

第3章 調査と解析

3.1 衛星画像による土地利用分析

調査団は、現況土地利用をモニタリングするため表 3-1 に示すランドサット7号 ETM データを取得し、調査地域の現況土地被覆及び湿地分布の把握、地形地質判読を支援する画像データ処理を実施した。

表 3-1 ランドサット7号のデータ取得諸元

データ取得日	パス - ロウ		シーン ID 番号
2000年2月4日撮影	パス8	ロウ56	2000724634
1999年11月16日撮影	パス8	ロウ57	2000431753

調査対象地域のカラー強調画像及び、画像分類と現地調査での土地被覆サンプリング調査とのクロスチェックを行い、調査地域の土地被覆分類図を作成した(図 3-1、図 3-2参照)。流域毎の土地利用区分面積は表 3-2 に示され、その結果以下の分布が整理できた。

- ◆ 標高 3,000m 以上の森林地帯分布およびボゴタ以北での森林増加
- ◆ 標高 2,400m から 2,900m のボゴタ平原の湿地及びボゴタ川流域の氾濫原緩斜面にある耕作地と草地
- ◆ 標高と起伏を伴う草地の増加
- ◆ 北部・北東部・南西部の裸地・土壌侵食・地すべり地
- ◆ ボゴタ市北東部の水源地と南西部の小規模湖沼の水源地
- ◆ 花卉栽培の温室分布。

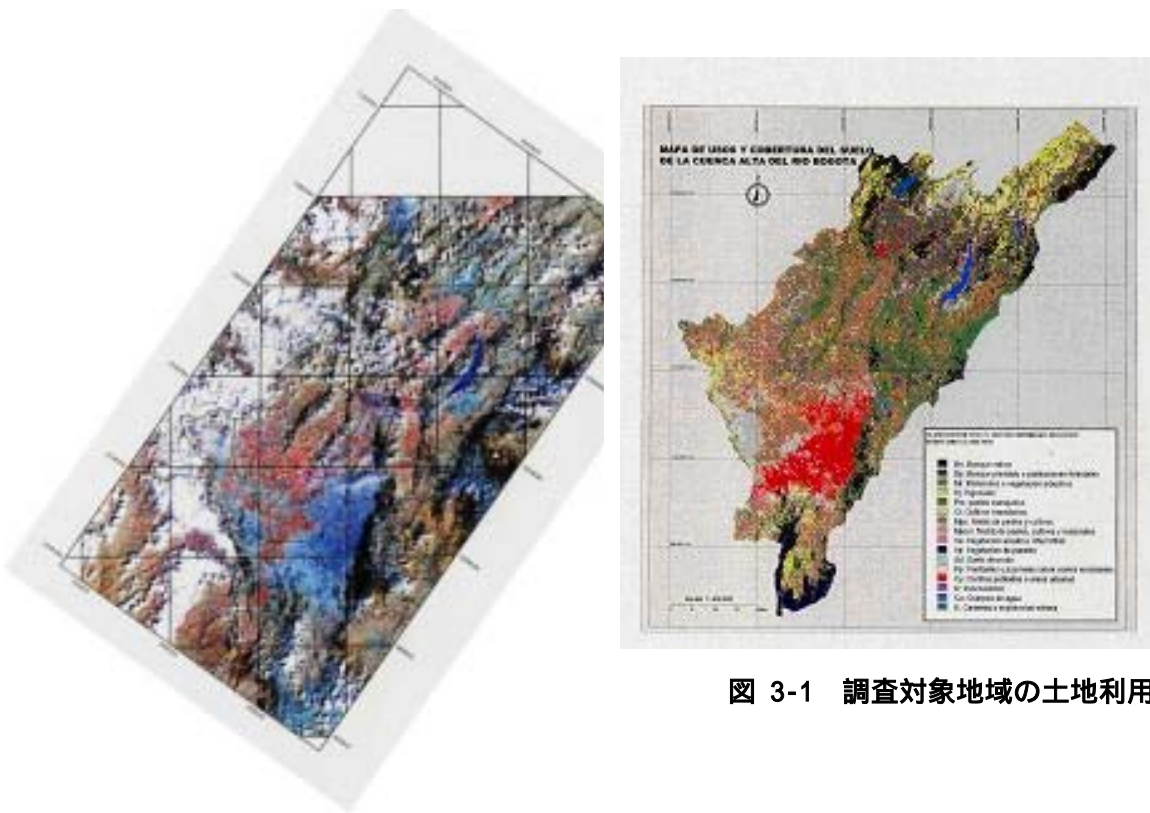


図 3-1 調査対象地域の土地利用図

図 3-2 調査対象地域全域のランドサット7号カラー合成画像

表 3-2 調査対象地域の土地利用面積

分類 1	分類 2	面積 (km ²)	比率 (%)	分類 1	分類 2	面積 (km ²)	比率 (%)	
森林地帯	自然林	181.19	4.2	耕作地	一時的耕作地	39.48	0.9	
	植林地	17.25	0.4		草地耕作地混合地	551.96	12.9	
	<合計>	198.44	4.6		草地、耕作地、雑草混合地	1126.79	26.4	
草地	雑草地又は灌木植生	644.20	15.1	<合計>		1717.23	40.3	
	高雑草地	415.83	9.7		裸地	裸地	245.59	5.8
	草地	137.02	3.2			採鉱地と石切り場	0.35	0.0
	湿地帯(水生植生)	6.48	0.2	<合計>		245.94	5.8	
	荒地植生	303.23	7.1	水域	湖沼、河川	39.61	0.9	
	牧場と裸地上の高雑草地	188.06	4.4	市街地	市街地又は人口稠密地	300.16	7.0	
	<合計>	1694.82	39.7	温室	花卉栽培	71.49	1.7	
流域全体: 4268.69 km ²								

3.2 環境現況調査

(1) ボゴタ川の水環境

<ボゴタ川の利用>

ボゴタ川は、クンディナマルカ県 Villapinzon 市の西標高 3,300m に源を發し、平坦なボゴタ平原(水路勾配: 1/1,000)をほぼ北東から南西の方向に約 130km 流下し、ボゴタ平原の最下流端であるテケンダマ滝から(厳密に言えば、EMGESA の水力発電プラント: 1,000MW を通って)域外へ流出し、さらに 80km 下ってマクダレナ川と合流する。ボゴタ川は、幾つかの支流から構成されている。すなわち、上流から、シスガ川、トミネ川、ネウサ川、テウサカ川、フリオ川、チク川、スパチョケ川、ツンフェリート川およびムニャ川である。また、ボゴタ市内には、上述の支流ツンフェリート川の他に、サリツレ川とフォーチャ川の都市河川がある。

ボゴタ平原には、上流の 4 支流にそれぞれ大規模貯水ダムがある。すなわち、シスガダム(CAR 管轄、貯水量 = 102 百万、灌漑・水道)、トミネダム(EEEE 管轄、貯水量 = 690 百万、発電・水道・洪水調節)、ネウサダム(CAR 管轄、貯水量 = 100 百万、灌漑・水道)およびサンラファエルダム(EAAB 管轄、貯水量=75 百万、水道)である。

調査団の実施した水収支解析(1973 年-1999 年の観測流量と水利用データに基づく)によれば、年間流出量は 36.69 m³/秒である。このうち、灌漑(工業用水を含む)等に 11.10 m³/秒、給水に 5.10 m³/秒が取水されている。取水施設としては、テウサカ川合流点の上流のティビトック浄水場が代表的で、ボゴタ川本川から取水している。また、給水等から還元される下水量は、10.24 m³/秒と推計される。下水量のうち、6.16 m³/秒は域外(チンガサダムからの導水)分である。また、相当量の農業排水量もあると思われるが、実態は不明である。この水収支バランスは、過去 27 年間の平均値であるが、最近のデータでは、給水取水は 7 m³/秒程度、下水量(大部分は未処理)は 12 m³/秒程度に達しているものと推測できる。このことは、最下流端で考えた場合、河川流量(約 31 m³/秒)の約 40%は都市下水であると言える。

このように、ボゴタ川は、洪水の排水路や水資源(灌漑用水、工業用水、都市用水)の運搬路ばかりでなく、下水排水路としての重要な機能を果たしていることが分かる。このため、給水のための取水地点は、ボゴタ川本川の上流部(ティビトック浄水場)や支流の上流部(Vitelma 浄水場: San Cristobal 川、San Diego 浄水場: San Francisco 川、Laguna 浄水場および El Dorado 浄水場: ツンフェリート川)に設けられている。

< ボゴタ川の水質 >

上述した現状のボゴタ川の利用状況を考え、ボゴタ川の水質を議論する場合、いくつかの側面からの見方が適当であろう。すなわち、給水の水源としての安全な水質であるか？ 都市空間にある河川が、健全な水環境としての水質であるか？ 汚染された河川水が地下水を汚染しているか？ である。このような疑問を解くため、本調査では、26 ヲ所の河川水と 12 ヲ所の河川底泥をサンプリングし、汚染の指標となる水質や泥質を調べた。なお、河川水による地下水汚染については、後述する井戸水質調査の結果を参照した。検討結果の要点は、次の通りである。

Tibitoc 浄水場の上流での主な汚染源は、Villapinzon 付近に集まった 160 ヲ所もの皮革なめし工場からの工業廃水である。廃水には、有機廃棄物、Cr、塩化物、硫化物、タンニン等が含まれている。また、この区間の河川底泥には、Cu や Cr 等の重金属が検出されている。農業排水による汚染の兆候は見られない。現時点では、河川水は給水の原水基準を満足している。また、9 ヲ所の溪流の水質試験を行ったが、給水の原水基準を超える項目はない。鉄やマンガンが若干高い値を示すところもあるが、地下水のそれらの値よりかなり低い。

ボゴタ川が、ボゴタ市内に達すると、家庭排水や工場廃水を集めた Salitre 川、Fucha 川、Tunjuelito 川等の都市河川が次々と合流し、溶存酸素は枯渇し嫌気的な様相を示す。Salitre 川では、終末下水処理場が稼働し始めたが、他の河川には下水処理場はまだない。3 つの都市河川やボゴタ川本川の水質は、都市空間の中で健全な水環境としての水質とはいえない状態である。

河川の水質と河川周辺の井戸水質の試験結果からは、汚染された河川水が地下水を汚染している根拠は見出せなかった。ボゴタ川の緩勾配がもたらす緩流速のため、流水に含まれるシルト分やコロイド分が長年にわたって河床に沈殿し、河川そのものが不透過性の水路となっているものと思われる。ボゴタ平原の水質の特徴は、広域にわたり高濃度の硫化水素とアンモニア性窒素で、深層地下水としては稀なケースである。これらの高濃度の水質は、先ず地表からの汚染が疑われるが、それらのストック量が地上由来（肥料、生活排水、家畜排水、工業廃水等）と比較して膨大であるため、地下由来によるものと判断できる。硫化水素については、ボゴタ平原の第三紀に多く含まれる黄鉄鉱や火山灰由来が考えられる。また、アンモニア性窒素については、ボゴタ平原の形成過程（湖が埋設して盆地化）で堆積した有機物に由来するものと思われる。

< 湿地帯 >

ボゴタ平原には、かつて 50,000 ヘクタールの湿地帯が存在していたが、現在はボゴタ川の西側に 700 ヘクタール、東側に 800 ヘクタール残っているだけである。これらの湿地帯はボゴタ川本流や支流の洪水により形成された後背湿地帯（バック・マーシュ）である。しかし、流域の中に建設されたダム群により洪水氾濫が無くなったこと、更に灌漑や給水のための取水量の増加によりボゴタ川の水位が低下したこと等の理由によって、近年、湿地帯の面積が減少している。これらの湿地はラムサール条約には未登録である。

現在、湿地帯には 53 種の鳥類・脊椎動物が生息していることが確認されている。ボゴタ市内にはコネヘラ、コルドヴァ、フアン・アマリージョ、ハボケなど 12 ヲ所の湿地帯があるが、都市化の進行と都市下水の流入、ごみの投棄、有機物による富栄養化等により水質は極めて悪化しており、水鳥等生態系への影響が問題となっている。

EAAB、DAMA 及び CAR はそれぞれの湿地帯の環境管理計画（ラムサール会議の合意事項を採用し、DAMA と CAR のガイドラインに従って作成されたもの）に従って、管理・改善事業を行っている。都市空間において、市民に安らぎを与える貴重な水辺として積極的な保全対策が望まれる。

