

1.2 地下水モデル解析結果概要

目 次

1	水理地質調査～地下水モデル解析の方法	1-1
2	既存資料解析と現地調査の結果	2-1
2.1	既存資料の収集	2-1
2.2	地形解析	2-1
2.3	地質・水理地質解析	2-2
2.3.1	地質概要	2-2
2.3.2	Cubitas断層	2-4
2.3.3	地質柱状図	2-4
2.3.4	物理探査結果	2-6
2.3.5	試掘調査結果	2-8
2.4	地下水位	2-10
2.4.1	地下水位の長期変動	2-10
2.4.2	地下水位の季節変化	2-12
2.5	地下水質	2-13
2.5.1	電気伝導度(EC)	2-13
2.5.2	EC値の長期変動傾向	2-16
2.6	水文解析	2-17
2.6.1	気象データ	2-17
2.6.2	河川流量観測	2-17
3	地下水モデル	3-1
3.1	地下水モデルの概要	3-1
3.2	モデルの構造	3-2
3.3	モデルのパラメータ	3-4
3.4	地下水涵養量の推計	3-5
3.5	地下水揚水量の推定	3-8
3.6	初期水頭	3-8
3.7	塩分濃度分布	3-9
3.8	内挿検定	3-11
4	予測解析	4-1
4.1	予測解析のシナリオ	4-1
4.1.1	MODFLOW-96による予測解析	4-1
4.1.2	SEAWATによる予測解析	4-4
4.2	新規水源が開発されるシナリオ	4-13
4.2.1	MODFLOW-96による予測解析	4-13

4.2.2	SEAWATによる予測解析	4-15
4.3	予測解析に基づく地下水開発・管理への提言	4-19

1 水理地質調査～地下水モデル解析の方法

水理地質調査～地下水モデル解析は、図 1-1に示す流れで実施した。



図 1-1: 調査フロー

2 既存資料解析と現地調査の結果

2.1 既存資料の収集

本プロジェクトで収集・整理・解析した主要な既存資料の種類は、以下に示すとおりである。これらのデータは、地下水モデル解析の基礎資料として使用した。

- 地形データ（数値標高データを含む）
- 地質図・水理地質図他
- 地質・水理地質・地下水に関連する既存報告書
- ボーリング・井戸掘削データ
- 水質データ
- 物理探査データ
- 気象データ

2.2 地形解析

SRTM-90 の数値標高データを基にして、調査対象地域の陰陽図（図 2-1）を作成し、対象地域の広域的な地形特性を把握した。

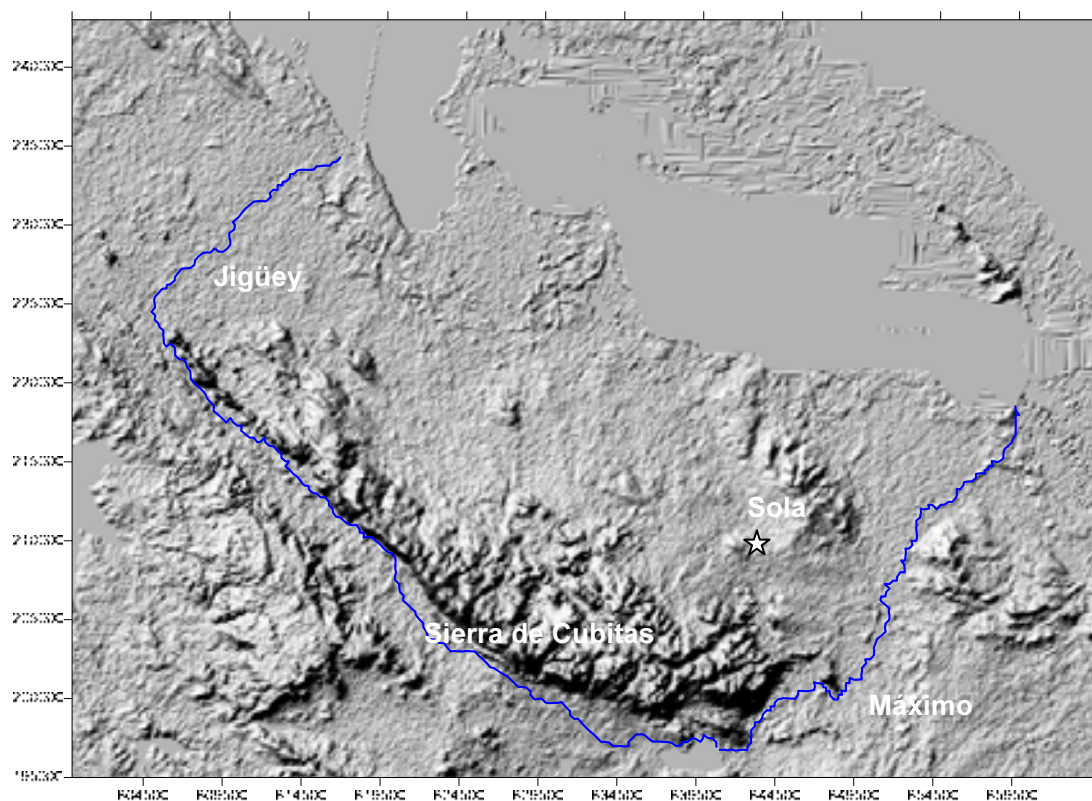


図 2-1: 調査地域の陰陽図

- 調査・解析地域は、カマグエイ県北部の丘陵山地 Sierra de Cubitas（標高 200m 程度）の北側、山腹から海岸へ至る地域であり、主要な帯水層はソラ市街地の西側に分布する。
- 調査・解析地域の北部は、標高 40m 程度から海岸線に至る平坦地となる。
- ソラ市街地は標高 40m 程度に位置し、本地域の主要な地下水盆の東端に位置するとされている。また、ソラ市街地を含む東部一帯は、標高 20～40m の丘陵地となっており、その西側の主要な地下水盆が広がる地域とは地質構造が異なる。
- 調査・解析地域南部は、Sierra de Cubitas の山裾にあたる標高 40～100m 程度のゆるやかな傾斜地となっている。また、Sierra de Cubitas の南側を取り巻くように Jigüey 川と Máximo 川の 2 本の河川が流下している。

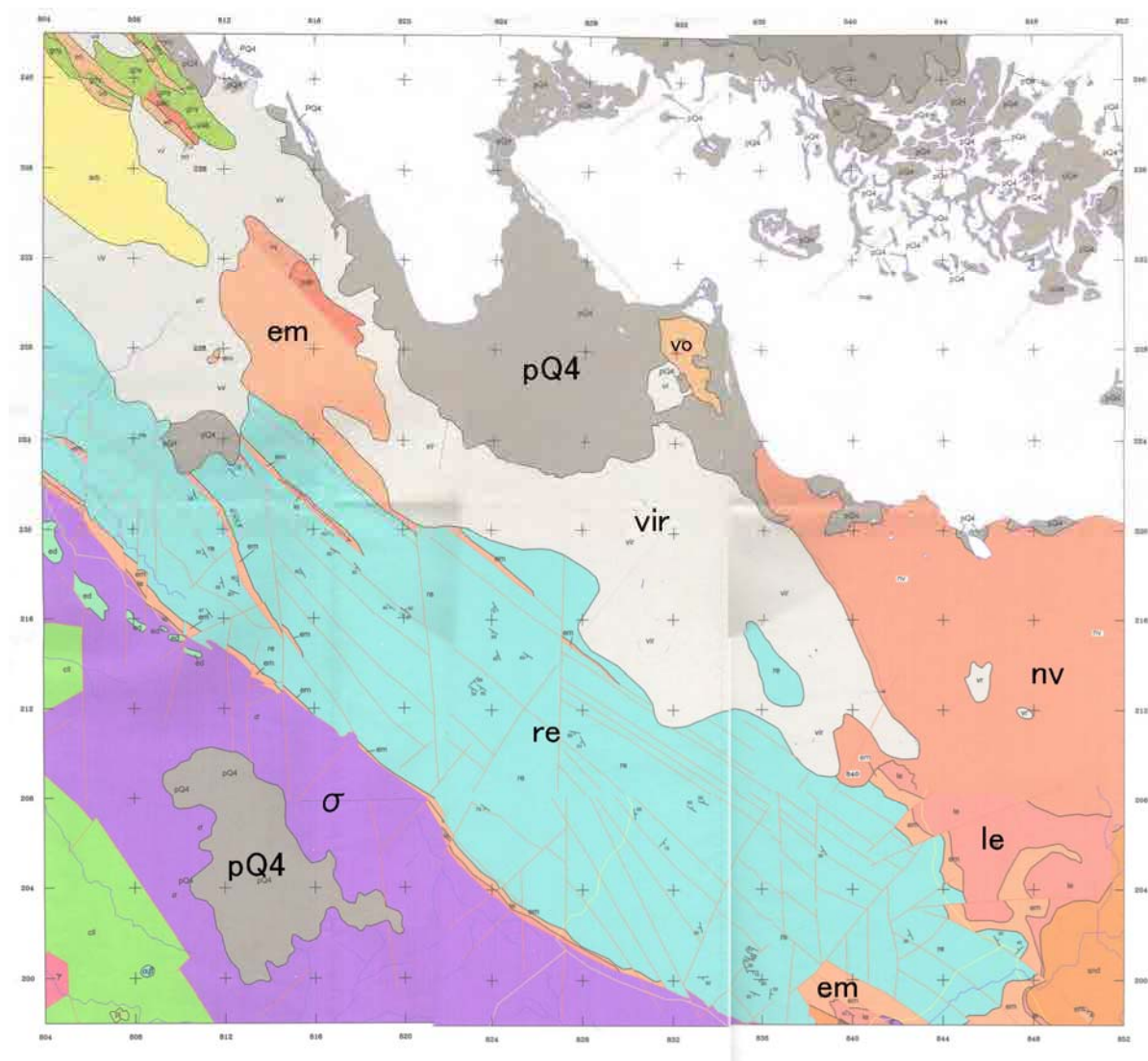
2.3 地質・水理地質解析

2.3.1 地質概要

ソラ地区に分布する主要な地質は、Cubitas 丘陵や Güaney 丘陵に分布するジュラ紀から白亜紀にかけて堆積した北米プレート縁辺の炭酸塩岩（Cubitas 丘陵）やチャネル相（Güaney 丘陵）と、地下深部に分布が推定されている陸棚斜面堆積物からなる。Sierra de Cubitas を構成する炭酸塩岩は、浅海の堆積物であり、堆積後の造構運動により強く褶曲している。

対象地域の地質図を図 2-2 に、模式断面図を図 2-3 に示すが、本地域の地質の特徴は、以下のようにまとめられる。

- Sierra de Cubitas は石灰岩で形成されている。この石灰岩は、ジュラ紀から白亜紀にかけて堆積したレメディオス層群（Grupo Remedios）と名づけられた石灰岩層の一部であり、北側山裾地域一帯に広く分布している。
- 石灰岩層は一部地域では亀裂が発達しブロック状となっている。また Sierra de Cubitas には、すでに水の流れは無いが鍾乳洞が形成されている箇所があるなど、カルスト地形がみられる。
- 対象地域内では、上記の石灰岩層に発達した帯水層が地下水取水の対象となっている。



<i>pQ4</i>	<i>Depositos palustres</i>	湖沼堆積物: 泥、粘土
<i>Q2 vir</i>	<i>Fm. Villarroja</i>	粘土(砂質-泥質)、砂岩(粘土質-石英砂質-粒状物質)
<i>P2-3 nv</i>	<i>Fm. Nuevitas</i>	泥灰岩(石灰質-碎屑-塊)
<i>P2-2 vo</i>	<i>Fm. Venero</i>	石灰質角礫岩?、珪石及び石灰岩礫岩、碎屑石灰岩
<i>P2-2 le</i>	<i>Fm. Lesca</i>	石灰岩(碎屑-粘土質、砂岩-珪岩)
<i>P1-2 - P2-1 em</i>	<i>Fm. El Embarcadero</i>	石灰質礫岩? (石灰岩、ドロマイト)、火山岩集塊岩?
<i>J3-K2 re</i>	<i>Grupo Remedios</i>	苦灰岩、石灰岩、石灰質礫岩
<i>α β</i>		玄武岩質安山岩
<i>γ</i>		花崗岩
<i>σ</i>	<i>J2-3?</i>	蛇紋岩

図 2-2: ソラ地区の地質概要図

(Sources: Estadio Hidrogeologico de la Cuenca Guanaja, 2008)

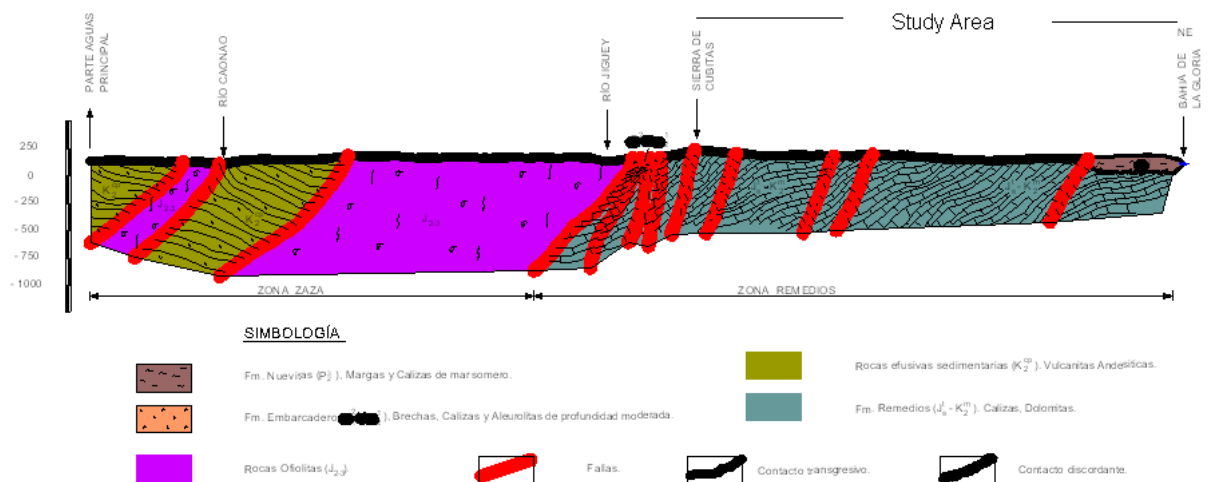


図 2-3: ソラ地区周辺の模式断面図

(Sources: CuencaGuanaja.ppt by Ing. Adan Echemendia Martinez)

2.3.2 Cubitas断層

ソラ地区に分布する Cubitas 断層はかつてのプレート境界であると考えられている。

Cubitas 断層は、北西－南東方向に Sierra de Cubites の南端（Senado 市街から Esmeralda 市街までの約 68km）を通過しており、オフィオライト（南側）と炭酸塩岩（北側）を境する衝上断層である。断層面は 30° 南東から 45° 南－南東に傾斜しており、重力－磁気探査結果からカماغエイ市街地では深度 5km 付近に断層面があるものと推定されている。

なお、Cubitas 断層の東端は、北－南から北東－南西方向に通過する Camagüey 断層によって切られている。

2.3.3 地質柱状図

個々の井戸の掘削記録は、地質柱状図として整理した（図 2-4）。この作業を通して、対象地域の帯水層を、上位より以下の 6 帯水層に区分した。

- ・ 帯水層 A：粘土及び砂
- ・ 帯水層 B：砂及び礫
- ・ 帯水層 C：泥灰岩（泥灰岩及び粘土）
- ・ 帯水層 D：石灰岩及び粘土
- ・ 帯水層 E：石灰岩（碎屑質）
- ・ 帯水層 F：石灰岩（比較的塊状）

さらに、地質柱状図毎に上記の帯水層区分を行った後、全ての柱状図の区分結果を整理することにより、各帯水層の層厚分布図（図 2-5）及び基底面深度分布を作成した。



図 2-4: 地質柱状図の例(S-7 井)

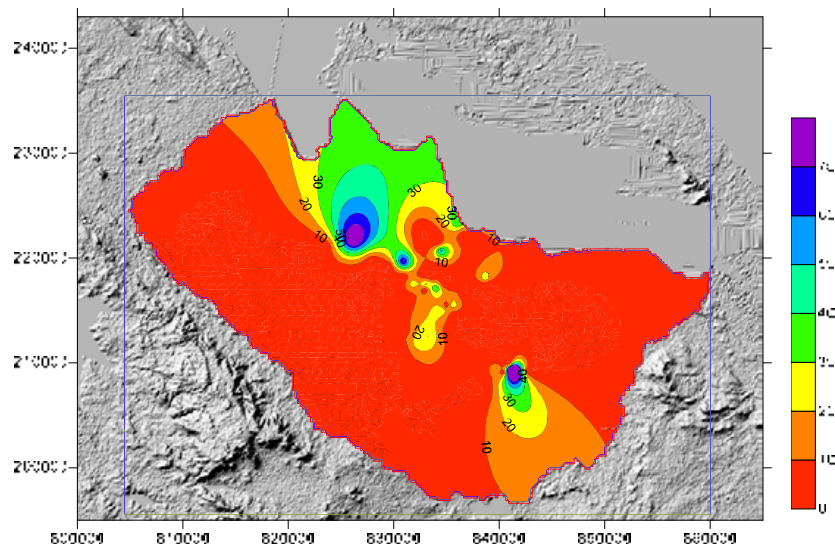


図 2-5: 層厚分布図の例(帯水層 D: 石灰岩及び粘土)(単位:m)

2.3.4 物理探査結果

ソラ地区で実施した物理探査結果の概要は「巻末資料 1.1」に示す。物理探査結果は、主として以下の 2 点において、地下水モデル解析に使用した。

- 水理地質構造解析
- 比抵抗値分布に基づく塩分濃度分布の推定

a . 水理地質構造

前記した地質柱状図が無い地域においては、物理探査結果から推定した地質分布を用いて以下に示すような水理地質断面図を作成し、水理地質構造の概要を把握した。

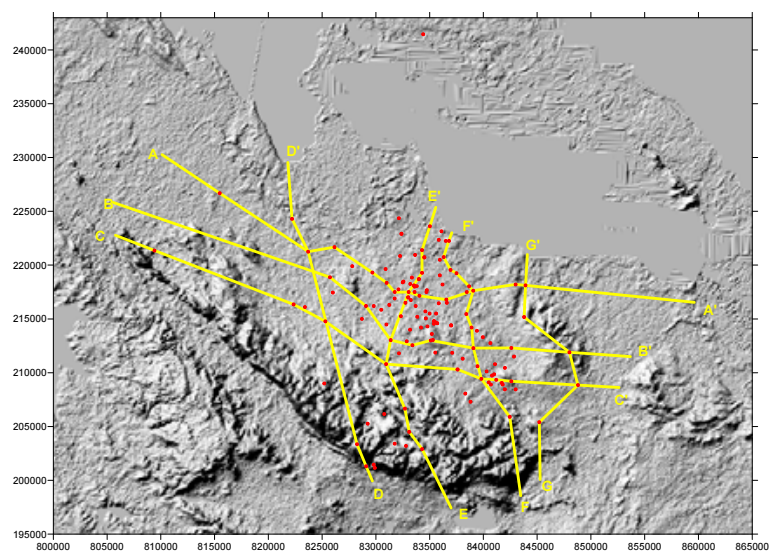


図 2-6: 水理地質断面図位置図

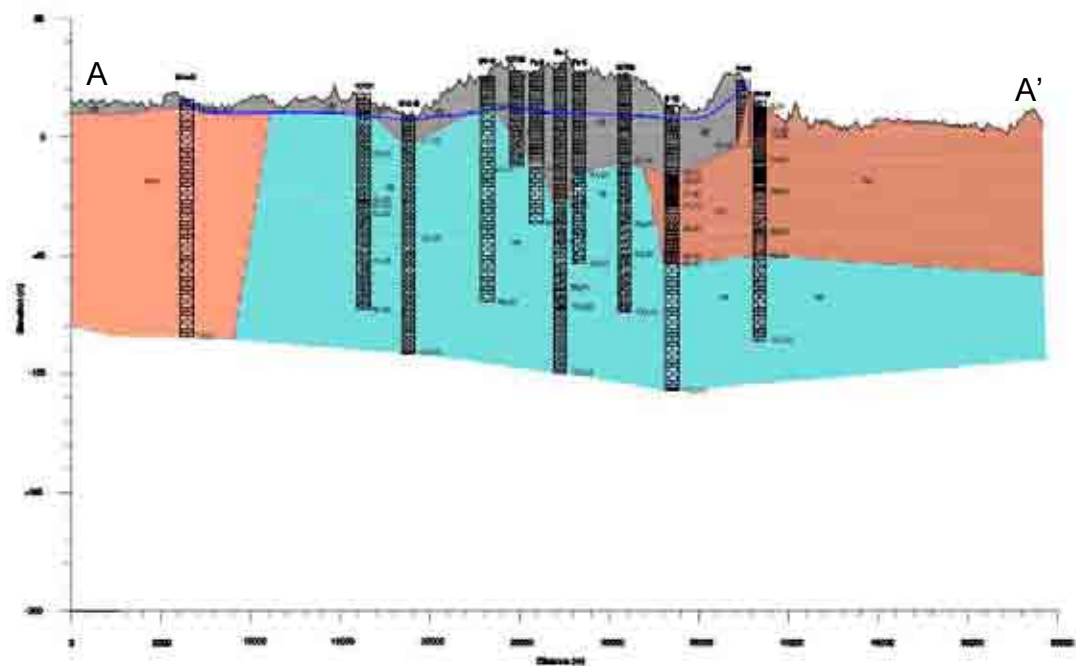


図 2-7: 水理地質断面図の例(東西方向:A-A')

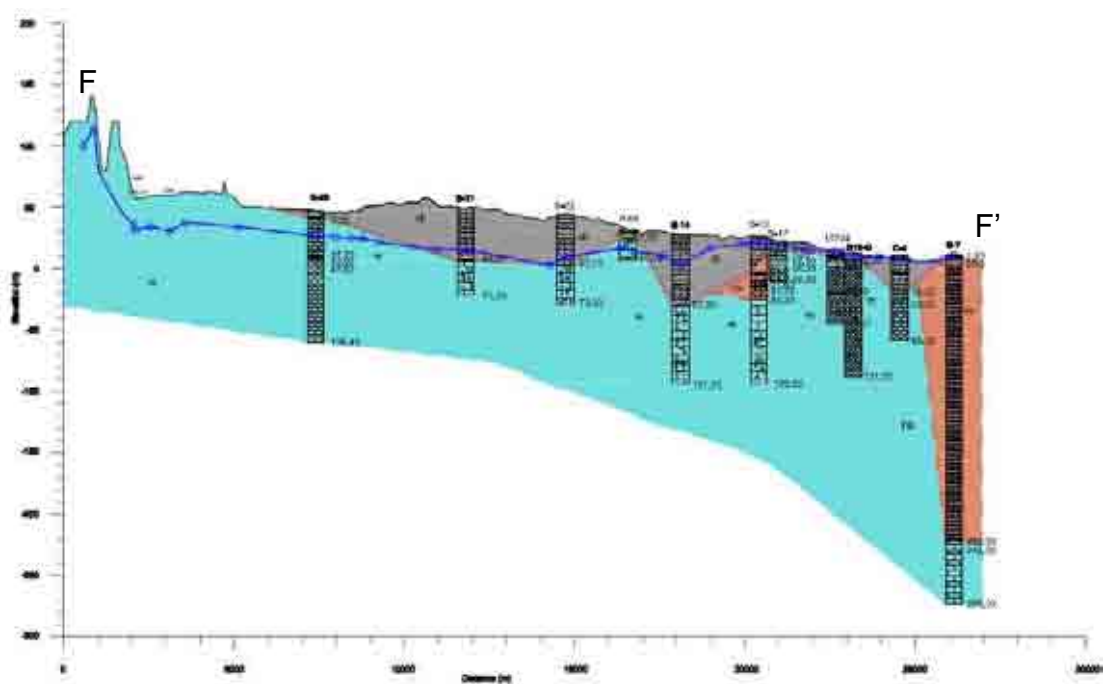


図 2-8: 水理地質断面図の例(南北方向:F-F')

b . 比抵抗値分布

44 地点の電磁探査結果を基に、深度 20m 毎（標高 30m～-290m）に比抵抗分布図を作

成し、この結果を次章で記すように塩分濃度分布の推定に利用した。図 2-9に標高-10mの比抵抗値分布を例示する。

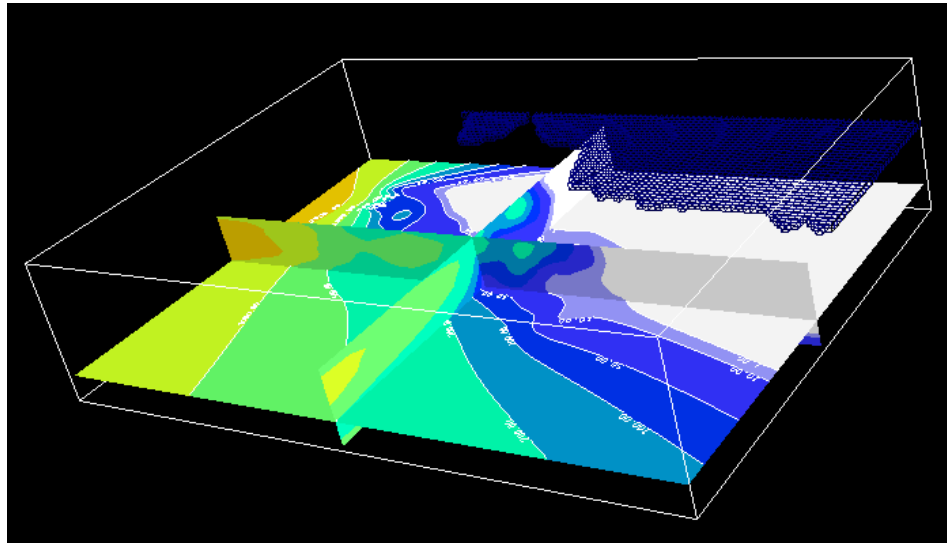


図 2-9: 比抵抗分布図の例(標高-10m)

