

第4章 地下水ポテンシャル

4.1 水理地質解析

(1) 帯水層の分類と水理特性

(a) 帯水層の分類

調査対象地域では、過去の調査の地質分類に従って帯水層の分類を行なっている。本調査でも、これに従い、地質分類を帯水層の分類とする。既往調査結果に基づき、帯水層の分類と単純化した特徴を表 4-1に示す。

表 4-1 調査対象地域における帯水層区分

時代区分		地層名	岩層	一般的透水性
第四紀	完新世	沖積層	粘土、シルト、砂、砂礫	高～低
	更新世	Terraza 層	粘土、砂質粘土、砂	中～低
		Sabanna 層	粘土、砂質粘土、砂	中～低
		Tilata 層	固結砂礫、固結砂、固結シルト、固結粘土	高
第三紀	漸進世	Usme 層	粘土岩	低
	始新世	Regadera 層	砂岩、礫岩、粘土岩	低
		Bogota 層	粘土岩、シルト岩、砂岩	中～低
	暁新世	Cacho 層	砂岩、礫岩	高
		Guaduas 層	粘土岩、頁岩	中～低
白亜紀	Guadalupe 層群	砂岩、シルト岩、頁岩	高～低	
	Chipaque 層	頁岩、砂岩	中～低	

(b) 帯水層の性状

ボゴタ平原の帯水層は、大きく3つ帯水層に区分されている。即ち、第四紀帯水層、第三紀帯水層および白亜紀帯水層である。これら3つの地層は透水性層と不透水性層の複雑な互層であり、帯水層となる地層は透水性の地層に限られている。また、帯水層の大部分は、地表に露出している部分涵養部分を持っているため、不圧帯水層と被圧帯水層の両者の性質を持っている。

第四紀層帯水層

現在、ボゴタ平原に存在する井戸から大量に揚水されている地下水は、主に Savana 層中に介在する砂礫層の中の地下水である。第四紀層は粘土質な地層が主体であるが、その中に含まれた砂層および礫層が部分的に帯水層を形成している。これらの砂層や礫層は、層厚や連続性に乏しく、また、様々な深度に分かれて存在しているものと推定される。また、それぞれの砂層・礫層が異なる地下水位を持っており、井戸で観測される地下水位は、通常は異なる地下水位が合成されたものと考えられることができる。

第三紀層

第三紀層は主に粘土質な地層が主体であるが、その中に介在する小規模な砂礫層が帯水層となっている。しかし、この帯水層は規模が小さいため、大規模な地下水開発の対象とは成り難い。

白亜紀層

白亜紀層は Guadalupe 層群と Chipaque 層からなる。このうち、Guadalupe 層群には透水性の砂岩層が介在し、帯水層として優れている。一方、Chipaque 層は主に頁岩からなる。Guadalupe 層群は以下に示す3つの層で構成されている。即ち、a) Labor Tierna 層、b) Plaeners 層および c) Renisca Dura 層である。

3つに区分された Guadalupe 層群の中で、最も上位に位置する Labor Tierna 層は、主に透水性の

砂岩で構成されており、帯水層として優れている。一方、中位に位置する Plaeners 層は不透水性の頁岩からなり、帯水層として期待できない。最も下位に位置する Arenisca Dura 層は砂岩・頁岩の互層であり、Labor Tierna 層よりも透水性が劣る。したがって、Guadalupe 層群の中で、最も上位に位置する Labor Tierna 層が地下水開発の対象として期待され、次いで Arenisca Dura 層が期待される。

(c) 水理地質構造

調査対象域の水理地質構造は調査地域の複雑な地質構造に強く支配され、帯水層の分布・連続性は、褶曲構造・断層の存在に影響されている。第四紀帯水層、第三紀帯水層、白亜紀帯水層ともに被圧帯水層を形成していると考えられる。第四紀層の表層部分には不圧帯水層が存在しているが、その規模は小さい。第四紀層の主要帯水層となっている Savana 層および Tilata 層の砂礫質な部分は、不透水性の部分に挟まれているため、その地下水は被圧状態となっている。

第四紀帯水層、第三紀帯水層、白亜紀帯水層ともにその自然地下水位は GL-20m ~ GL-50m 程度と推定されており、各帯水層の分布深度は大きく異なるが、その自然地下水位は似通っている。これは3つの帯水層の間に水理的連続性があることを示している。

(d) 地下水涵養メカニズム

第四紀層および第三紀層地下水涵養メカニズム

第四紀帯水層は、山麓堆積物、平地部分、河川流路を通じて地下水の涵養を受けている可能性が高い。地表面から浸透した雨水が土壌を通過し、不透水性の地層を通過して地下深部に存在する帯水層に到達しているものと推定される。

白亜紀層地下水涵養メカニズム

白亜紀層はボゴタ平原の外周部分に山地を形作っているが、ボゴタ平原の中央部ではこれらの地層は褶曲・断層によって地下深部に潜りこんでいる。したがって白亜紀層の主要な涵養域はボゴタ平原を取り囲んでいる外周山地部分であり、山地部で涵養された地下水は帯水層内をボゴタ平原の深部に向かって流動しているものと推定される。

(e) 帯水層パラメータ

調査対象地域において過去に実施された揚水試験結果の中から、信頼性の高いと判断される試験結果を用いて帯水層パラメータの分析を行なった。その結果を以下に示す。

表 4-2 帯水層の水理パラメータ

パラメータ	第四紀帯水層		Guadalupe 層	
	範囲	代表的値	範囲	代表的値
揚水量 (m ³ /day)	30 - 1500	150 - 250	50 - 7000	150 - 1000
比湧出量 (m ³ /day/m)	1 - 500	4 - 30	1 - 1000	10 - 120
透水量係数 (m ² /day)	1.5 - 250	4 - 15	1 - 1000	15 - 150
透水係数 (m/day)	0.01 - 10.0	0.15 - 1.0	0.05 - 10.0	0.5 - 1.0
貯留係数 (-)	10 ⁻⁷ - 10 ⁻¹	10 ⁻⁵ - 10 ⁻³	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹	10 ⁻⁷ - 10 ⁻³

(2) 水理地質図の作成

本調査において、各種調査の結果を総合し GIS によって水理地質図を作成した。GIS によって作成した項目は、「帯水層の分布」、「帯水層の地下水位分布」、「帯水層の地下水涵養量分布」、「既存井戸の分布」、「帯水層の水理特性(透水係数、貯留係数)分布」、「地下水の水質分布」、「帯水層ごとの地下水開発可能量分布」その他である。

4.2 水収支解析と地下水涵養

水収支解析の目的は、ボゴタ平原における地下水涵養量を推定することである。水収支解析の実施に当たっては、既往収支解析結果を分析・検討し、CAR、EAAB が所有する水文・気象データを利用した。水収支解析のアウトプットとして地下水涵養量を推定し、この地下水涵養量は地下水シミュレーションの入力データとして利用した。