< 水環境の改善 >

ボゴタ川の水質の悪化は、工業廃水や生活排水の処理率の低さに大きく起因している。工場廃水の処理については、行政指導により、工場ごとに改善が進められるべきである。ボゴタ市の下水道整備率はまだ低く、終末下水処理場は、合計 3 ヲ所計画されているが、現在完成しているのは、Salitre 下水処理場の 1 ヲ所だけである。早急の改善が望まれる。

一方、灌漑用水や給水のための取水量の増加によりボゴタ川の水量が低下していることも、ボゴ

タ川水質悪化の一因と考えられる。ボゴタ川の水質改善のために、ボゴタ川の平常時の水量を増やす方策を考えるべきである。例えば、給水のための代替水源を地下水に求めティビトック浄水場のボゴタ川からの取水量を減らすことやチンガサシステムを利用して他流域からの水質浄化用水の導水等が考えられる。

(2) 地下水と地盤沈下

< 地下水の利用 >

ボゴタ平原には、現在、7,000本の深井戸が存在し、3.7 m³/秒の地下水が利用されている。農業用水や工業用水への利用が大部分で、都市給水としても一部都市（Funza や Facatativa 等）で利用されている。本調査で実施した井戸インベントリ調査によれば、地下水の主要な帯水層は第四紀層で、井戸本数で合計深井戸本数の93%、揚水量で合計地下水利用量の78%となっている。白亜紀層も有望な帯水層であるが、その利用はあまり進んでいない。白亜紀層については、井戸本数で合計深井戸本数の5%、揚水量で合計地下水利用量の20%となっている。

地下水が多く利用されている流域は、ボゴタ川下流域、ボゴタ川中流域、ボハカ川流域、スパチョケ川流域、チク川流域およびフリオ川流域である。この流域の中で、最も地下水が高度利用されている流域は、チク川流域である。

< 過剰揚水と地盤沈下 >

ボゴタ平原においては、地盤沈下が地下水の過剰揚水との関連でしばしば言及されているが、実際に地盤沈下といわれる事例は、舗装道路上の波状の変形やひび割れ、不等沈下によると思われる家屋やビルの壁や床のひび割れ、公園などユーカーリの木の近くで起きる局所的な地盤沈下。これらの現象は地下水の過剰揚水とは関係なく、地下深部で起こる可能性のある圧密沈下については、今のところ確認されていない。いずれにしても、ボゴタ盆地内の水収支が赤字側に傾いていないことから、地下水に関係する地盤沈下が起きているとは考えにくい。しかし、地下水が高度利用されている地域については、地盤沈下を長期的に観測することは必要である。

3.3 物理探査

ボゴタ地下水盆の帯水層構造と白亜紀帯水層の分布の把握を目的として、本調査では、CSAMT法による物理探査を実施した。探査では、14種類の送信周波数（5120Hz、2560、1280、640、320、160、80、40、20、10、5、2.5、1.25、0.625）を使用し、探査深度はGL-1,000m～GL-1,500mとなった。観測地点を図3-3に示す。

CSAMT探査結果の比抵抗値から地層の分布を解釈するに当たっては、次の基準を使用した。すなわち、第四紀層比抵抗30 m以下、第三紀層比抵抗50 m以下、白亜紀層比抵抗50 m以上。物理探査結果によると、ボゴタ平原中央部においてGuadalupe層は少なくともGL-1,000m～GL-1,200mよりも深い位置に分布し、その分布深度はボゴタ平原の縁辺部に向かって次第に浅くなっている。これは過去に予測されたGuadalupe層の分布状態・深度とほぼ一致している。表3-3に地区ごとの探査結果を示す。

表 3-3 CSAMT 探査結果

地域	探査結果
A 地域 (No. 1, 3, 4)	Guadalupe 層分布深度は少なくとも GL-1,200m 以深と推定される。
B 地域 (No. 2, 5)	Guadalupe 層分布深度は少なくとも GL-1,000m 以深であると推定される。
C 地域 (No. 14, 15)	Guadalupe 層は深度 100m 程度から 1,000m 以上連続していると推定される。
D 地域 (No. 6, 7, 8, 9)	Guadalupe 層は GL-200m 以浅から分布していると推定される。
E 地域 (No. 10, 11, 12, 13)	Guadalupe 層は概ね GL-200m 以深から分布していると推定される。
F 地域 (No. 20, 21, 22)	Guadalupe 層は GL-250m 以深から 1,000m 以上の厚さで分布していると推定される。
G 地域 (No. 16, 17, 18, 19)	Tilata 層は GL-100m～GL-400m に分布すると推定される。また Guadalupe 層はこの下位に分布すると推定される。
H 地域 (No. 23, 24, 25, 26)	Guadalupe 層は GL-100m～GL-200m 以深に分布していると推定される。
I 地域 (No. 28, 29, 30, 31)	Guadalupe 層は GL-400m 以深に分布すると推定される。

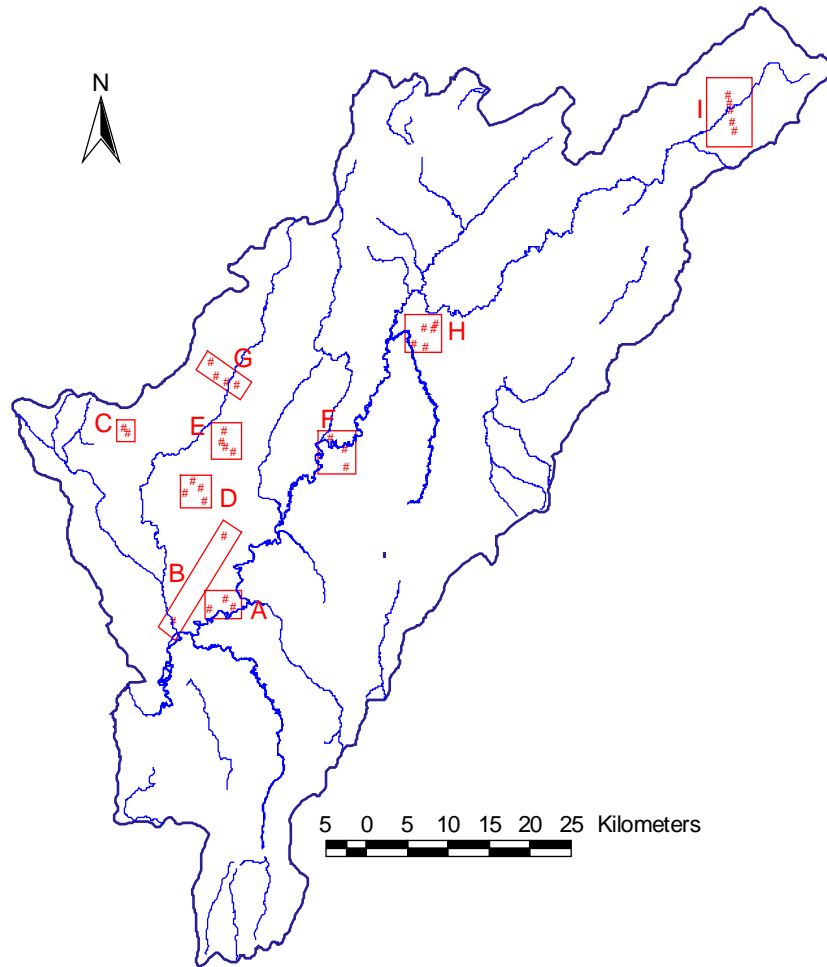


図 3-3 CSAMT 法探査位置図

3.4 試掘井戸

本調査では、水理地質状況の把握および地下水位観測井戸の設置を目的として、第四紀層（6カ所）および白亜紀層（4ヶ所）の試掘調査を実施した。試掘井戸位置を図 3-4 に示す。

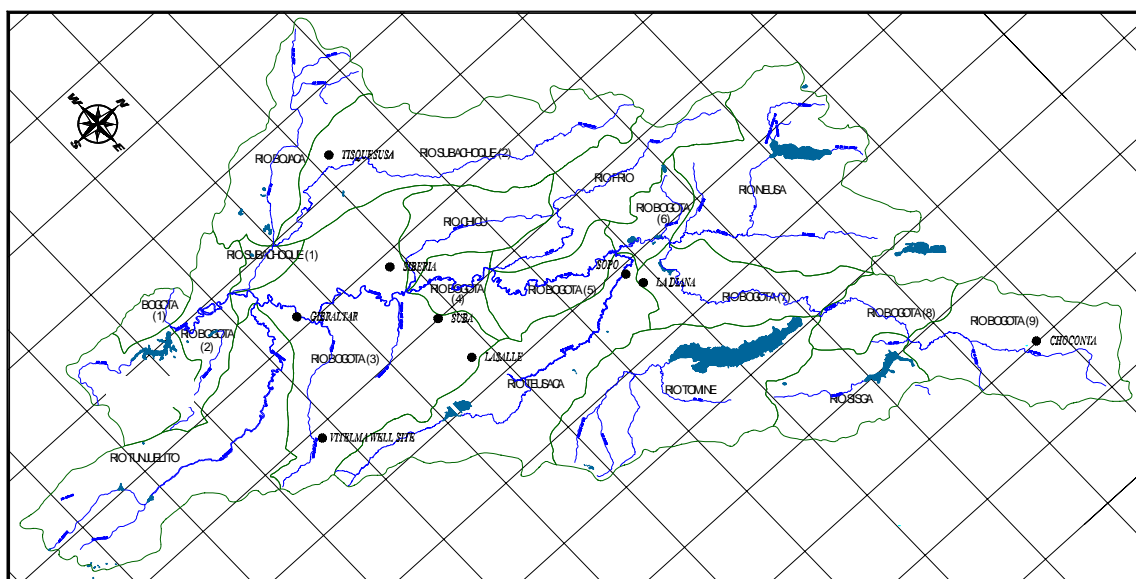


図 3-4 試掘井戸の位置図

(1) 第四紀層試掘調査

< 試掘井戸の調査結果 >

6本の試掘井戸位置の選定に当たっては、調査地域の第四紀層の水文地質特性や地下水位の特性が得られる位置であることを考慮した。6本の試掘井戸の調査結果を表 3-4 に示す。

表 3-4 第四紀層試掘井戸の調査結果

井戸 No. (サイト名)	No.1 Gibraltar	No.2 Tisquesusa	No.3 Siberia	No.4 Sopo	No.5 Diana	No.6 Choconta
井戸深度 (m)	196	192	173	150	188	123
井戸径	8 inch	8 inch	8 inch	8 inch	8 inch	8 inch
帯水層の地質	細砂、砂礫 (Sabana 層)	細砂 (Sabana 層)	細砂 (Sabana 層)	砂、砂礫 (Sabana 層)	細砂、シルト質砂 礫 (Sabana 層)	シルト質砂礫、シルト Tilata 層)
< 揚水試験結果 >						
静水位 (GL-m)	16.5	76.92	21.94	14.7	17.33	11.07
揚水量	注 2	317	432	605	586	533
水位低下量	注 2	6.43	16.69	5.37	6.99	3.89
動水位 (GL-m)	注 2	83.35	38.63	20.07	24.32	14.96
比湧出量 (m ³ /日/m)	注 2	49	26	82	84	137
透水量係数 (m ² /日)	46	204	30	85	89	159
透水係数 (m/日)	0.96	4.0	0.56	2.8	2.3	2.2
貯留係数	注 2	1.38 × 10 ⁻¹⁸	6.82 × 10 ⁻²	注 3	1.27 × 10 ⁻²	7.61 × 10 ⁻²

注 1：透水係数・貯留係数は Yacob 法と回復法で解析した。注 2：Gibraltar では揚水試験ではなく現場透水試験を実施したため、動水位、比湧出量、貯留係数は算出していない。注 3：Sopo の井戸は揚水試験中の井戸水位の変化が不規則であったため貯留係数値が算出できなかった。

< 第四紀帯水層の特性 >

試掘調査結果によると、第四紀の Sabana 層および Tilata 層ともに、粘土質の地層が主体であり、砂質や砂礫質な部分は少ない。第四紀層の中で帯水層と成り得るのは砂層や砂礫層に限られるが、これらの地層は厚い粘土質な地層の中に挟まれて異なる深度に分散している。また、帯水層は被圧地下水を賦存しているが、半透水層を通じて互いに水理的に連続していると推定される。揚水試験結果によると、今回掘削した 6本の試掘井の比湧出量は 26～84 m³/日/m であり、その平均値は 60 m³/日/m である。これは第四紀帯水層の高い能力を示す。