2.3.5 試掘調査結果

試掘調査においては、図 2-10に示す地点（JICA_01：X 832302、Y 214970）で約 200mの掘削を行った。

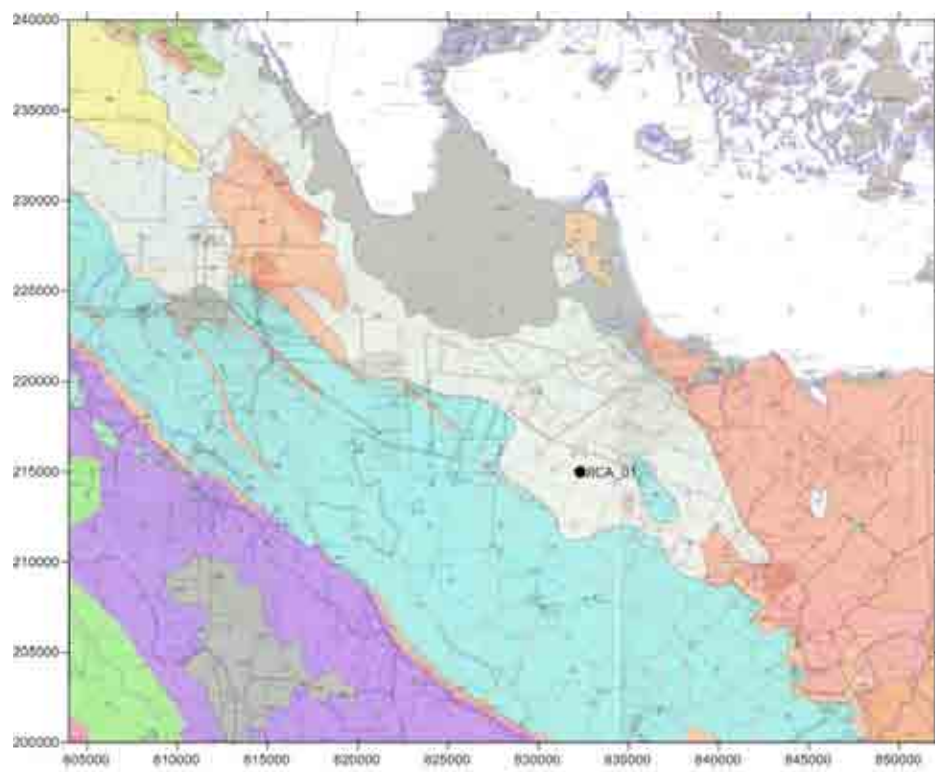


図 2-10: 試掘調査地点位置図

試掘結果を、図 2-11に総合地質柱状図としてとりまとめる（なお、検層結果については深度 90m までを示す）。

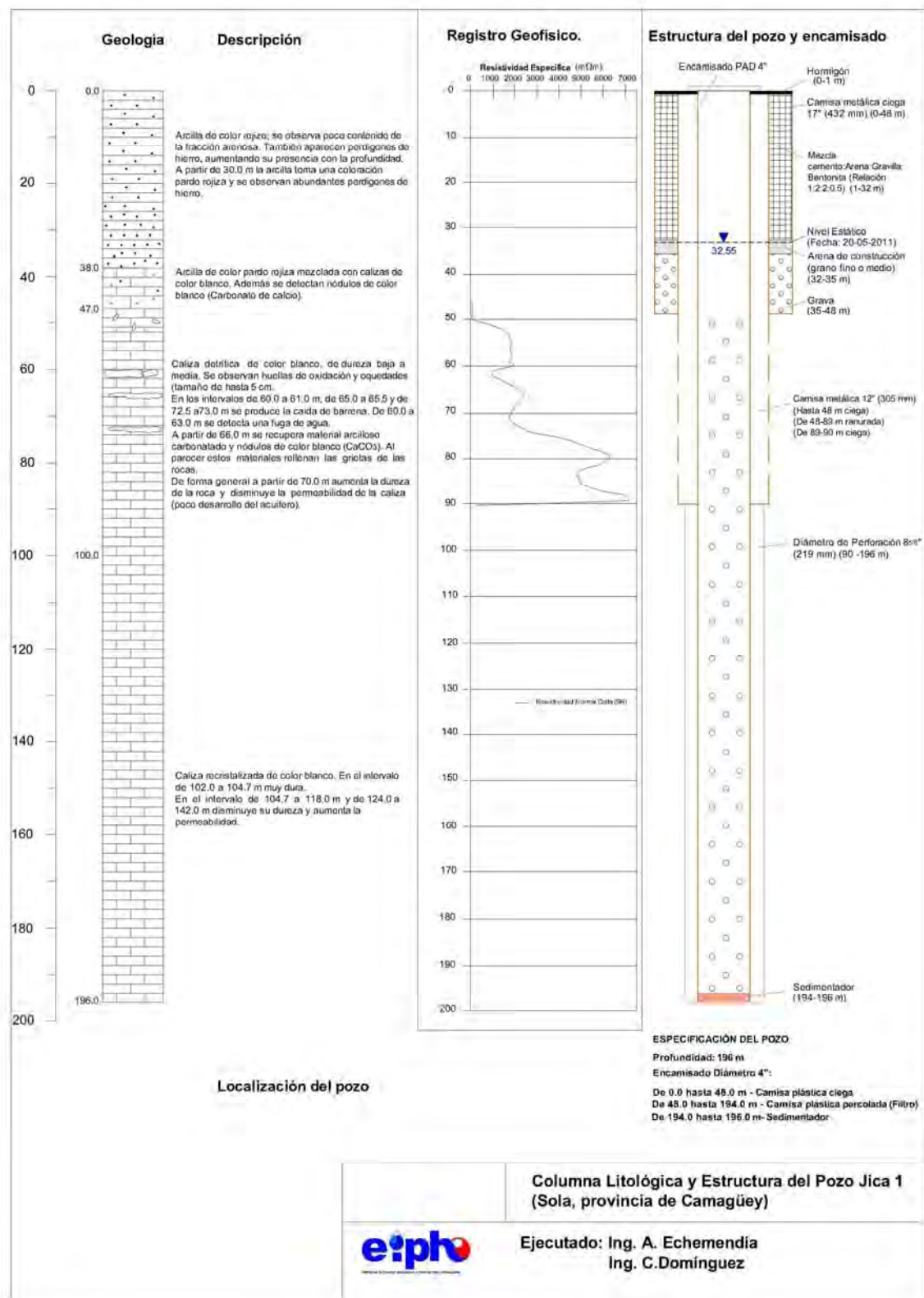


図 2-11: JICA_01 の総合地質柱状図

2.4 地下水位

2.4.1 地下水位の長期変動

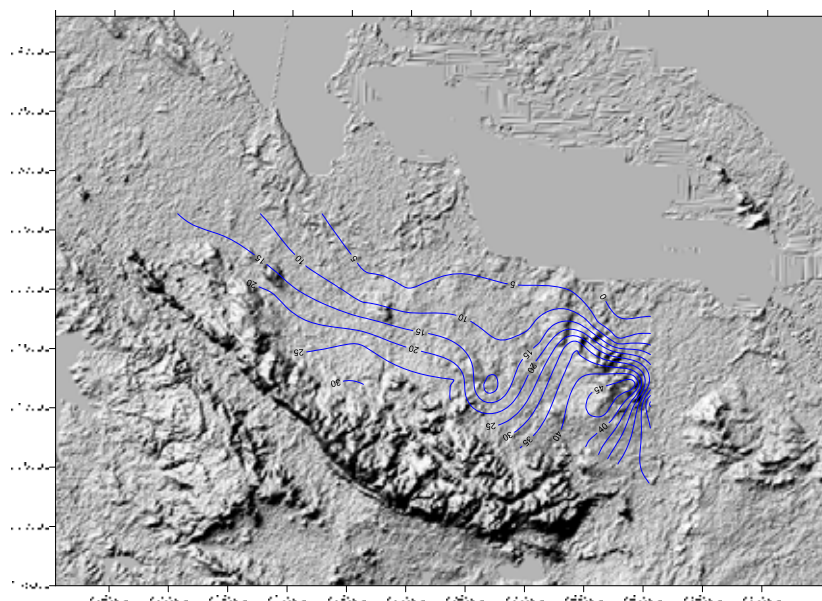
EIPH カマグエイの技術者と日本人専門家が協働し 2009 年 6 月に 30 本の観測井の水位測定を行った。また 1988 年報告書では、1988 年 11 月の観測井の地下水位をもとに地下水等圧線図が作られている。これらの地下水位記録を表 2-1にまとめ、88 年と 09 年の地下水位変化を表の右欄に示した。11 月が雨季の終わりであり、今回調査実施した 6 月が雨季の始まりにあたることを考慮すると、示された水位の差異はそれほど大きなものとは言えない。ただし、3 つの観測井（No.11587、B1-G、B13-G）については、やや大きな差異が認められる。No.11587 と B13-G は、東部の丘陵地形の地域にあり、B1-G は調査地域中央北部の灌漑地域に掘削された井戸である。

表 2-1: 観測井の地下水位(1988 年及び 2009 年)

井戸No.	X	Y	標高 (m)	井戸深度 (m)	1988年11月 静水位 (標高 m)	2009年6月 静水位 (標高 m)	2009年と 1988年の 差異
1050	819050	223350	12.45	25.00	10.75	9.85	-0.90
1053	820400	221000	13.91	13.05	13.11	12.84	-0.27
1242	814920	222570	17.78	4.8 (4.65)	17.56	17.40	-0.16
2001	811950	226350	13.81	Sellado	12.68	12.98	0.30
4680	830020	207960	96.36	82.00	-	41.42	-
8394	840500	215850	11.90	9.00	-	4.32	-
11587	846060	209850	48.60	28.80	46.78	42.01	-4.77
10713-2	836614	216881	21.00	50.65	-	3.35	-
B 1-G	834260	219270	14.73	87.05	7.93	4.00	-3.93
B 2-G	843770	215200	39.97	67.00	31.20	32.80	1.60
B 4-G	843910	218140	10.00	69.00	9.28	9.50	0.22
B 7-G	825400	214800	36.98	100.35	45.5?	22.28	-
B 9-G	829680	219320	22.18	92.76	4.28	5.00	0.72
B10-G	826660	221570	5.80	61.15	5.08	4.34	-0.74
B11-G	827850	222140	5.27	79.32	4.32	3.83	-0.49
B13-G	843520	219920	10.09	95.00	8.70	4.50	-4.20
B14-G	815450	226390	11.84	85.00	11.79	11.84	0.05
B15-G	831370	223280	6.98	88.83	2.13	2.70	0.57
B16-G	834280	221370	10.40	56.66	0.20	1.82	1.62
B19-G	836990	219680	6.06	88.50	5.34	4.25	-1.09
B21-G	830700	217890	27.00	140.00	-	4.11	-
NG-81	834000	221195	10.41	-	-	4.53	-
A dug well near So-10G	819787	216799	35.00	28.25	-	19.60	-
So2-G	841170	209340	39.00	107.9	-	4.96	-
So5-G	841110	210900	33.50	39.60	-	5.17	-
So6-G	834370	215500	31.70	37.00	-	4.70	-
So7-G	836770	216250	25.00	41.00	-	1.73	-
So-8G	845700	217150	5.72	8.60	-	1.70	-
So9-G	847440	215830	4.23	4.00	-	4.12	-

図 2-12は、1988 年報告書のデータを元にして作成した地下水位等高線図であり、図 2-13は 2009 年 6 月の測定結果を元にして作成した地下水位等高線図である。限られたデータ数のものではあるがおおよその傾向は把握することが出来る。

これら二つの地下水位等高線図を比較すると、10m の等高線が、1988 年から 2009 年の間に、中央部から東南のソラ市街地に向かう地域まで後退していることがわかる。後退した地域は、季節変動も比較的大きな地域である。東の丘陵地域や西側の地域では、あまり顕著な地下水位変化は見られない。



2.4.2 地下水位の季節変化

2007-08 年に実施された地下水調査において、2007 年の 11 月、2008 年の 5 月の 2 回、当該地域一帯の井戸を対称に、地下水位測定が行われている。前者（11 月）が、雨季の終わりの時期にあたり、後者（5 月）が乾季の終わりの時期に当たる。それぞれの地下水位測定結果にもとづき、図 2-14 及び図 2-15 を作成した。

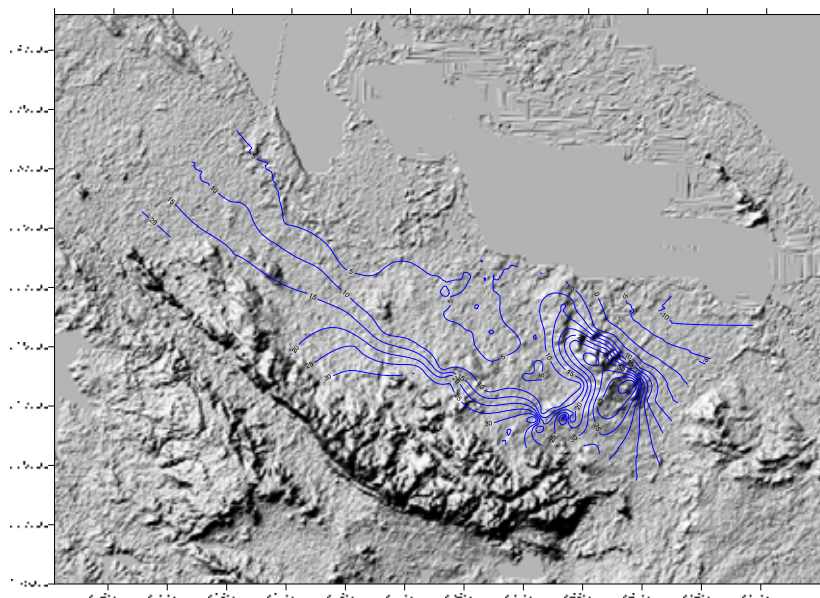


図 2-14: 2007 年 11 月の地下水位分布(雨季末期)

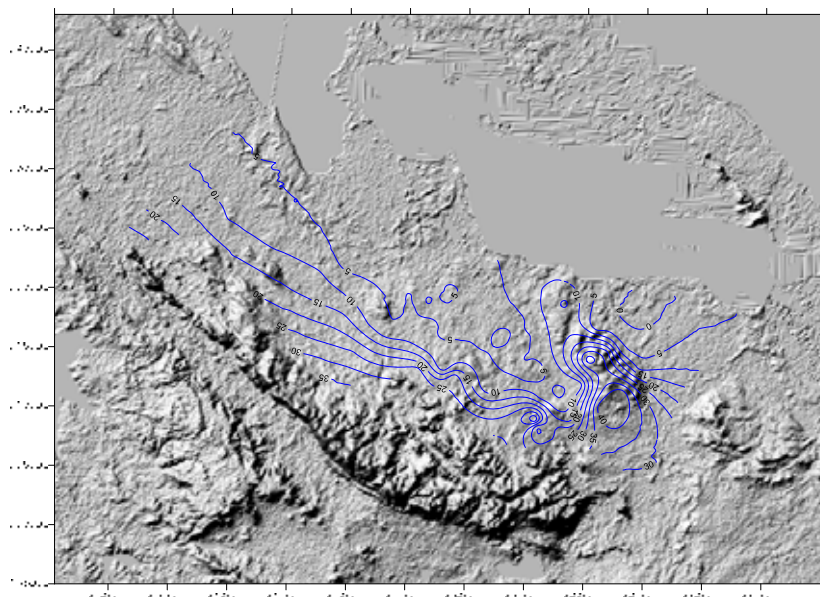


図 2-15: 2008 年 5 月の地下水位分布(乾季末期)

- 地下水面はおおよそ地形に対応して変化している。東側の地下水位の高い地域は、標高のやや高くなった丘陵地形の地域であり、地質も他の地域とは異なっている。この東部地域と中央地域との間が地質境界となっている。

- 二つの時期を比較すると、地下水位に比較的大きな変化が見られる地域を二箇所挙げる事が出来る。
- 一つは、地域北部の灌漑用井戸が数多くある農業地帯である。2007年11月（雨季終期）には、地下水位標高5mラインが中央部に張り出しているが、2008年5月（乾季終期）には、5mラインは南側へ後退している。この地帯で、乾季の間に地下水位が低下していることが確認される。
- もう一つの地域は、ソラ市街地周辺地域である。ソラ市街地南側で、地下水位標高30mラインが、乾季の終わりには後退している。

2.5 地下水質

2007-08年の調査で、地下水の水質分析が実施された。分析項目は電気伝導度（EC）、pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_3^- である。2009年6月の調査の際にも、30井で簡易水質計を利用し、EC、pH、水温など現場での測定を行った。

2.5.1 電気伝導度（EC）

EIPH カマグエイの技術者と日本人専門家が観測井で測定した電気伝導度（EC）を表2-2にまとめる。また、図2-16及び図2-17は、それぞれ2007年11月、2008年5月に測定したEC値の分布を示したものである。

表 2-2: 観測井の電気伝導度

井戸 No.	標高	井戸深度	Nov.88 (estimated**)	2007年 11～12月	2008年5～6月		2009年 1～2月	2009年 6月	2009年7月	
	(m)	(m)	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	採水深度 ***	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	採水深度 ***
1050	12.45	25.00			1,265			2,508		
1053	13.91	13.05	1,306		1,186			3,300		
1242	17.78	4.80 (4.65)	1,070		783			981		
2001	13.81	Sellado			1,367		1,542	1,856		
4680	96.36	82.00		651	675			652		
8394	11.90	9.00						1,412		
10713	21	-		2,203	2,203			1,245		
11098	52.10	30.00						652		
11587	48.60	28.80			1,215			1,110		
B 1-G	14.73	87.05	742	436	900			824	534	(-10.97)
					920	(-85)			910	(-36)
									929	(-61)
B 2-G	39.97	67.00	1,203	346	427		393	1,122		
					1,533	(-12)				
					2,096	(-15)				
					5,770	(-60)				

B 4-G	10	69.00	4,816	13,480	20,170		28,400	10,100		
					34,326	(-65)				
B 7-G	36.98	100.35	165		183		429	140		
					381	(-15)				
B 9-G	22.18	92.76	818		300			295	255	(-17.45)
					1,677	(-30)			833	(-42.5)
					3,199	(-90)			2466	(-67.5)
B10-G	5.8	61.15	818		4,062		4,200	1,744	2562	(-2)
					8,323	(-5)			4500	(-27)
					9,639	(-59)			4200	(-52)
B11-G	5.27	79.32	1,573		1,491		1,197	1,623	1655	(-2)
					1,268	(-10)			2158	(-27)
					1,355	(-15)			2242	(-52)
					3,954	(-78)				
B13-G	10.09	95.00	1,037	1,936	1,725		2,914	2,701		
					9,354	(-93)				
B14-G	11.84	85? (39)*	1,384		934		1,038	656	698	(-1)
					1,928	(-40)			1667	(-25)
									2099	(-39.4)
B15-G	6.98	88.83	584		1,634		1,683	1,500	1497	(-5)
					1,635	(-90)			1407	(-30)
									1509	(-55)
B16-G	10.40	56.66	539		1,185		1,051	989	942	(-8.78)
					1,354	(-50)			1086	(-33.8)
									1075	(-51)
B19-G	6.06	88.50		240	1,120		78	71	61	(-2.05)
					1,188	(-50)			879	(-27)
					1,277	(-90)			1017	(-52)
B21-G	27	140? (24)*			465			184	201	(-23.17)
					415	(-25)			-	(-24)
NG-81	10.41	-		1,387	1,302			1,331		
NG-98	35.90	-		2,050	2,639		2,681	2,922		
A well near So10-G	35	28.25						1,380		
So2-G	39	107.9		310	688			346		
So5-G	33.50	39.60			245			137		
So6-G	31.70	37.00		548	300			345		
So-8G	5.72	8.60		1,044	1,044			1,436		
So9-G	4.23	4.00		600	518			527		

*) 埋戻し、**) TDSからの推計、***) 井戸トップからの深度

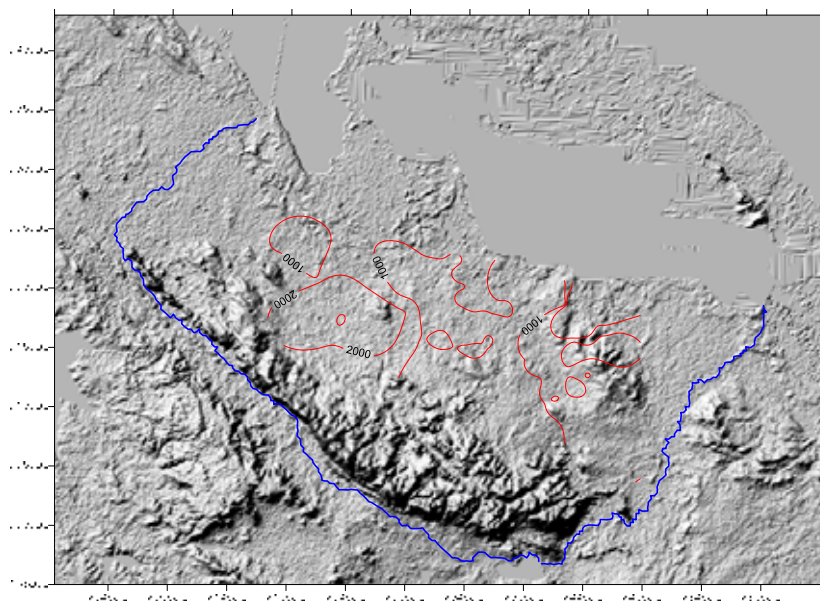


図 2-16: 雨期末期の電気伝導度分布(2007 年 11 月、単位: μ S/cm)

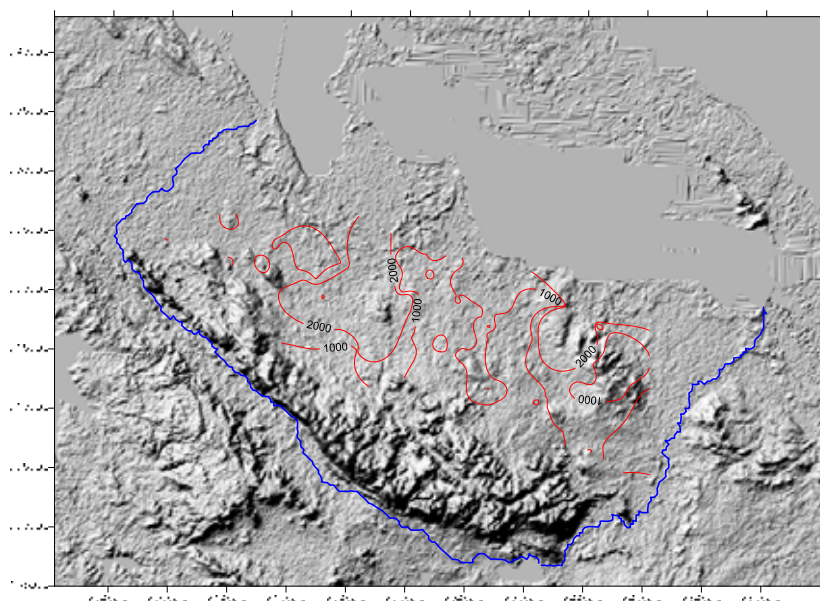


図 2-17: 乾期末期の電気伝導度分布(2008 年 5 月、単位: μ S/cm)

- ソラ市街地の北部、Playa Piloto の南側に位置する B4-G は、2007 年に 13480μ S/cm、2008 年に 20170μ S/cm と非常に高い EC 値が測定されていた。2009 年 1 月及び 6 月に EIPH カマグエイの技術者と日本人専門家が測定した際にも、それぞれ 28400 、 10100μ S/cm と変動はあるものの、やはり他観測井と比べて高い値を示していた。1988 年に実施された調査においても、井戸頂部から 20m の深さの地点で 14664μ S/cm という値が記録されている。B4-G から 1.7km 離れた観測井 B13-G の EC 値は、2008 年に 1725μ S/cm、2009 年に 2914μ S/cm である。

- 調査地域北西域の Lombillo 周辺地域は、 $2000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上と、他地域と比べやや高い EC 値を示している。
- 灌漑用井戸が集中する中央北部は $1000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の低い EC 値を示している。
- EC 値の分布からは、調査地域は大きく 3 つの地域に分けることが出来るように見える。すなわち、ソラ市街地の北から東へ広がる東部の丘陵地域、灌漑用井戸が集中する中央部地域、及び Lombillo 周辺の西部地域である。

2.5.2 EC 値の長期変動傾向

1988 年の調査の際の TDS 値から推算された EC 値を使い、1988 年 11 月の EC 値分布を示す図 2-18を作成した。データ数は少ないながら、中央部に比べ東部、西部がやや大きな EC 値を示すという調査地域の大まかな傾向は表している。

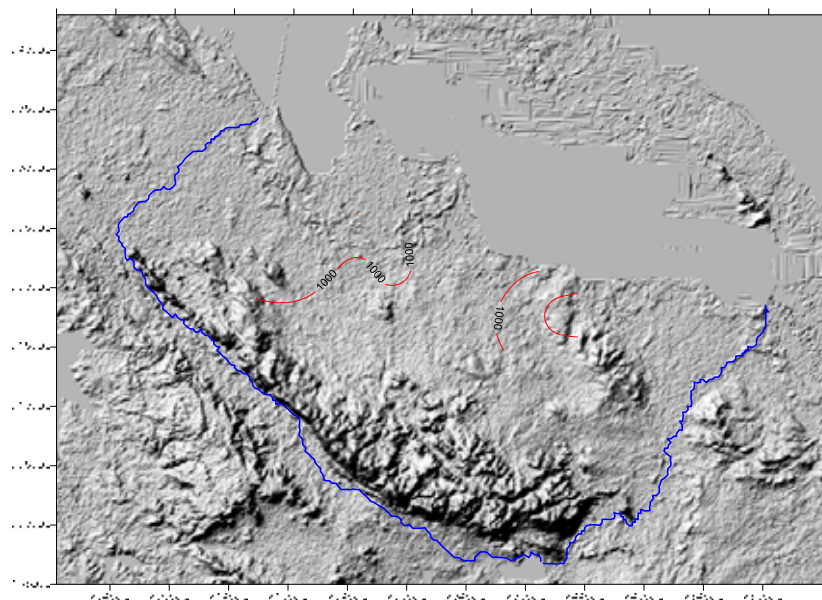


図 2-18: 1988 年 11 月の電気伝導度分布(単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