4.2.1 水収支

(1) 水収支の計算法

流域からの流出量と降雨量の算出過程を図 4-1に示す。この算出過程に従って説明を行なう。

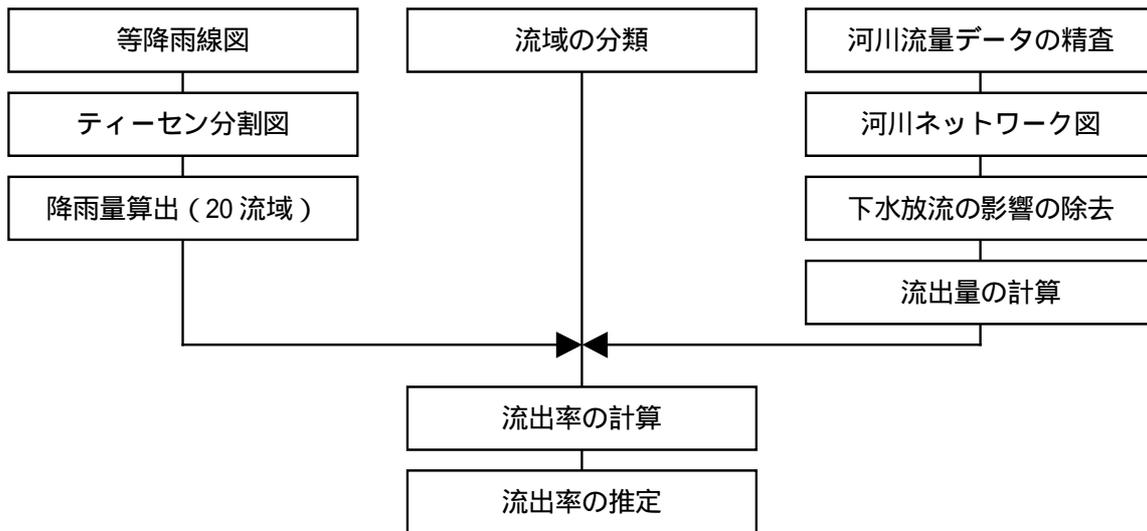


図 4-1 流出率算出過程

(2) 流域の分類

河川への流出は基本的に山地部で発生するという仮定のもと、各流域の地形特性（山地と平地の面積比率）と流出率には強い相関関係が成り立つものと考え、20 流域を山地/平地の比率により3つのグループに分類した。河川流量データが適用できず流出量が算出できない流域は、同じグループに属する流域の流出率を適用するものとする。

表 4-3 流域の分類

グループ 1	山地の比率が高い。主に支流流域。河川データには開発の影響は少ない。
グループ 2	山地と平地の比率は半々程度。農業地帯の支流流域。河川データには灌漑取水の影響が大きい。
グループ 3	平地の比率が高く、ボゴタ川の本流域。河川データには下水放流、上水への取水、灌漑用水取水の影響が大きい。

(3) 降雨量の算出

長期雨量観測結果から調査域の年等雨量線図を作成した。この等雨量線図から各流域の年降雨量を算出した。調査域全域の降雨量分布を図 4-2 に示す。

(4) 河川ネットワーク図の作成

河川ネットワーク図を作成し、流量データ（1973年-1999年の観測流量と水利用データ）に基づ

いて、ボゴタ川の観測流量を上流から下流の Alcachin 観測所までプロットした。図 4-2参照。この図からボゴタ川の流量には Tibitoc 浄水場への取水の影響、ボゴタ市街における下水放流の影響が強いことが読みとれる。

(5) 下水放流の影響

下水放流の影響を見かけの流出量から差し引く必要がある。下水放流の大半を占める Bogota(3)流域を対象にボゴタ川の区間流量データおよび上水供給量から真の流出量を求めた。

(6) 流出量の計算

流域ごとに得られた観測値から流域の流出率を計算し、また流量観測データが少ないため流出率を算定できない流域に関して、地形特性が類似した他の流域の流出率を適用し流出量を推定した。最終的に求められた全流域の流出量は表 4-4の通りである。

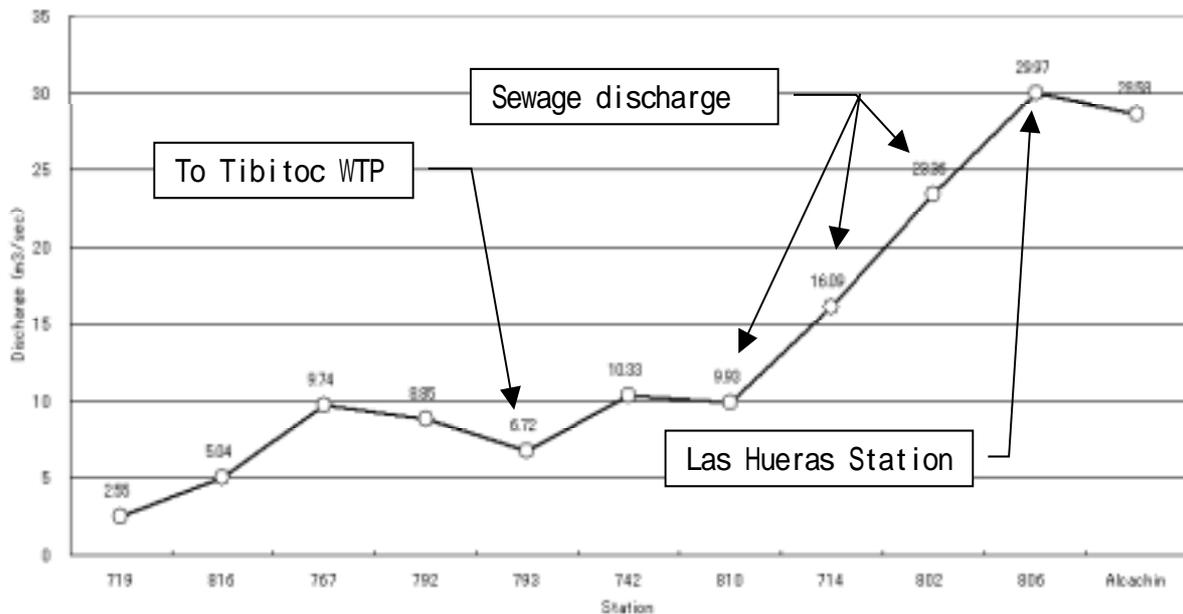


図 4-2 ボゴタ川流量曲線

表 4-4 調査域の河川流出量

流域名	降雨量 (mm)	流出率 (%)	流出量 (m³/s)	流域名	降雨量 (mm)	流出率 (%)	流出量 (m³/s)
SISGA	913	40.0%	1.77	BOGOTÁ (8)	725	40.0%	0.95
TOMINE	873	34.0%	3.47	BOGOTÁ (7)	730	20.0%	0.80
TEUSACA	896	34.2%	3.42	BOGOTÁ (6)	772	20.0%	0.32
TUNJUELITO	941	30.7%	3.71	BOGOTÁ (5)	705	20.0%	0.47
NEUSA	850	30.2%	3.52	BOGOTÁ (4)	713	41.0%	0.58
FRIO	838	42.1%	2.18	BOGOTÁ (3)-E	770	48.5%	4.36
CHICU	752	20.0%	0.63	BOGOTÁ (3)-W	624	20.0%	0.65
BOJACA	755	32.9%	1.72	BOGOTÁ (2)	618	20.0%	0.44
SUBACHOQUE (2)	833	32.2%	3.28	BOGOTÁ (1)	722	50.1%	0.41
SUBACHOQUE (1)	600	20.0%	0.12	MUNA	727	45.4%	1.35
BOGOTÁ (9)	719	39.9%	2.54	-	-	-	-
平均	年間降雨量=802mm, 流出率=33.7%, 年間流出量=36.69 m³/s。ただし、ボゴタ平原出口の流量は、取水量と還元量を考慮すると、30.73 m³/s。また、域内発生 of ボゴタ平原出口流量は、域外分の下水還元量を差し引いた 24.57 m³/s となる。 < 灌漑・給水取水量: 16.20 m³/s > 灌漑等: 11.10 m³/s、上水取水: 5.10 m³/s < 下水還元量: 10.24 m³/s > 域内分: 4.08 m³/s、域外分: 6.16 m³/s						