(2) 白亜紀層試掘調査

< 試掘井戸の調査結果 >

5本の試掘井戸の調査結果を表 3-5 および表 3-6 に示す。

表 3-5 白亜紀層試掘井戸の調査結果(1)

項目	No.1 (La Salle)	No.2 (Suba)	No.3 (Mariscal Sucre)
井戸座標	E: 1,006,063 N: 1,017,517	E: 999,911 N: 1,017,839	E: 999,214 /N: 1,019,352
井戸深度	270 m	389 m	304m
井戸径	8 inch	8 inch	8 - 6 inch
帯水層の地質	砂岩、頁岩	砂岩、頁岩	砂岩、頁岩
< 揚水試験結果 >			
静水位	+1.75m	- 23.92m	20.09
揚水量 (m ³ /日)	1,944	1,987	4,320
水位低下量 (m)	35.01	5.07	3.91
動水位 (GL-m)	33.26	18.85	24
比湧出量 (m ³ /日/m)	56	392	1,104
透水量係数 (m ² /日)	160-192	651	1,729
透水係数 (m/日)	1.9-2.3 (0.59 ~ 0.71)	7.8 (1.67)	-
貯留係数	1.44 × 10 ⁻¹¹	1.53 × 10 ⁻⁴	2.3 × 10 ⁻³

注 1) 透水係数・貯留係数は Yacob 法と回復法で解析した。注 2) 透水係数は透水量係数をスクリーンの長さで割って算出した値と、井戸全長で割って算出した値の両者を記載した。()内は井戸全長で割って算出した値。

表 3-6 白亜紀層試掘井戸の調査結果(2)

項目	No.4 (Vitelma Recharge well)	No.5 (Vitelma observation well)
井戸座標	E: 1,001,326 N: 996,416	E: 1,001,220 N: 996,431
井戸深度	300 m	280 m
井戸径	8 inch	4 inch
帯水層の地質	砂岩、頁岩	砂岩、頁岩
< 揚水試験結果 >		
静水位	-6.63m	-6.84m
揚水量 (m ³ /日)	1,296	-
水位低下量 (m)	18.84	12.03
動水位 (GL-m)	25.47	18.87
比湧出量 (m ³ /日/m)	69	-
透水量係数 (m ² /日)	62	62
透水係数 (m/日)	0.70(0.21)	0.70(0.21)
貯留係数	3.4×10^{-4}	3.4×10^{-4}

注 1) 透水係数・貯留係数は Jacob 法と回復法で解析した。注 2) 透水係数は透水量係数をスクリーンの長さで割って算出した値と、井戸全長で割って算出した値の両者を記載した。() 内は井戸全長で割って算出した値。注 3) No.4 井戸の静水位は、No.3 井戸の地盤高に対するもの。

< 白亜紀帯水層の特性 >

試掘調査結果によると、La Salle、Suba、Mariscal Sucre および Vitelma における白亜紀層の帯水層は、Labor y Tierna 層が主要帯水層となっている。Labor y Tierna 層は主に砂岩でできているが、この中でより粗粒で多孔質な部分やキレツが発達している部分が帯水層となっている。また Labor y Tierna 層の中には割れ目が特に発達した部分があり、この部分が主要な帯水層を形成している可能性がある。揚水試験結果によると、La Salle 井戸の比湧出量は 56m²/日、Suba 井戸の比湧出量は 392m²/日また Vitelma 井戸の比湧出量は 69m²/日である。3 者とも極めて高い比湧出量を示し、試掘調査地点の Guadalupe 層が帯水層として優れていることを示す

3.5 地下水位観測

調査対象地域の地下水位は、地下水位調査を目的とした一斉観測や自記水位計観測によって観測されている。これらの観測結果を用いて、調査対象域の地下水位分布やその季節変化を推定した。

(1) 地下水一斉観測結果

< 地下水一斉観測 >

本調査団は 2001 年 2 月、8 月、12 月および 2002 年 8 月、11 月に地下水位の一斉観測を行なった。観測井戸の数は約 100 個所であり、現在使用していない井戸を観測井戸として利用した。また CAR は 1998 年から調査対象地域の既存井戸の地下水位一斉観測を開始した。この観測は約 370 個所の井戸を対象に、1998 年～2001 年の間に 14 回実施された。観測井戸として使用した井戸は現在使用中の井戸である。

< 地下水位一斉調査結果 >

JICA 調査団と CAR の一斉観測結果との観測結果を総合し、ボゴタ平原の地下水位分布およびその変動状況を推定した。CAR の地下水位観測結果を利用して、1998 年～2001 年の間の地下水位変動を調べた。水位変動の傾向をヒストグラムにし、図 3-5 に示す。同図から分かるように、水位変動が -6m/年～6m/年の範囲にあるものが最も多い。また、地下水位変動の平均値は、-0.2m/年である。

この結果に対して、次の 2 通りの解釈が可能である。すなわち、平均-0.2m/年の割合で地下水が低下している、平均-0.2m/年の値は測定誤差の範囲にあり、地下水位はほとんど平衡状態にあり、地下水位は大きな変動をしていない。調査地域では 20 年程前から、大規模な地下水開発が始まり、同時に地下水の低下が始まったと推定される。上記結果からは、揚水と地下水補給の関係がほぼ平衡状態に達し、急激な地下水の低下はすでに終了したものと推定される。

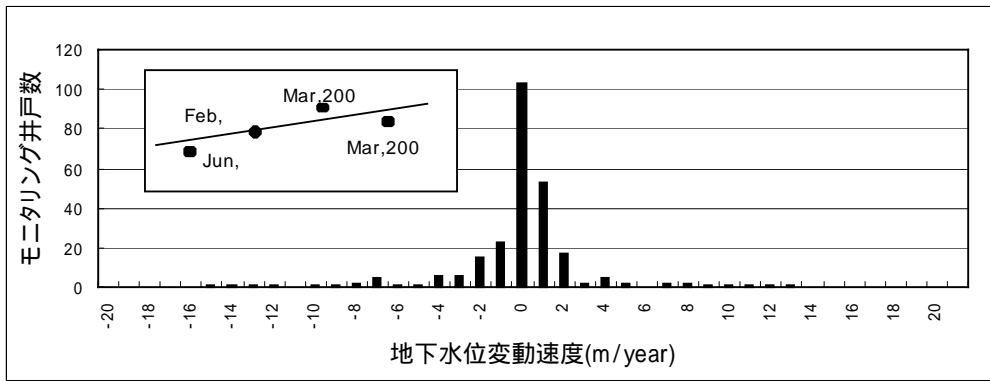


図 3-5 水位変動ヒストグラム

(2) ボゴタ平原の地下水位分布

< 第四紀層の地下水分布 >

推定された第四紀層の地下水位を図 3-6 に示す。同図から分かるように、第四紀層の地下水位は、調査対象地域内の地形勾配にしたがって、ボゴタ平地の外周部（山地部、丘陵部）からボゴタ平原の中央部に向かって流動している。また、井戸が集中する地域で地下水位が低くなっており、この地域に向かって周辺から地下水が流入することが予想される。



図 3-6 第四紀層の地下水位分布

< 白亜紀層の地下水位分布 >

白亜紀層の地下水位データは、第四紀層の地下水位データに較べ非常に少なく、調査域全体をカバーする地下水位分布の作成は不可能である。白亜紀層の地下水位分布のイメージを把握する目的で地下水位分布図を作成した。これを図 3-7 に示す。同図から分かるように、白亜紀層中の地下水は、地形の大局的勾配に従って、北北東から南南西に向かって流動し、最終的に調査域外に流出しているものと推定される。

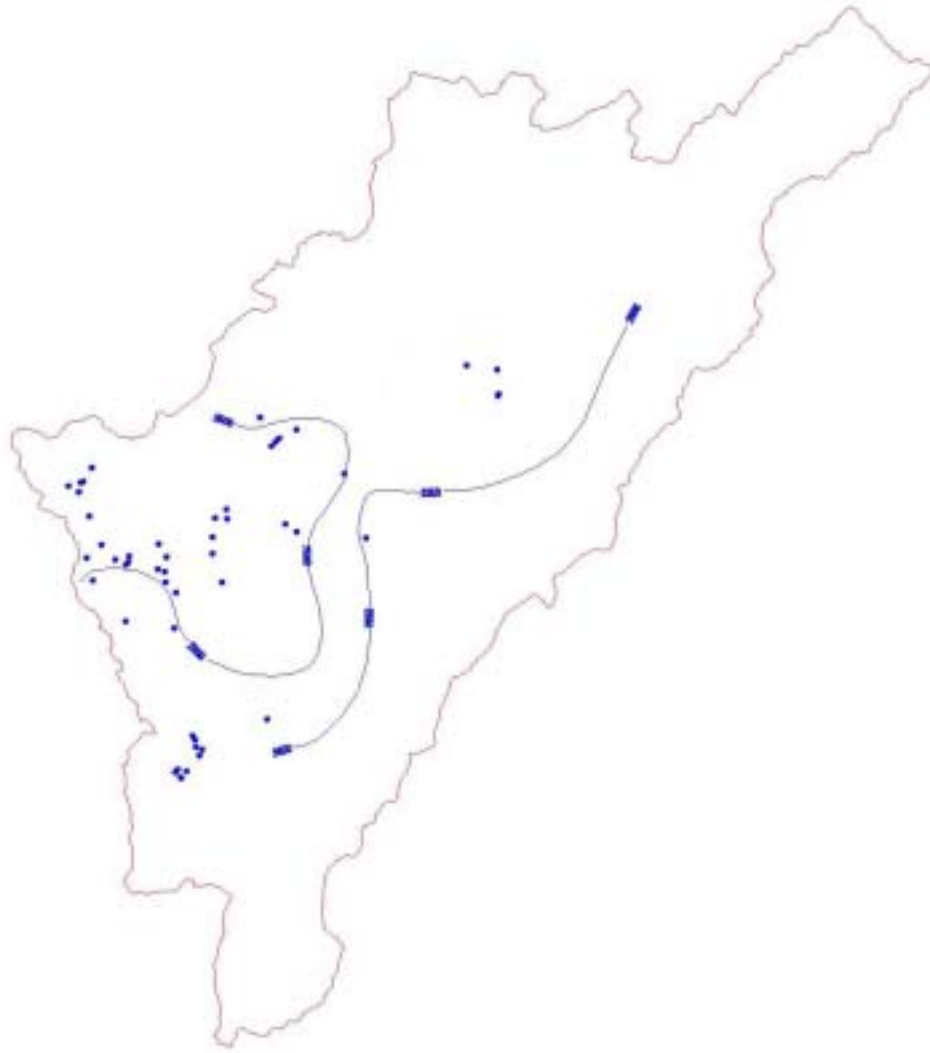


図 3-7 白亜紀層の地下水位分布

(3) 自記水位計観測結果

調査団は、調査対象地域の 11 ヶ所に自記水位計を設置し、地下水位を観測した。自記水位計設置箇所を図 3-8 に示す。観測結果から、第四紀地下水位には季節変化による地下水位の変化が認められる。しかし、その変化パターンは井戸ごとに異なり、地下水位の季節変化は明瞭ではない。観測井戸の近傍に存在する揚水井戸の影響が、観測結果に反映されているためと考えられる。

また、調査対象地域における地下水位の変化パターンは一般に複雑である。これは、調査対象地域に多くの揚水井戸が存在し、人工的な揚水量のコントロールの影響が地下水位に影響しているためである。また長期的な水位上昇や低下傾向は認められない。ボゴタ平原の地下水開発による地下水位の変化は既に平衡状態に達していると考えられる。