2009 年 6-7 月に EIPH カマグエイの技術者と日本人専門家が測定された EC 値をもとに図 2-19を作成した。地域的な傾向は 1988 年とほぼ同様であるが、詳細に見るといくつかの違いが確認できる。全体的に EC 値が大きくなっており、特に西部の高い EC 値の範囲が南東方向へ拡大しているように見える。東部の丘陵地域では、B4-G の 1988 年の EC 推定値 $4816\ \mu\text{S}/\text{cm}$ が 2009 年には $10100\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上まで増大している。この 20 年間で地下水の塩水化が進行したと考えられる。

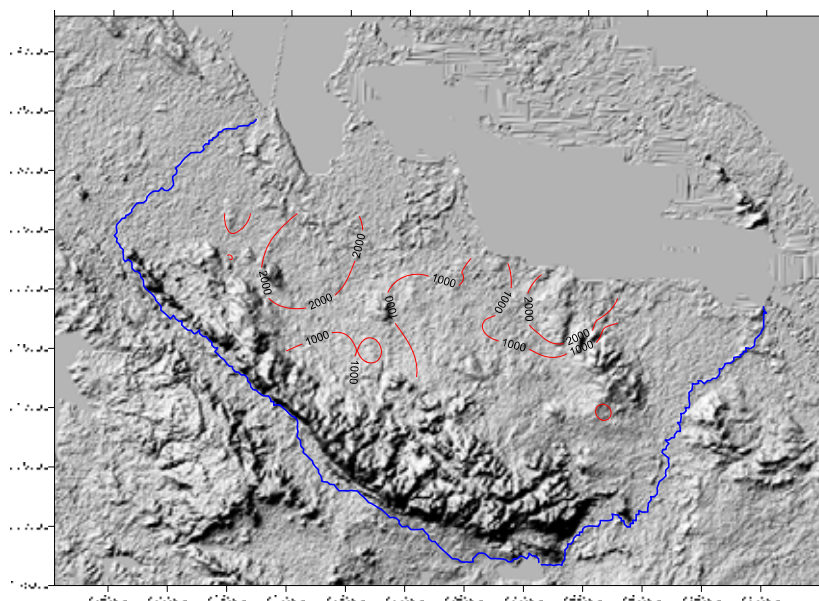


図 2-19: 2009 年 6 月の電気伝導度分布(単位: μ S/cm)

2.6 水文解析

2.6.1 気象データ

本調査・解析においては、EIPi カマグエイより提供された気象データと WMO 公表データを用いて降水量・気温データの整理を行った。

整理したデータは次章で記すタンクモデルを用いての地下水涵養量の推計計算等に使用した。

2.6.2 河川流量観測

本プロジェクトで EIPi カマグエイが実施した河川流量観測の位置を図 2-20に、結果を表 2-3に示す。

表 2-3: 河川流量観測結果

観測地点番号	測線番号	河川	位置座標		計算結果			
			X	Y	全断面積 (m^2)	全流量 (m^3/s)	平均流速 (m/s)	年/月/日
1	1M	Máximo	843040	197348	3.283	0.988	0.301	2010/09/03
2	2M		843798	198407	10.043	2.161	0.215	2010/09/03
3	3M		846621	200056	4.182	0.628	0.15	2010/08/31
4	4M		851400	203683	7.139	2.025	0.284	-
5	5M		854077	211556	4.234	0.996	0.235	-
6	1J	Jigüey	818022	210560	3.581	0.255	0.071	2010/08/24

7	2J		817557	210658	2.488	0.104	0.042	2010/09/09
8	3J		815356	212614	1.706	0.056	0.033	2010/09/16
9	4J		815263	212557	1.317	0.127	0.096	2010/09/16
10	5J		814278	213451	5.533	0.163	0.029	2010/10/24
11	6J		813088	214973	0.783	0.144	0.184	2010/09/06
12	7J		807539	219289	0.667	0.107	0.160	2010/09/06
13	8J		804999	223906	2.347	0.232	0.099	2010/09/07
14	9J		806499	226317	1.981	0.265	0.134	2010/08/25
15	10J		808024	227681	1.834	0.358	0.195	2010/09/07
16	11J		814699	231667	4.536	0.305	0.067	2010/08/25

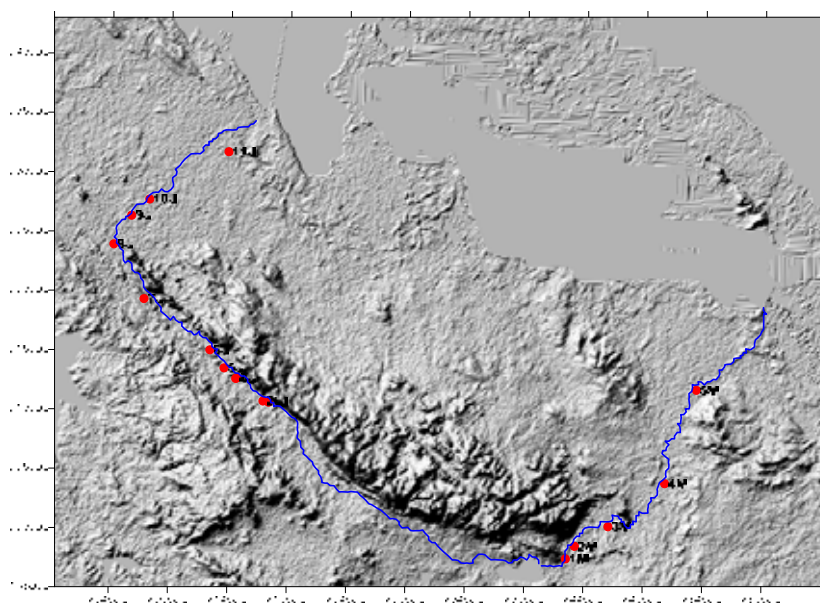


図 2-20: 河川流量観測地点位置図

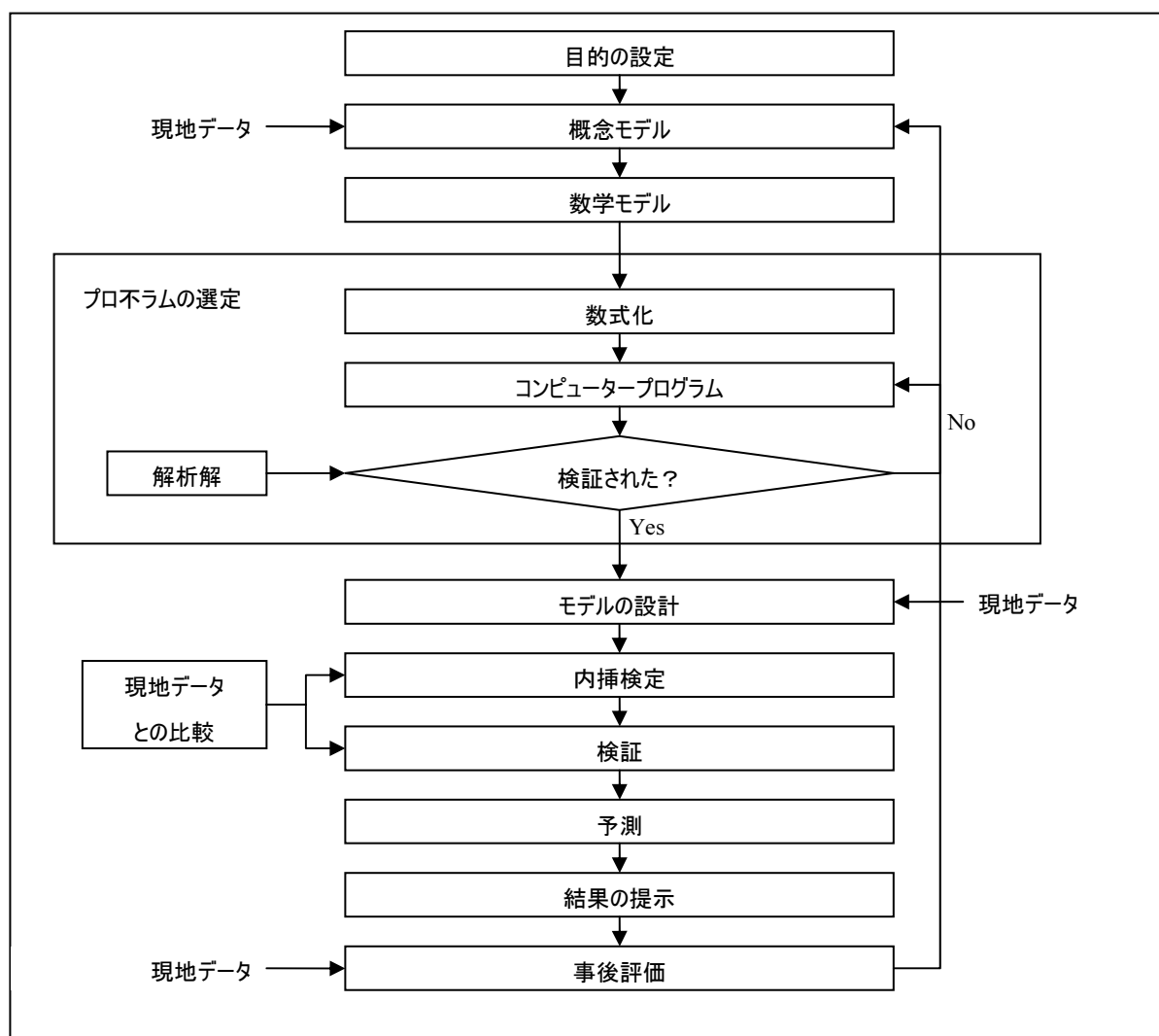
3 地下水モデル

3.1 地下水モデルの概要

a . モデル化の手順と使用コード

地下水モデルのモデル化は、図 3-1に示す手順で行った。

また、本調査・解析では、地下水流動及び物質輸送解析に MODFLOW コードと SEAWAT コードを選定するとともに、FEFLOW コードを用いた FEM 解析の研修も併せて実施した。



(出典：地下水モデル、p6、藤縄克之監訳、1984)

図 3-1: モデル化の手順

b . 使用データ

地下水モデル構築に必要な項目と、本プロジェクトで使用したデータを下表に示す。

表 3-1: 地下水モデルに使用したデータ

項目	使用データ
水理地質構造	GEIPIより提供された柱状図データを整理するとともに、既存地質・水理地質・物理探査データを用いて、水理地質構造解析を行った。さらに、このモデルを、物理探査結果・試掘結果に基づいて修正した。
水理地質定数	水理地質定数（透水係数、貯留係数他）の初期値は、各帯水層の層相から推定される一般値を用いた。
地下水涵養量	タンクモデル解析により1973年から2008年までの36年間の地下水涵養量を推定した。タンクモデルに使用したデータは下記のとおりである。
気象（降水量・気温）	降水量：ソラ地区に位置する23地点の雨量観測所の1973年から2008年の月平均降水量を入力データとした。 気温：“CAMAGUEY AWROPUETRO”の1973年から2008年の月平均気温を入力データとした。
検証データ	不圧井戸の地下水位観測データを検証データとした。
地下水揚水量	GEARHのデータを整理して、モデル入力用データを作成した。
初期水頭	実測地下水位を基準に準定常計算を行い、水位分布が安定した状態の値を検証非定常計算開始時の初期水頭とした。
塩分濃度	EC、比抵抗値との関係から塩分濃度分布を推定した。
モデルの検証データ	GEIPIより提供された地下水位観測データを検証データとした。

3.2 モデルの構造

a . 解析範囲とメッシュ（グリッド）サイズ

三次元モデルの平面グリッドは、図 3-2に示すように、対象地域の東側を流下するMaximo 川、西側を流下する Jigüey 川、北側の丘陵地をカバーするように設定した（X 方向：804,500 – 860,000、Y 方向：195,500 – 235,500）。また、各グリッドの平面サイズは500m×500m とした（X 方向：111 グリッド、Y 方向：80 グリッド）。

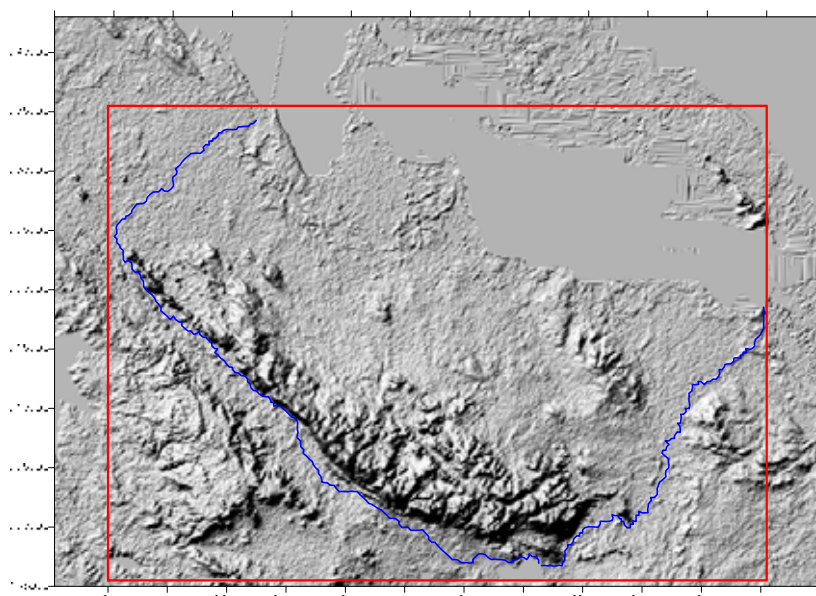


図 3-2: 地下水モデル解析範囲

b . 断面構造

三次元モデルの断面構造は、深度方向において塩水侵入の状況を立体的に反映できるように 25 層構造とし、各層の層厚は 200m とした。また、モデルの最上面標高は 200m、最下面標高は-300m とした（図 3-3）。

LAYER	Elev.(m)
1	200
2	180
3	160
4	140
5	120
6	100
7	80
8	60
9	40
10	20
11	0
12	-20
13	-40
14	-60
15	-80
16	-100
17	-120
18	-140
19	-160
20	-180
21	-200
22	-220
23	-240
24	-260
25	-280
	-300

図 3-3: 三次元モデルの断面構造

c . 三次元モデル立体構造

以上記した三次元モデルの骨格に従い、実際のモデル化地域の地形面標高と水文地質単位（帯水層単位）の分布（図 3-4）を考慮して、モデルの立体構造を構築した。

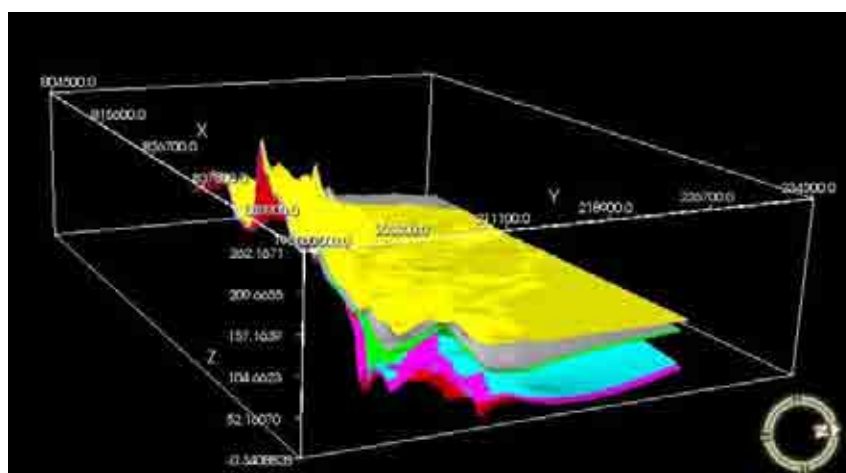


図 3-4: 帯水層単位(帯水層 A~F)の分布

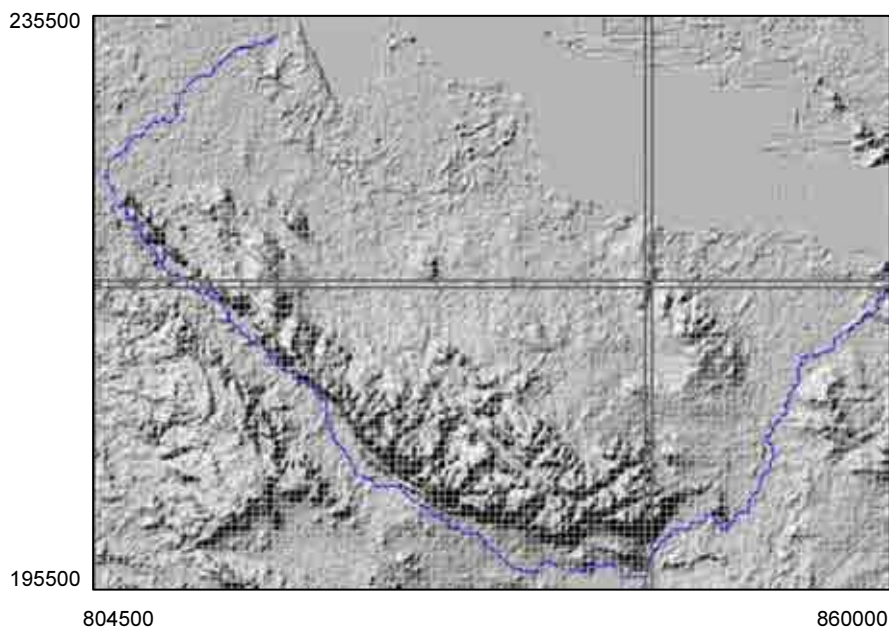


図 3-5: 地下水モデルの平面グリッド



図 3-6: X 方向の垂直モデル構造の例 (Row=38)



図 3-7: Y 方向の垂直モデル構造の例 (Column=78)

3.3 モデルのパラメータ

モデルの水理地質定数の初期値は、表 3-2に示すような帯水層毎に層相から推定される一般値を想定した。次に、各グリッドの水理地質定数を水理地質構造に従って計算し、モデルに入力した。さらに、検証計算の中で実際の地下水位を再現できるようにパラメータを変化させている。

表 3-2: 帯水層単元別水理地質定数の初期値

帯水層単元	A	B	C	D	E	F
帯水層 No.	1	2	3	4	5	6
層相	粘土及び砂	砂及び礫	泥灰岩(泥灰岩 及び粘土)	石灰岩及び 粘土	石灰岩 (碎屑質)	石灰岩 (比較的塊状)
水平方向透水係数 <HHC> (m/day)	0.1	1000	0.001	0.005	100	10
垂直方向透水係数 <HHC> (m/day)	0.05	500	0.0005	0.0025	50	5
Storage Conefficient <S>	0.01	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
比貯留率<SS>	0.001	0.00005	0.00001	0.00001	0.000005	0.00001
比産出率<Sy>	0.15	0.3	0.1	0.1	0.2	0.14
有効空隙率<EP>	0.15	0.3	0.1	0.1	0.2	0.14

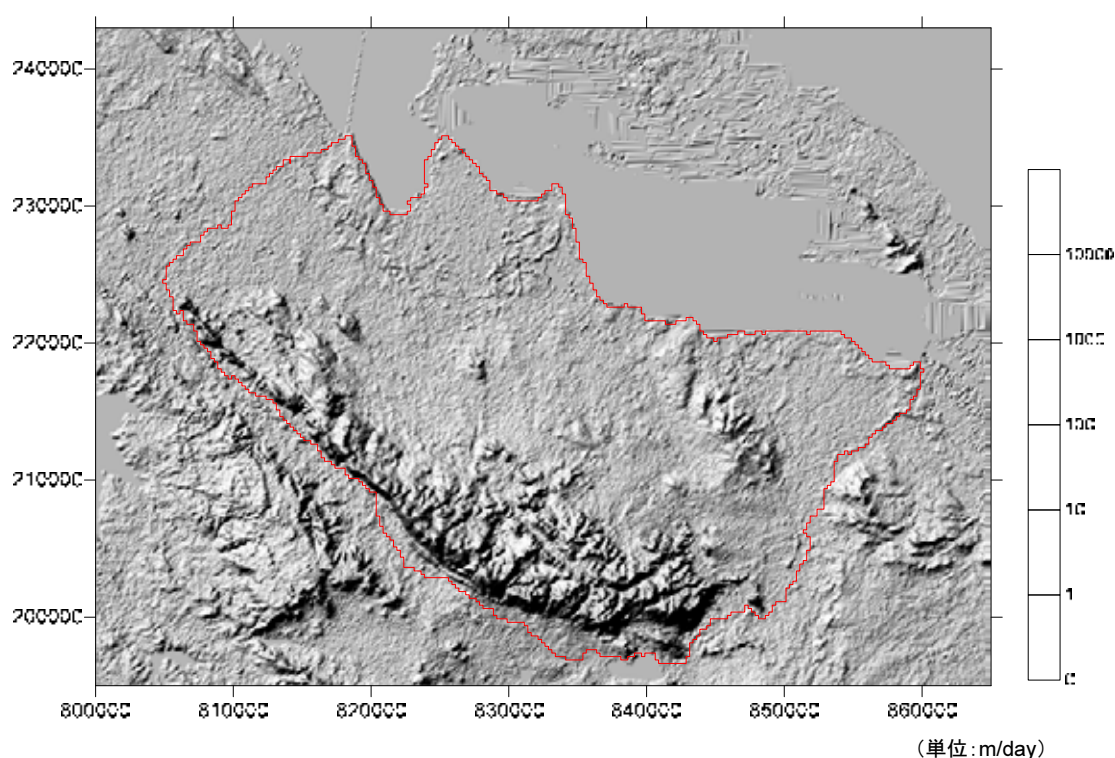


図 3-8: 水平方向透水係数分布の例(第 11 層)

3.4 地下水涵養量の推計

地下水モデル計算に必要なデータの一つである地下水涵養量を推計する方法として、タンクモデルによる流出解析法を採用した。タンクモデルの入力データとして、降水量と蒸発散量が必要である。

a . 降水量と気温データ

タンクモデル解析に使用したデータは次のとおりである。

- 降水量：ソラ地区に位置する 23 地点の雨量観測所の 1973 年から 2008 年の月平均降水量
- 気温：“CAMAGUEY AWROPUETRO”の 1973 年から 2008 年の月平均気温

b . 可能蒸発散量の推計

本プロジェクトにおいては、ソーンスウェイト法（Thornthwaite method）を用いて、可能蒸発散量の推計を行った。ソーンスウェイト法は、気象学、水文学の分野で広く適用されている方法で、気温と日照時間を変数とした経験式である。推計結果の例を表 3-3 に示す。

表 3-3: 可能蒸発散量の推定の例(1999 年～2008 年)

	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
1 月.	7.4	6.1	5.8	7.4	6.3	7.5	6.9	7.2	8.7	7.7
2 月	6.1	6.9	8.5	7.3	9.0	9.3	6.4	7.0	8.1	8.7
3 月	9.0	8.9	9.6	9.8	12.3	10.3	12.0	9.7	9.6	10.5
4 月	12.7	10.9	11.3	11.4	10.5	11.9	12.3	12.0	11.8	10.8
5 月	12.2	12.8	11.9	13.7	14.9	15.4	15.6	14.7	13.2	14.9
6 月	13.9	14.2	13.7	15.0	14.6	16.0	15.8	15.0	15.4	15.3
7 月	15.4	15.9	14.9	16.0	16.1	16.4	16.8	16.1	16.6	16.2
8 月	15.0	14.7	15.6	15.4	15.4	16.2	16.2	15.7	16.0	15.9
9 月.	13.8	14.4	13.4	12.6	14.0	14.5	14.7	14.5	13.6	14.0
10 月.	11.9	9.9	12.0	13.4	13.2	12.6	12.1	13.5	12.7	11.9
11 月	7.8	9.2	7.5	10.0	9.6	9.0	9.6	9.4	9.0	7.9
12 月	6.2	7.9	8.3	9.0	7.7	8.1	8.1	9.8	8.7	7.2
平均	10.9	11.0	11.0	11.7	12.0	12.3	12.2	12.0	12.0	11.8

(単位：cm/月)

c . 地下水涵養量の推計結果

タンクモデルのパラメータは、観測井（NO.1053）の地下水位変動と計算水位変動を比較することにより同定した（図 3-9）。No.1053 の井戸仕様は表 3-4に示すとおりである。この井戸の深度は浅く、不圧地下水の水位を測定しているものと推定され、観測データも比較的良く揃っている。このパラメータが同定されたモデルを用いて、実蒸発散量と地下水涵養量を推定した（表 3-5、表 3-6）。地下水モデルの計算の単位は月単位とするため、地下水涵養量も月単位で集計している。

表 3-4: No.1053 井の井戸仕様

No.	井戸No.	座標		井戸深度 (m)	井戸施設長 (m)
		X	Y		
32	1053	820400	221000	13.05	13.91

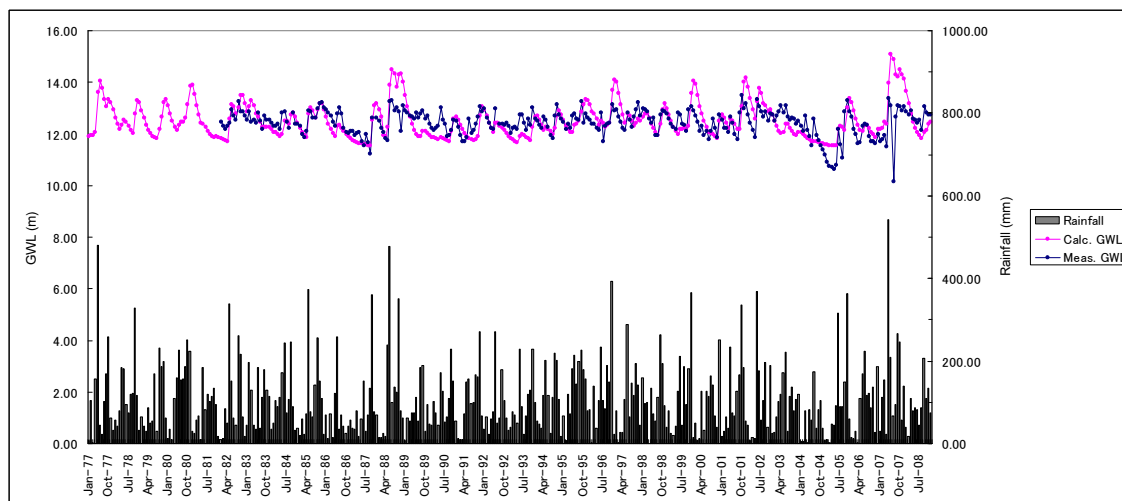


図 3-9: タンクモデル解析の検証結果

表 3-5: 実蒸発散量の推計結果の例(1999 年～2008 年)

