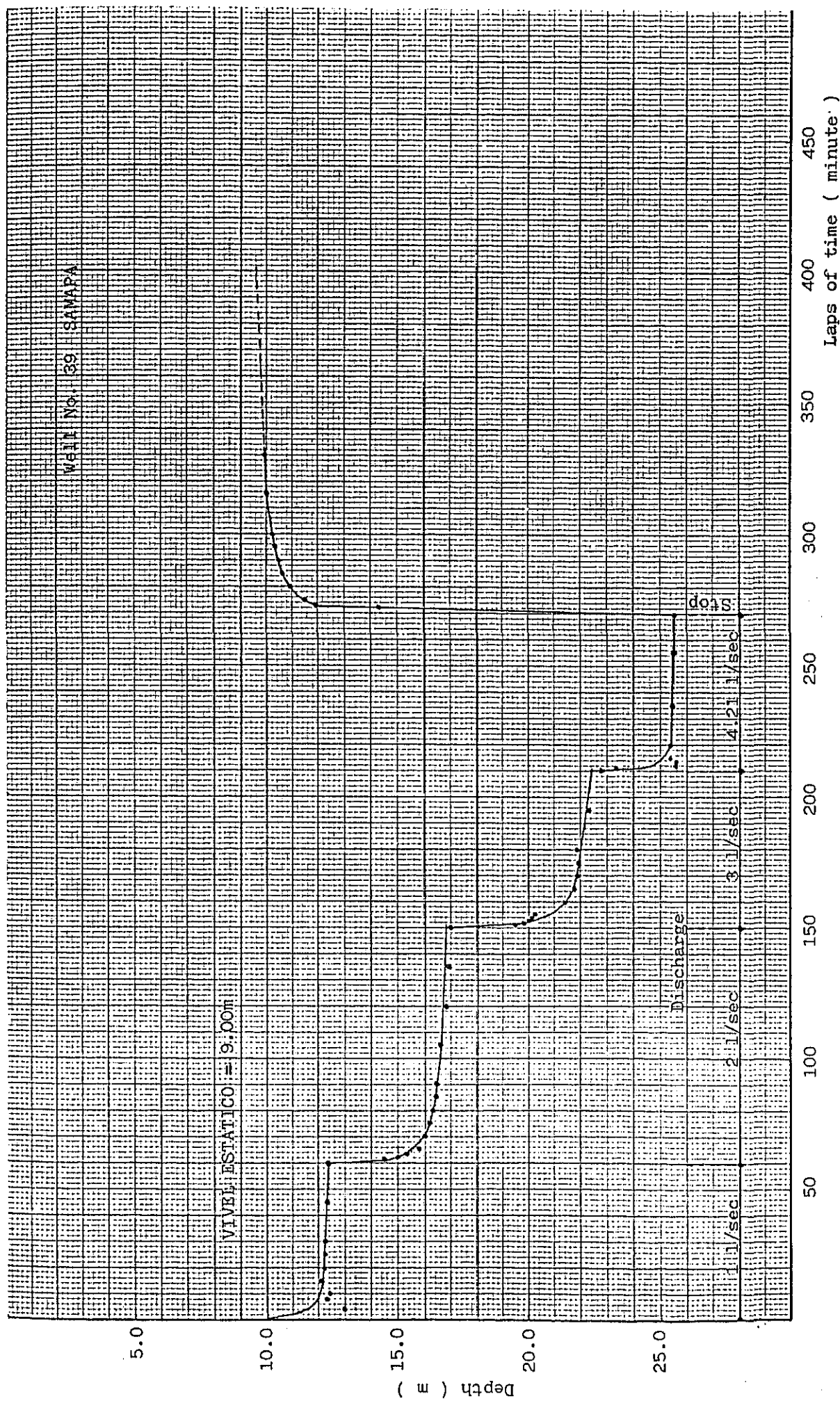


fig. 3.1.3-3 RESULT OF PUMPING TEST (3)

4) 観測結果

完全不圧井としての平衡式（式-2）により、各井戸の透水係数を求める。揚水量は各井戸の揚水試験における最大揚水量を限界揚水量とし、その7割を適正揚水量として計算する。