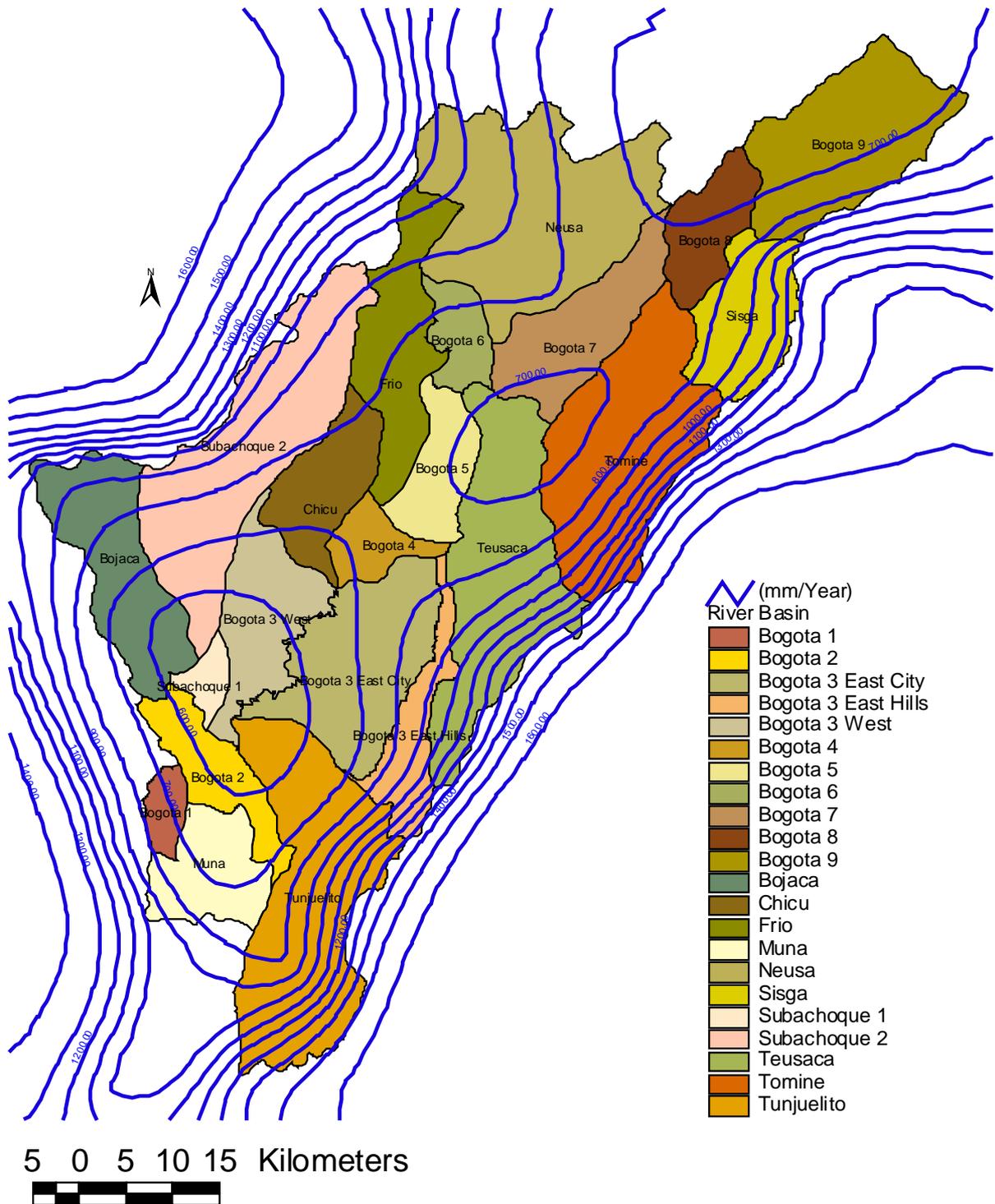


図 4-3 調査域の年降雨量

4.2.2 地下水涵養量

(1) 地下水涵養量を算定する基礎式

調査対象地域の地下水は、山地・丘陵部、平地部、河川において降雨から涵養され、徐々に地下深部の帯水層に浸透していくものと推定される。本調査では地下水涵養量を水収支解析によって求めた。今回使用した水収支式を下に示す。

$$\text{年間地下水涵養量 (mm/年)} = P - \text{ETR} - (D_2 + G_{2\text{-baseflow}}) \quad (1)\text{式}$$

ここで、

P : 年間降雨量 (mm/年)
 ETR : 年間実蒸発量 (mm/年)
 (D₂ + G_{2-baseflow}) : 年間河川流出量 (mm/年)

(2) 水収支の計算位置および期間

水収支解析はボゴタ平原内の全流域を対象として実施した。使用した気象データや水文データは大部分が CAR の気象・水文観測所のデータであり、5年～30年間のデータが集積されている。地下水涵養量の算定は長期間の年平均値を使用して実施した。

(3) 流域の降雨量(P)の算定

流域の年平均降雨量の分布は図 4-3 に示す通りである。年降雨量の平均値は 802mm である。

(4) 流域の河川流出量の算定 (D₂ + G_{2-baseflow})

流域ごとの河川流出量は「4.2.1 水収支」の結果の年平均流量を使用した。

(5) 可能蒸発散量(ETP)の算定

本調査では、パン蒸発量から直接的に可能蒸発散量を推定する方法を採用した。本調査地域で使用されているには Class-A パン蒸発計であり、この蒸発量の約 70%が可能蒸発量と推定できる。パン蒸発量観測所の分布に対しテーゼン分割を適用し、流域ごとの年可能蒸発散量を算出した。

(6) 実蒸発散量(ETR)の推定

実蒸発散量は、降雨量、可能蒸発散量、土壌水分の関数である。特に、蒸発散比(実蒸発散/可能蒸発散)は、降雨量、可能蒸発散量、土壌水分と強い関係を持っている。本調査では土壌のモデル計算によって蒸発散比を降雨量、可能蒸発散量、土壌水分の関数として表し、次にその関数を調査地域に適用して実蒸発散量を求めた。

モデル計算に使用したデータ

表 4-5 に示す CAR 観測地点における日降雨量と日パン蒸発量をモデル計算に使用した。表に示すように使用した大部分のデータは 1991年～1998年の8年間のデータである。モデル計算では代表的な3種類の土壌タイプを設定した。この設定値は FAO のデータに基づいている。

表 4-5 観測所一覧

CAR 観測地点	観測年度	CAR 観測地点	観測年度	CAR 観測地点	観測年度
Checua	1991-1997	Neusa	1991-1998	Dona Juana	1991-1992 1994-1998
Guatavita	1991-1997	Primavera	1991-1998	Barrancas	1991-1997
Guymaral	1991-1998	Ramada	1991-1998	Sisga	1993-1997
Iberia	1991-1998	Tabio	1991-1996	Tisquesusa	1991-1998
Muna	1991-1998	Venecia	1991-1997	-	-

モデル計算結果

14個所の観測所の日降雨量と日パン蒸発量を使用して8年間のモデル土壌水分計算を日ベースで行なった。また計算に当たって3種類の土壌を仮定しそれぞれの土壌について蒸発散比(ETR/ETP)

を計算した。この結果、年平均蒸発散比(ETR/ETP)は(年降雨量÷年可能蒸発散量)および土壌水分量と非常に良い相関を持っていることが判明した。この結果に基づき、平均蒸発散比を年降雨量、年可能蒸発量(ETP)、および土壌の最大保持水量の3つを変数として関数近似を行なった。関数形としては以下のものが妥当である。

$$\text{年蒸発散比(ETR/ETP)} = \text{LN}(1.49 \times P^{0.216} \times W^{0.0545})$$

ここで、

- P : (年降雨量÷年可能蒸発量)
 W : 土壌の最大利用可能水分量 (mm)
 LN() : 自然対数

この近似式は良い適合性を示している。この近似式を使用することによって、調査地域の降雨量・可能蒸発量・土壌種を考慮した実蒸発散量の推定を行なった。

(7) 実蒸発散量の分布

年蒸発散比の推定式を用いて、調査対象地域における実蒸発散量を求めた。実蒸発散量の算定に当たっては、年降雨量分布図(図 4-3)、年可能蒸発散量分布図、および土壌の蒸発散可能量分布図の3つを重さね合わせ、推定式によって年蒸発散可能量を算出した。計算結果の年実蒸発散量分布を図 4-4に示す。土壌の最大利用可能水分量分布図は調査団が作成した土地被覆図を用いて、土地の被覆状況を5つのカテゴリーに分類し、それぞれに土壌の最大利用可能水量を与えた。