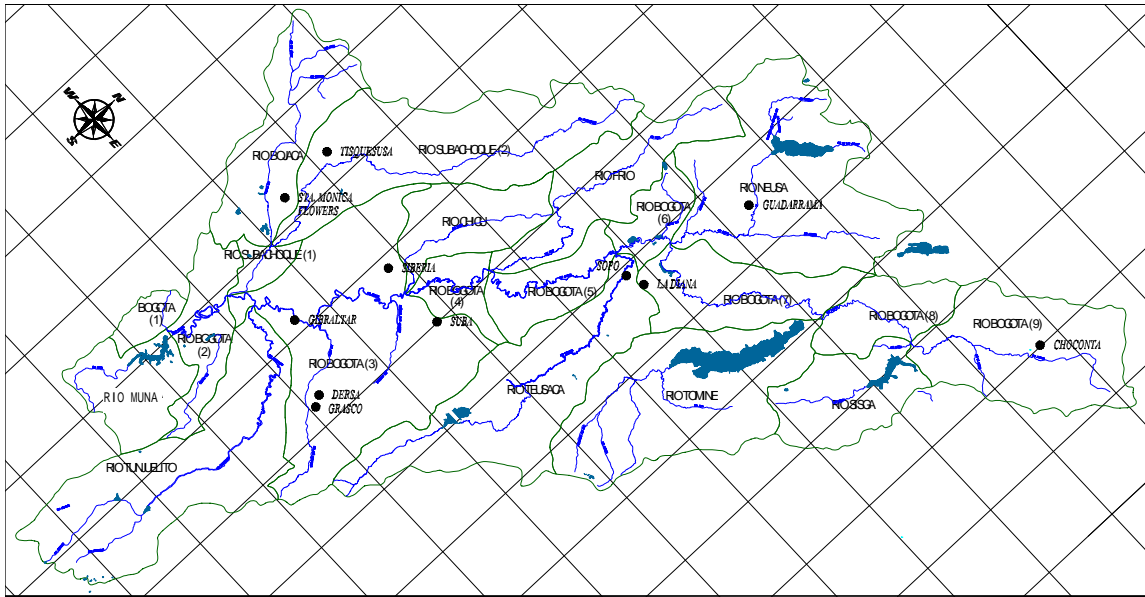


図 3-8 自記水位計設置箇所

3.6 井戸の水質試験

ボゴタ平原の地下水について、環境的な側面と水理地質的な側面から評価するため、井戸の水質調査を3度にわたって実施した。第1回調査は2001年2月～3月、第2回調査は2001年10月～11月、第3回調査は2002年8月～9月に実施した。

(1) 採水地点および試験項目

井戸の水質試験の採水地点は、河川周辺地区井戸、農業地帯井戸、工業地帯井戸、アイソトープ分析井戸およびその他地区の井戸とした。採水井戸の選定に当たっては、既存の井戸データベースの井戸情報等を考慮して採水井戸を決定した。試験項目としては、表3-7に示すように、6分野（健康に影響ある化学物質、味・臭い・色等に関する物質、無機物、有機物、農薬、細菌）をカバーする項目を選んだ。

表 3-7 井戸水質試験の採水地点と試験項目

項目	第1回調査		第2回調査		第3回調査	
1. 採水地点	98ヶ所		104地点		70地点	
・ 河川周辺区域井戸	33ヶ所		33ヶ所		18ヶ所	
・ 農業地域井戸	5ヶ所		5ヶ所		5ヶ所	
・ 工業地域井戸	5ヶ所		5ヶ所		5ヶ所	
・ アイソトープ分析井戸	20ヶ所		20ヶ所		9ヶ所	
・ その他	36ヶ所		42ヶ所		33ヶ所	
2. 分析項目	河川周辺区域	農業地域	工業地域	アイソトープ分析	その他	
健康に影響ある化学物質	(試験実施)					
	砒素、ホウ素、カドミウム、クロム、シアン、フッ素、鉛、総水銀、ニッケル、硝酸、亜硝酸、セレン、アンチモン、バリウム、ベリリウム、銅、マンガン、モリブデン					
味・臭い・色等に関する物質						
	色度、匂い、濁度、温度、ランゲリア指数、導電度					
無機物						
	アルミニウム、アンモニア、塩化物、硬度、硫化水素、鉄、溶剤酸素、pH、ナトリウム、硫酸塩、全蒸発残留物、亜鉛、マグネシウム、カリウム、重炭酸イオン、炭酸塩、カルシウム、全アルカリ度、酸度					
有機物	(実施せず)					
	トルエン、キシレン、エチルベンゼン					
農薬						
	Aldicarb, Carbofuran, Aldrin, Endrin, Dieldrin, Chlordane, Linuron, P,p-DDT, o-p-DDT, p-p-DDT, Permethrin, 2-Chlorophenol, 2,4,6-Trichlorophenol, Endosulfan I, Endosulfan II, Endosulfan S042-, Heptachlor, Heptachlorepoxyde, Lindane, Metolachlor, Atrazine, Bentazone, Profenofos, Clorpirifos, Triclorfos, 2,4-D, Methoxychlor, Simazine, Trifluralin, 2,4-DB, Dichlorprop, Malation, Etil Paration, Metil Paration, 2,4,5-T, PCP, Diazinon, Permethrin, 2,4,5-TP					
細菌						
	大腸菌、大腸菌群					

(2) 試験結果の概要

< 環境的な側面からの水質評価 >

第四紀層地下水質

極めて特徴的なのは、通常の深層地下水でほとんど検知されない水質項目が、調査地で広く、しかも高い数値で観測されている。その例は、色度、NH₄、H₂S、Ba、大腸菌群等である。工業地区で行った、工業汚染の波及の証拠となる有機物（BTX）は検出されていない。同じく、農業地区の地下水に、農薬の影響は検出されていない。コロンビア国の原水基準に照らし、基準を超過する水質項目と、その井戸数の状況は、以下の通りである。全般的には、調査地域の地下水は通常地下水に期待できる水質基準を満たしておらず、通常の浄化プロセスまたはそれ以上の処理を経なければ、飲料に供することはできない。

- ◆ 家庭用水の原水基準超過状況：色度、濁度、大腸菌群、アンモニア、pH が多くの井戸で基準値を超えている。通常浄化プロセスを予定する原水としては良い水質と言い難く、また塩素滅菌のみで使用に供するには大いに問題がある。硫化水素や鉄分などは、国の原水基準に規定がないため超過と言えないが、WHO の基準など国際的に通用している飲料水基準値を超過しているので、無処理での飲用はリスクが高く、水質の良さに依存する地下水の使い方は、本調査地域ではあまり期待することはできない。
- ◆ 農業用水の原水基準超過状況：大部分の調査井戸で、マンガン、鉄の超過が認められる。コロンビア国の基準項目の中には、硫化水素、有毒イオン等が含まれていないので、これらについて後に検討する。
- ◆ 畜産用水の原水基準超過状況：この基準値を超えた井戸は無い。

白亜紀層地下水水質

硫化水素・マンガン・鉄・色度の項目では基準をわずかに超過が見受けられるものの、第4紀層に比べて全般的にそれらの濃度は低い。第4紀層水質結果と大きく違う点は、白亜紀層ではほとんどアンモニアが検出されていないことである。すなわち、白亜紀層と第4紀層の水質は違うと言える。

特徴的な地下水水質

(色度) → 塩素滅菌を前提とする原水の基準値は20TCU（人の感知できる色度15TCU）だが、8割近くの流域が平均色度を超過している。深井戸の水が広範囲に渡り高い色度を示すことは極めて稀であるが、原因としては、嫌氣的な分解を受けた植物性着色有機物（フミン酸等）が、溶解し色度を高めていると考えられる。古い湖底堆積物から構成され大量の植物性有機物を含む可能性が高い第四紀層井戸[第四紀層(25井戸):平均色度30TCU]と海成砂岩層からなりその可能性が低い白亜紀層井戸[白亜紀層(10井戸):平均色度17TCU]との地下水の色度を比較した。その結果、第四紀層の井戸では著しく色度が高く、高い色度は地下由来の腐植性有機物であることを示唆している。

(アンモニア性窒素) → アンモニア性窒素は、調査地域に広く高濃度で検出されている。飲料水原水基準は1.0mg/リットルだが、70%の流域が平均濃度でこの基準を超過している。また第四紀層25井戸の平均で4.91mg/リットル、白亜紀層17井戸平均で1.12mg/リットルを示している。検出されているアンモニア性窒素の濃度から見て、膨大な窒素のストックが深層地下水中に存在していると考えなければならない。この事実を、全て地表からの局地的な人間活動に伴う窒素排出で説明するのは困難である。先に触れた第四紀層の湖底堆積物に含まれる腐植有機物の窒素分が還元的環境の中でアンモニアになっていると考えるのがより自然である。データ解析によると、調査地域の井戸全体で、色度とアンモニア性窒素濃度がかかなりよい相関関係（相関係数にして0.58）を保つことが認められ、上記の推定を間接的に裏付けている。

(硫化水素) → 硫化水素は、調査区域全域に押しなべて高濃度で分布している。WHOの基準0.03mg/リットルを参考にすれば、ほぼ全ての井戸でこれを超過している。これは深層地下水としては異例なことと考えられる。全調査井戸の平均値は、0.804mg/リットルであるが、帯水層別に見ても

ほぼ似たような値になっている。硫化水素のストック量が地上由来(肥料、生活排水、家畜排水、工業廃水等)と比較して膨大であるため、地下由来によるものと判断できる。硫化水素については、ボゴタ平原の第三紀に多く含まれる黄鉄鉱や火山灰由来が考えられる。

(鉄とマンガン) → 鉄、マンガンともに地質に由来することは明らかで、調査区域全域にわたり、大きなバラつきで分布している。帯水層別に見ると、第四紀層の濃度が大きい。鉄の検出濃度は、多くの国で用いている飲料水基準 0.3mg/リットルを大きく超過している。これは、地下の還元的環境のため水溶性の鉄分が増えていると考えられる。マンガンについても同様のことが言える。

(大腸菌) → 半数の流域で、糞便性の大腸菌が検出されている。また大腸菌群については、流域内で 40%以上の井戸から検出されている流域数は、75%を超えている。おそらくは、井戸の構造的な問題が、地表から井戸への大腸菌の浸入を容易にしていると考えられる。

< 水理地質的な側面からの水質評価 >

水質サンプルの主要 8 イオン (Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻) の濃度をトリニアダイアグラム、ヘキサダイアグラム上に表現した結果、次の様な地下水の特長が認められた。

- ◆ 第四紀層の地下水は、地下の流動年月が長く、粘土鉱物との間のイオン交換が進んだ深層地下水の典型である、Na - HCO₃ 型水質が多い。一方、浅層地下水によく現れるイオン交換の進んでいない Ca - HCO₃ 型も見られるが、その数は少ない。
- ◆ 白亜紀の地下水については、大きな特徴は無く、若干 Ca - CO₃ が多い程度である。
- ◆ 全調査井戸を、主要 8 イオン濃度の総合的類似性により統計的に分類した(クラスター分析)結果、長い流動年月を経たと見られる Na - HCO₃ 型の水質を示す井戸が 65%を超える。
- ◆ 第四紀層中の水質では、盆地縁辺部から盆地中央部に向かう地下水の流れが水質面から示唆されている。白亜紀層でも、似たような結果が現れている。

3.7 アイソトープ分析

(1) サンプリングと分析項目

ボゴタ平原の地下水の発生と流動を把握する目的で、第 1 回調査は 2001 年 2 月に 20 ヶ所の井戸で、第 2 回調査は 2002 年 8 月に 9 ヶ所の井戸とボゴタ川源流部の表流水を採水しアイソトープ分析を実施した。アイソトープ分析サンプルの井戸と分析項目は表 3-8 の通りである。

表 3-8 アイソトープ分析井戸の選定基準

項目	炭素 14 (¹⁴ C)	トリチウム (³ H)	重水素 (D)と水素 (¹ H)	酸素 18 (¹⁸ O)と酸素 16 (¹⁶ O)
<分析の狙い>	古い(5000年以上)地下水の年代測定	ごく新しい(40年程度)地下水の確認	地下水の起源、地下水の混合、地下水の流動等を調べる。	
<選定の基準>	・全ての帯水層から選定するが、白亜紀層を重点とする。 ・流域の中心部の井戸	・全ての帯水層から選定するが、第四紀層を重点とする。 ・調査域の全体にわたって選定する。 ・既存のアイソトープ分析結果が利用できるので、同一井戸と重複しないようにする。		
<選定井戸数>				
第四紀層	1ヶ所(5ヶ所)	14ヶ所	14ヶ所	14ヶ所(5ヶ所)
第三紀層	1ヶ所	3ヶ所	3ヶ所	3ヶ所
白亜紀層	3ヶ所(4ヶ所)	3ヶ所	3ヶ所	3ヶ所(4ヶ所)
合計	5ヶ所(9ヶ所)	20ヶ所	20ヶ所	20ヶ所(9ヶ所)