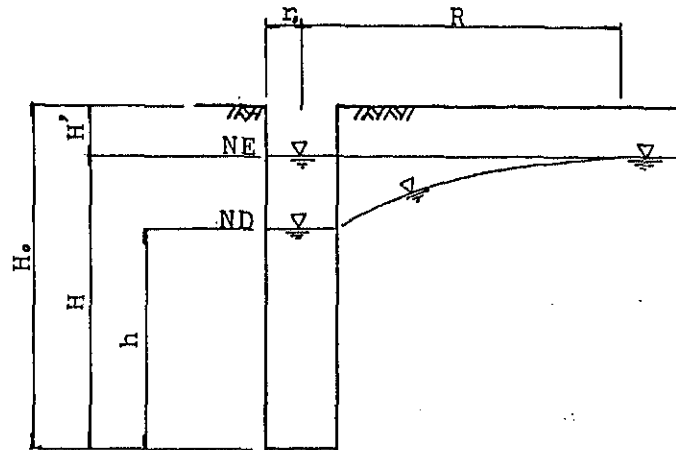


図 3.1.3 - 4

平衡式
$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h^2)}{2.3 \log R/r_o} \quad \text{----- 式-2}$$

Q : 揚水量 m^3/min

H o : 井戸深度 (m)

H' : 自然水位 (N.E m)

H : 自然水位の深度 (m)

h : 動水位 (N.O m)

r o : 井戸半径 (m)

R : 影響圏半径 (400 mと仮定)

k : 透水係数 (m/min.)

井戸 No.22
$$0.18 = \frac{3.14 k (38.5^2 - 14^2)}{2.3 \log 400/0.1} \quad \therefore k = 0.3 \times 10^{-3}$$

$$\text{井戸 No. 29} \quad 0.3 = \frac{3.14 k (41.9^2 - 10.7^2)}{2.3 \log 400/0.08} \quad \therefore k = 0.49 \times 10^{-3}$$

$$\text{井戸 No. 39} \quad 0.18 = \frac{3.14 k (31^2 - 17.19^2)}{2.3 \log 400/0.08} \quad \therefore k = 0.7 \times 10^{-3}$$

透水係数は $0.3 \sim 0.7 \times 10^{-3}$ の範囲にあり、その平均値は $0.5 \times 10^{-3} \text{ m/min}$ である。

通常、都市向水道の深井戸としては、建設費、維持管理費から考え、1井当たり $1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 以上を目標をする。揚水テストの結果から判断するに今後開発する井戸については既存井戸よりも井戸深度を大きくしかつ井戸径を大きくすることが必要であつと考えられる。

しかしながら、エル・アルト地区北部では井戸深度を大にし、井戸径を大にしても揚水量は増加していない。これは山岳部の地質的影響を受け、モレーナ深が 70 m 程度であり深くしてもあまり効果がないからである。またこれは電気探査解析結果とも符合する点である。よって、より多くの取水量を期待するにはモレーナの深い、更に南部地区に井戸を建設することが望まれる。

例題 1

井戸深 120 m 、水位低下 20 m 、井戸径 300 mm の場合

$$Q = \frac{3.14 \times 0.5 \times 10^{-3} \times (120^2 - 100^2)}{2.3 \times \log 500/0.15} = 0.853 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\therefore \text{1日当たり } 0.853 \times 60 \times 24 = 1,228 \text{ m}^3$$

例題 2

井戸深 100 m 、水位低下 20 m 、井戸径 300 mm の場合

$$Q = \frac{3.14 \times 0.5 \times 10^{-3} (100^2 - 80^2)}{2.3 \times \log 500/0.15} = 0.698 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\therefore \text{1日当たり } 0.698 \times 60 \times 24 = 1,004 \text{ m}^3$$

よって、新たな井戸の計画に当たっては、約 100 m 以上のモレーナ層を有する位置に井戸建設することが望まれる。

3. 2 気象・水文

3. 2. 1 気象諸元

調査対象地域内にはラパス市水道の水源である Milluni, Tuni, Condoriri の 3 カ所および計画対象地域である El Alto, Aero Puerto の 2 カ所において気象・水文の観測がなされており、日雨量、日最高気温、日最低気温、日平均気温の 1982～1986 データを入手した。（付録 9 参照）