(8) 地下水涵養量の算定

先に示した年間地下水涵養量を与える式の3つの要素：降雨量(P)、実蒸発量(ETR)、河川流出量(D2+ G1-baseflow)を重ね合わせ地点ごとに地下水涵養量を計算した。その結果を図 4-5 に示す。また、流域ごとの地下水涵養量を表 4-6 に示す。

表 4-6 流域ごとの地下水涵養量

流域名	流域面積 (km ²)	年平均降雨量(mm)	年平均河川流出量 (mm)	年平均蒸発散量 (mm)	年間涵養量	
					(10 ⁶ m ³)	(mm)
Bogota 1-Bogota 3	35.57	707	270	333	71.0	105
Bogota 4-Bogota 6	111.16	727	186	391	34.7	149
Bogota 7 Bogota 9	103.46	724	244	418	34.5	62
Bojaca	218.68	755	248	378	28.2	129
Chicu	134.00	751	150	414	25.1	187
Frio	194.08	838	353	385	19.4	100
Neusa	432.35	850	257	406	80.9	187
Sisga	151.96	913	365	405	21.7	143
Muna	128.11	727	330	339	7.5	58
Subachoque 1	31.50	600	120	409	2.2	71
Subachoque 2	385.99	833	268	415	57.9	150
Teusaca	353.36	896	307	423	58.7	166
Tomine	367.79	873	297	467	40.2	109
Tunjuelito	404.47	942	289	323	133.0	330
合計	4,268.69	805	271	391	615.0	144