()は、第3年次の採水箇所数

(2) 分析結果の概要と考察

< ¹⁴C (炭素 14) >

15 井戸の分析結果から、調査対象地の地下水のおおよその年齢は 1,690 年 ~ 33,170 年と推定される。採水した帯水層が主に白亜紀層であり、年齢は、涵養域から採水地点の白亜紀層までの流動時間を表している。一般に、降水が地下へ浸透し、流動していく間にはさまざまな反応によって溶存炭酸が供給されそれにともなって ¹⁴C 濃度も変化する。これらの二酸化炭素および炭酸水

素イオン中のいずれの炭素も ^{14}C を完全に失った Dead carbon であることから、これらが帯水層中で供給されると地下水中の ^{14}C の割合は小さくなり、実際の年代よりも古く見積られる可能性がある。したがって、地下水の年齢は 1,690 年～33,170 年よりも新しい可能性が高い。

また、第四紀層の地下水と白亜紀層の地下水の ^{14}C による年代測定結果を比較した場合、白亜紀層の地下水は第四紀層の地下水より新しい地下水であると結論できる。今回の ^{14}C 分析の対象となった白亜紀層の井戸は山地・丘陵の山麓部分に位置し、雨水からの涵養を比較的短時間で受け易い位置にある。一方、第四紀層の井戸は、ボゴタ平原の中央部に位置し、その帯水層は厚い不透水層に覆われてる場合が多く、雨水によって涵養された地下水が帯水層へ到達するには多くの時間を必要とする。また白亜紀層帯水層の透水性が第四紀層帯水層の透水性より高く、白亜紀層の地下水流動は第四紀層の地下水流動より活発であることも ^{14}C 分析結果の地下水年齢に現れている。水質分析試験結果によると、第四紀層の地下水は白亜紀層の地下水より深層型(Na-HCO₃型)を示しており、この結果は ^{14}C 分析結果と一致している。また人工涵養パイロットスタディを実施した Vitelma の地下水は、15 個のサンプルの中では最も新しい年代の地下水に分類される。

表 3-9 アイソトープ分析結果

No.	井戸	流域名	帯水層	水深(m)	^{14}C 年齢(年)	TR	^{18}O (‰)	D(‰)
< 第 1 年次 >								
1	246- -A-061	BOGOTA(1)	Saban-Gdlupe	357	14140 ± 50	0.41	-10.67	-60.76
2	227- -D-587	CHICU	G. Guadalupe	1000	8230 ± 40	0.50	-11.61	-78.50
3	227- -A-233	SUBACHOQUE	Sabana	-	27150 ± 150	0.37	-11.29	-74.16
4	227 A-299	SUBACHOQUE	Sap-Subacho	500	23650 ± 100	0.39	-8.82	-69.81
5	228- C-252	BOGOTA(2)	Tertiary	170	24180 ± 110	0.38	-10.97	-63.66
6	08-0007	BOGOTA(2)	Guadalupe	450	-	0.40	-11.77	-73.94
7	227- -B-561	BOGOTA(2)	Sabana	115	-	Na	-10.95	-43.13
8	11-0010	BOGOTA(2)	Sabana	251.8	-	0.45	-10.22	-86.52
9	22-0078	BOGOTA(2)	Sabana	252	-	0.45	-10.36	-61.42
10	228- -C-019	TUESACA	F. Sabana	135	-	0.49	-10.82	-33.07
11	209- -D-172	BOGOTA(3)	F. Sabana	253	-	0.35	-10.78	-70.70
12	228- -A-509	TUESACA	Sabana	112	-	0.33	-11.00	-70.03
13	209- -D-036	BOGOTA(3)	F. Sabana	82	-	0.56	-11.47	-70.38
14	209- -B-170	NUESA	F. Cacho	-	-	0.42	-10.67	-66.14
15	227- -D-1115?	BOGOTA(2)	Guadalupe	-	-	0.44	-11.48	-41.79
16	227- -A-442?	SUBACHOQUE	Sap-Subacho	353	-	0.57	-10.68	-73.77
17	227- -B-577?	BOGOTA(2)	F. Sabana	526	-	0.44	-12.49	-68.08
18	227 A-X6	SUBACHOQUE	Tilata	581	-	0.41	-11.91	-75.35
19	16-0003	BOGOTA(2)	F. Sabana	192	-	0.47	-11.36	-66.90
20	10-0011	BOGOTA(2)	F. Sabana	120	-	0.44	-11.55	-54.54
< 第 3 年次 >								
21	227- -B-028	SUBACHOQUE(2)	G. Guadalupe	70	3630 ± 40		-10.46	
22	227- -A-063	SUBACHOQUE(2)	G. Guadalupe	448	33170 ± 380		-10.71	
23	227- -D-802	CHICU	F. Sabana	100	32380 ± 350		-10.51	
24	Vitelma1 EAAB	BOGOTA(3)	Guadalupe ?		4620 ± 40		-10.39	
25	E-2 EAAB	BOGOTA(3)	Guadalupe	389	9430 ± 40		-9.55	
26	JICA1 EAAB	BOGOTA(3)	Sabana	196	29750 ± 270		-10.31	
27	JICA2	SUBACHOQUE(2)	Sabana	192	33110 ± 380		-10.37	
28	JICA5	BOGOTA(7)	Sabana	188	20640 ± 90		-9.51	
29	JICA6	BOGOTA(9)	Tilata	188	1690 ± 40		-10.54	
30	Rio BOGOTA 源流				-		-9.99	

TR: トリチウム単位 (1TR は水素原子 1018 個中に 1 個のトリチウム原子を含む。以前は TU と略称)、Na: 検出限界未満、値: 問題とする試料と SMOW (平均標準海水) の同位体比の差を SMOW の同位体比に対する割合として千分率 (‰) で表すものであり、値の正負は各々試料の同位体比が SMOW より大きい小さいかを表す。

< ^3H (トリチウム) >

トリチウム濃度を決定するため、20 サンプルを分析した。結果的にはすべてのトリチウム濃度は検出限界 0.7TU 未満であった。トリチウムの半減期が 12.35 年であることを考えると、ボゴタ平原の地下水は 40 年より古いことが言える。この結果は、涵養域からサンプリング井戸までの距離や帯水層の深さが深い (GL - 80m ~ GL - 1,000m) ことなどから考えると、妥当なものと考えら

れる。一般に、熱核爆発実験によって生産された人工トリチウムは、その実験地が北半球に集中していたため、北半球に多く南半球に少ない。また、海面からの高度が高いほど濃度は低いとされている。調査地域の標高は 2,600m ~ 3,000m であることも考慮すると、トリチウム分析を実施しても、新たな情報が得られる可能性は低いと推定されるため、第三年次の調査ではトリチウム分析は省かれた。

< D と ^{18}O (重水素と酸素 18) >

第 1 年次調査結果の重水素と酸素 18 の分析結果を図 3-9 に示す。これによると、3 タイプの水が識別できる。ボゴタ川に沿って配列されている 1, 2, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 18, 19 の井戸水の同位体組成は、図 3-9 に示すように、世界の天水線 ($D=8 \text{ }^{18}\text{O}+10$) とほぼ平行な傾きを持つ近似直線 $D=9.3868 \text{ }^{18}\text{O}+35.631$ の位置にプロットされる。ボゴタ地域の天水線は明らかではないが、この直線が当地域の天水線に近いものと予想される。

一方、Madrid 地区の断層密集地域にある井戸 3, 4, 16, 18 では、近似直線が $D=1.7844 \text{ }^{18}\text{O}-54.224$ となり、傾きが小さく天水線と交差する。浸透した雨水が地下の熱源で暖められ周囲の岩石と同位体交換反応を起こした結果生じたものと考えられる。岩石中には原子比にして約 60% の酸素があり、このような条件下で水と岩石が同位体交換反応を起こすと、水の酸素同位体比が岩石の値に引き寄せられ ^{18}O が増加する。一方、岩石中の水素の量は、水中の水素の量に比べて非常に小さいことから、同位体交換反応による水素同位体比の変化はほとんどない。よって近似直線の傾きが小さくなる。

また、7, 8, 10, 15, 17, 20 の井戸の水は、図 3-9 のグラフでは天水線から上方にはずれた位置にプロットされ、最も上部にプロットされる 10, 15 が涵養域に近い地域に、それより下にプロットされる 7, 17, 20 と 8 が市街地部に位置する。地下水が地層中を移動する際の鉱物による濾過作用や深部の地層水の混入によって、D や ^{18}O の濃度が高くなったことが考えられる。

第 3 年次の ^{18}O 分析サンプル地点は第 1 年次 ^{18}O 分析サンプル地点の補間的位置および調査地域のより外周側(白亜紀層の岩石地帯)に配置された。その分析結果は 1 年次結果とほぼ整合するが、 ^{18}O の濃度の平均値が第 1 年次の平均値より多少高めである。これは、岩石地帯におけるサンプル数の比率が高くなったため、岩石-雨水との反応の影響を受け ^{18}O 濃度が高められたサンプルの比率が高かったためと推定される。以上の水素-酸素同位体分析結果より、調査地域の地下水は、一部に深部からの地下水の混入の可能性は考えられるものの、基本的には、調査地域の天水を起源とし循環している、と考えられる。

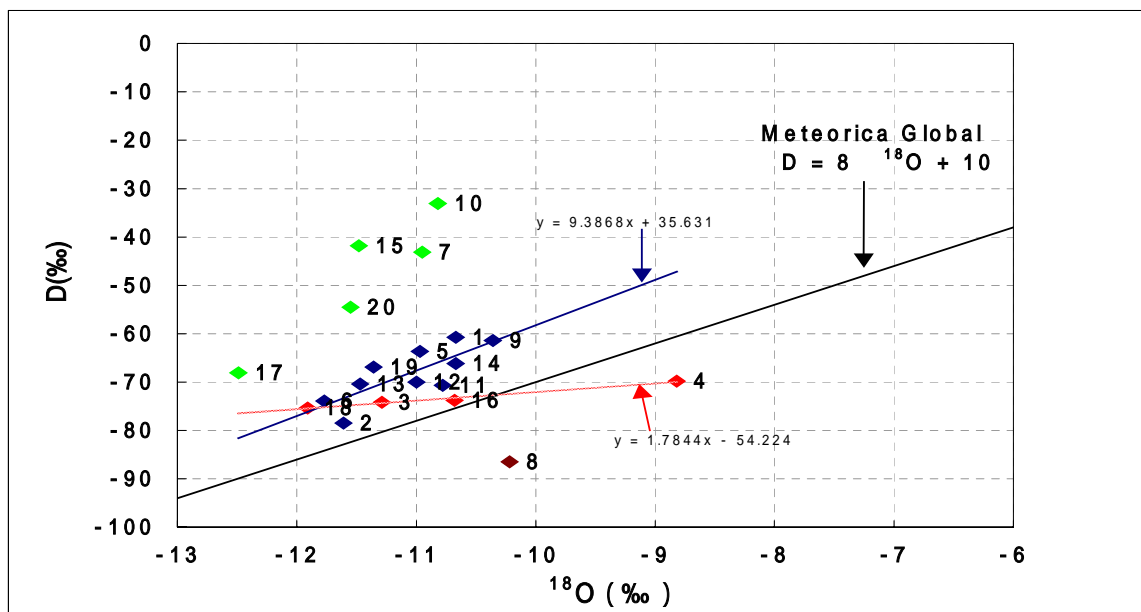


図 3-9 D および ^{18}O の相関

3.8 井戸インベントリー調査

(1) 井戸インベントリーの概要

調査団は調査対象地域に存在する全ての井戸を対象としてインベントリー調査を実施した。井戸インベントリー調査は、INGEOMINAS の井戸データベース、CAR および DAMA に登録された井戸データを収集・整理することによって実施した。この3者を総合することによって、現在調査対象地域にある井戸の大部分を把握することが可能である。表 3-10 に、井戸インベントリー調査で調査団が収集・整理した井戸数を示す。同表から、調査対象地域に存在する既存井戸の総数は約 7,081 本と推定される。