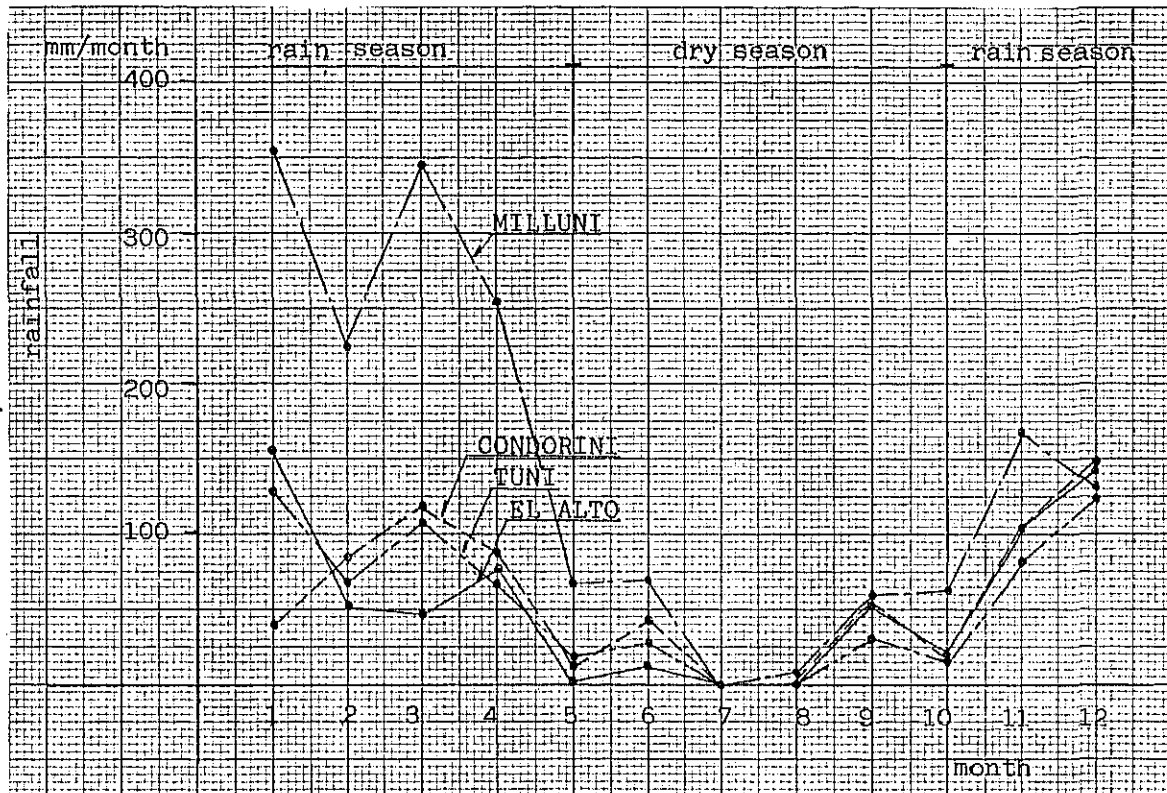


Fig.3.2.1-1 Regional mean annual rainfall (1985)

3. 2. 2 地下水位観測

1) 調査方法

a. 資料集および整理

調査対象地域内における大半の既存井戸は、G E O B O Lが建設していることから、G E O B O Lが保有するデータから本調査に関係すると思われる42本の既存井戸資料を収集した。G E O B O Lが建設したほとんどの井戸は、エル・アルト地区の各種工場から依頼を受けたものであり、個人使用のためのものは少ない。各井戸のデータには、位置、施主、建設年次、要員、使用機械、施工状況、地質状況、ケーシングおよびスクリーンの設置、揚水試験結果等が記述されており、井戸建設状況を知ることができた。本調査ではこれらのデータを参考に井戸調書を作成した。

b. 既存井戸調査

調査対象の既存井戸は1974～1987年にわたって建設されたものである。建設当時と現在との地下水変化の状況を知るために、先に作成した井戸調書を基に既存井戸調査を行った。調査項目は以下の通り。