計算結果によると、調査対象地域(4,268.7 km²)の地下水涵養の平均値は144mm/年(615百万m³/年、19.5m³/s)となった。

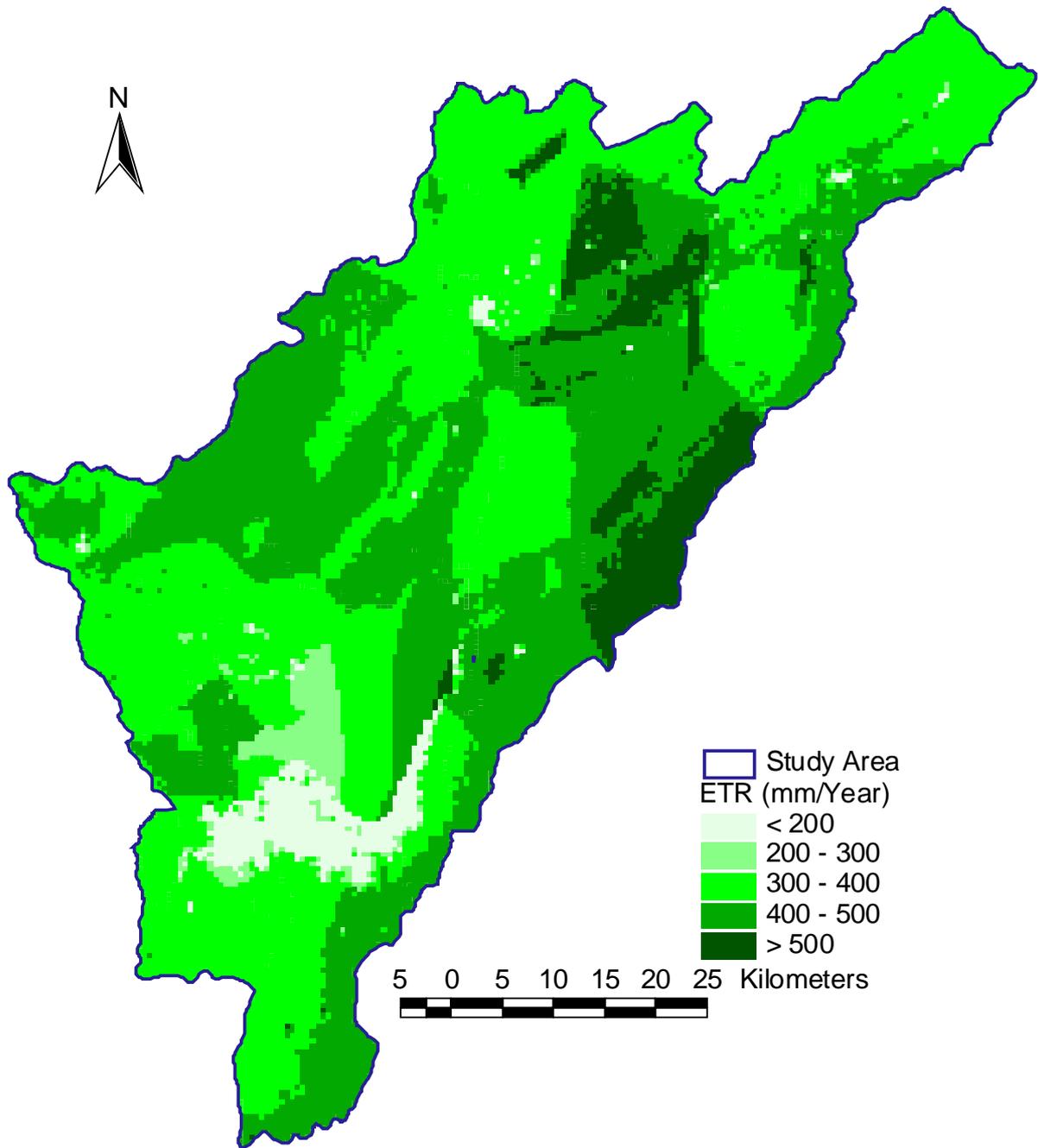


図 4-4 年実蒸発散量分布

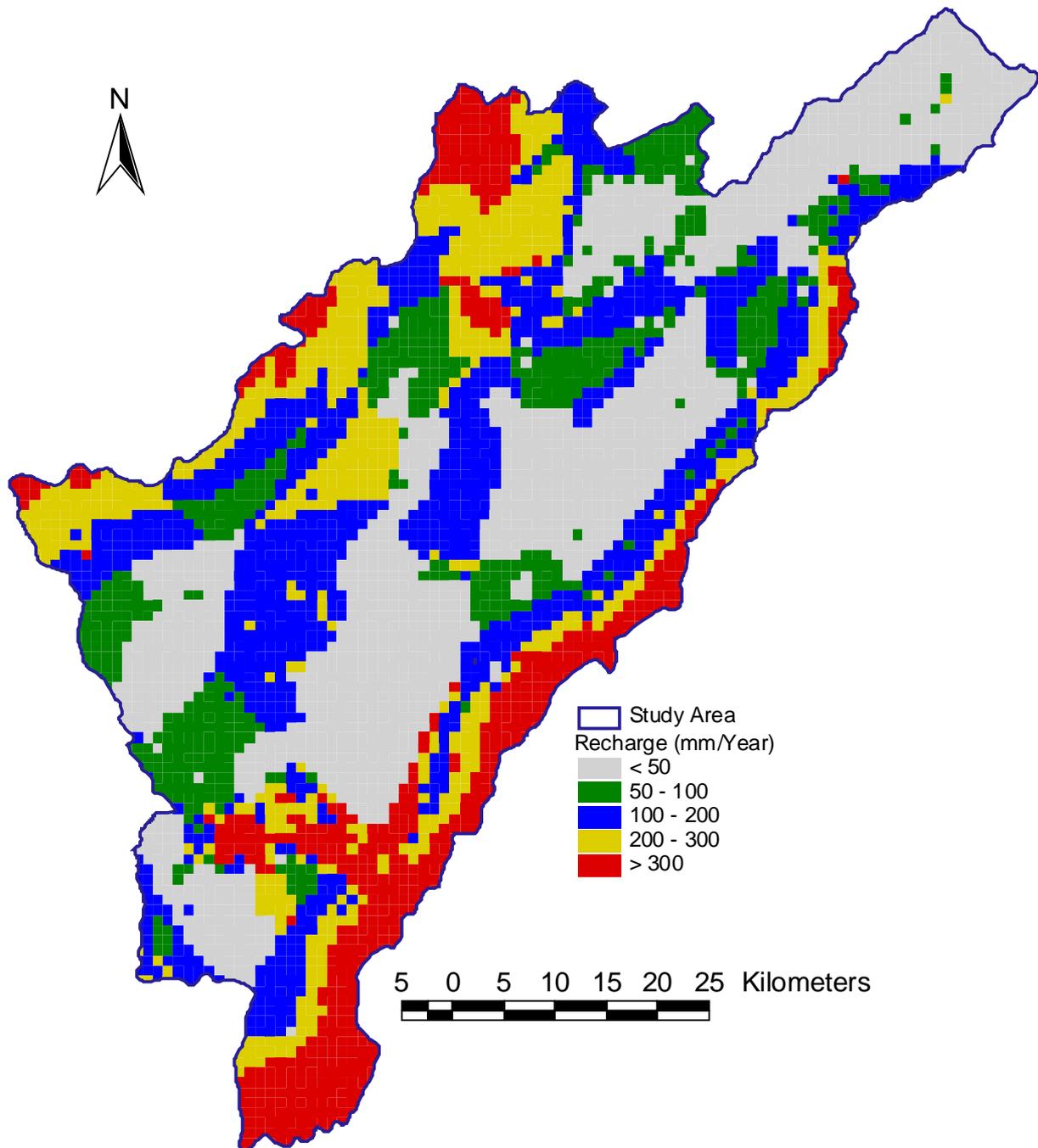


図 4-5 年地下水涵養量分布

(9) 調査域全体の水収支結果

河川流出量の一部は取水されて灌漑等に利用されている。この水量は最終的に蒸発散となる。これを考慮し、調査域全体の水収支を最終的に整理したものを表 4-7に示す。また、この表には、後述する地下水シミュレーションの結果による帯水層の水収支結果も記載されている。

表 4-7 調査域の水収支

項目	mm/年	m ³ /年	全体%	地下水涵養部分の%
・年間降雨量	802	108.5	100.0	-
・年間蒸発散量	430	58.0	53.6	-
・年間河川流出量	228	31.0	28.4	-
・年間地下水涵養	144	19.5	18.0	10.00
- 年間地下水使用量	27	3.7	3.4	18.8
- 調査域への年地下水流入	8	1.1	1.0	5.6
- 調査域からの年地下水流出	125	16.9	15.6	86.8

4.3 地下水シミュレーション

地下水シミュレーションによって調査対象地域における地下水賦存量を推定し、将来的な地下水開発の可能性を検討した。本調査では以下に示すステップで地下水シミュレーションを実施した。

- ・ 調査対象地域を含むクンディナマルカ県の大部分を含む地域を対象とした広域地下水シミュレーションの実施
- ・ 調査対象地域を対象とした地下水シミュレーションの実施

4.3.1 広域地下水シミュレーション

(1) 広域地下水シミュレーションの目的および解析対象範囲

広域地下水シミュレーションの目的は、調査対象地域を含んだ広域的な地下水流動を調べ、調査対象地域の境界条件を探ることである。解析対象地域の面積は 32,200km² であり、この範囲はクンディナマルカ県のほぼ全域をカバーしている（図 4-6 参照）。

(2) 広域地下水シミュレーションモデル

モデルのサイズおよび境界条件

モデルのメッシュ間隔は 1,500m、モデルの総セル数は 57,600 (240 X 240) である。境界条件を以下のように設定した。

- ・ マグダレーナ川には水位一定条件を設定する。
- ・ オリノコ川低地部分には水位一定条件を設定する。
- ・ その他の境界に関しては、境界が分水界と一致する場合は流量=0 とし、また境界が河川と一致する場合は、地下水位= 河床標高値として一定値を与えた。
- ・ モデルの内部の主要河川には「排水境界」条件を設定した。

帯水層構造

帯水層モデルは、INGEOMINAS が発行した ATLAS GEOLOGICO DIGITAL DE COLOMBIA(1997) から地質断面を作成しこれを 3 次元化しモデルを作成した。この地質図の地層区分に従い、モデルの帯水層構造を 8 層構造とした。

帯水層の水理定数

帯水層定数の設定に当たっては、水理地質解析で分析された水理定数の統計値を参考とし値を設定した。

地下水涵養量

本調査でモデル化した広域の地下水涵養量を直接的に推定するデータは存在しない。そこで IDEAM および CAR が作成したクンディナマルカ県全域をカバーする年間降雨量分布図をベースとして涵養量を推定した。また地下水シミュレーションの実施の過程で、合理的な計算結果が得られるように、許容できる範囲内で地下水涵養量の値を変更した。

揚水井戸

調査対象地域の揚水が広域的な地下水流動に与える影響を検討するために、調査対象域に単純化した井戸分布をモデルに設定した。井戸からの合計揚水量を涵養量の 0%、10%、20%、30%、40% に変化させ、それによる地下水流状況の変化を考察することによって、広域地下水流動における揚水の影響を検討した。