	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
1 月.	74.30	61.29	57.51	74.24	28.25	27.67	9.95	13.08	71.39	0.00
2 月	26.79	22.86	48.29	8.55	65.81	5.63	1.29	31.05	81.38	0.00
3 月	20.78	13.64	63.55	14.04	102.28	79.25	47.42	3.11	95.80	3.44
4 月	42.81	109.16	36.46	12.93	105.07	1.76	44.46	109.55	55.61	0.00
5 月	122.34	41.74	118.81	136.52	148.89	82.90	91.91	146.86	132.44	0.00
6 月	138.86	127.64	126.96	149.85	146.26	56.73	157.64	149.85	153.85	0.00
7 月	78.11	113.55	66.37	118.06	71.40	163.82	161.30	157.38	165.69	0.00
8 月	149.85	147.10	126.39	103.49	114.42	41.73	88.69	121.69	100.25	0.00
9 月.	111.02	144.00	133.56	126.40	136.90	82.03	147.41	86.86	135.98	67.13
10 月.	119.31	70.60	120.45	72.91	78.37	105.69	121.44	135.00	126.70	20.81
11 月	77.85	40.09	75.12	99.98	95.63	37.47	95.99	26.51	90.21	65.63
12 月	62.06	79.30	83.48	66.32	77.24	8.58	48.16	97.65	87.43	33.07

(単位: mm/月)

表 3-6: 地下水涵養量の推計の例(1999 年～2008 年)

	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
1 月.	10.24	37.92	29.79	26.28	6.69	6.98	0.04	10.71	10.99	1.28
2 月	5.12	17.81	14.16	12.58	3.34	3.49	0.02	5.35	13.08	0.70
3 月	2.56	8.77	7.08	6.29	1.67	1.74	0.01	2.68	24.65	0.46
4 月	1.28	8.85	3.54	3.14	4.28	0.87	0.00	1.34	11.84	0.28
5 月	1.66	4.43	30.78	59.68	9.71	0.44	0.00	6.32	108.28	0.13
6 月	19.30	2.21	14.60	60.34	26.94	0.22	39.46	24.69	109.81	0.03
7 月	9.43	1.11	7.30	27.90	12.87	2.48	18.51	11.86	52.81	0.00
8 月	13.95	4.98	3.65	13.31	6.44	1.24	9.08	5.93	24.51	0.00
9 月.	6.97	4.17	10.20	24.00	3.22	0.62	4.99	2.96	44.17	2.82
10 月.	19.19	2.08	63.13	11.55	1.61	0.31	63.18	1.66	65.52	0.37
11 月	88.41	1.04	82.75	28.06	3.63	0.15	47.51	0.83	42.33	3.57
12 月	64.34	43.76	55.41	13.38	13.95	0.08	22.13	22.75	38.34	1.62

(単位: mm/月)

3.5 地下水揚水量の推定

ソラ地区の地下水揚水量は、GEARH から提供された 2002 年 1 月から 2010 年 8 月までの揚水施設毎の揚水量データを、月単位でグリッド毎に集計・整理することによって推計した。

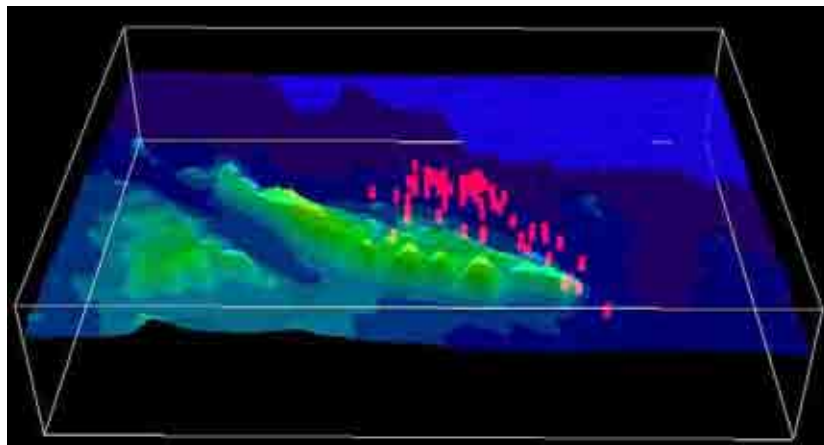


図 3-10: ソラ地区の生産井分布

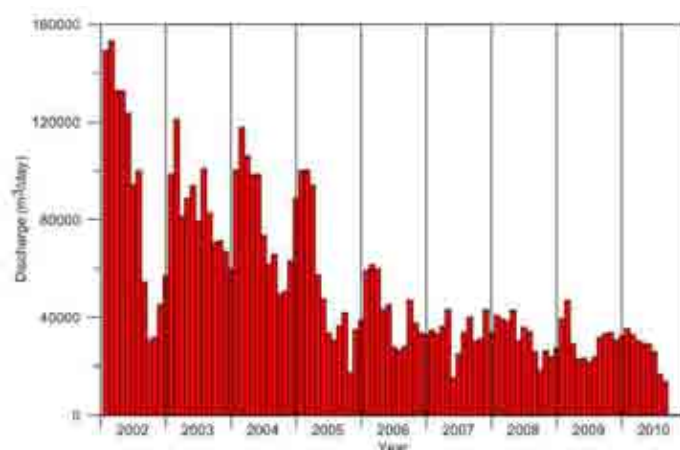


図 3-11: 解析地域(ソラ地区)の月別地下水揚水量(2002 年～2010 年)

3.6 初期水頭

モデルに入力した初期水位は、前章で記した実測地下水位を初期値に準定常計算を行い、水位分布が安定した状態の値を検証非定常計算開始時の初期水頭とした。

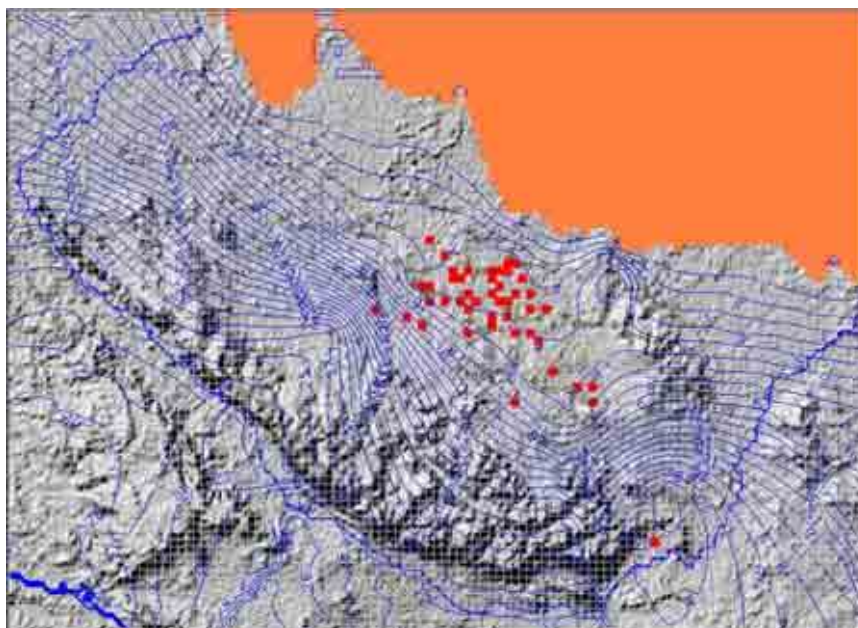


図 3-12: 初期水頭の例(第 11 層)

3.7 塩分濃度分布

以下に記す手順で、地下水モデルに入力する初期塩分濃度分布を推計した。

- ステップ 1：前章で記した電磁探査結果に基づく比抵抗分布を数値化する。
- ステップ 2：一般に、電気伝導度 (EC) と塩分濃度の間には以下の関係がある。
 - ◆ $4,000\text{mS/m} = 35,000\text{ ppm (mg/kg)}$
 - ◆ $1\text{ mS/m} = 10\text{ }\mu\text{S/cm} = 8.75\text{ mg/kg} = 0.00875\text{ g/kg}$
- ステップ 3：ソラ地区で測定された電気伝導度 (EC) と比抵抗値の間には、以下の関係が認められる。
 - ◆ $\text{EC} = \text{pow}(\text{Resis}, -0.5922685154) * 2339.419888$ (EC: mS/m, Resistivity: ohm-m)

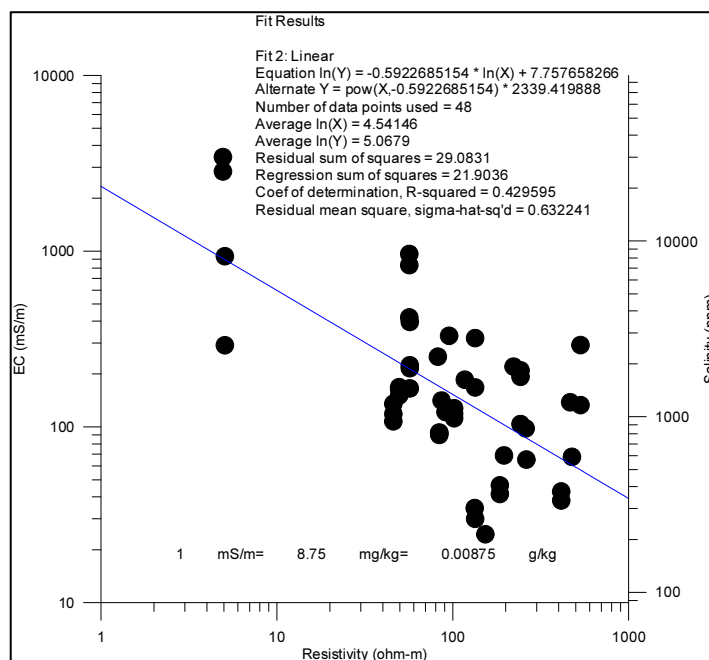


図 3-13: 電気伝導度 (EC) と比抵抗値の関係

- ステップ 4 : ステップ 2 と 3 より、以下の関係が成り立つ。
 - ◆ $\text{Salinity} = \text{pow}(\text{Resistivity} - 0.5922685154) * 2339.419888 * 8.75$
(Salinity: ppm、Resistivity: ohm-m)
- ステップ 5 : ステップ 1 で数値化した比抵抗分布とステップ 4 の関係式から、地下水モデルに入力する塩分濃度を推計する。

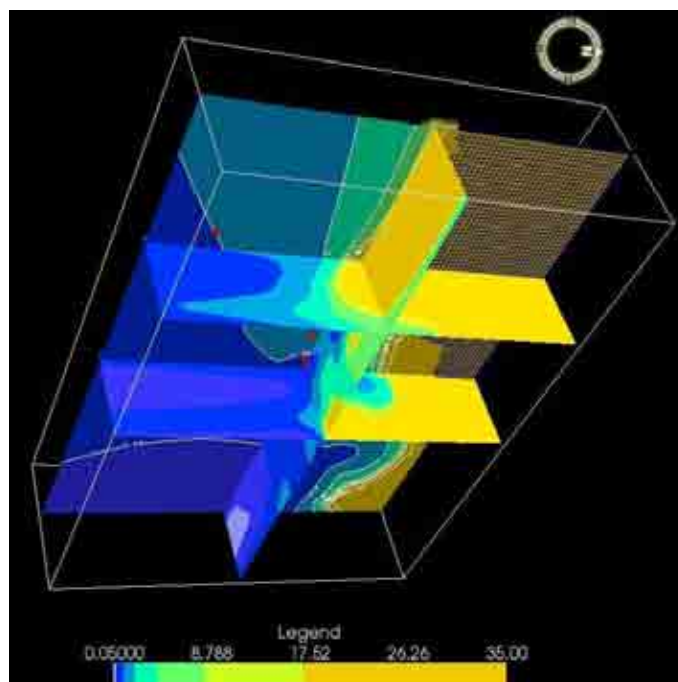


図 3-14: 初期塩分濃度分布の推計事例

3.8 内挿検定

上記した初期水頭と初期塩分濃度や、2002 年 1 月から 2010 年 8 月まで（104 ヶ月）の地下水涵養量と揚水量を各グリッドに入力した後に、MODFLOW-96 を用いて検証計算を行った。計算単位は月単位（104 ステップ）とし、モデルの検証は、モニタリング井の観測地下水位変動と計算水頭変動を比較することにより行った。図 3-15に検証事例を示す。

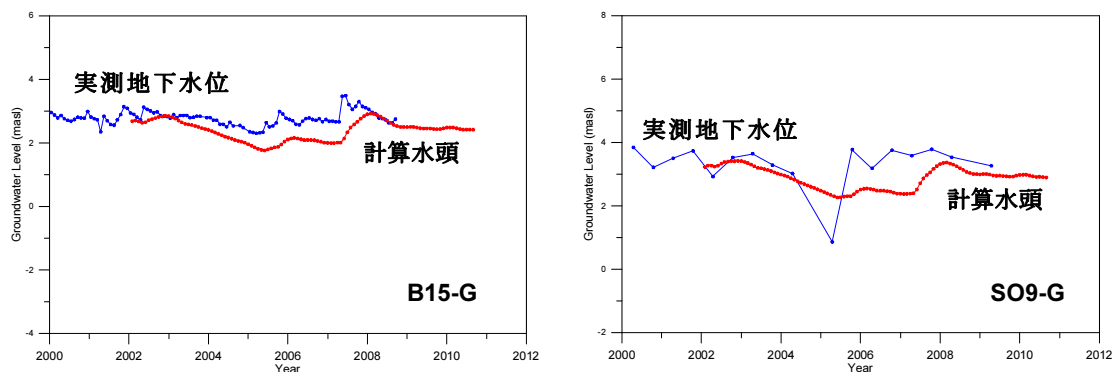


図 3-15: 実測地下水位変動と計算水頭変動の比較事例 (MODFLOW-96 による計算)

上記の検証計算で計算水頭が実測地下水位を再現できた段階で、同じ条件で SEAWAT を用いて密度流解析を行い塩分濃度分布の再現を行った。

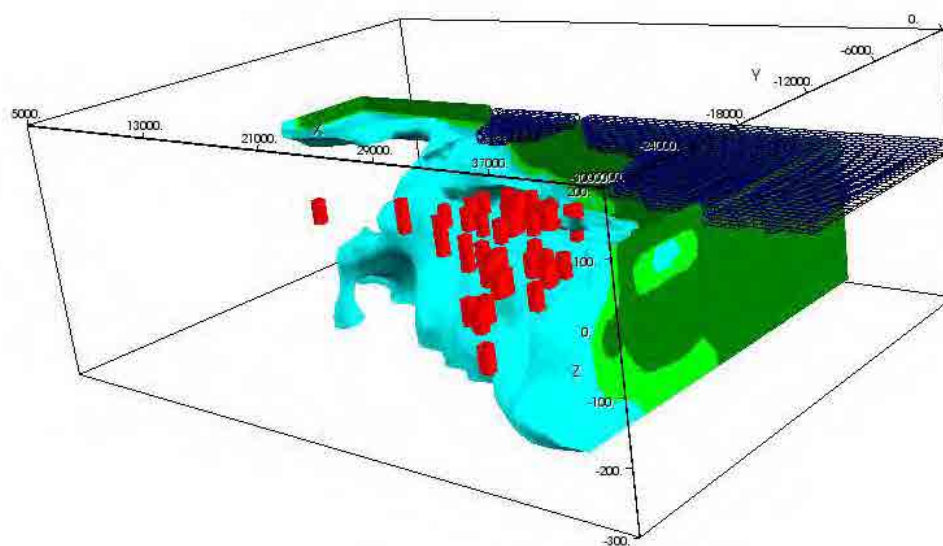


図 3-16: 内挿検定で再現された塩分濃度分布の例

4 予測解析

4.1 予測解析のシナリオ

予測解析においては、地下水涵養量と揚水量を変化要因として、両者を組み合わせた表 4-1に示す 6 ケースの計算を行った。予測期間は、2010 年 9 月から 2018 年 12 月までの 100 ヶ月（100 ステップ）とした。表 4-1における各要素は、以下のように設定している。

- 地下水涵養量平均：検証計算の 2002 年から 2009 年までの 8 年間の月毎の平均値が予測期間中繰り返すものとする。
- 地下水涵養量減少：月毎の地下水涵養量を上記平均値の 80%と設定する。
- 地下水涵養量増加：月毎の地下水涵養量を上記平均値の 120%と設定する。
- 揚水量現状維持：検証計算の 2009 年 9 月から 2010 年 8 月の最後の 1 年間の月別揚水量が予測期間中繰り返すものとする。
- 揚水量回復：検証期間の 2002 年から 2009 年まで揚水量は年々減少しているが、予測の最終年である 2018 年の揚水量が 2002 年の揚水量のレベルまで回復するシナリオである。具体的には、2011 年の揚水量＝2009 年の揚水量、2012 年の揚水量＝2008 年の揚水量、2013 年の揚水量＝2007 年の揚水量、・・・、2018 年の揚水量＝2002 年の揚水量と設定する。

表 4-1: 予測解析のシナリオ

	揚水量現状維持	揚水量回復
涵養量平均	ケース 1	ケース 2
涵養量減少	ケース 3	ケース 4
涵養量増加	ケース 5	ケース 6

4.1.1 MODFLOW-96による予測解析

MODFLOW-96 を用いた地下水流動解析による地下水位変化の予測計算結果を以下に示す。

第 11 層（生産井の主要な取水層）の地下水位分布の変化を計算事例として図 4-1に示す。この地下水位の変化は、予測解析の最終ステップである 2018 年 12 月の地下水位と検証計算期間中の 2009 年 12 月の地下水位の差異を表している。また、図 4-2には、揚水量が過大になると内陸部への塩水浸入が危惧されている第 17 層（標高-120m～-140m）の地下水位分布の変化を示す。

また、図 4-3は、内挿検定の項で検証結果の例としてあげた B15-G と SO9-G の表 4-1 の予測条件での地下水位の変動を示す。

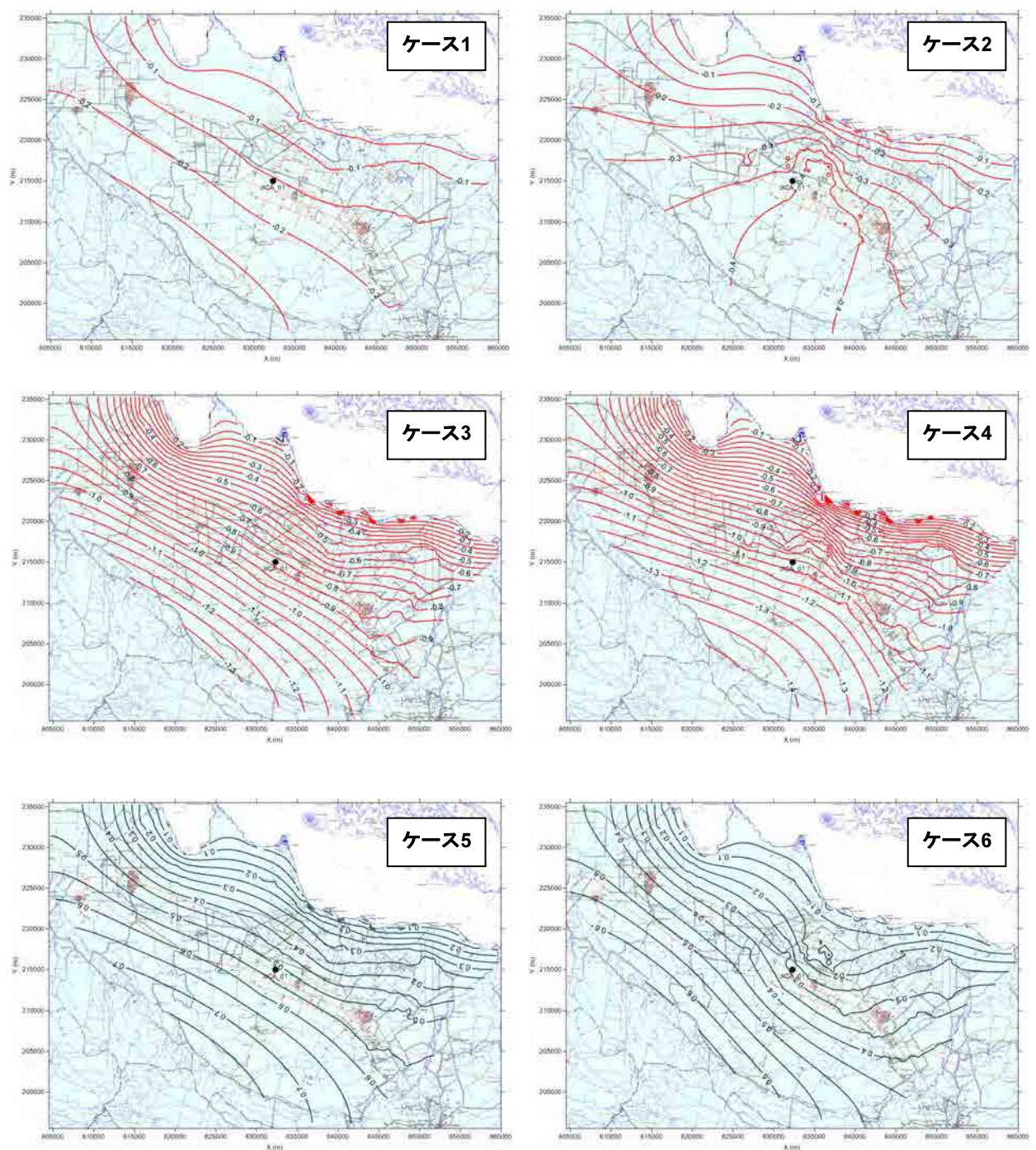


図 4-1: MODFLOW-96 を用いた計算による地下水位分布の変化の例(第 11 層、2018 年 12 月と 2009 年 12 月の比較)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

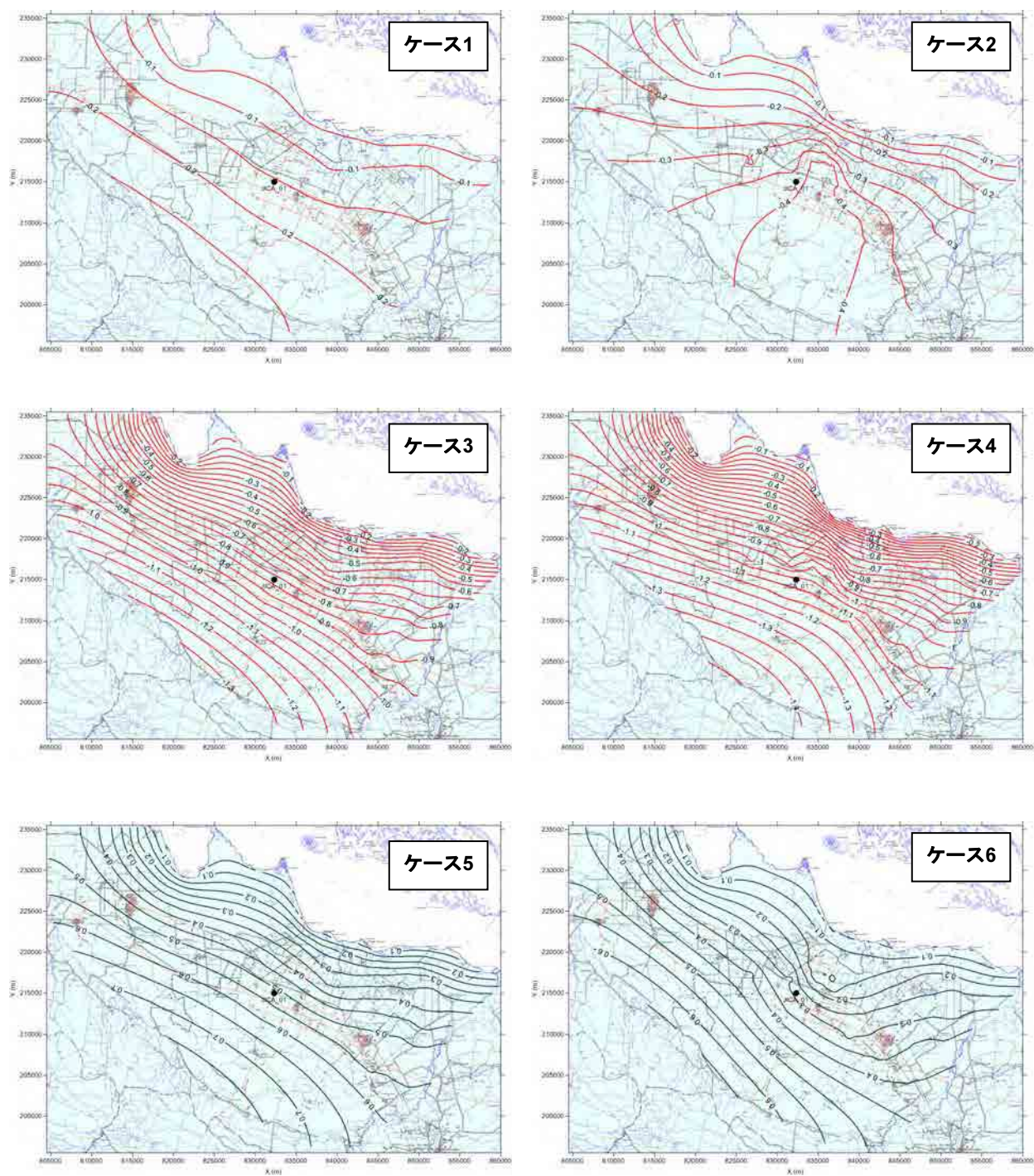


図 4-2: MODFLOW-96 を用いた計算による地下水位分布の変化の例(第 17 層、2018 年 12 月と 2009 年 12 月の比較)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