- ・現在の稼働状況
- ・揚水管の管径、管種
- ・静水位、動水位、水位低下量
- ・一日当たり揚水量
- ・一日当たり運転時間

c. 井戸天端水準測量

暫定井戸調書より選定した既存井戸について井戸天端および地盤高の水準測量を実施した。本調査はS A M A P Aの調査、測量部のメンバー2チームにより実施された。

d. 井戸一覧表作成

実施した調査項目のうちから、下記の項目について一覧表を作成した。

- ・ 井戸番号
- ・ 静水位（標高）
- ・ 建設当時と現在との静水位差
- ・ 井戸径
- ・ 井戸深
- ・ 建設当時の可能揚水量

2) 雨期調査

既存井戸を利用して水位観測をすることにより、地下水流動状況を知り、涵養機構解析のための地下水初期値すなわち現在の静水位を測定した。（図 3.

3-1 既存井戸位置図参照）

水位回復テストの結果、ポンプ停止後 1 時間を経過すれば静水位に回復することが確認されたので、運転していない井戸と運転停止を 1 時間以上可能な井戸に対して水位を測定した。なお、調査期間中偶然にも土曜、日曜にナショナルホリデーを加えた 4 連休があり、当国における最長の休暇で、エル・アルト地区の全工場が操業をストップした。よってその最終日に立ち入り可能な工場で水位を測定したが、1 時間程度の運転停止の水位と変化がないことが確認された。雨期調査を通じて明白になった事項は次の通りである。

- ① 井戸間隔が狭い所は年々静水位が低下し、干渉し合っている。
- ② 井戸間隔広く、かつ揚水量が少ない地区の地下水位は 1973 年の調査時点とほとんど水位変化がない。
- ③ 水位回復テスト（表 3.3-1 井戸台帳および 付録 2 井戸調書 参照）、水位低下量観測（同 17 井戸調書 参照）の結果、水位反応時間は短く、かつ静水位・動水位の測定が容易である。
- ④ 井戸径の割に揚水量が少ない。

3) 乾期調査

乾期調査も雨期調査と全く同様な手法で調査した。雨期と乾期の水位を比較した場合、上下変動が見られるが、地区により変動・傾向が異なる。すなわち、エル・アルト中心区域では雨期に比べ、低下の方向にあり、それ以外の地区では雨期とほぼ同様な数値を示す。以下地区別に変動量と原因に対する考察を述べる。

a. エル・アルト中心区域（工場集中地域）

この区域は工場が集中しており乾期の水使用量が増大したため、地下水が低下したものと考えられる。水使用量の増大は各工場の運手よりむしろ、この水を農業用に供給しているためである。

表 3.2.2-1 エル・アルト中心区域地下水位変動

井戸番号	名 称	水位変動量※
5	LIQUID CARBONIC	-1.50
6	BERA BOLIVIA	+0.34
7	VASCAL	-0.04
2 4	CENACO	-1.55
2 7	INBOLSA	-2.23
2 8	ARANDO	-2.31
	合 計	-7.29
	平 均	-1.22

※ 雨期を 0 とする

b. エル・アルト中心地域外（住居非密集地域）

この区域は水使用量は飲料水のみで、かつ使用量が少ないため、揚水による水位変化は少ない地区である。よってこの区域はほとんど雨期、乾期による地下水位変動は無いものと考えられる。

表 3.2.2-2 エル・アルト中心地域外地下水位変動

井戸番号	名 称	水位変動量※
2	FANVIPLÉN	- 0.32
3	LABOFARMA	0.00
9	GEOBOL	- 0.06
8	HORMITABOL	+ 0.20
1 8	BAMVI	- 0.87
1 7	ELMEC	- 0.53
2 0	JABONES PATRIA	- 0.16
1 3	CONVIFAG	+ 1.24
1 0	Y. P. F. B.	+ 0.46
1 2	COVIMA	+ 0.69
3 1	INSA	+ 0.39
	合 計	+ 1.04
	平 均	+ 0.09

※雨期を 0 とする

4) 継続観測調査

既存井戸に関しては、長期水位変動記録がないので、本調査で既存井戸に自記水位計を設置して長期水位記録の測定を開始した。

自記水位計は、現在使用されておらずかつ、住民の立ち入り不可能な G E O B O L 所有井戸（井戸 No. 9）に設置することとし、架台設計図を作成し、S A M A P A にて架台を製作し、調査団立ち会いのもとに 1 9 8 7 年 2 月 2 5 日より測定を開始し、乾期調査が完了する 7 月 3 1 日まで測定を継続した。この間、1 カ月毎の用紙交換を S A M A P A が実施し、2 回トラブルで測定を中断したが、おおむね当初の目的を得ることができるだけの観測結果（図 3.2.2-1 参照）が入手できた。