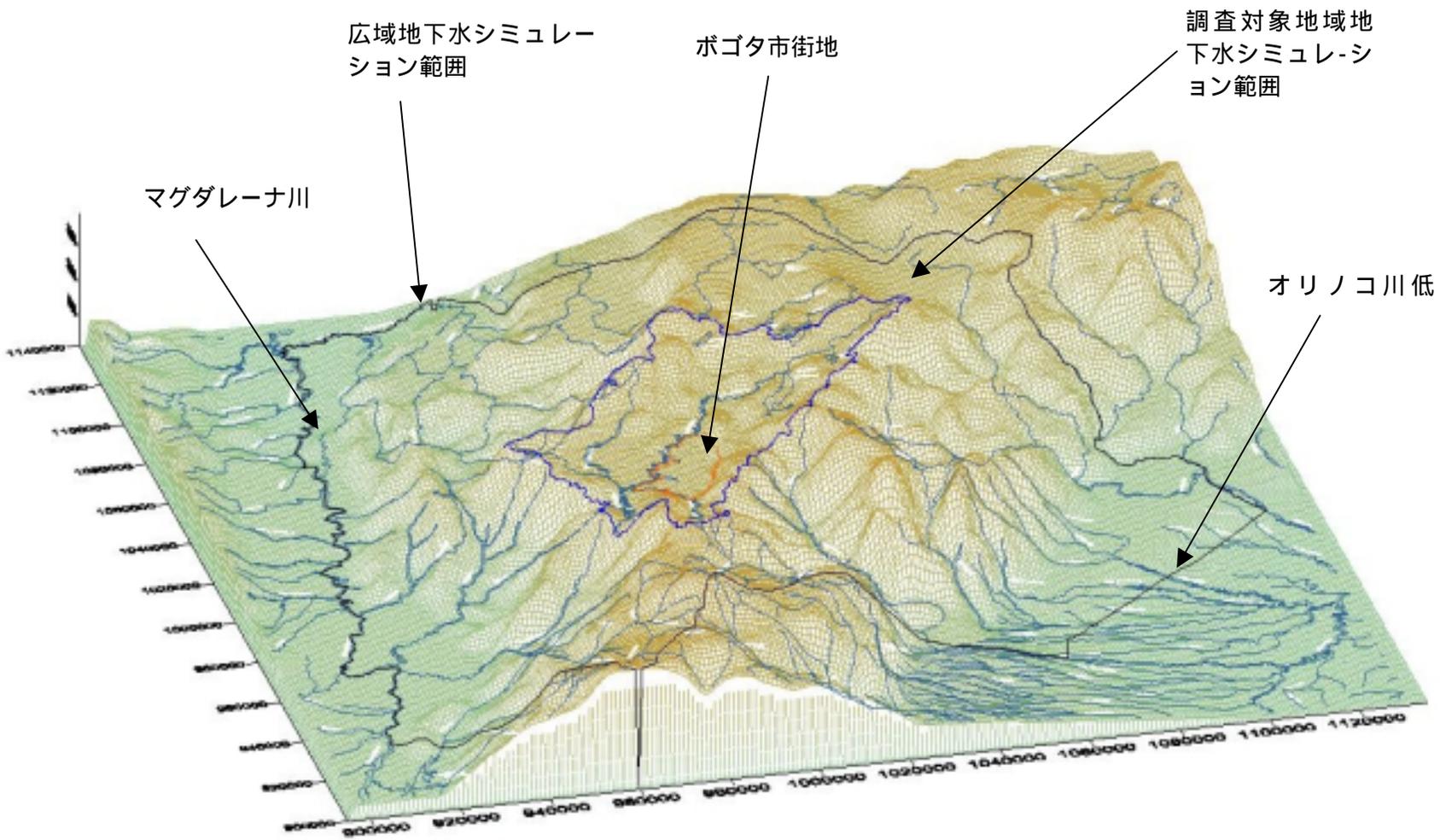


図 4-6 広域地下水シミュレーション範囲

(3) 広域地下水シミュレーションの解析結果

地下水流動系

調査対象地域の揚水量が地下水涵養量の40%の場合の地下水流動状況を図4-7に示す。解析領域の地下水流動系は以下の2つに大別される。

- マグダレーナ川に向かう地下水流動系
- オリノコ川低地に向かう地下水流動系

調査域の大部分は「マグダレーナ川に向かって南西に向かう地下水流動系」に属する。

調査対象域の揚水が地下水流動に与える影響

シミュレーション結果によると調査対象域の揚水が地下水流動に与える影響は以下の通りである。

- 揚水の増大に伴って、ボゴタ平原の地下水流動が井戸群に向かって促進される。同時に井戸群の位置で地下水位低下が発生する。
- 調査域の揚水量を増大するにしたがって、地下水分水界が調査域の外側に向かって拡大される。揚水の増大に伴ってその影響圏が外側に更に拡大され、調査対象域の外側に存在する地下水が調査域内に引き込まれる。

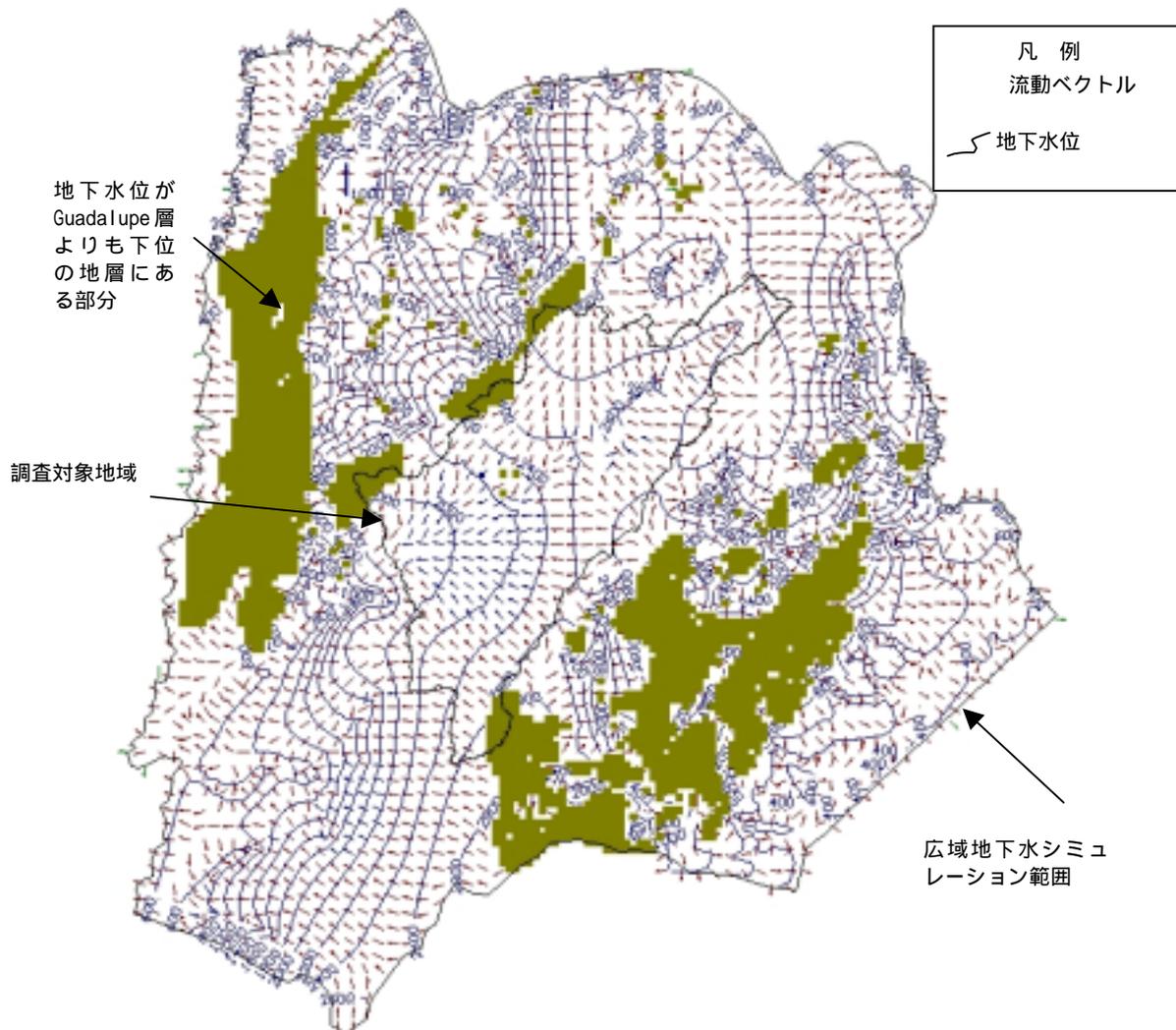


図 4-7 揚水量が涵養量の40%の場合の広域地下水流動

(4) 広域シミュレーション結果の考察

広域シミュレーションの結果から以下の事項が推定される。

- 地下水開発以前から調査対象域の地下水は大局的な地形勾配に従ってマグダレーナ川に向かって南西方向に流れていた。
- ボゴタ平原の地下水開発以後は、ボゴタ平原の中央部（井戸群）に向かう地下水流動が促進され、同時にボゴタ平原の地下水位が全体的に低下した。
- 地下水の流動が調査対象域内のみ限定されているのではなく、地下水開発量に応じてその影響範囲が調査対象域の外側にも拡大されていく。

4.3.2 調査地域の詳細地下水シミュレーション

(1) 調査地域地下水シミュレーションの目的

調査地域であるボゴタ平原を対象として詳細なモデルを作成し、調査地域地下水シミュレーションによって、調査対象地域の地下水涵養量の推定値 144mm/年の妥当性を評価する。

(2) 調査地域地下水シミュレーションモデル

モデルのサイズ、モデル化した範囲と境界条件

モデルのメッシュ間隔は 1,000m、モデルの総セル数は 12,600 (105 × 120) である。調査地域地下水シミュレーションでは調査対象地域の全体を含む面積 105km × 120km 範囲をモデル化した。

境界条件

広域地下水シミュレーションの結果によると、調査地域の外部の水系に従って、マグダレーナ川およびオリノコ側水系の方向へ地下水が流動している。したがって、境界条件として、調査地域外の主要水系を境界条件としてモデルに組みこんだ。また、モデル内の一部分の地域では合理的な計算結果を得るために、一部分の地域には河川条件を入れた。