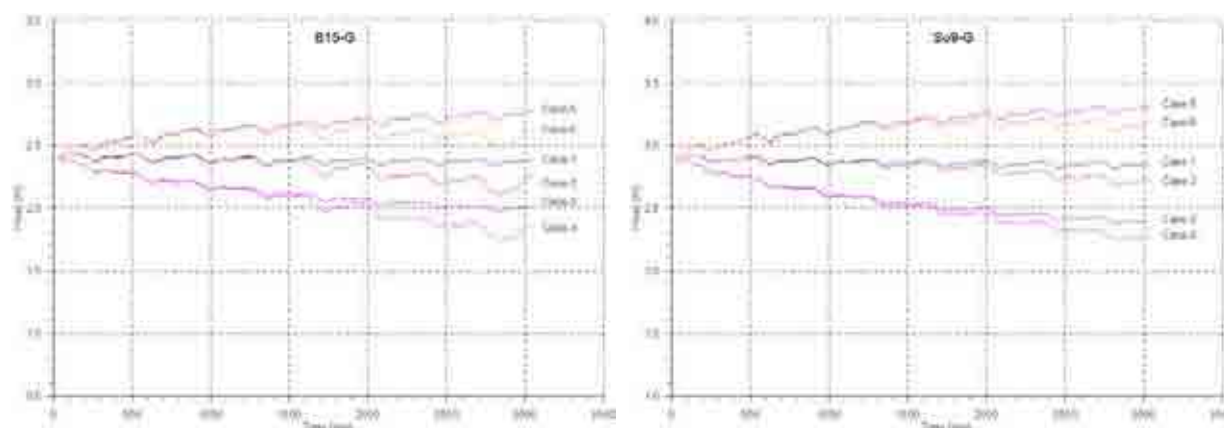


図 4-3: 予測シナリオに基づく地下水位変動の予測事例(MODFLOW-96 を用いた計算結果)

4.1.2 SEAWATによる予測解析

a . 地下水位

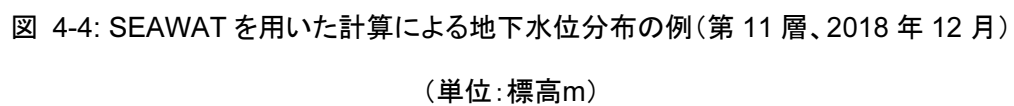
SEAWAT は地下水流動モデル (MODFLOW) と輸送モデル (MT3DMS) をカップリングさせたものである。ベースとなる MODFLOW が一定の固定した密度で流動計算を行うのに対して、SEAWAT では可変密度流計算を行うため地下水位も上記の MODFLOW-96 による計算結果と異なるものとなる。これまでの経験では、SEAWAT による計算の方が MODFLOW による計算に比べて地下水位の変動が大きくなる傾向が認められる。

図 4-4と図 4-5に表 4-1に示した各予測ケースの最終ステップ (2018 年 12 月) の第 11 層と第 17 層の地下水位分布を示す。また、図 4-6と図 4-7に予測解析の最終ステップである 2018 年 12 月の地下水位と検証計算期間中の 2009 年 12 月の地下水位の差異を示す。

b . 塩水分布

上記した地下水位分布と同様に、SEAWAT を用いて計算した各予測ケースの最終ステップ (2018 年 12 月) の第 11 層と第 17 層の塩水濃度分布を図 4-8と図 4-9に示す。

また、図 4-10と図 4-11に 2018 年 12 月の塩水濃度と 2009 年 12 月の塩水濃度の差異を示す。



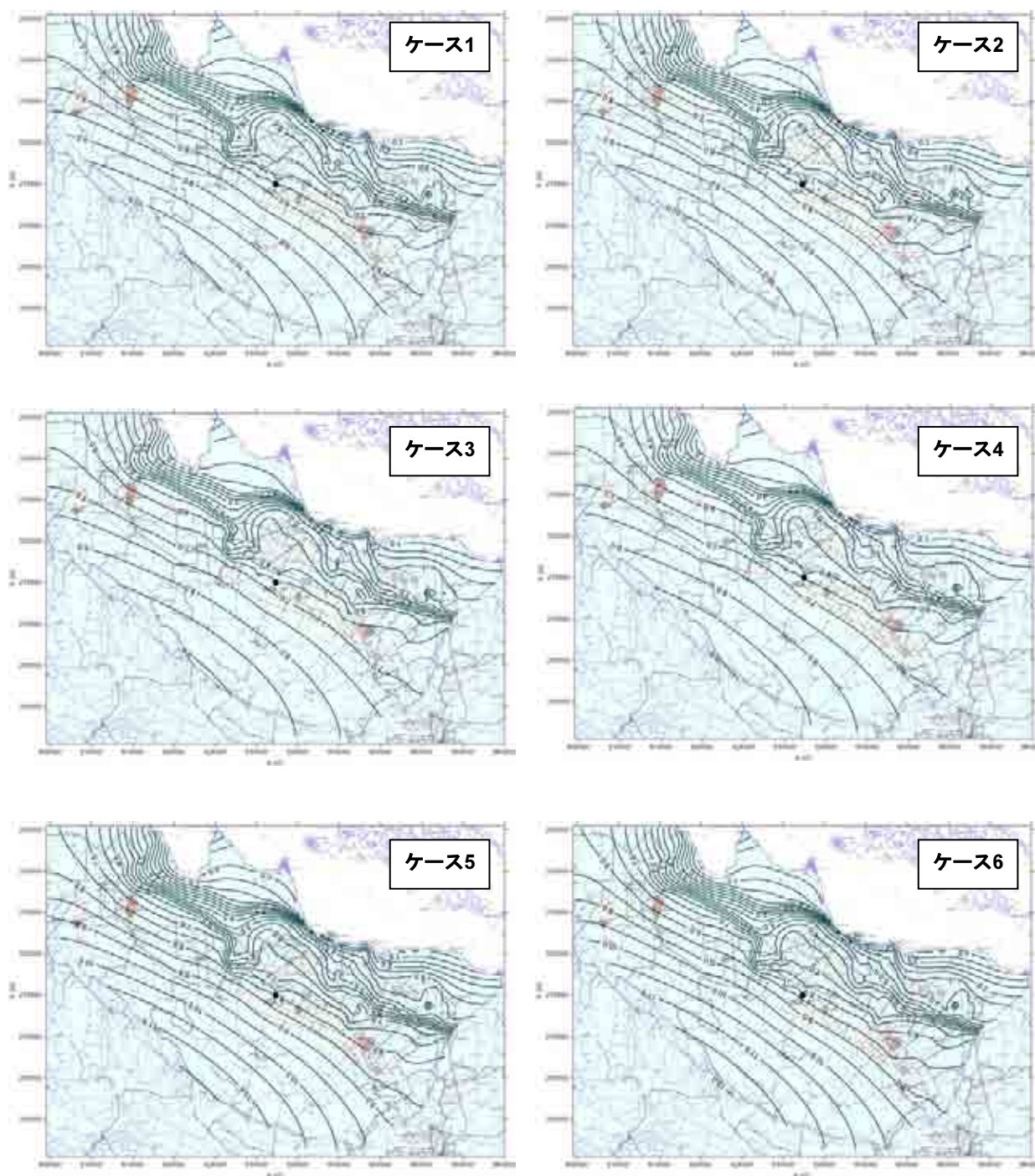


図 4-5: SEAWAT を用いた計算による地下水位分布の例(第 17 層、2018 年 12 月)

(単位: 標高m)

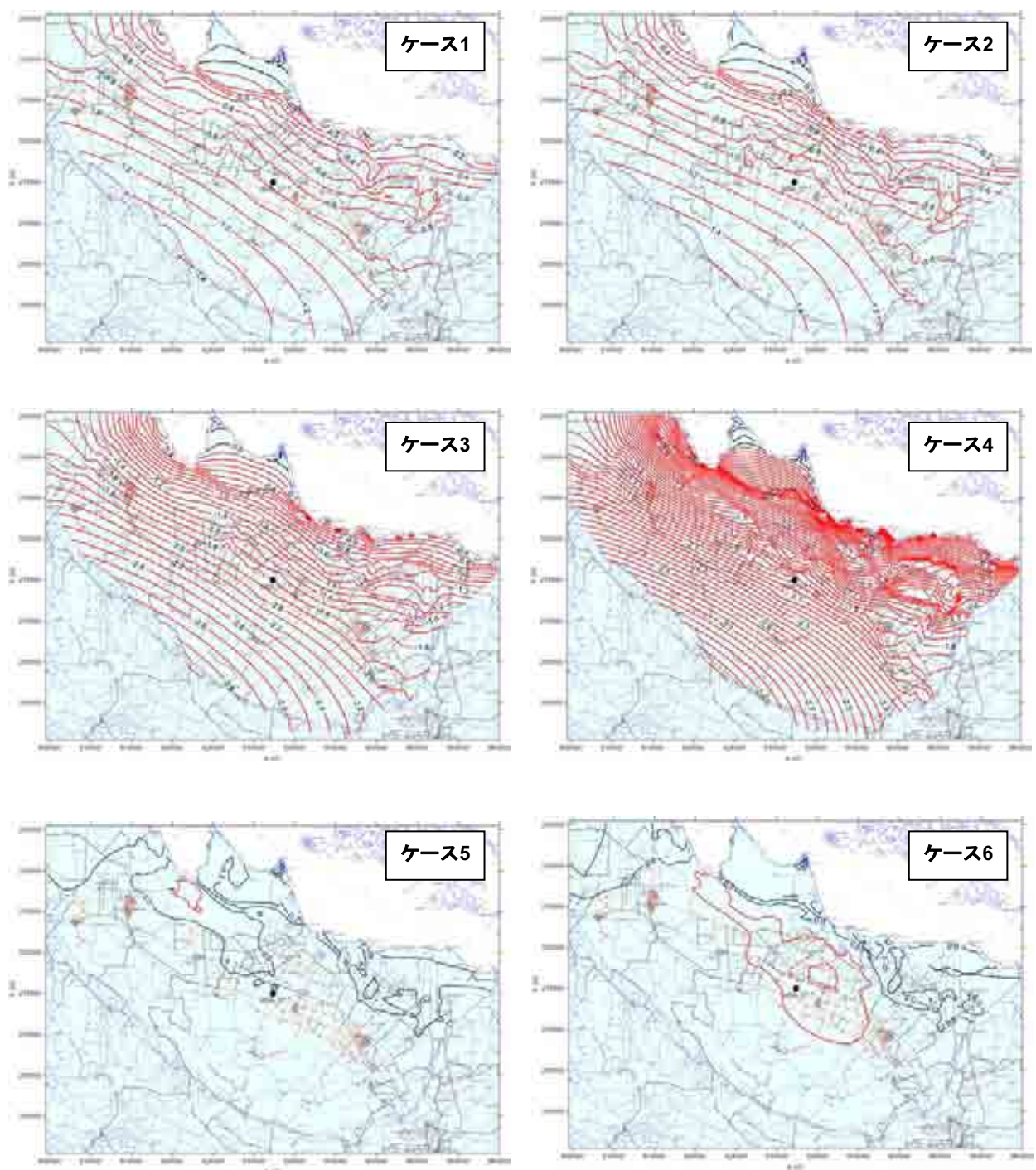


図 4-6: SEAWAT を用いた計算による地下水位分布の変化の例(第 11 層、2018 年 12 月と
2009 年 12 月の比較)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

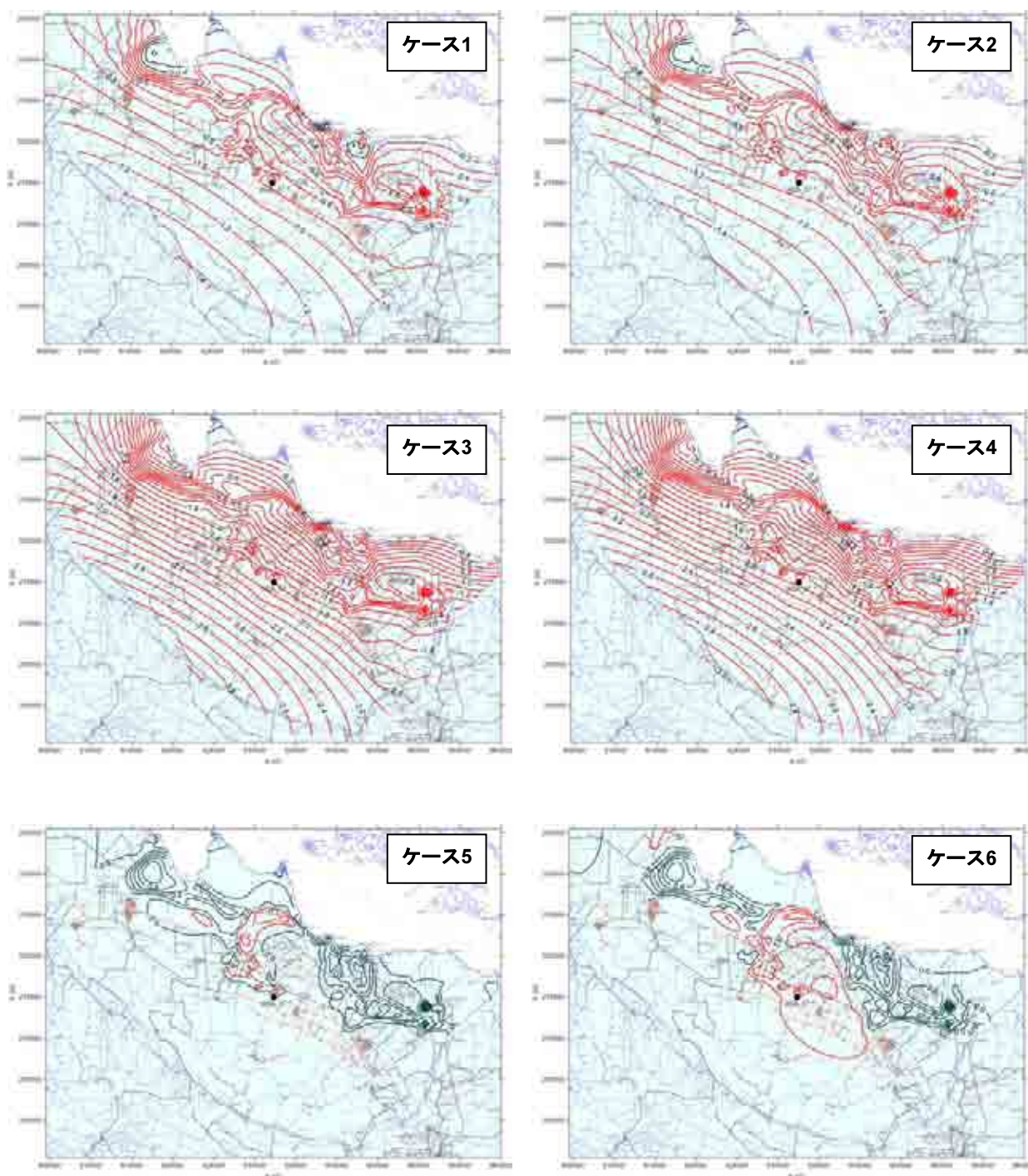


図 4-7: SEAWAT を用いた計算による地下水位分布の変化の例(第 17 層、2018 年 12 月と
2009 年 12 月の比較)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

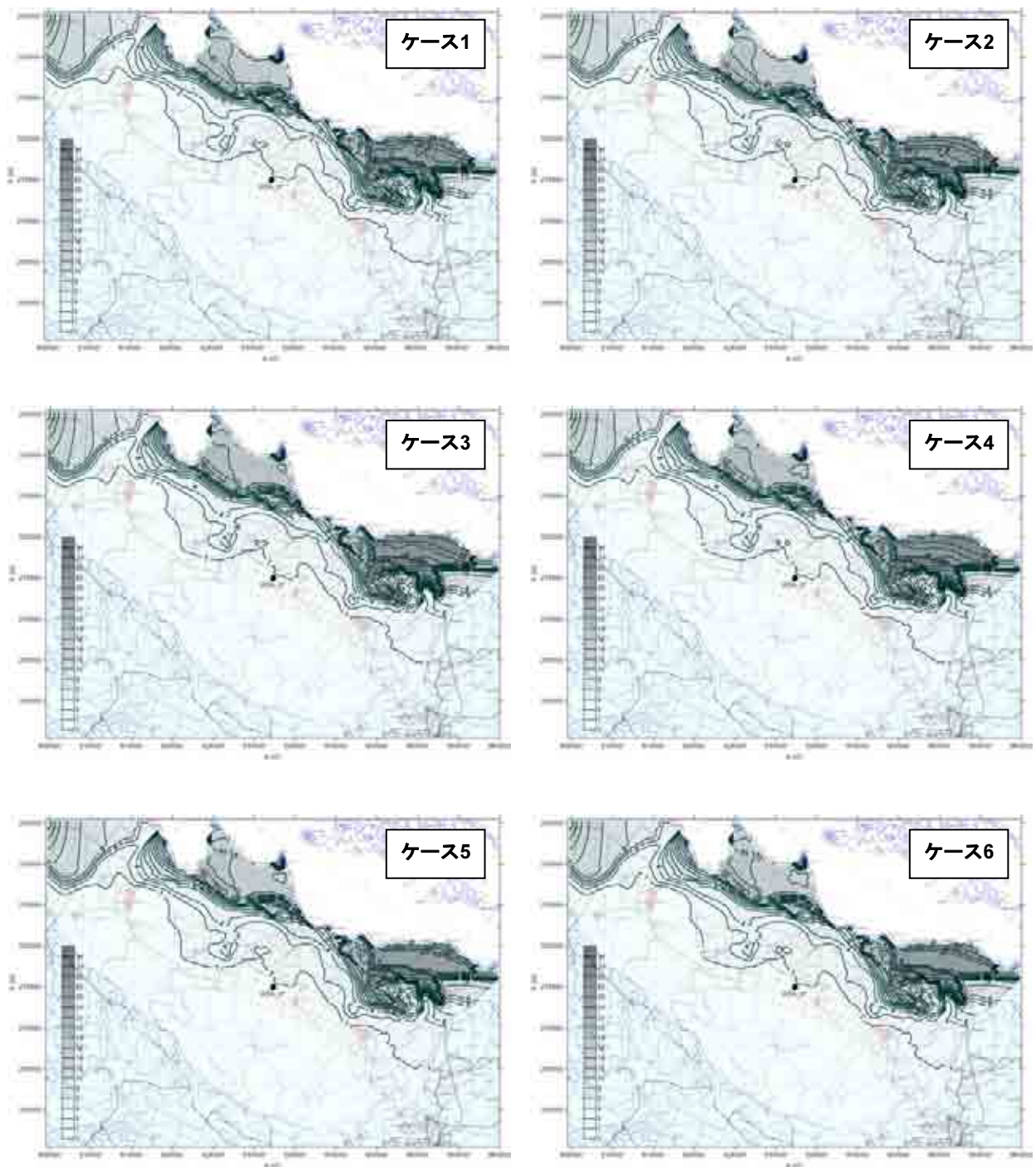


図 4-8: SEAWAT を用いた計算による塩水濃度分布の例(第 11 層、2018 年 12 月)

(単位: kg/m^3)

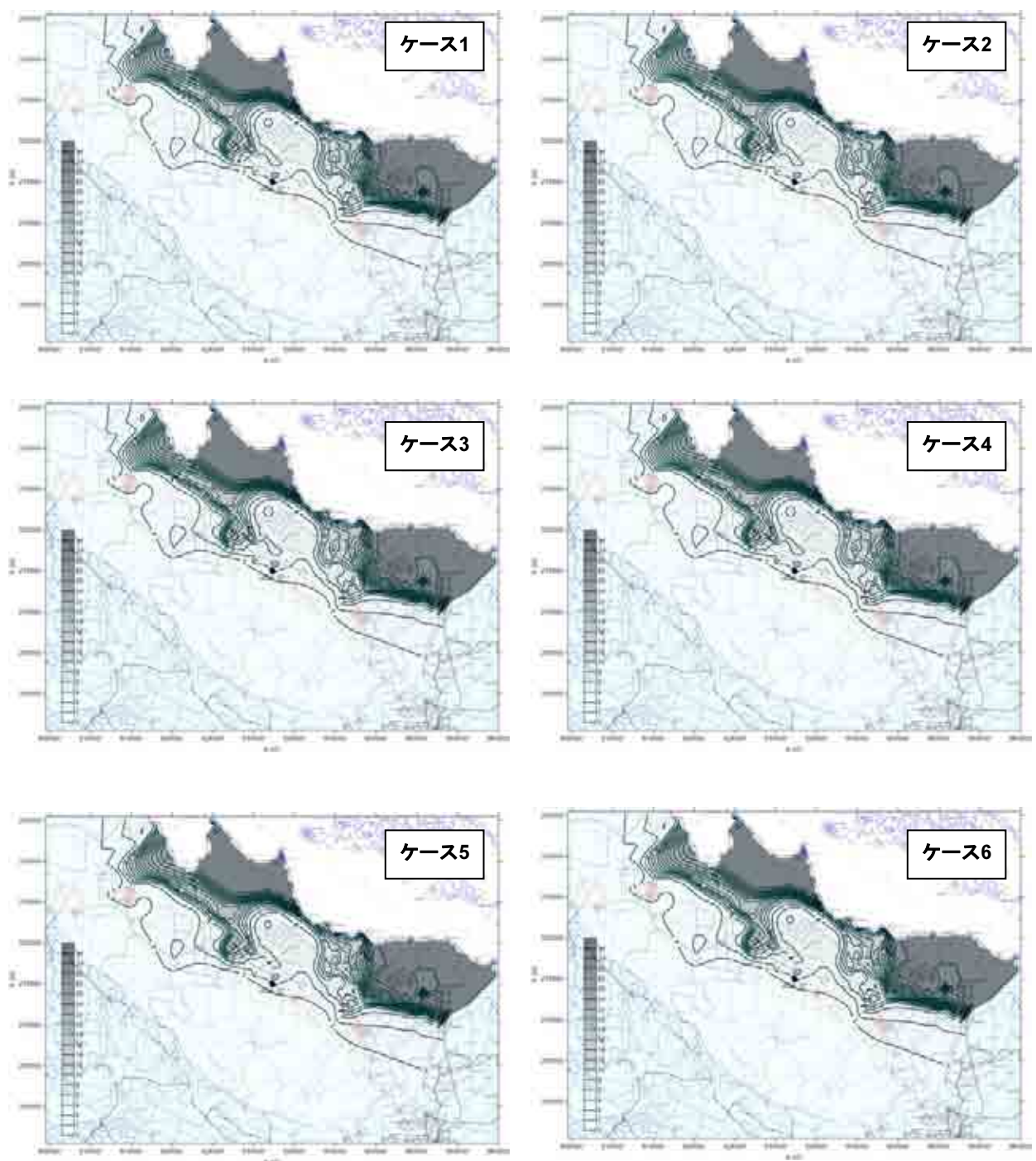


図 4-9: SEAWAT を用いた計算による塩水濃度分布の例(第 17 層、2018 年 12 月)

(単位: kg/m^3)

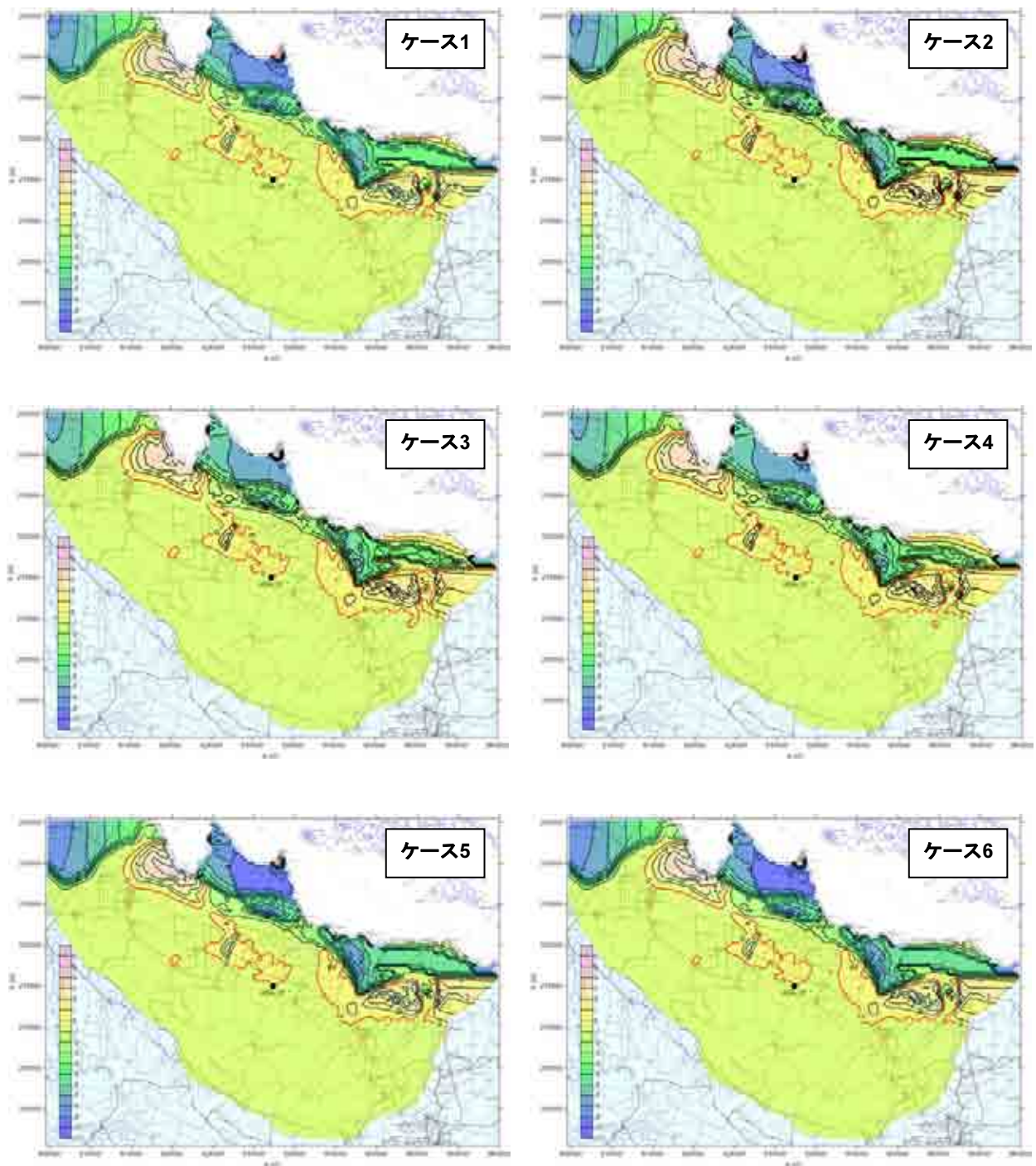


図 4-10: SEAWAT を用いた計算による塩水濃度分布の変化の例(第 11 層、2018 年 12 月と
2009 年 12 月の比較)