また S A M A P A は測定グラフから毎日の最大、平均、最低を読み取り、これを日本側が準備したコンピュータで数表化、図表化した。その結果次のことが判明した。

日平均最高水位 3月 1日(雨期) -13.74 m

日平均最低水位 7月30日(乾期) -15.34 m

1日の変動の最大値 2月28日 0.76 m

本井は揚水していないことから、通常自然水位が測定されている筈であるが、日変動が大なることから自然以外の力、すなわち他の井戸による干渉を大きく受けて要ることが伺い知れる。本井の周辺には地下水流入の上流側約300mに HOLIMITABOL、同じく約600mに FANVIPLAN、LABOFARMA の井戸があることからこれらの干渉による日変動であることは間違いない所である。一方、日平均的には、雨期に水位が高く、乾期に水位が低いことも明らかな現象であり、水収支解析における予測のチェックデータとして使用可能と考える。

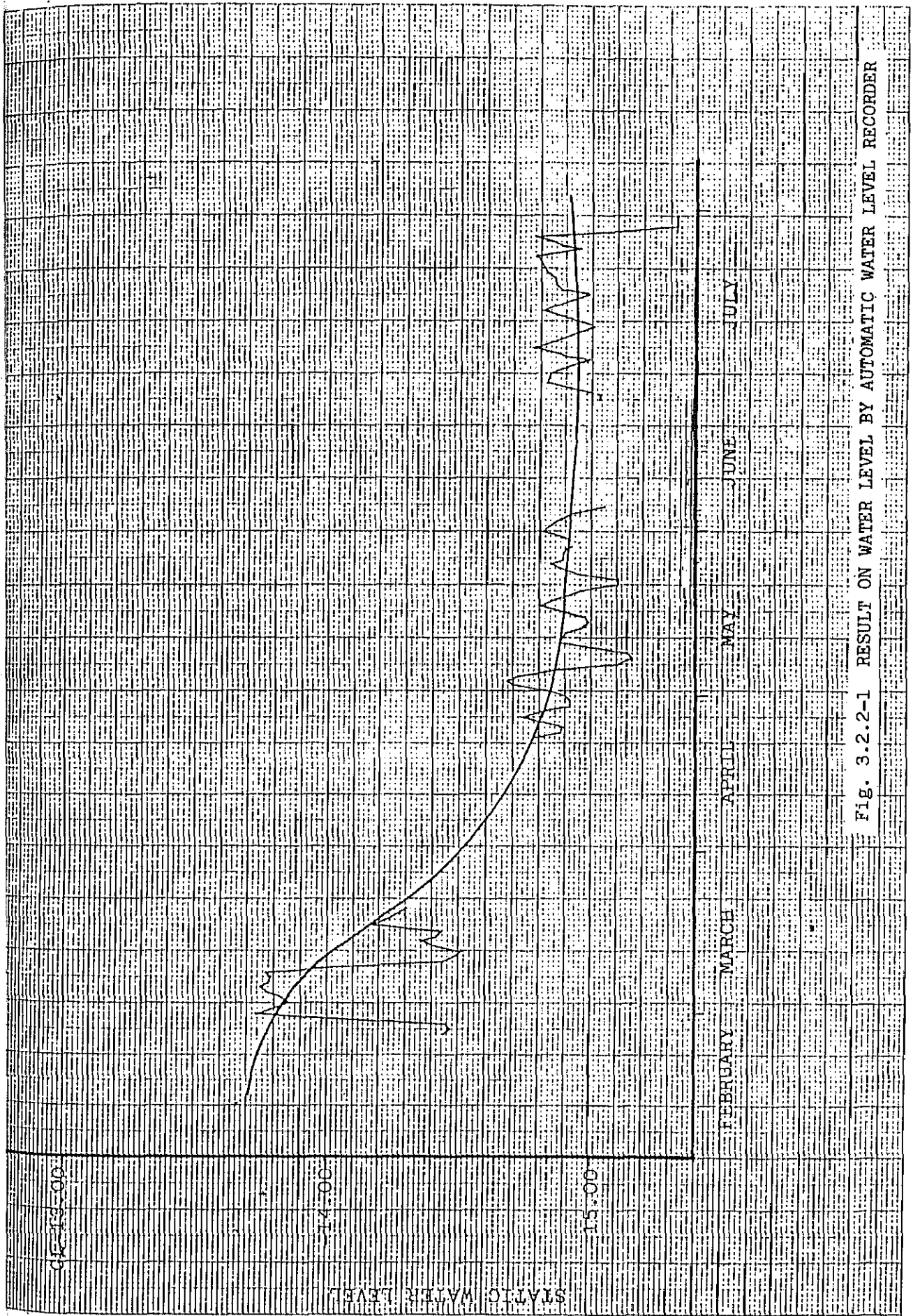


Fig. 3.2.2-1 RESULT ON WATER LEVEL BY AUTOMATIC WATER LEVEL RECORDER

3. 2. 3 表流水観測

水収支を行うに必要な要素のひとつであり、地表水としての流入量 (Is) および流出量 (Os) を知るために、関連のある河川における流量測定を行った。測定位置は別図 (図 3. 2. 3 - 1 参照) に示すとおりである。

測定は季節変動を知るため、雨期 (7月) と乾期において行った。測定結果は別表 3. 2. 3 - 1 のとおりであるが、これらから以下のことが判断される。

- ① エル・アルト地区の河川は雨期に降水の影響を受けやすく、流量が変化しやすい。1つの河川として流量が10倍にまで変化するというのは特徴的だが、本地域の水収支という観点から考えると、いずれも無視できる程度であった (地下水流動量 ≫ 地表水)。また乾期にはそのほとんどの地点で流量が0である。
- ② ラパス河の本流については季節度ごとに安定した流量があるが、支流についてはエル・アルトの河川と同様降雨の影響を受けやすい。
- ③ ラパス河の上流から下流までの流量の変化を見る限り、エル・アルト地区からの地下水流出はほとんどない。乾期におけるエル・アルト全体からの流出量は最大に見積もっても $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度である。