帯水層構造

帯水層モデルは、INGEOMINAS 発行の 1/10 万地質図から地質断面を作成しこれを 3 次元化しモデルを作成した。この地質図の地層区分に従い、図 4-8 に示す様にモデルの帯水層構造を 5 層構造とした。

帯水層の水理定数

帯水層定数の設定に当たっては、「水理地質解析」で分析された水理定数の統計値を参考とした。

地下水涵養量

モデルに与える地下水涵養量は、水収支解析の結果を利用した。モデルに与えた地下水涵養量の分布を図 4-9 に示す。調査地域の平均値は 144mm/年である。また、調査対象地域外では地下水涵養量が求められていないので、広域地下水シミュレーションで使用した地下水涵養量を参考にして調査対象域外の地下水涵養量を設定した。

揚水井戸

モデルには調査地域の全井戸（約 7,000 本）の井戸揚水量を組み込んだ。その総揚水量は約 320,000m³/日である。

(3) 調査地域詳細地下水シミュレーションの解析結果

地下水シミュレーション結果の地下水位分布

計算結果の白亜紀層地下水位分布を図 4-10 に示す。現況の地下水位と計算結果の地下水位の傾向は一致している。計算結果の地下水位は、観測された水位と較べ平坦である。本調査域において井戸で観測された地下水位は、地形の影響を強く受けた見掛けの水位であり、山地部・平地部において不飽和帯の宙水によって形成される場合が多い。そしてこのような地下水は局所的な流動系を構成し、近傍の河川に向かったものとなる。一方、今回の地下水シミュレーションで計算さ