表 3-10 調査対象地域の既存井戸数の推定

井戸区分	井戸本数(井戸位置が記載区分別)	
	記載あり井戸	記載なし井戸
INGEOMINAS 井戸データベースに記録されている井戸本数	3,027	694
CAR に登録されている井戸本数	1,672	1,439
DAMA に登録されている井戸本数	248	1
合計	4,947	2,134
全体合計	7,081	

(2) 調査対象地域における現況揚水量

データベースに基づき調査対象地域における現状の井戸揚水量を推定した。調査団の井戸データベースには全部で 7,081 本の井戸データが記録されており、各井戸からの揚水量が記録されている。しかし、全ての井戸データに揚水量の情報が記載されているわけではない。単位時間揚水量および揚水時間が記載されている井戸の日揚水量は以下の関係から推定した。

$$1 \text{ 本の井戸の日揚水量} = \text{単位時間揚水量} \times 1 \text{ 日の揚水時間}$$

単位時間揚水量が既知のデータによる単位時間揚水量の平均値は 1.54 リッター/秒である。したがって、単位時間揚水量が不明の井戸データについては、単位時間揚水量を 1.54 リッター/秒と仮定した。

1 日の平均揚水時間が既知のデータによる揚水時間の平均値は 6.54 時間/日である。したがって、1 日の平均揚水時間が不明の井戸データについても、1 日の平均揚水時間として 6.54 時間/日を使用した。

上述の分析結果に基づき、調査対象地域の全体揚水量を推定した。その結果を表 3-11 に示す。同表から分かるように、調査対象地域の全体揚水量は 320,490 m³/日である。推定された全体揚水量を他の単位に換算すると、 $117 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year} = 3.7 \text{ m}^3/\text{s} = 27 \text{ mm}/\text{year}$ となる。

(3) 地質別の井戸本数および揚水量

調査団が整理した井戸データベースには、各井戸が取水している帯水層の区分が示されている。このうち INGEOMINAS の多くの井戸データは帯水層に関する情報がある。その情報に基づき、帯水層ごとの井戸本数および取水量を表 3-12 のように推定した。

表 3-11 調査対象地域の全体揚水量

井戸データ区分(単位時間揚水量および揚水時間の記載の有無)	井戸数	推定単位時間揚水量	1日当たりの推定揚水時間	合計揚水量(m ³ /day)
記載ありの井戸	2,644	既知	既知	158,690
記載なしの井戸	4,437	1.54(l/s)	6.54(時間)	160,800
合計	7,081	-	-	320,490

表 3-12 帯水層別井戸本数および帯水層別揚水量

帯水層区分		井戸本数		井戸揚水量	
		井戸本数	全体井戸本数に占める割合 (%)	揚水量 (m ³ /日)	全体揚水量に占める割合 (%)
第四紀	Quaternary	6,570	92.9	248,830	77.6
第三紀	Chaco 層	60	0.8	4,200	1.3
	Guaduas 層	50	0.7	3,900	1.2
	他の第三紀層	50	0.7	700	0.2
白亜紀	Labor and Tierna 層	246	3.5	48,060	15.0
	Pleaners and Dira 層	90	0.13	14,400	4.5
	Chipaque 層	15	0.02	400	0.1
全 体		7,081	100	320,490	100

井戸本数の面からは、調査対象地域の全井戸のうち約 93%は第四紀層を帯水層とし、約 2%は第三紀層を帯水層とし、約 5%は白亜紀層を帯水層としている。また、井戸の揚水量の面からは、調査対象地域の全揚水量のうち約 78%は第四紀層から取水し、約 3%は第三紀層から取水し、19%は白亜紀層から取水している。以上のデータが示すように、調査対象地域では、大部分の地下水は第四紀層から取水されており、白亜紀層からの取水は少ない。また第三紀層からの取水は非常に少ない。

(3) 地域ごとの井戸分布

井戸 Inventory 結果から流域ごと井戸本数および揚水量を算出した。その結果を表 3-13と図 3-10に示す。図 3-10は揚水量を 1km×km のメッシュでごとに加算したものを表示している。図 3-10からわかるように、ボゴタ平原における井戸の分布は非常に偏っている。ボゴタ平原中央～西部地域で揚水量が非常に多い。ボゴタ市の西部地域、Subachoque 川流域、Chicu 川流域に井戸が集中していることが明らかである。

表 3-13 流域ごと井戸本数および揚水量

流域名	流域面積(km ²)	井戸数	面積当り井戸本数 (本/km ²)	日揚水量 (m ³ /日)	面積当り日揚水量(m ³ /日/km ²)
Bogota1 Bogota3	678	1,559	2.3	77,651	114.5
Bogota4 Bogota6	232	1,141	4.9	45,797	197.4
Bogota7 Bogota9	557	429	0.8	27,451	49.3
Bojaca	219	311	1.4	21,549	98.4
Chicu	134	1,620	12.0	44,636	333.1
Frio	194	320	1.6	12,476	64.3
Neusa	432	185	0.4	8,333	19.3
Sisga	152	1	0.0	30	0.2
Muna	128	40	0.3	1,298	10.1
Subachoque 1	32	18	0.6	293	9.2
Subachoque 2	386	1,078	2.8	54,751	141.8
Teusaca	353	256	0.7	14,467	41.0
Tomine	368	21	0.7	719	2.0
Tunjuelito	404	103	0.3	11,038	27.3
合計	4,269	7,081	1.7	320,490	75.1

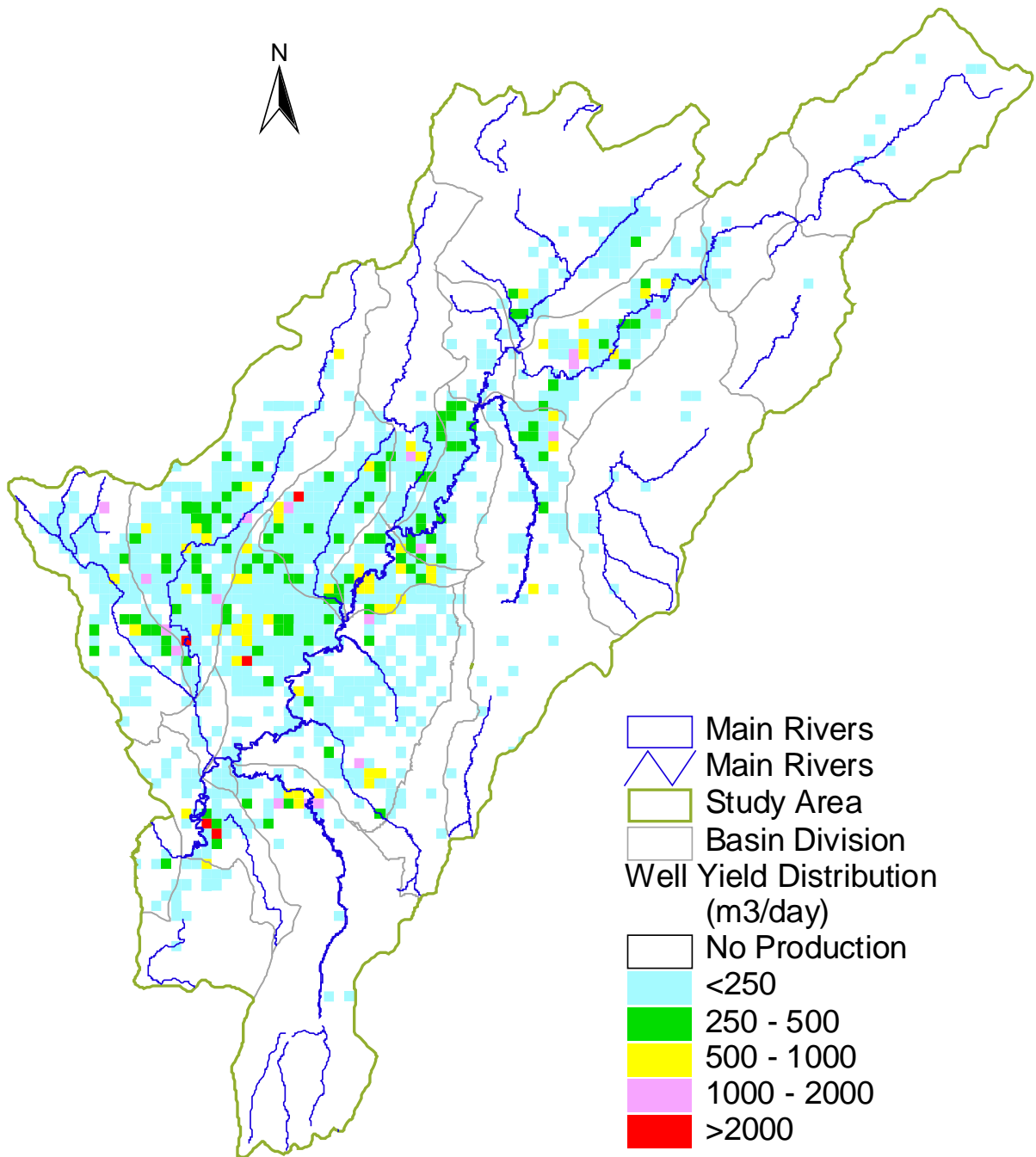


図 3-10 流域ごとの揚水量分布

3.9 気象観測

本調査団は、調査対象地域の気象観測を目的として、調査対象地域の 11 個所に気象観測所を設置した。

(1) 気象観測所設置位置

気象観測所設置位置は以下の通りであり、また

図 3-11に示す。これらの気象観測機器を設置する 11 地点を選定するに当たっては、関係機関である EAAB、CAR、IDEAM、INGEOMINAS と十分な協議を行なった。最終的に選定された 11 個所は、調査対象地域内の主に丘陵・山地部に配置されている。これらの地域は現在まで気象データが得られていなかった地域である。今回設置した 11 個所の気象観測所は、調査対象地域内の既往気象観測ネットワークに組みこまれ、全ての関係機関によって観測結果が利用されている。また、気象観測地点の選定に当たっては、気象データ観測する上で重要な地点であることだけでなく、盗難や破壊に対して安全な地点であることも十分に考慮した。

- | | | |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 1) Tomine | 5) El Vino | 9) Aguas claras (Muna) |
| 2) Suesca | 6) Cruz verde (Bojaca) | 10) Dona Juana |
| 3) Casa Loma | 7) Paramo de Guerrero | 11) Manjui (Chia) |
| 4) EL tablazo | 8) Siecha | <合計> 11ヶ所 |

(2) 気象観測項目および気象機器

気象観測項目は、風向風速、雨量、湿度、温度、日照時間、蒸発量および日射量の 7 項目である。気象機器の設置は 2002 年 2 月に完了し、その後から観測が開始された。現在気象観測を継続中である。気象観測結果は本調査の気象解析に有効に利用されている。

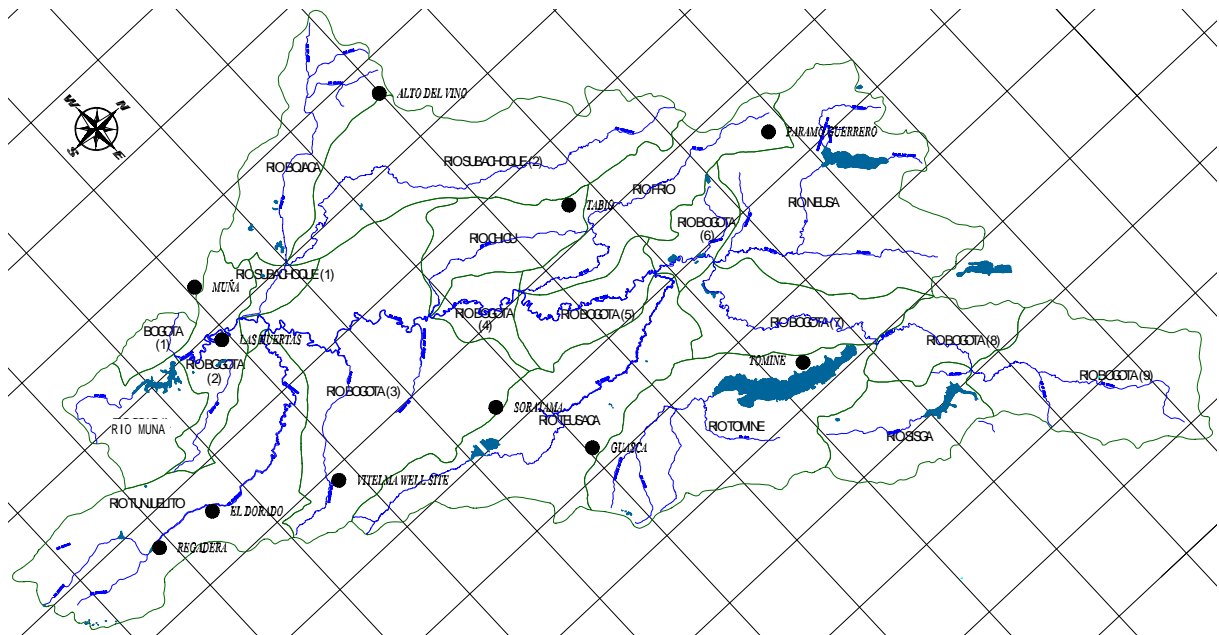


図 3-11 JICA 気象観測所設置個所

3.10 パイロット調査

人工涵養のためのパイロットスタディは、井戸に実際に注水を行なうことによって、人工涵養の可能性や問題点を明らかにし、人口涵養プロジェクトを計画するための基礎データを得る目的で実施した。