- ④ エル・アルト地区において水収支を考える場合、表流水の流量は無視できるほど小さいことからシミュレーションは地下水を中心に行う。

すなわち、Study area を通過する表流水 $\max 2.5 \text{ m}^3/\text{sec}$. (雨期)

Study area 周辺を通過する表流水 $\max 2.1 \text{ m}^3/\text{sec}$. (雨期)

(もちろん、乾期には ≈ 0 となる。)

これに対し、地下水流動量は地表面下 200 m までとると

$$1.0 \times 10^{-1} \times \frac{1}{\alpha} \times 8000 \times (2000 - 30) = \frac{1}{\alpha} 1360 \text{ m}^3/\text{sec},$$

透水系数 動水勾配 平均巾 地下水径

これはあくまでもラフな概算であるが $\alpha = 10$ としたとき、地下水流動量のオーダーは地表水のそれより2つ大きくなることから、地表流は無視できると判断される。

表 3.2.3-1 表流水観測結果

雨 期				乾 期			
河川名	地点	測定日	流量($\text{m}^3/\text{sec.}$)	測定日	流量($\text{m}^3/\text{sec.}$)	測定日	流量($\text{m}^3/\text{sec.}$)
SECO	A-1	9 Feb.	0.14	23 Feb.	0.03	1 July	0
	2		0.37		0.02		≈ 0
	3		0.29		0.48		0
SEQUE	B-1	9 Feb.	0.81	23 Feb.	0.26	9 July	0
	2		2.10		0.11		0
	3		0.50		0.13		0
SAN ROQUE	C-1	10 Feb.	—				0
	2		0.10			9 July	≈ 0
KOKOTA	D-1	10 Feb.	0.03			9 July	0
	2		0.03				0
VILAQUE	E-1	10 Feb.	0.57			9 July	0
LA PAZ	F-1	12 Feb.	1.50	24 Feb.	1.02	3 Aug.	0.034
	2		1.34		2.05		0.22
	3		1.57		0.60		0.037
	4		2.70		1.50		0.048
	5		0.22		1.50		0.004
	6		5.18		5.90		0.32
	7		0.18		—		0.004