れた地下水位は広域的な地下水流動を示すものであると解釈される。

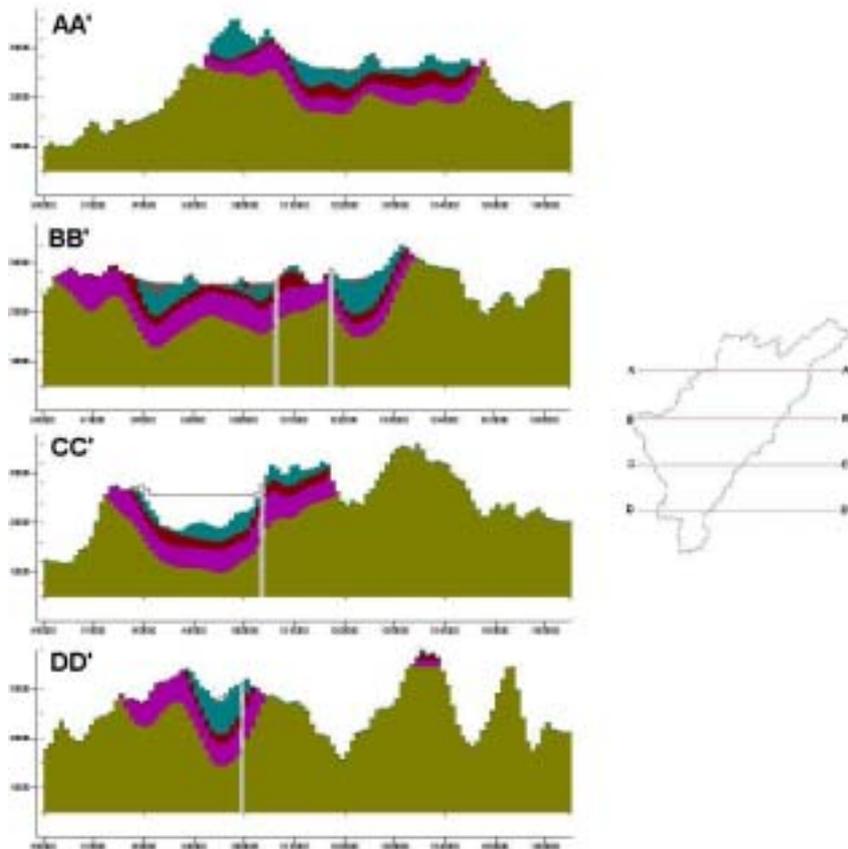


図 4-8 調査域シミュレーションの帯水層モデル例

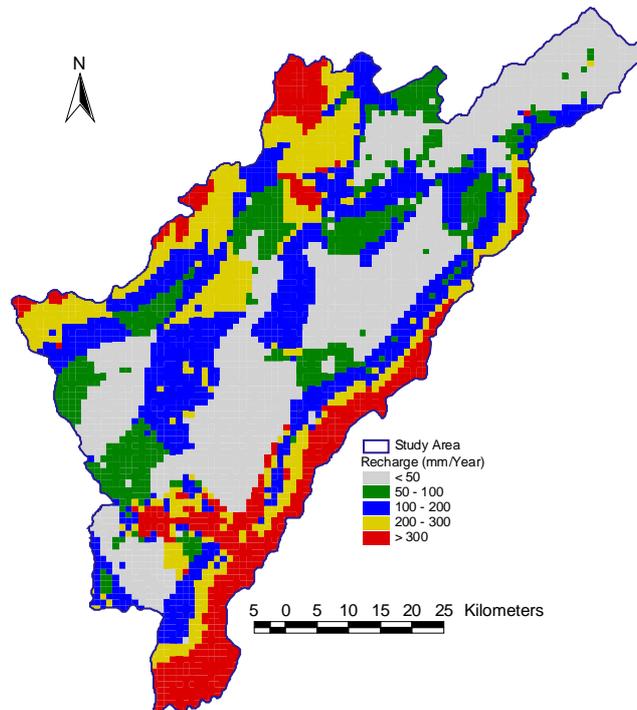


図 4-9 調査域地下水シミュレーションの地下水涵養量分布

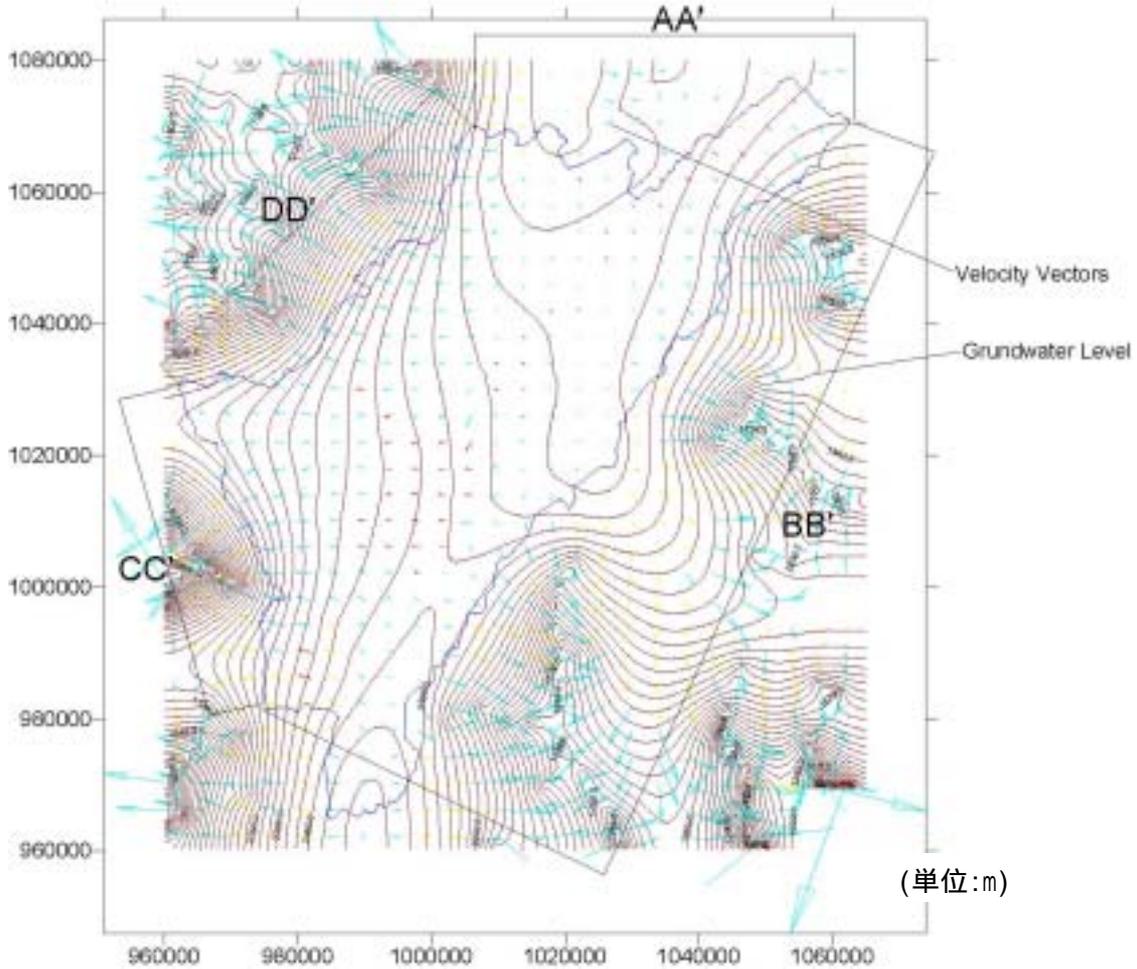


図 4-10 地下水シミュレーション結果の白亜紀層地下水位分布

地下水シミュレーション結果の地下水水収支

地下水シミュレーション結果の地下水水収支は表 4-8 に示す通りである。

表 4-8 地下水シミュレーション結果の地下水の水収支

区分	項目	計算結果			比率
地下水流入	涵養量	1,690,000m ³ /日	144mm/年	19.6m ³ /s	100%
地下水流出	井戸からの揚水	321,000m ³ /日	27mm/年	3.7m ³ /s	19%
	地下水流出	1,368,900m ³ /日	117mm/年	15.9m ³ /s	81%

また、調査対象地域の外へ流出する地下水の内訳は表 4-9 の通りである。

表 4-9 調査対象地域からの地下水流出

合計流出量	境界	流入出量	全体流出量に占める割合
1,368,900(m ³ /日)	北側境界 (A-A')	94,640 (m ³ /日)の流入	7%
	東側境界 (B-B')	621,920(m ³ /日)の流出	45%
	南側境界 (C-C')	341,380(m ³ /日)の流出	25%
	西側境界 (D-D')	500,240(m ³ /日)の流出	37%

4.4 地下水開発ポテンシャルの評価

(1) 地下水開発ポテンシャル

本調査において、地下水賦存量は以下のステップで評価された。

- 水収支式解析を用いて地下水涵養量を推定した。
- 地下水シミュレーションによって調査対象地域の地下水流動を解析し、地下水涵養量推定値の妥当性を検証した。

以上の2つの解析結果によって、調査対象地域の地下水賦存量は144mm/年程度と推定された。この推定結果に関し以下に述べる。

過去に行なわれた地下水の年齢測定結果から、調査対象地域の地下水はほとんど流動していないと従来考えられていた。しかし、現在までの解析結果によると、調査対象地域の地下水は地下水涵養を受けまた広域的な地下水流動系に組み込まれている更新性の水資源であると評価するのが妥当である。

地持続的地下水開発を計画するに当たっては、調査域の地下水涵養量144mm/年の条件のもとで、地下水開発によって引き起こされる地下水位低下を予測し、その値が許容できるか否かの判断を行なう必要がある。

(2) 流域ごとの安全揚水量

現況の井戸揚水量と地下水涵養量

流域ごとの現在の地下水利用率（揚水量と地下水涵養量との比率）を表4-10に示す。現在の調査域全体における井戸揚水量は地下水涵養量の19%に過ぎないが、流域ごとの（揚水量/地下水涵養量）は1%～65%であり流域ごとの地下水開発量に大きな差があることが明らかである。現在の地下水開発量は地下水涵養量と比べ相当小さいため、全ての流域で、揚水と地下水の供給の関係はバランスし地下水位の低下は既に終了しているものと考えられる。

表 4-10 流域ごとの井戸揚水量と地下水涵養量

流域名	流域面積(km ²)	井戸本数	揚水量 (mm/年)	地下水涵養量 (mm/年)	地下水利用率
Bogota 1-3	678	1,559	42	105	40%
Bogota 4-6	232	1,141	72	149	48%
Bogota 7-9	557	429	18	62	29%
Bojaca	219	311	36	129	28%
Chicu	134	1,620	122	187	65%
Frio	194	320	23	100	24%
Neusa	432	185	7	187	4%
Sisga	152	1	0	143	1%
Muna	128	40	4	58	6%
Subachoque 1	32	18	3	71	5%
Subachoque 2	386	1,078	52	150	35%
Teusaca	353	256	15	166	9%
Tomine	368	21	1	109	1%
Tunjuelito	404	103	10	330	3%
調査域全体	4268	7,081	27	144	19%

注) 地下水利用率は(揚水量÷地下水涵養量)として算出した

安全揚水量

地下水開発に当たって、理論上は地下水涵養量の100%を開発できる。しかし相応の地下水位低下が発生し既存井戸に影響を与える。表4-10に示すとおり、調査地域内における地下水利用率の最大値は65%（Chicu流域）である。地下水開発による既存井戸への影響を考えた場合、調査地域における現在の水位低下の状況は許容できる範囲内にあるものと考えられる。したがって、安全揚水量として現在の地下利用率の最大値である60%程度以下とすることが推奨される。流域ごとの安全揚水量を表4-11に示す。

小規模な地下水開発（第四紀層、第三紀層）に当たっては、流域ごとの安全揚水量を基準に井戸計画がなされるべきである。また、白亜紀層に対する大規模な地下水開発に当たっては、白亜紀層が流域区分を超えて連続的に分布していることを考慮し、開発可能量として、その地下水開発が影響する複数の流域の安全揚水量を基準とすべきである。また、シミュレーションモデルによって、開発の影響を事前に評価することが望ましい。

表 4-11 流域ごとの安全揚水量

流域名	全流域面積 (km ²)	安全揚水量 (mm/年)	流域名	全流域面積 (km ²)	安全揚水量 (mm/年)
Bogota 1-3	678	63	Sisga	152	86
Bogota 4-6	232	90	Muna	128	35
Bogota 7-9	557	37	Subachoque 1	32	43
Bojaca	219	77	Subachoque 2	386	90
Chicu	134	112	Teusaca	353	100
Frio	194	60	Tomine	368	66
Neusa	432	112	Tunjuelito	404	198
調査地域全体	86 mm/年				

注) 安全揚水量は(流域の地下水涵養量×60%)として算出

揚水と地盤沈下

過剰揚水によって生じる障害は、地下水資源の枯渇と地盤沈下である。揚水量を地下水涵養量以下とすることによって地下水資源の枯渇は防ぐことができる。

地表部で容易に観測される地盤の沈下は、土壌の乾湿に原因した陥没や建設工事に原因した局部的地盤沈下であることが多い。一方、地下水の過剰揚水による地盤沈下は広域的地盤沈下と呼ばれ、広い範囲の地盤が長期間にわたって徐々に等しく沈下する。これを地表部分の変状から観察することは困難であり、長期間にわたる地盤標高の測量によって始めてその実態が明らかにされるものである。調査地域ではこのような測量がなされていないため、過剰揚水を原因とした地盤沈下の証拠は無い。

また地盤沈下は、地下水位の低下と地盤の沈下特性によって決まる。地下水位低下の影響を受ける地盤は地下100m以深の硬質な地盤であり、本調査地域においては100m以深の地盤の沈下に対する抵抗は非常に大きい。したがって地下水位低下によって発生する広域的地盤沈下は無視できる程度のものである。特に、ボゴタ平原西部地域は広域的地盤沈下によって被害を受ける深いクイ基礎を持った高層構造物は存在しないため、その影響はないと結論される。