(単位: kg/m^3)

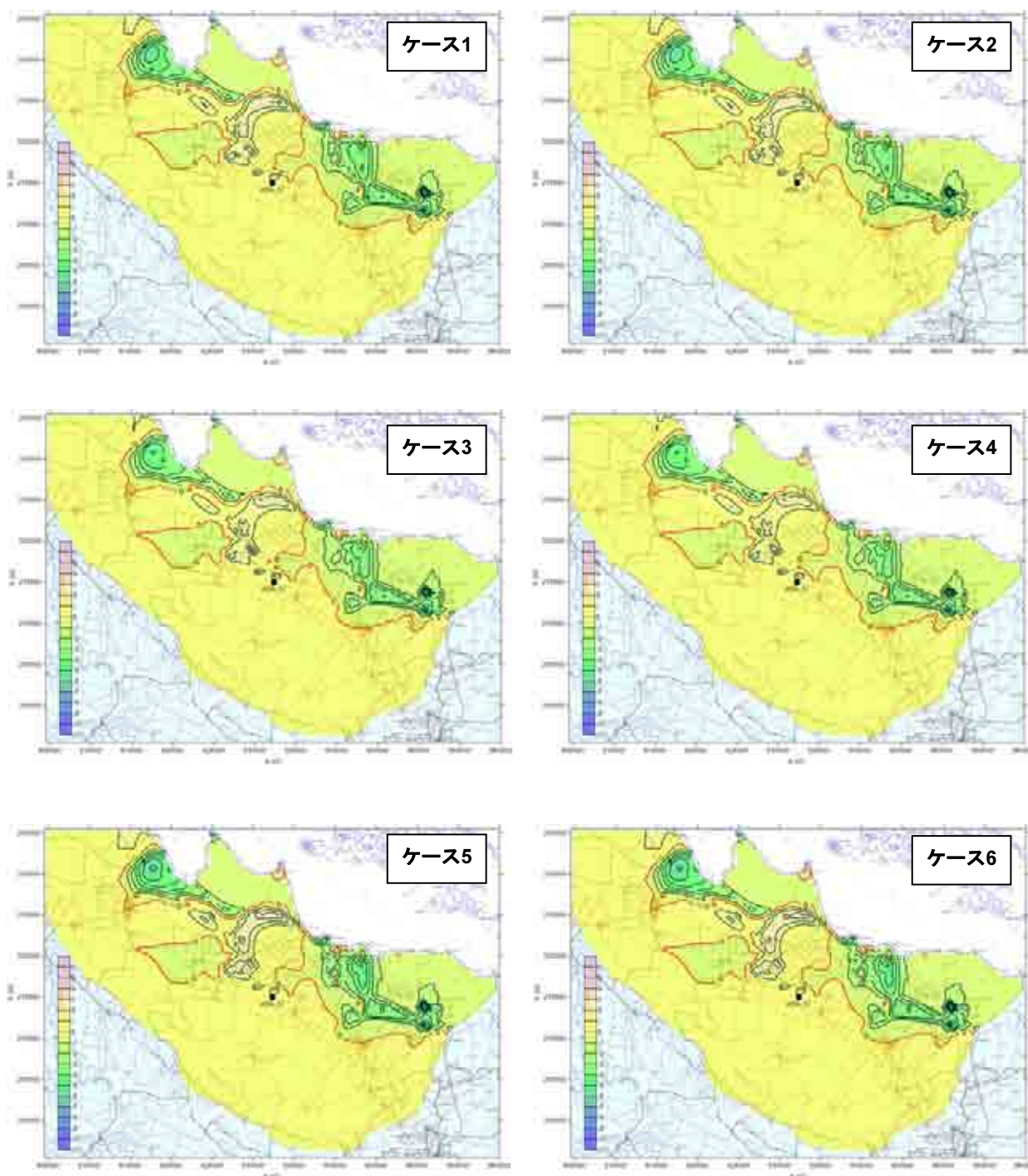


図 4-11: SEAWAT を用いた計算による塩水濃度分布の変化の例(第 17 層、2018 年 12 月と
2009 年 12 月の比較)

(単位: kg/m^3)

4.2 新規水源が開発されるシナリオ

現在、ソラ地区においては新規水源（井戸）開発に関連した具体的な計画は立てられていない。

本節においては、JICA_01 が掘削された地点で揚水が行われたと仮定して、新規水源が開発された場合の予測解析事例を示す。

a . 新規水源開発シナリオ1

JICA_01 は、X : 832302.36、Y : 214970.09 に位置して、その地点の地盤標高は約 44m である。また、図 2-11 に示したように深度 60～75m 付近に主要な帯水層がある。このため、第 11 層（標高 0～-20m）で取水が行われることとし、揚水量は揚水試験結果から $200\text{m}^3/\text{hour} \times 7 \text{ 時間} (=1400\text{m}^3/\text{日})$ と仮定した。

また、その他の条件は前節のケース 1 と同じとした。すなわち、平均的な涵養量で現在の揚水量に JICA_01 の揚水量が加わったシナリオで、2010 年 9 月から 2018 年 12 月までの 100 ヶ月（100 ステップ）の予測計算を行った。

b . 新規水源開発シナリオ2

JICA_01 の掘削では塩水の浸入は確認されなかったが、物理探査の結果から直下に塩水の浸入が推測されている。そのため、JICA_01 の最下部である第 17 層で揚水した場合の水位・塩水の変化を予測する。

このシナリオでは揚水深度のみ変え、その他の条件は新規水源シナリオ 1 と同じとする。

4.2.1 MODFLOW-96による予測解析

図 4-12 は第 11 層（JICA_01 の取水層）の地下水位分布の変化で、(a) は新規水源開発シナリオ 1 の最終ステップ（2018 年 12 月）の地下水位と検証計算期間中の 2009 年 12 月の地下水位の差異、(b) は新規水源開発シナリオ 1 と前節のケース 1 の 2018 年 12 月の地下水位の差異をそれぞれ示している。また、同様に第 17 層の地下水位分布の変化を図 4-13 に示す。

また、新規水源開発シナリオ 2 の場合の地下水位の変化を、上記と同様に図 4-14 及び図 4-15 に示す。

新規水源開発シナリオ 1 及び 2 と前節ケース 1 との地下水位の差異（地下水位低下の最大値）は下表のとおりであり、これらのシナリオでは周囲の地下水位にほとんど影響を与えないと予測される。

表 4-2: MODFLOW-96 を用いた予測計算による新規水源開発シナリオと前節ケース 1 の地下水位の差異(地下水位低下の最大値)

	第 11 層	第 17 層
新規水源開発シナリオ 1	-4.2cm	-3.2cm
新規水源開発シナリオ 2	-3.2cm	-4.4cm

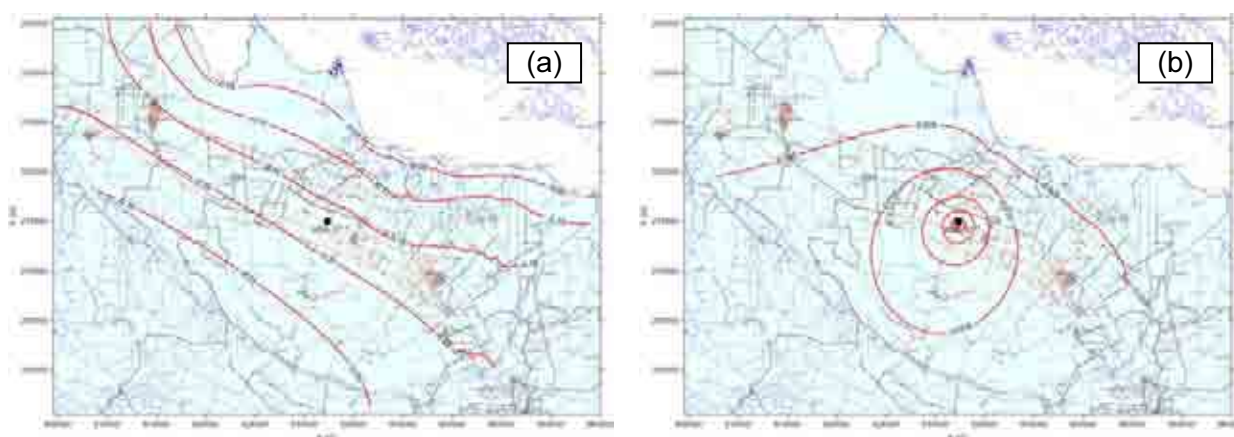


図 4-12: MODFLOW-96 による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新規水源開発シナリオ 1、第 11 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

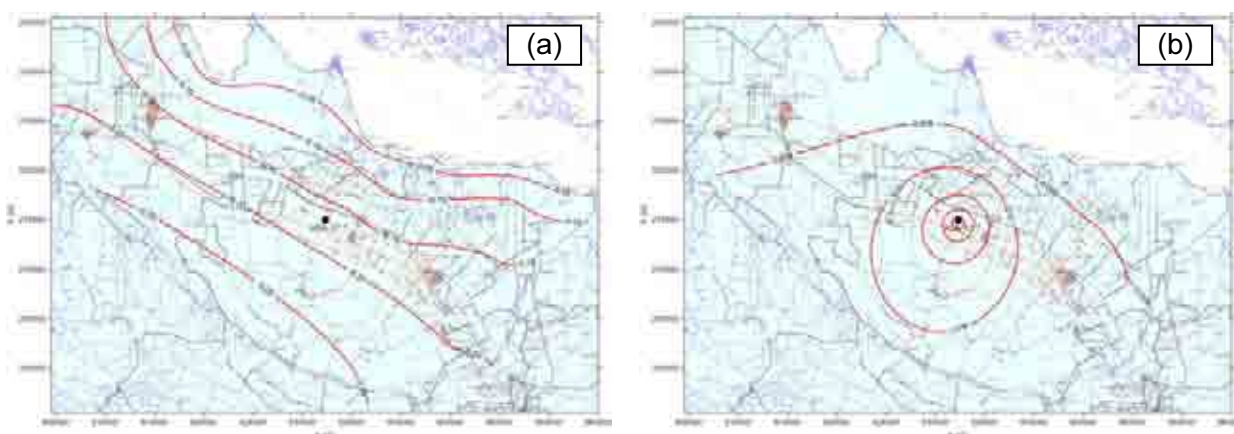


図 4-13: MODFLOW-96 による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新規水源開発シナリオ 1、第 17 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

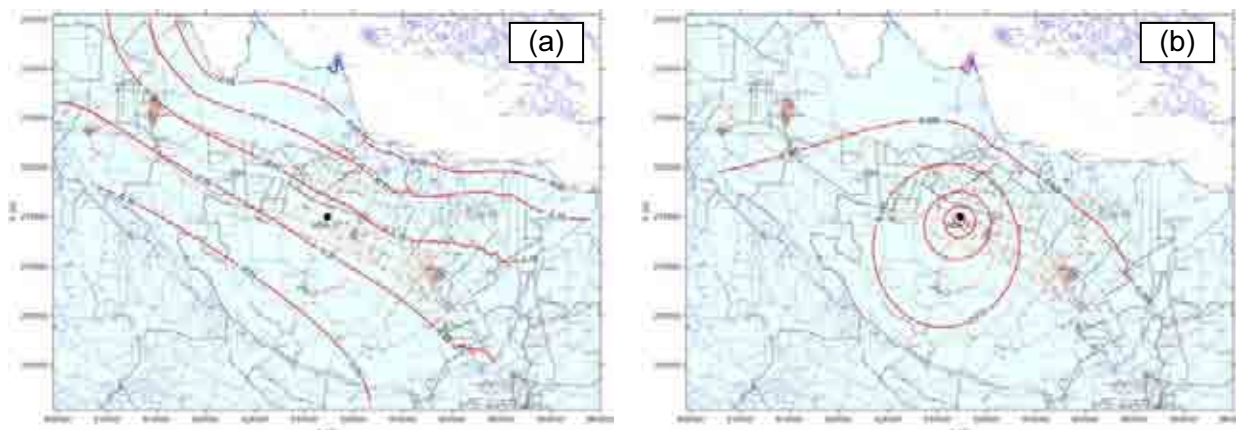


図 4-14: MODFLOW-96 による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例新規
水源開発(シナリオ 2、第 11 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

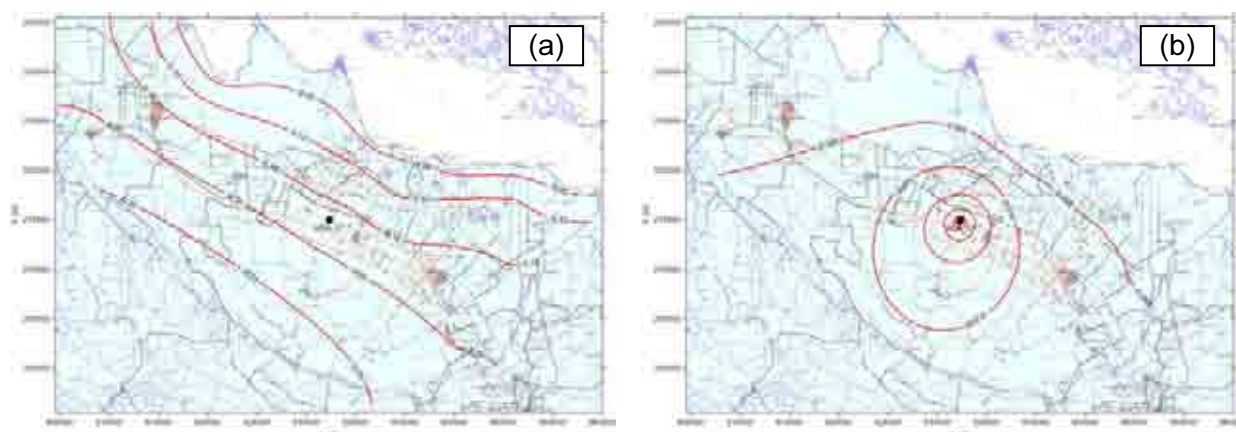


図 4-15: MODFLOW-96 による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新
規水源開発シナリオ 2、第 17 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

4.2.2 SEAWATによる予測解析

SEAWAT を用いた地下水位変化の予測解析結果も、上記の MODFLOW-96 を用いた解析結果と同様の方法で示す(図 4-16～図 4-19)。また、塩水濃度変化の状況も同様の図面類で示す(図 4-20～図 4-23)。

SEAWAT を用いた予測による新規水源開発シナリオ 1 及び 2 と前節ケース 1 との地下水位の差異(地下水位低下の最大値)は下表のとおりであり、MODFLOW-96 を用いた解析と概ね同様の値となっている。

表 4-3: SEAWAT を用いた予測計算による新規水源開発シナリオと前節ケース 1 の地下水位の差異(地下水位低下の最大値)

	第 11 層	第 17 層
新規水源開発シナリオ 1	-4.5cm	-3.4cm
新規水源開発シナリオ 2	-3.4cm	-4.2cm

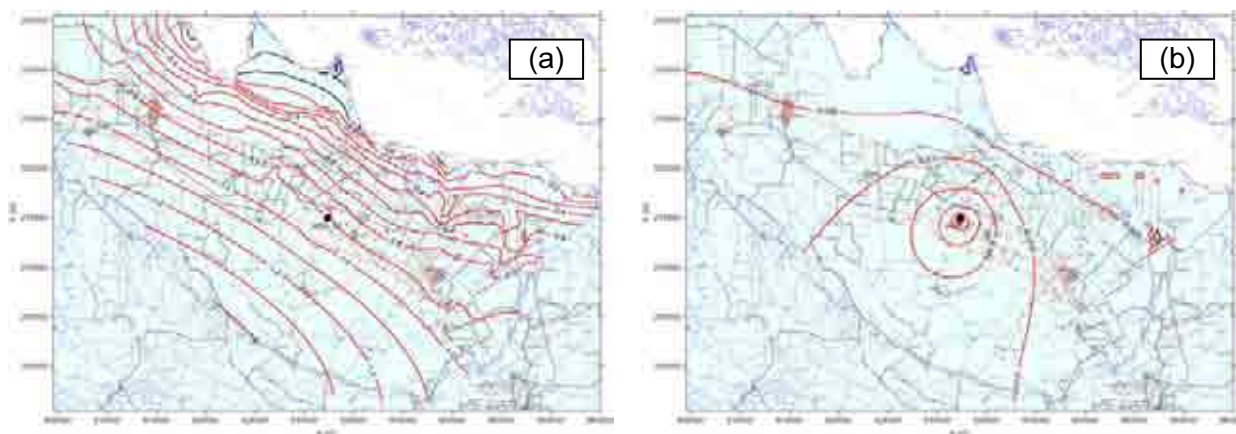


図 4-16: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新規水源開発シナリオ 1、第 11 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

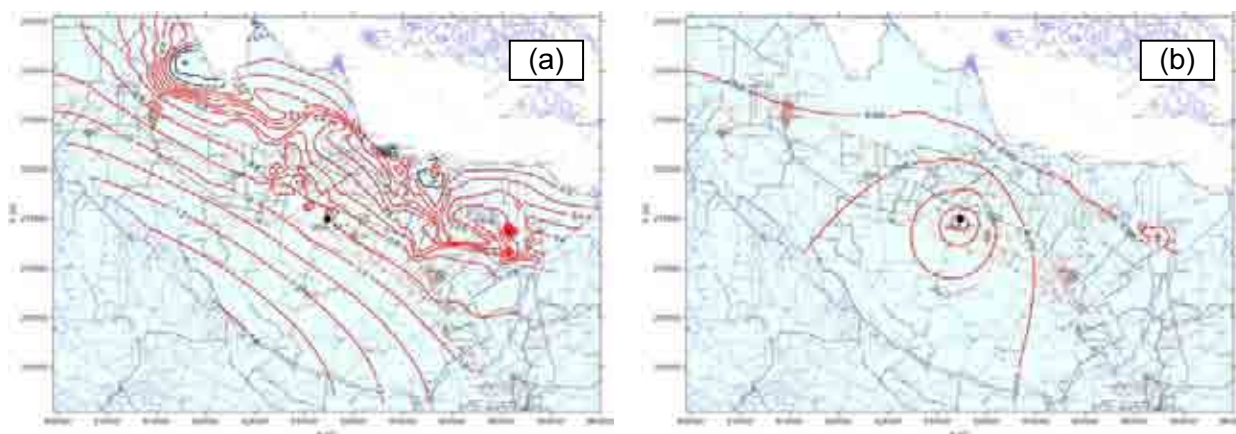


図 4-17: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新規水源開発シナリオ 1、第 17 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

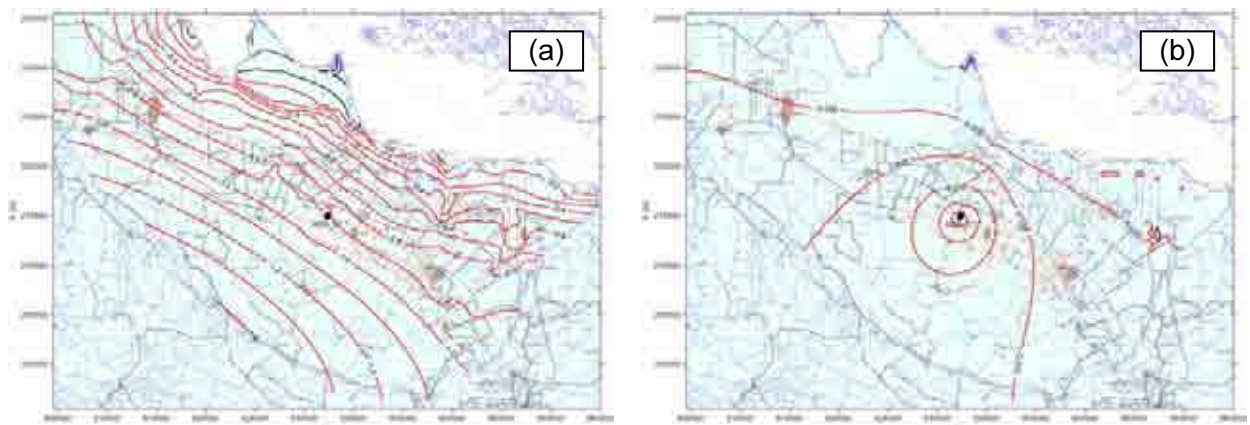


図 4-18: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新規水源
開発シナリオ 2、第 11 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

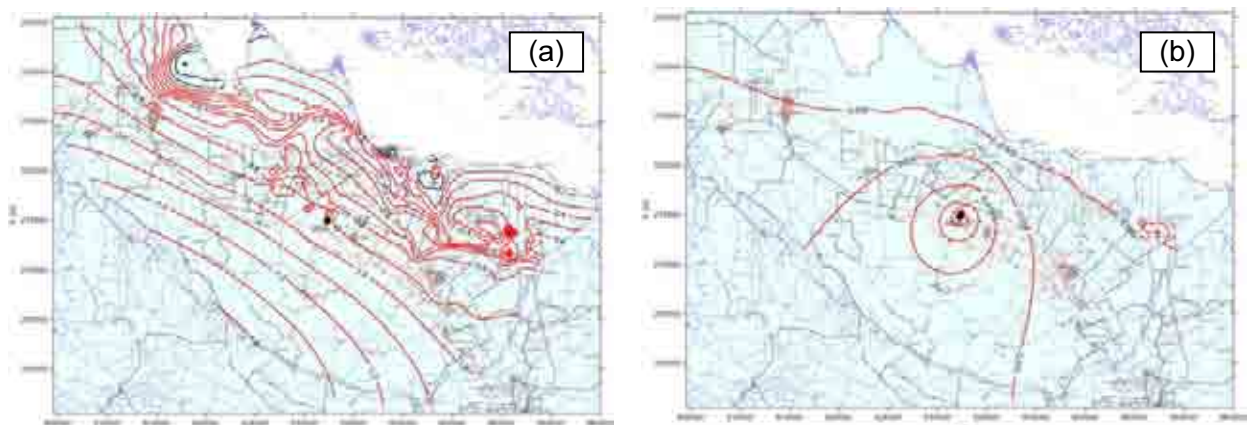


図 4-19: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う地下水位低下予測解析事例(新規水源
開発シナリオ 2、第 17 層)

(単位:m、赤線:地下水位低下、黒線:地下水位上昇)

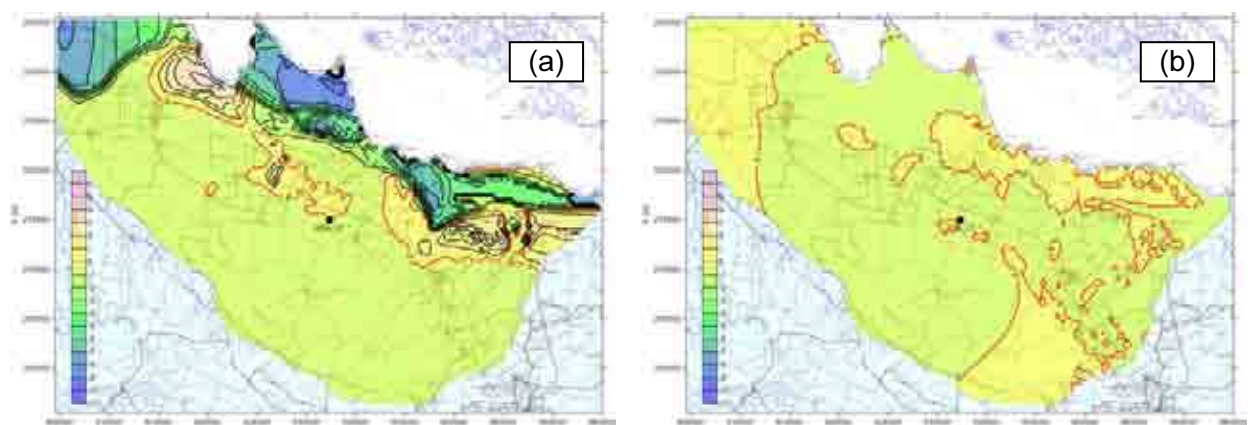


図 4-20: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う塩水濃度変化予測解析事例(新規水源
開発シナリオ 1、第 11 層)

(単位:kg/m³)

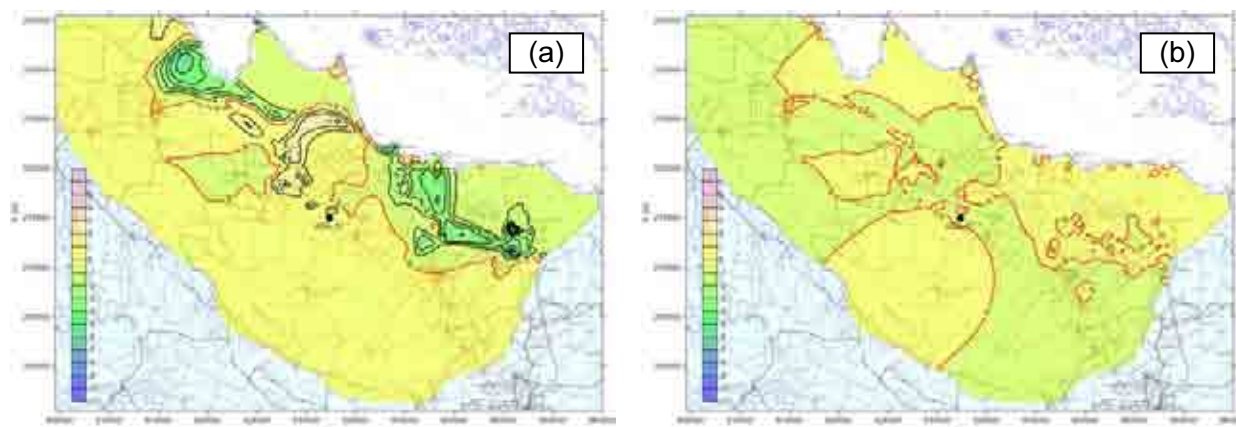


図 4-21: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う塩水濃度変化予測解析事例(新規水源
開発シナリオ 1、第 17 層)