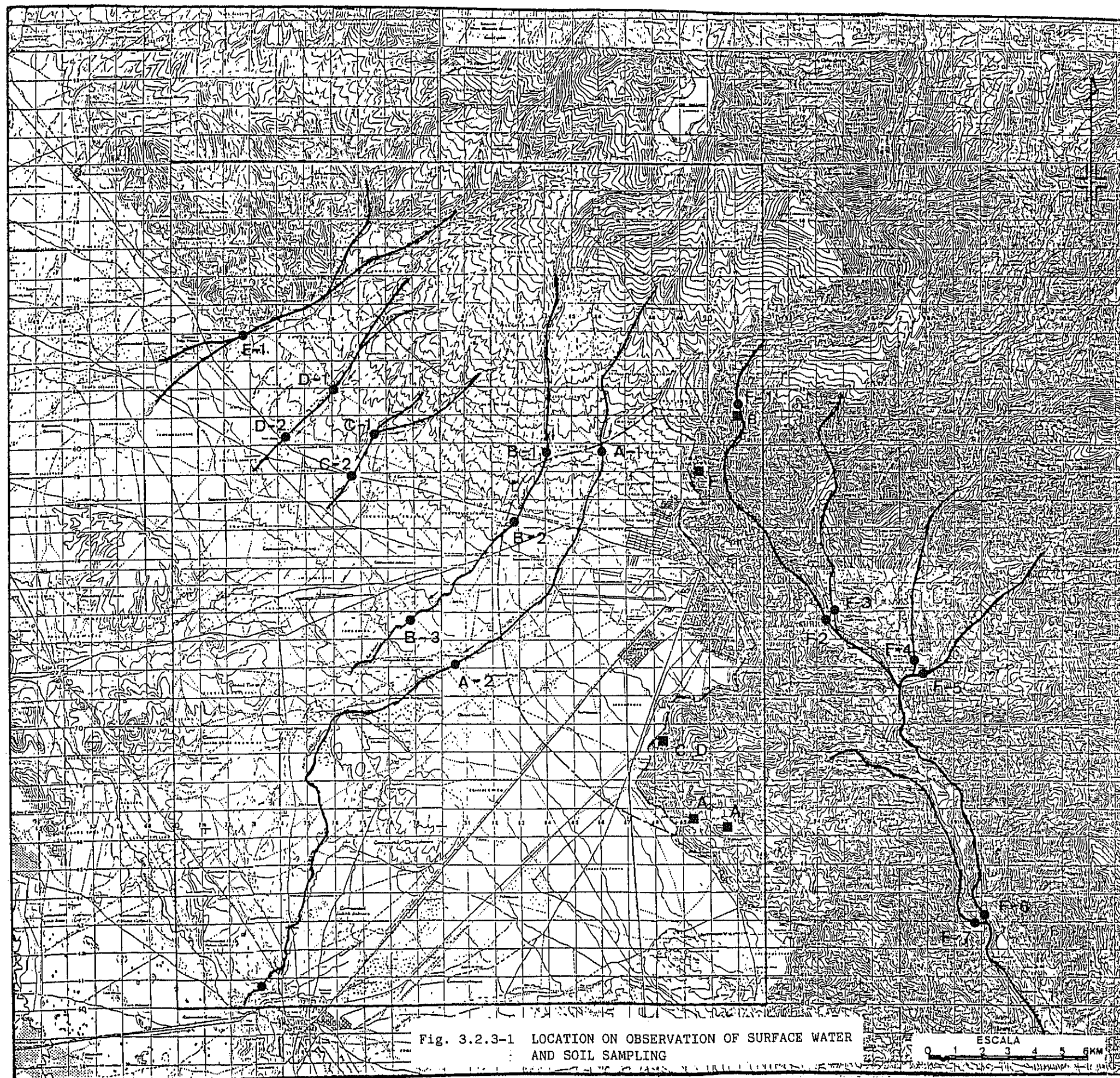


Fig. 3.2.3-1 LOCATION ON OBSERVATION OF SURFACE WATER AND SOIL SAMPLING

LEGEND

- C ■ SOIL SAMPLING
- A-1 ● OBSERVATION OF SURFACE WATER