(1) パイロットスタディサイトの選定

本調査において JICA 調査団は、次に示す 4 ヶ所の人工涵養候補地を提案した。 Vitelma、 La Aguadora、 La Salle、 Subachque。この中から最終的に Vitelma サイトをパイロットスタデ

イの実施地点として選定した。その理由は以下の通りである。

- ◆ Vitelma サイトの近傍には San Cristobal 川が流れ、パイロットスタディの期間中に十分な水量を確保することが可能である。
- ◆ Vitelma サイトには EAAB の沈砂池があり、人工涵養のための清浄な河川水の取得が容易である。
- ◆ Vitelma 地域は標高 2,800m であり自噴井戸地域ではないことが予測されるため人工涵養試験に適している。

(2) パイロットスタディのための井戸

EAAB が Vitelma サイトで 2 本の井戸を掘削した。このうち 1 本は涵養井戸、もう 1 本は観測井戸である。この 2 本の井戸を利用してパイロットスタディを実施した。2 本の井戸の概要および地質状況は以下の通りである。

表 3-14 Vitelma 涵養井戸および観測井戸の地質状況

井戸名	井戸深度	井戸口径	静水位	地質区分	深度 (m)	岩 相
涵養井戸	300m	8 inch	GL -6.63m	崖錐堆積物	0-22	礫、砂、シルト
				Labor・Tierna 層	22-180	砂岩が卓越した砂岩・頁岩の互層
				Chipaque 層	180-300	頁岩
観測井戸	240m	4 inch	GL -6.84m	崖錐堆積物	0-36	礫、砂、シルト
				Labor・Tierna 層	36-188	砂岩が卓越した砂岩・頁岩の互層
				Chipaque 層	188-240	頁岩

注) 観測井戸の静水位は、涵養井戸の地盤高に対するもの。

涵養井戸の揚水試験結果によると、涵養井戸の比湧出量は $62\text{m}^2/\text{日}$ であり、高い生産能力を示す。また、涵養井戸からの揚水の影響はわずか 15 分で 120m 離れた観測井戸で観測された。これは、白亜紀層に掘られた井戸相互間の反応の早さを示すものであり、白亜紀帯水層が高い被圧性を持っている一つの証拠となる。以上の観測結果は白亜紀帯水層における人工涵養の効果が周辺の井戸に短期間で到達することを意味する。

(3) パイロットスタディの手順

パイロットスタディ(人工涵養試験)の実施手順は図 3-12 に示す通りである。

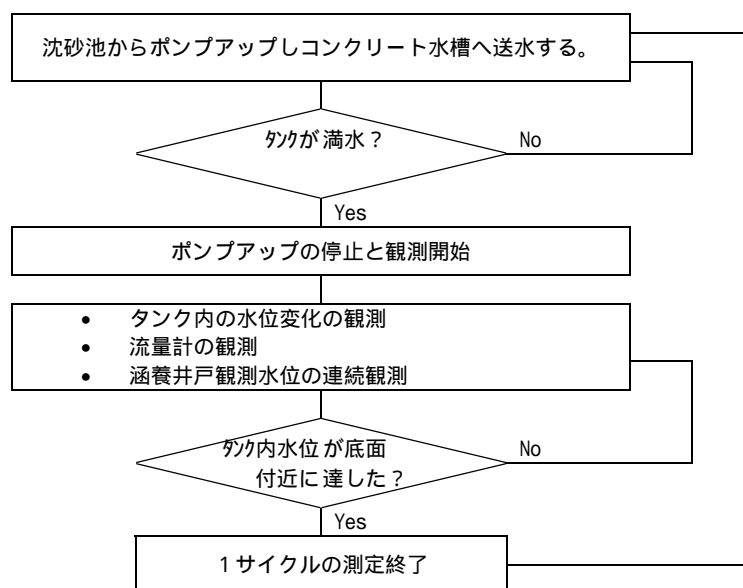


図 3-12 パイロットスタディにおける注水量測定 of 1 サイクル

(4) パイロットスタディの結果

パイロットスタディの結果の例を図 3-13に示す。図 3-13は人工涵養中の涵養井戸内の地下水位を表示したものである。この観測結果は以下の通りである。

表 3-15 人工涵養試験結果

平均注水量	平均注水水頭	比注水量	揚水試験時の比湧出量
864m ³ /日	8.41m	103m ² /日	69 m ² /日 (揚水量 1,296 m ³ /日)

人工涵養の注水効率は、比注水量 (=注水量/水位上昇) で評価される。比注水量は、揚水効率を示す比湧出量において、揚水量を注水量に置き換えたものである。一般に、比注水量は、注水量の増加とともに減少するとされている。表に示した比注水量 103m²/日は注水量 864m³/日に對するものであり、注水量の増加とともに減少していくことが予想される。しかし、揚水試験時の比湧出量と比べ、Vitelm サイトの帯水層の注水効率は揚水効率と同等以上であることが証明された。

Monitoring Result

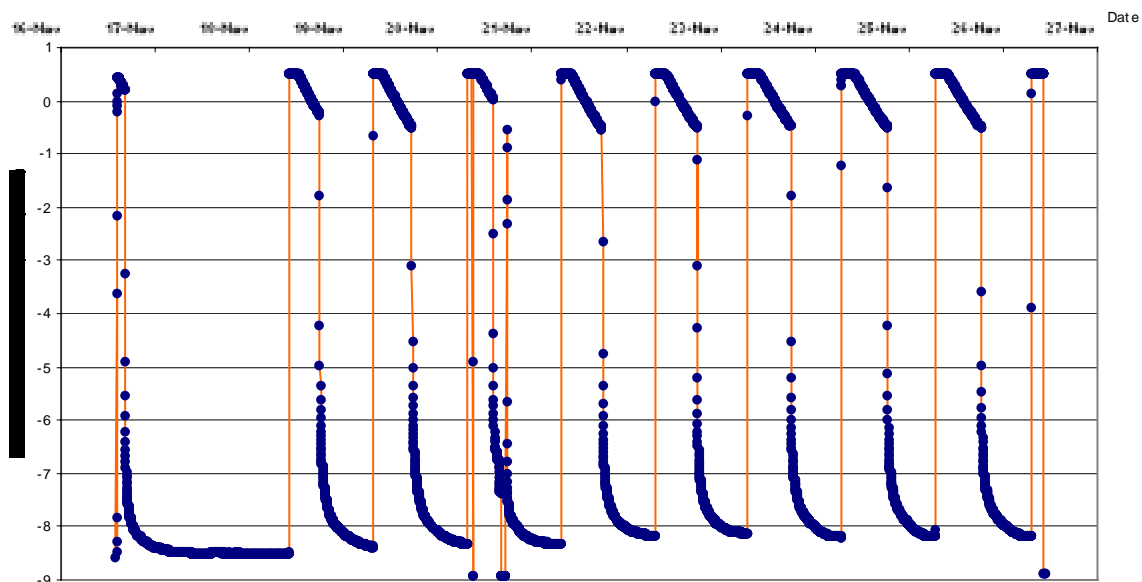


図 3-13 人工涵養試験結果例

3.11 GIS データベースの作成

本査では、地下水関連データの一元管理を目的に、調査成果のデータベース作成を支援するための GIS システムを導入した。コロンビアでは、地下水開発に関連する GIS とデータベースは、分散された状況にあり、各関連機関はデータ共有の困難さを抱えて独自にシステムを開発してきた。本調査のデータベース作成もこの状況のため、特に、データ収集が困難であった。

GIS システムには、ArcView3.2 (ESRI 社) と PC、入出力装置、ネットワークの機材を導入した。図 3-14 参照。GIS データベースは、調査地域、IGAC の地形図等を考慮して、表 3-16 に示す GIS データの仕様を定義した。作成したデータベースの項目は表 3-17 に示す通りである。

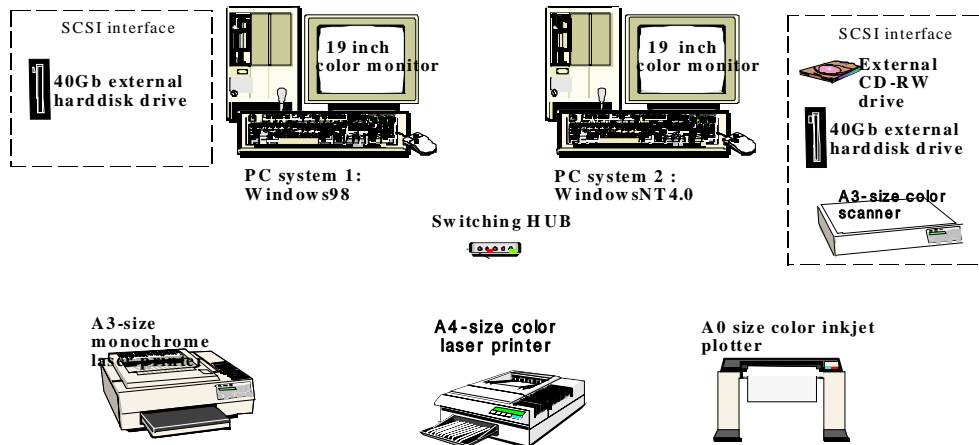


図 3-14 GIS 機材の構成

表 3-16 GIS データの定義

データベースの定義	内 容
地図座標の範囲： X (EAST)	940,000 m - 1,070,000m
地図座標の範囲： Y (NORTH)	960,000 m - 1,080,000m
グリッドセルの原点： (X, Y)	X = 940,000 m, Y = 1,080,000m
DEM の解像度とグリッドセル	100m, 250m, 500m
地図投影	Gauss conformed
楕円帯	International
地理座標のゾーン原点座標	緯度; 北緯 4 ° 35 ' 56.57" 経度; 西経 74 ° 04 ' 51.30 "
平面座標	1'000.000 メートル北 1'000.000 メートル 東;
水平 DATUM:	MEAN LEVEL OF THE OCEAN IN BUENAVENTURA
垂直 DATUM:	BOGOTA

表 3-17 GIS データのリスト

データベースの項目	データベースの内容
ベースマップ	コンターライン、道路、行政界、河川、居住地域、地図注釈他を含む IGAC の 1:100,000 地形図の編集図、調査成果についての一連の AutoCAD ファイル (図 3-15 参照)
人工衛星画像	カラー合成画像、土地被覆図、植生指標図、地質判読のためのエッジ強調画像 (図 3-16、図 3-17 参照)
井戸インベントリー	既存井戸インベントリーの結果
気象・水文観測データ	気象観測所の月平均観測データ：降水量、気温、湿度、蒸発散量、放射量、地面温度、水文観測所の月観測データ：平均流量、洪水流量
地形地質	ベクターコンター図、DEM(100m、250m、500m)、河川図、流域図、地形区分図、地質図、水理地質図 (図 3-18、図 3-19 参照)
土地利用図	衛星画像データによる土地被覆図、現況土地利用図、土地利用計画図 (図 3-20 参照)
行政界図と関連統計データ	市町村の行政界図、ボゴタ市セクター図、1993 年の国勢調査データ及び水需要解析における他統計データ (図 3-21 参照)
水需要図	2015 年までの水需要予測図は、行政界単位で解析・予測された計算結果をもとに、データと行政界を直接リンクして作成
上水・下水施設図	上水道ネットワーク及び給水施設、下水道ネットワーク、排水施設及び下水施設 (図 3-22 参照)
環境保全図	生態、開発保護のための保護地域及び保全地域
災害履歴図	浸水、土壌浸食、地すべり、地震災害のゾーニング図、 (図 3-23 参照)
観測データの可視化図	水質分析井戸図、揚水試験井戸図、井戸水質分布図、深度別井戸分布図、CSAMT 物理探査図 (図 3-24、図 3-25、図 3-26 参照)