(単位: kg/m^3)

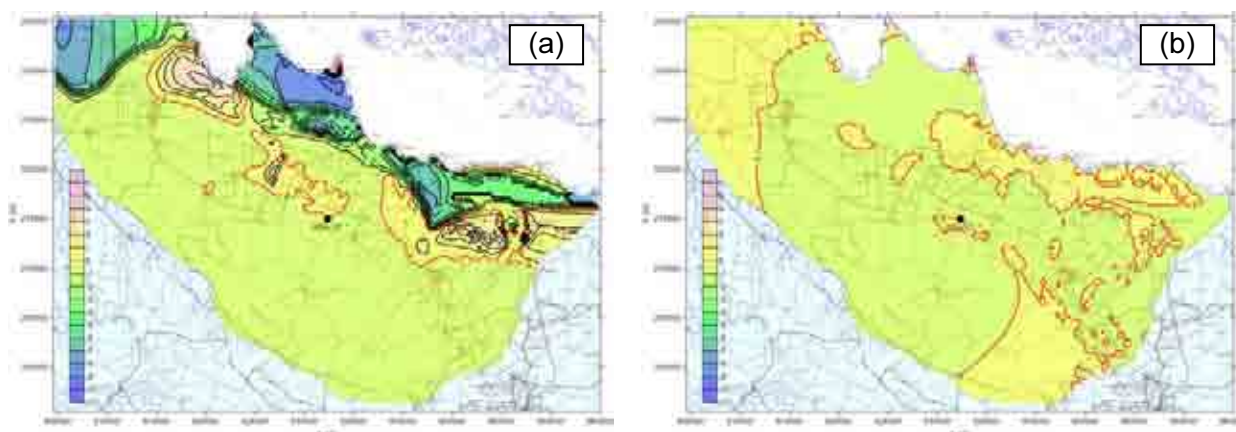


図 4-22: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う塩水濃度変化予測解析事例新規水源
開発(シナリオ 2、第 11 層)

(単位: kg/m^3)

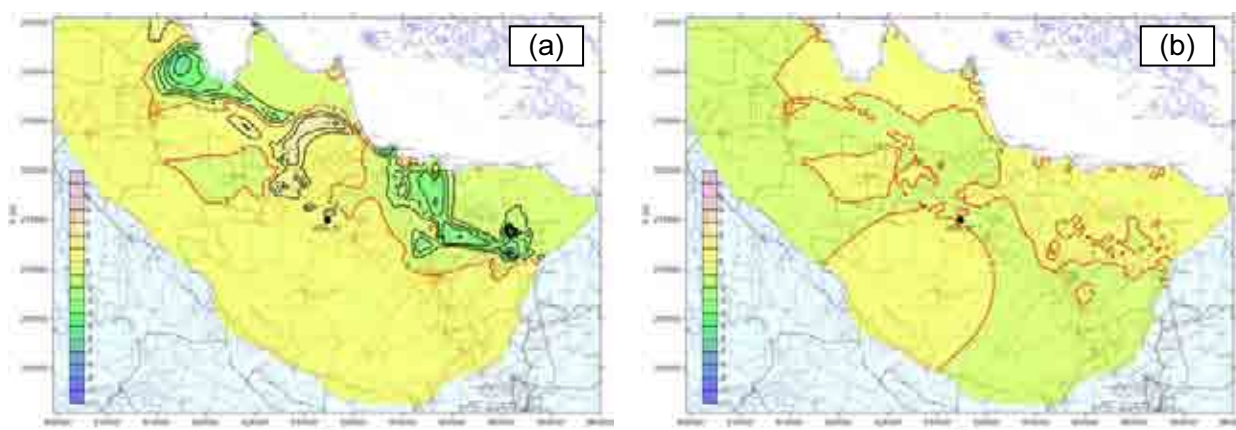


図 4-23: SEAWAT による新規水源(井戸)開発に伴う塩水濃度変化予測解析事例(新規水源
開発シナリオ 2、第 17 層)

(単位: kg/m^3)

4.3 予測解析に基づく地下水開発・管理への提言

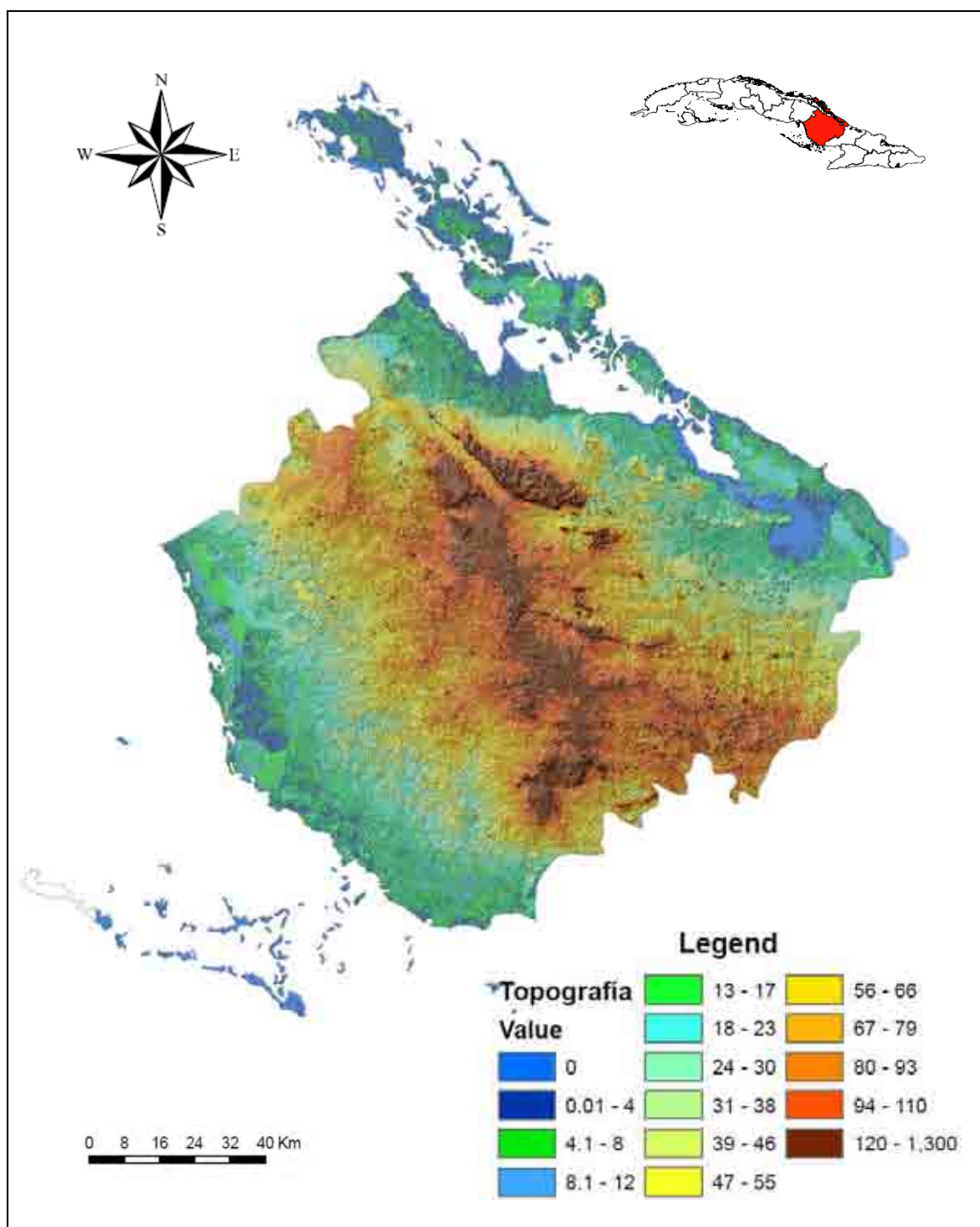
第4.1節のケース1～6及び第2節の新規水源開発シナリオ1～2の結果から得られるソラ地区における地下水開発・管理への提言を、以下にまとめる。

- (1) 休止している揚水施設が再稼動を始めて2002年当時の揚水量に戻った場合、試掘地点JICA_01の東～北東側で地下水位の低下が大きくなる。このため、他地域と比べてこの地域の揚水量変化・地下水位変化には十分に注意を払い、モニタリング体制を整えておくことが望ましい。
- (2) JICA_01の北西側には地下水位の低い地域（地下水位分布では谷状を呈する地域）が認められる。特に第17層では、この地域の塩分濃度が高く、塩水浸入も進行している予測解析結果となっており、深所の地下水開発の前に十分な調査・解析を行うことが望ましい。
- (3) 上記2地域を除くJICA_01周辺では、1,400m³/日程度の地下水開発を行っても周辺地域への影響は小さい。
- (4) 従来、地下水開発に適さないと言われてきたソラ市街地の東側から北東側のNuevitas層分布域は、本解析においても涵養量や揚水量の変化によって地下水位や塩分濃度が影響を受け易い結果となった。(2)の地域と同様に、この地域で地下水開発を行う場合には、十分な調査・解析を行うことが望ましい。

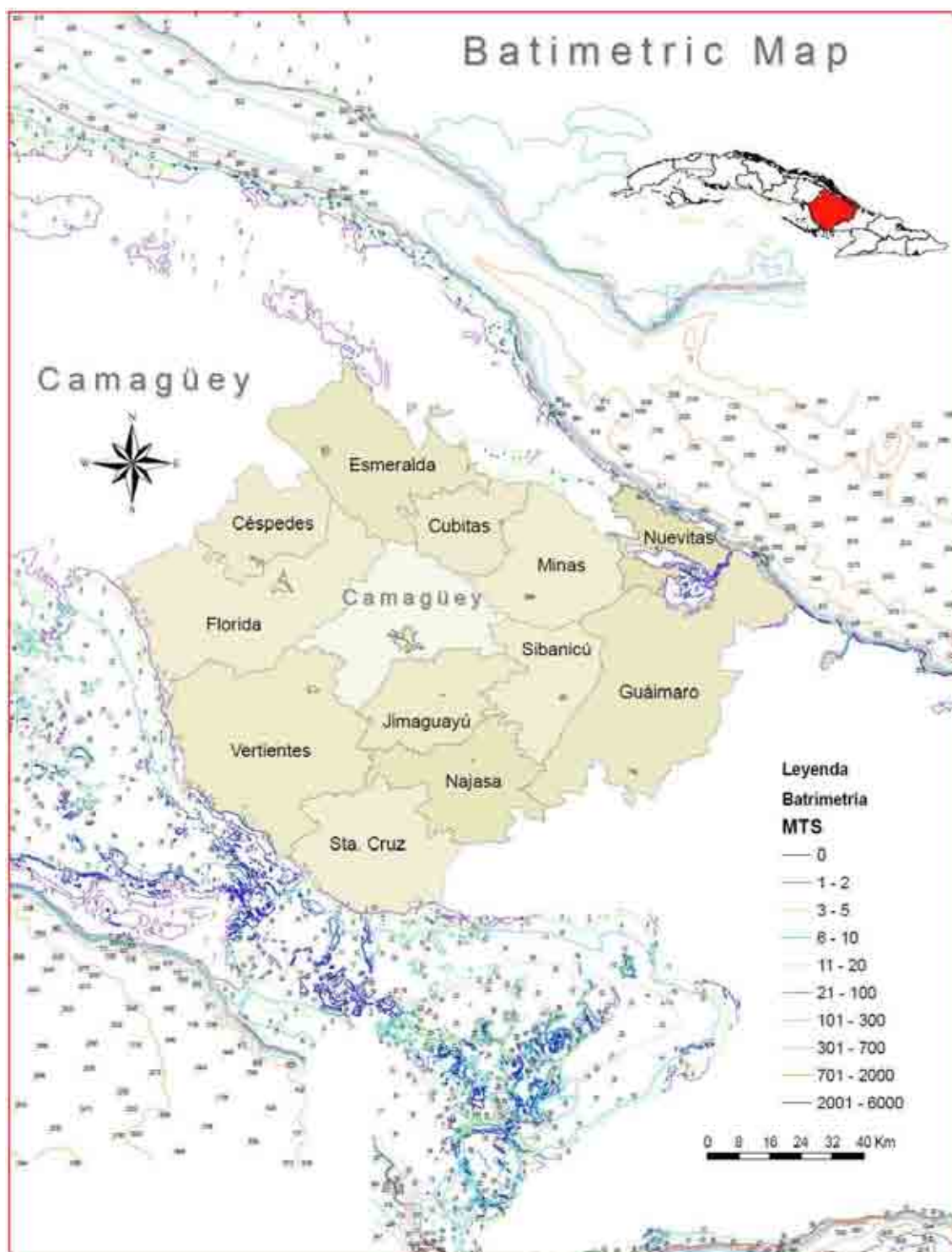
1.3 GISで作成した図面類の例

カマグエイ県

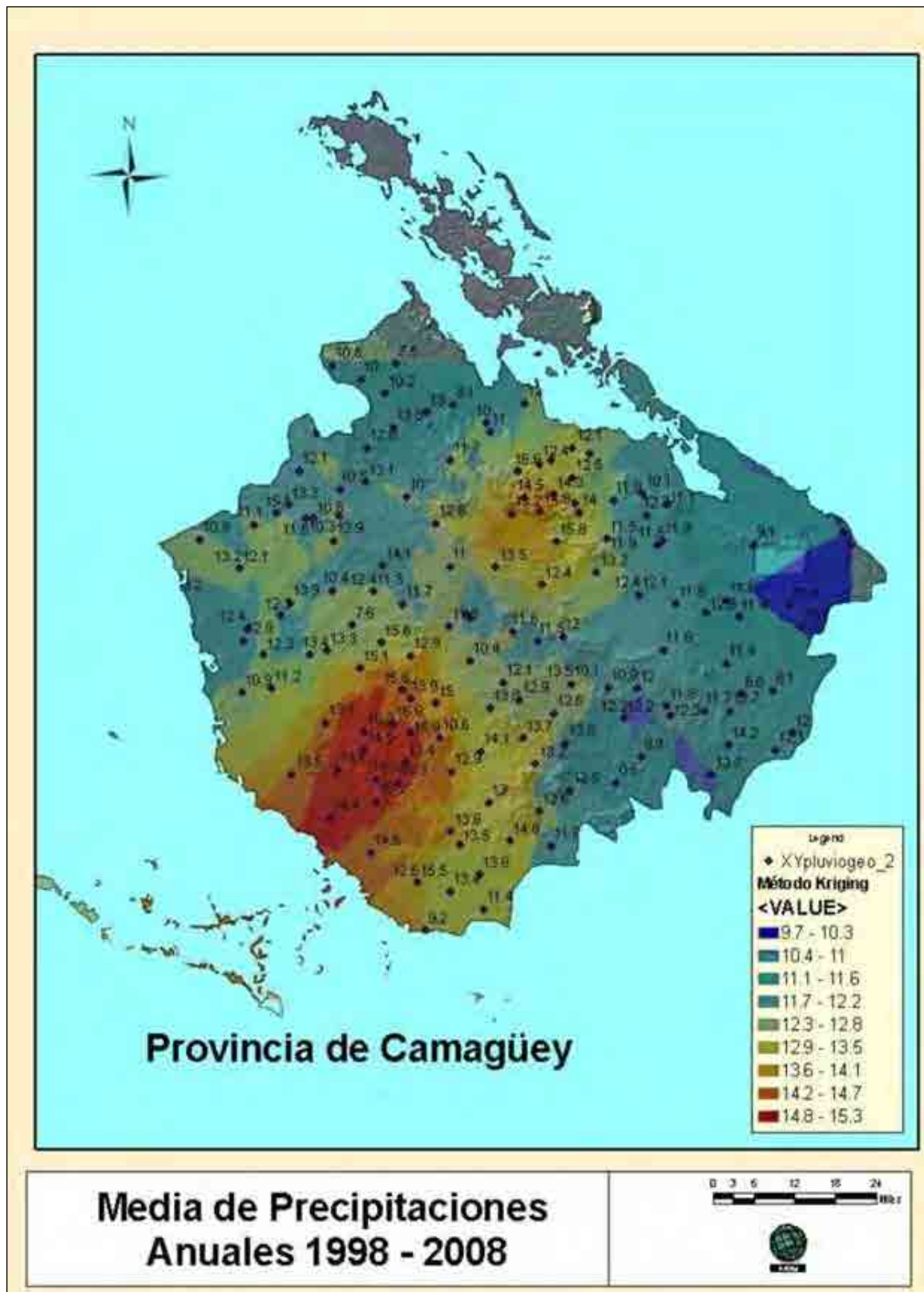
Topography Map of Camaguey Province



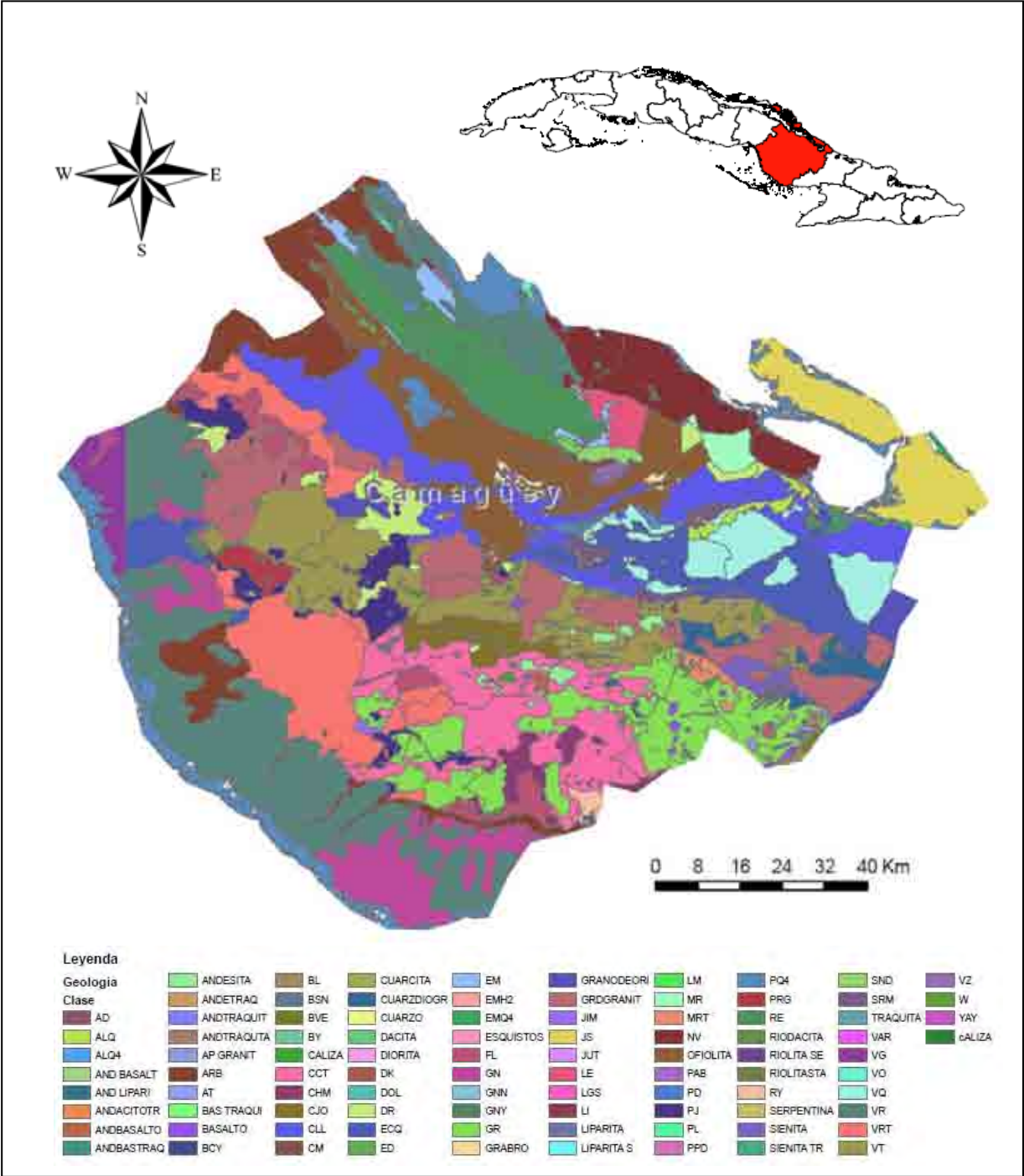
Depth of Sea Bottom Around Camaguey Province



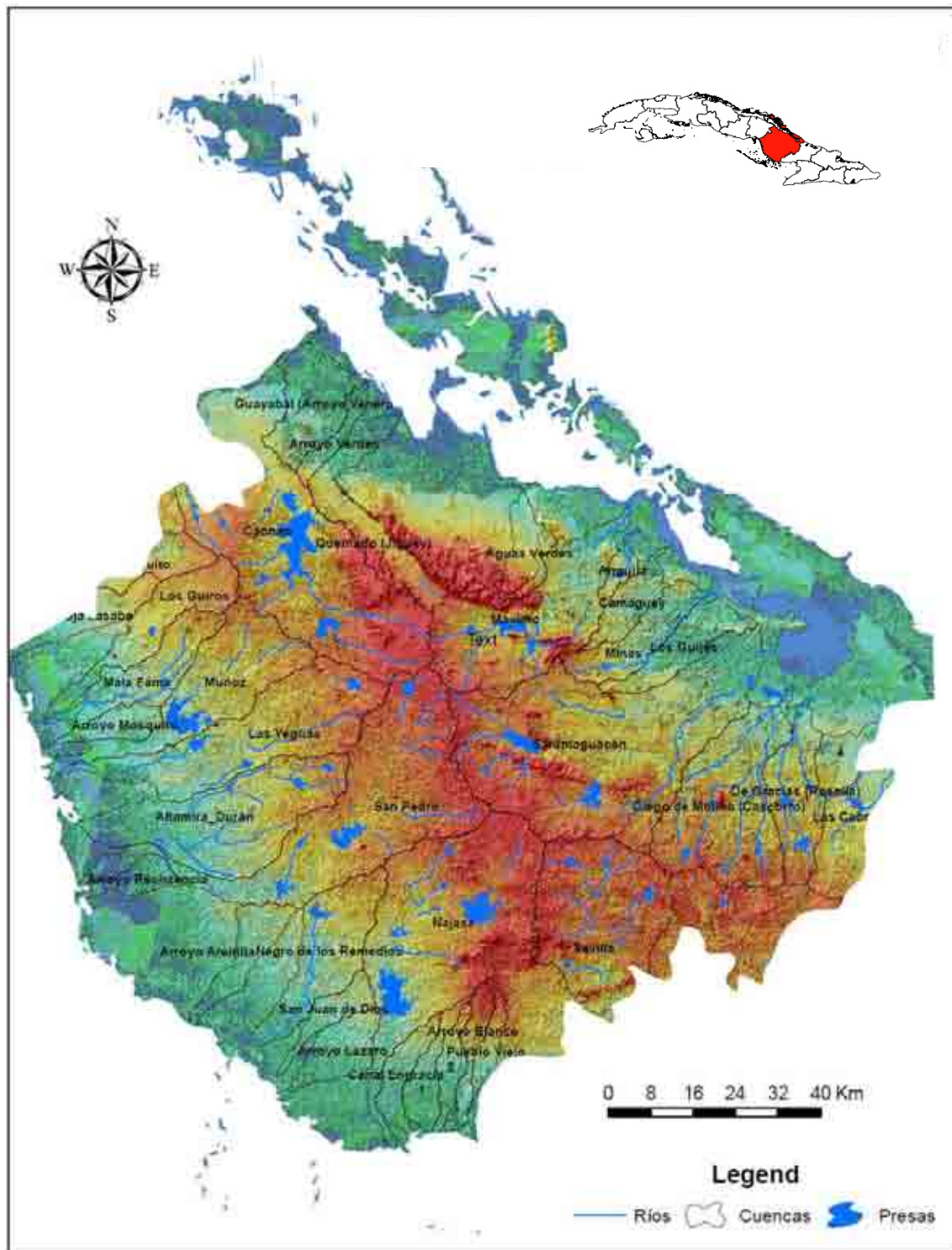
Average Precipitation in Camaguey Province