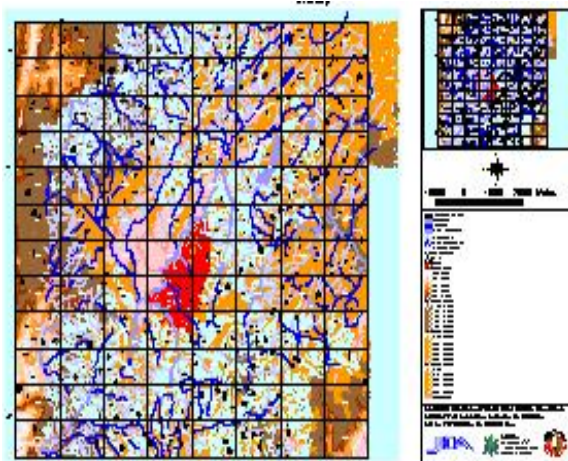


図 3-15 調査におけるベースマップ

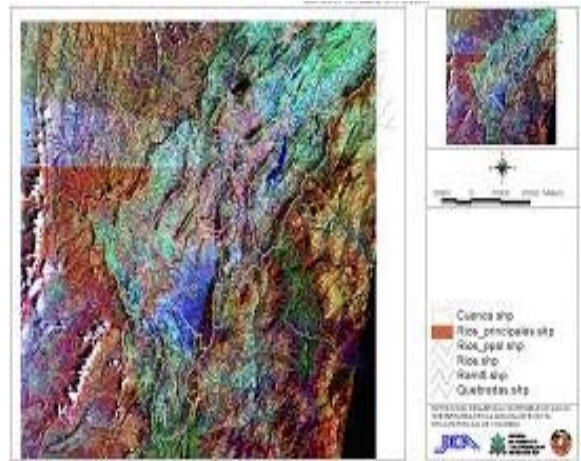


図 3-16 IGAC Spatial Mapa (1995年 LANDSAT 5号)

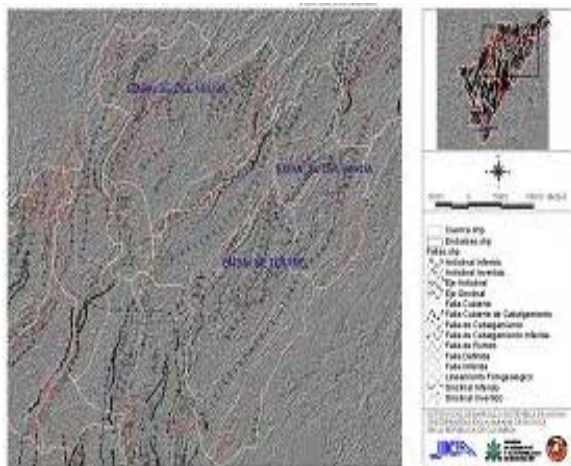


図 3-17 北西方向の線強調画像

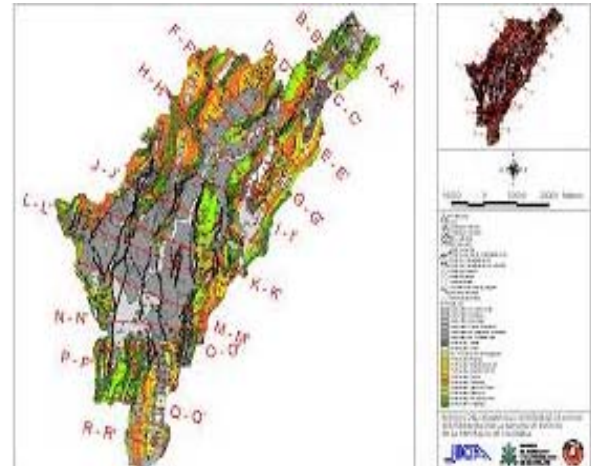


図 3-18 調査団の一般地質図

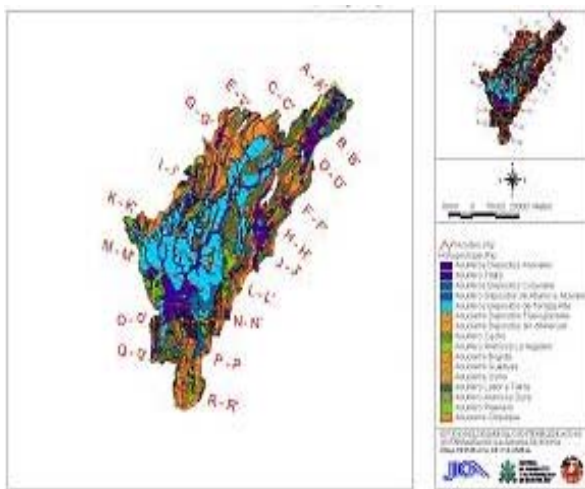


図 3-19 水理地質図

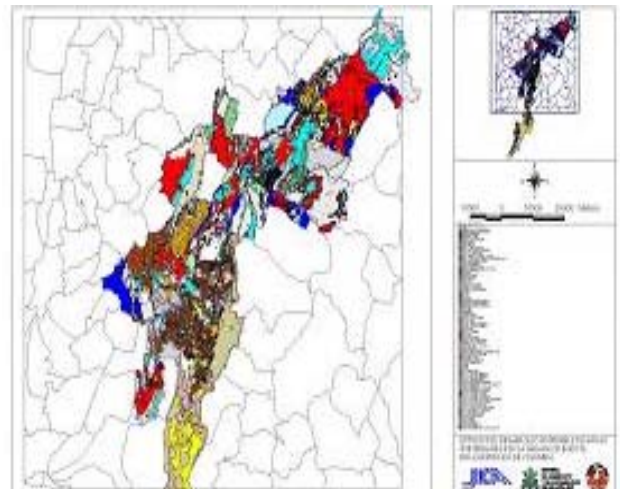


図 3-20 POT を編集した土地利用・計画図

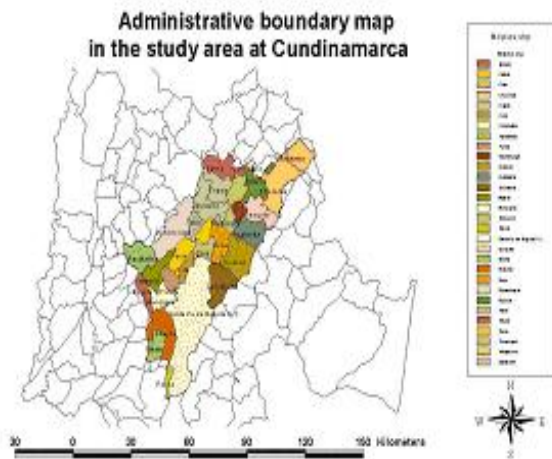


図 3-21 DANE の行政界図

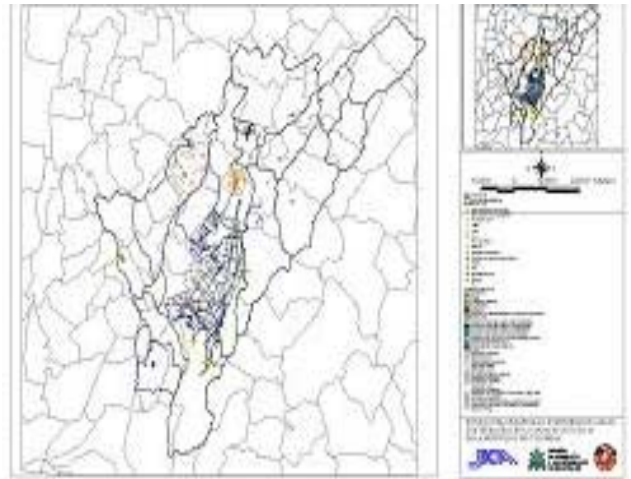


図 3-22 POT 編集による上水道施設図

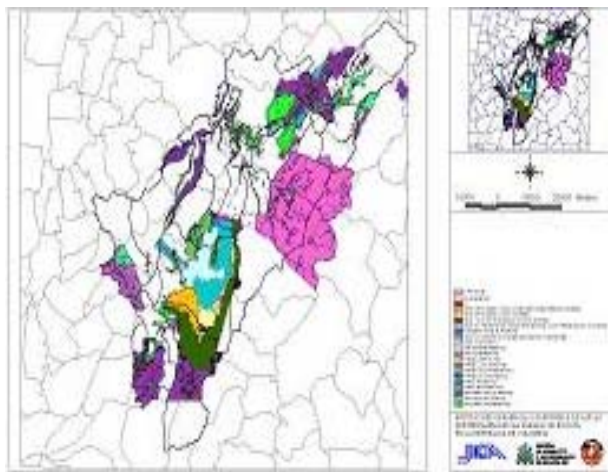


図 3-23 自然災害図、リスク図

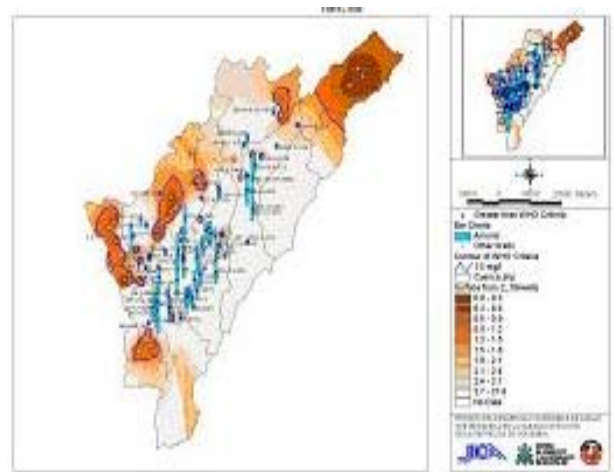


図 3-24 アンモニアの水質分析結果の例

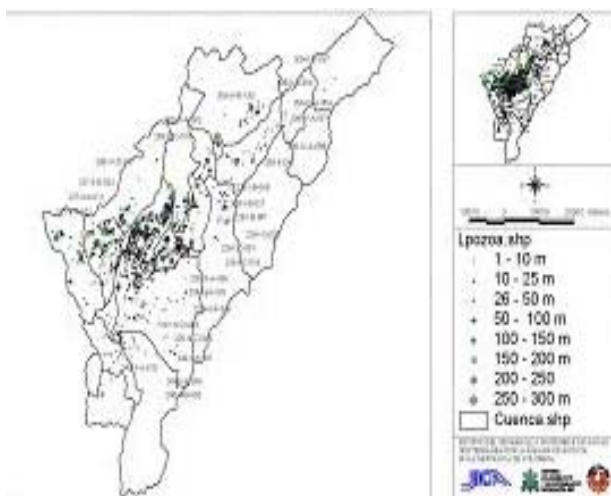


図 3-25 深度別井戸分布図の例

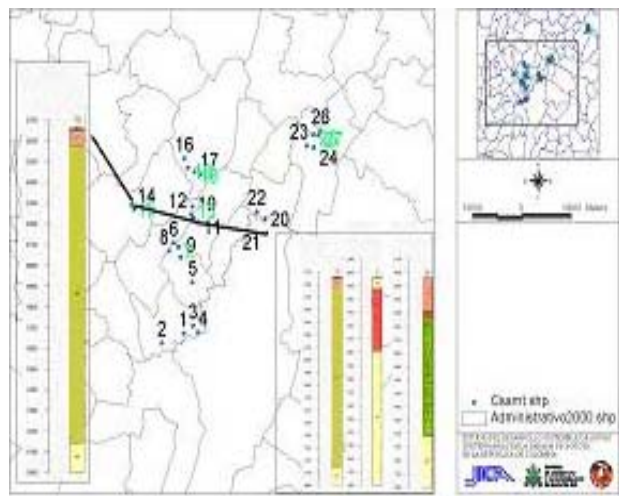


図 3-26 CSAMT 物理探査図