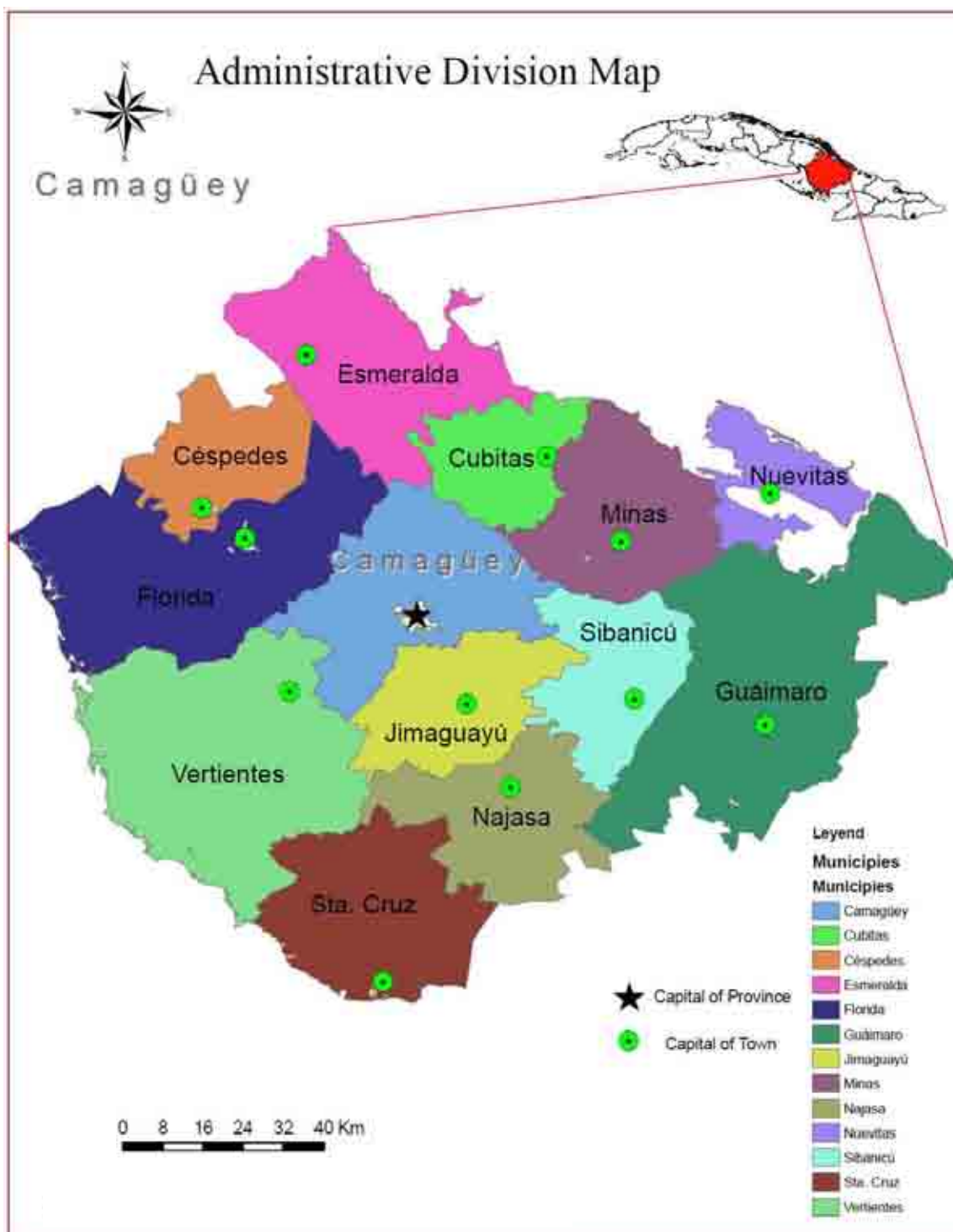


Geology Map of Camaguey Province

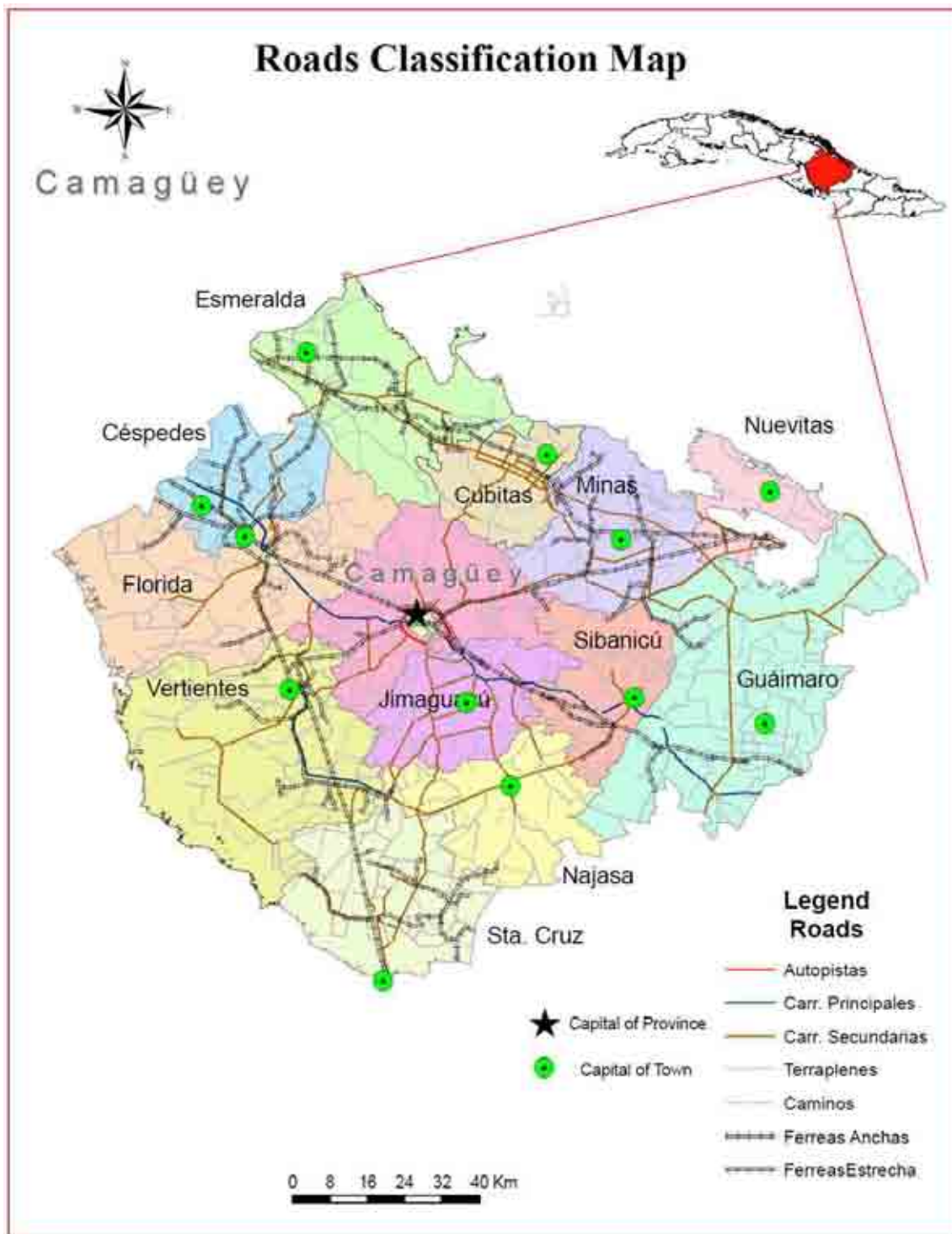


Topography, Rivers and River Basins in Camaguey Province





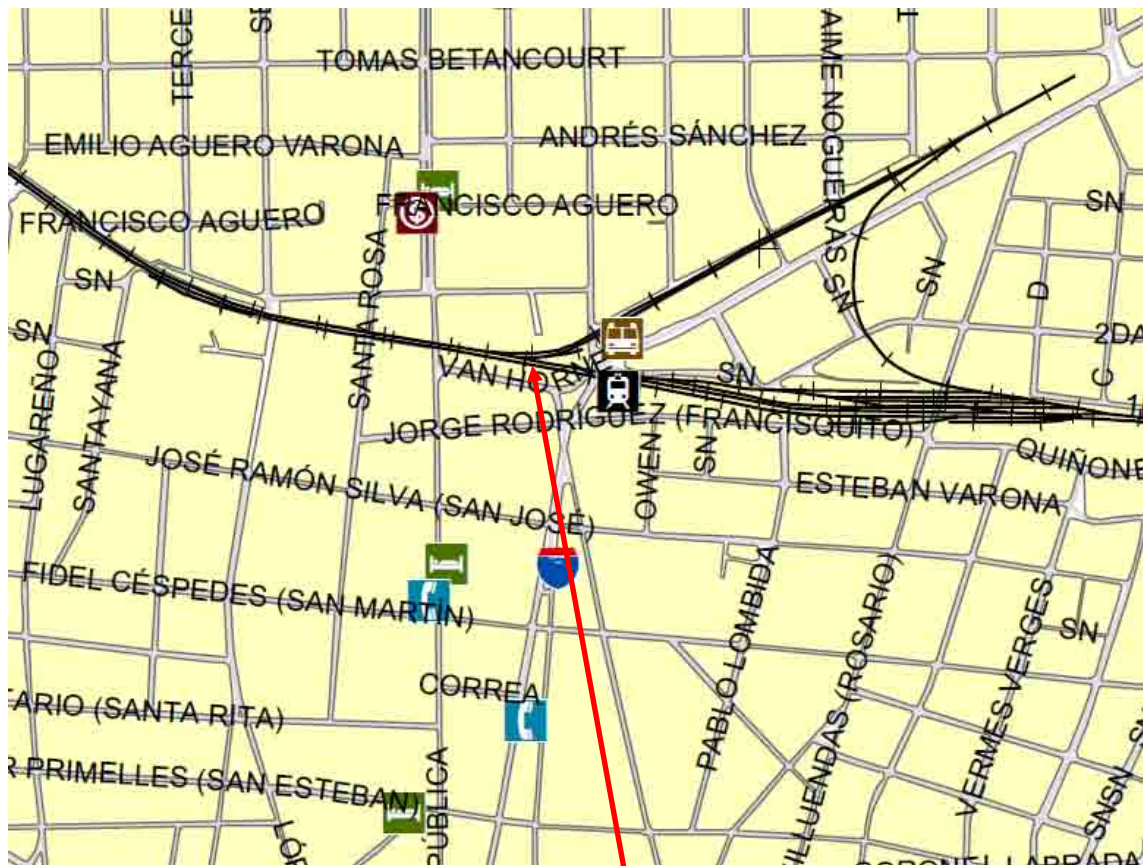
Road Map of Camaguey Province



Population Density Map of Camaguey Province

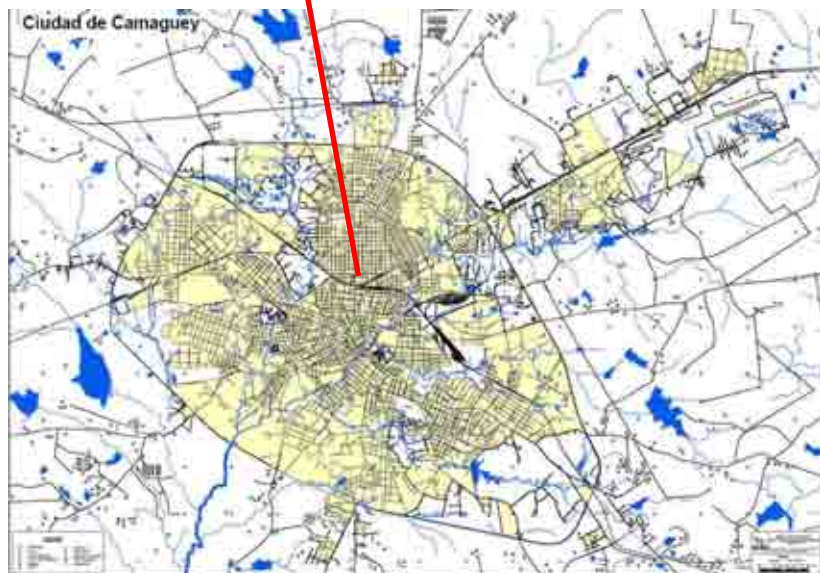


Camaguey City Map



Leyenda

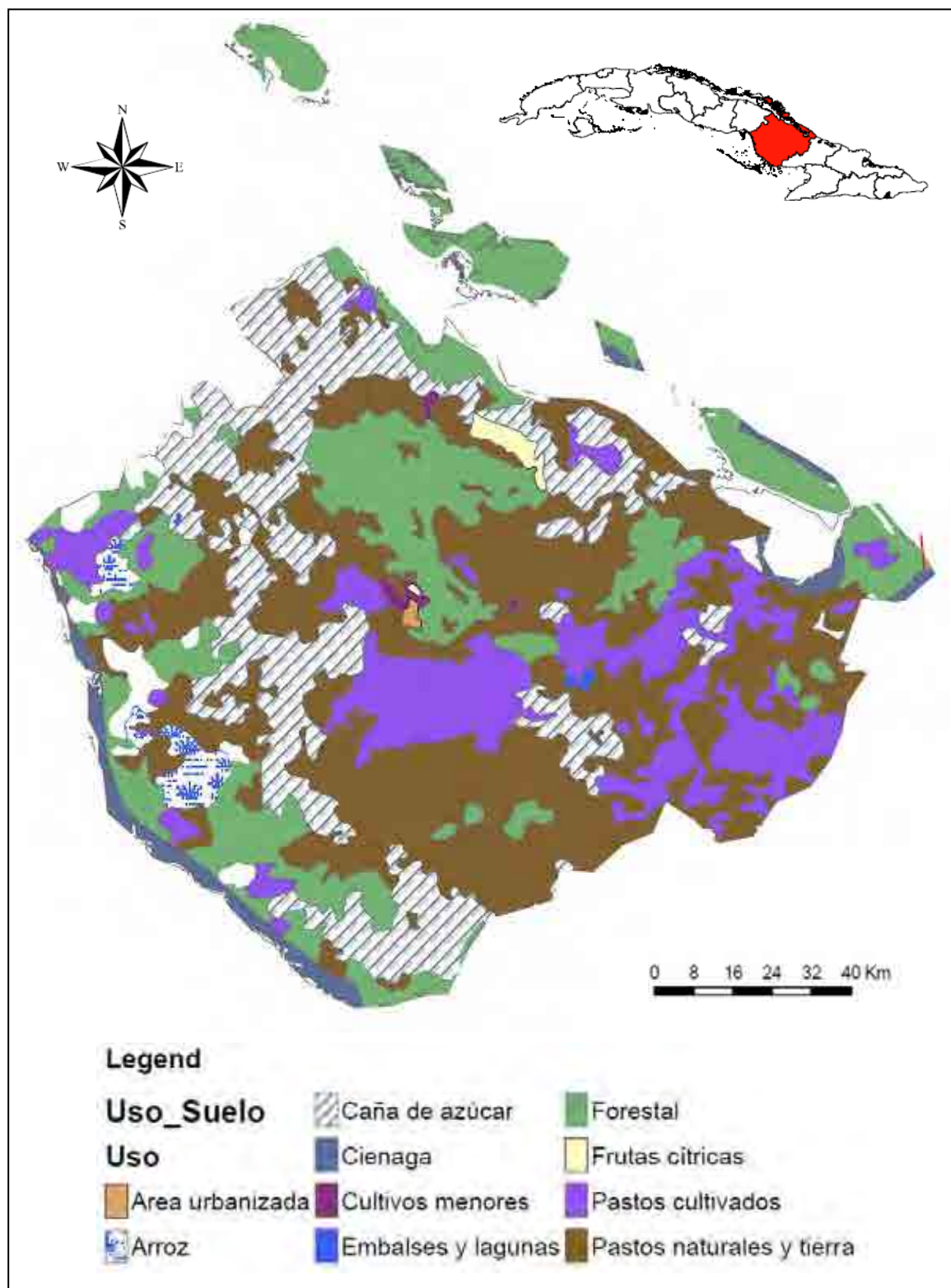
- Aeropuerto
- Banco
- Centro Telefónico
- Centro de Enseñanza
- Hospital
- Hotel
- Policlinico
- Servicentro
- Terminal de Omnibus
- Terminal de Tren
- Unidad PNR



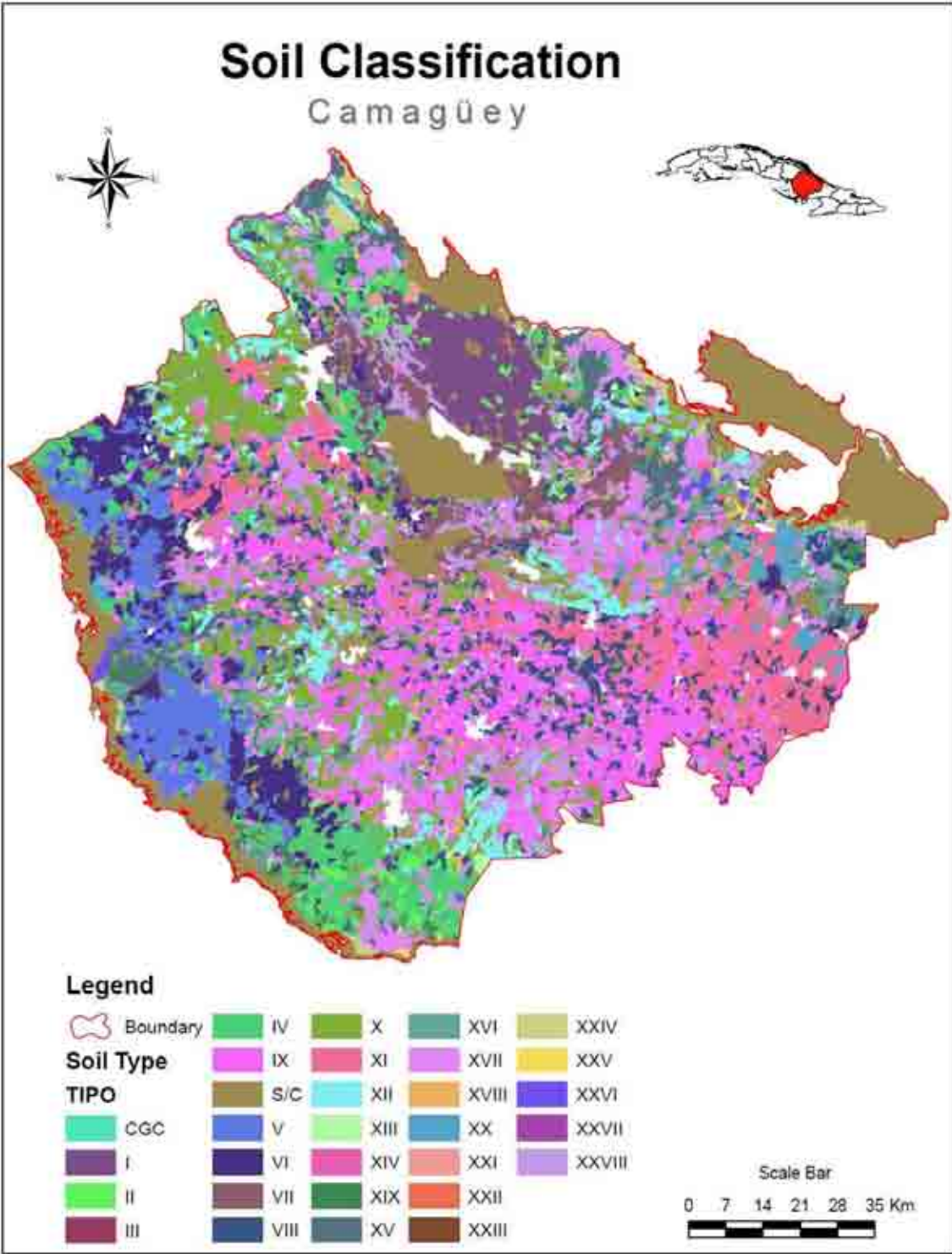
Electric Power Line Map of Camaguey Province



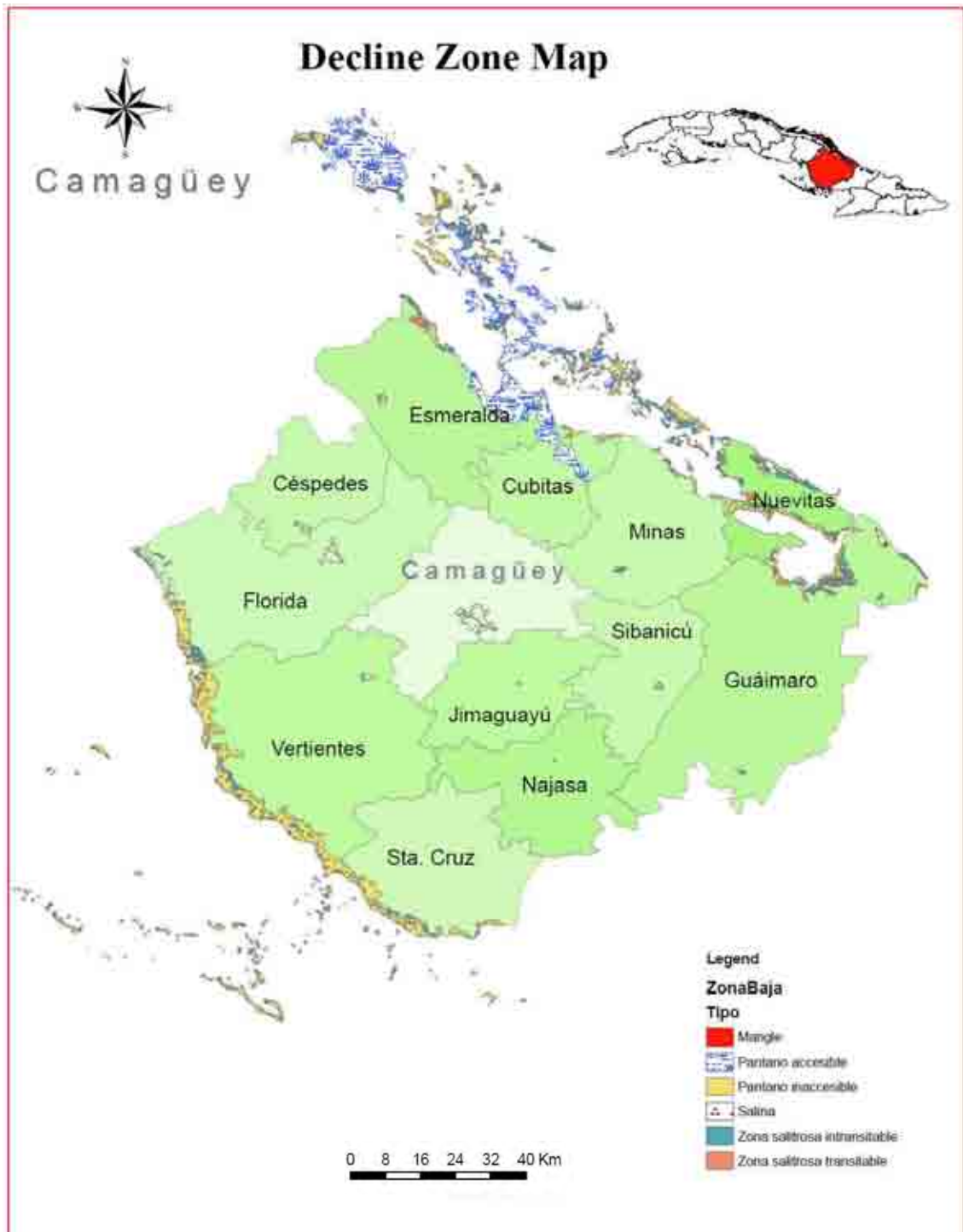
Land Use Map of Camaguey Province



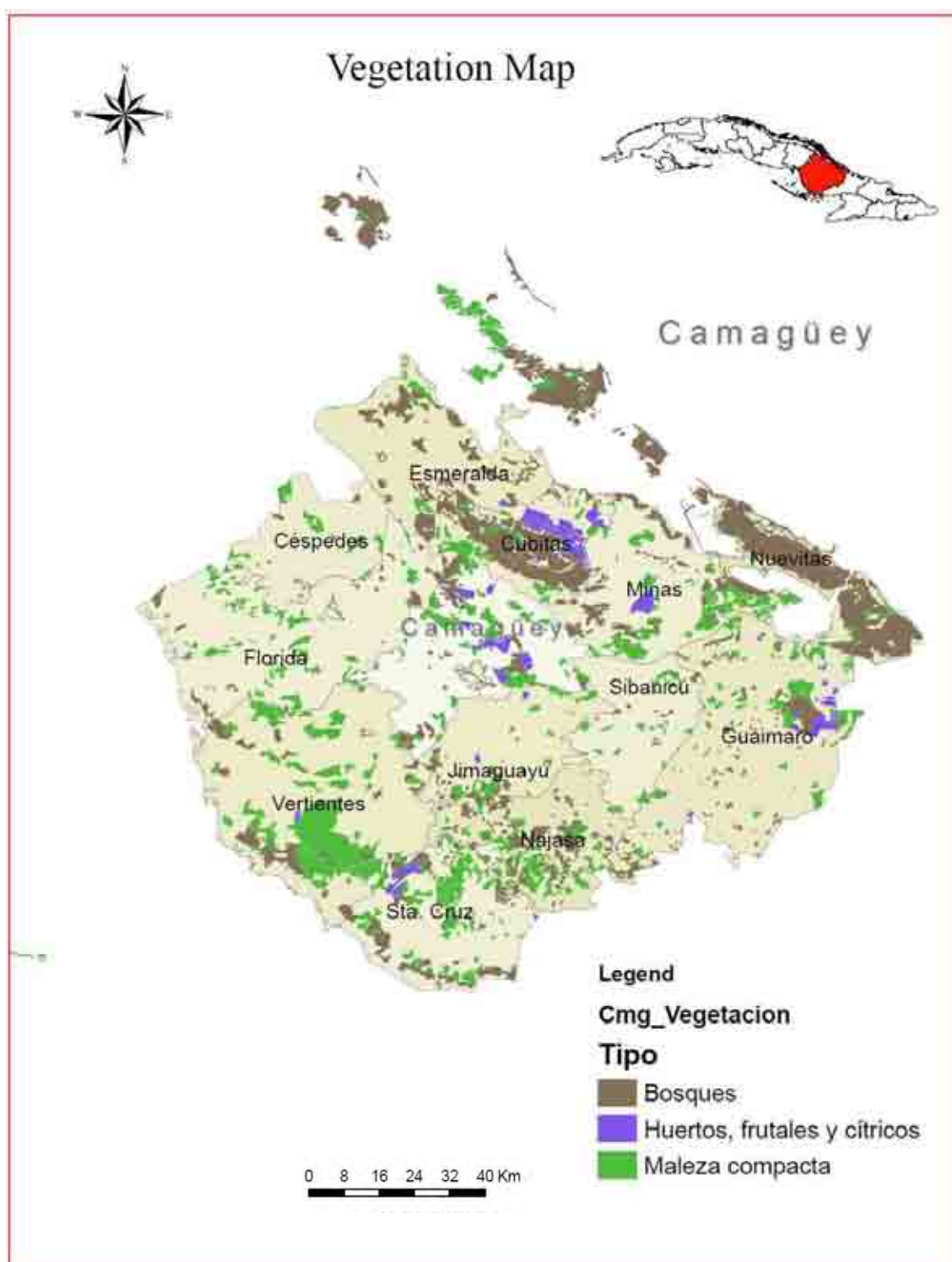
Soil Classification Maps of Camaguey Province

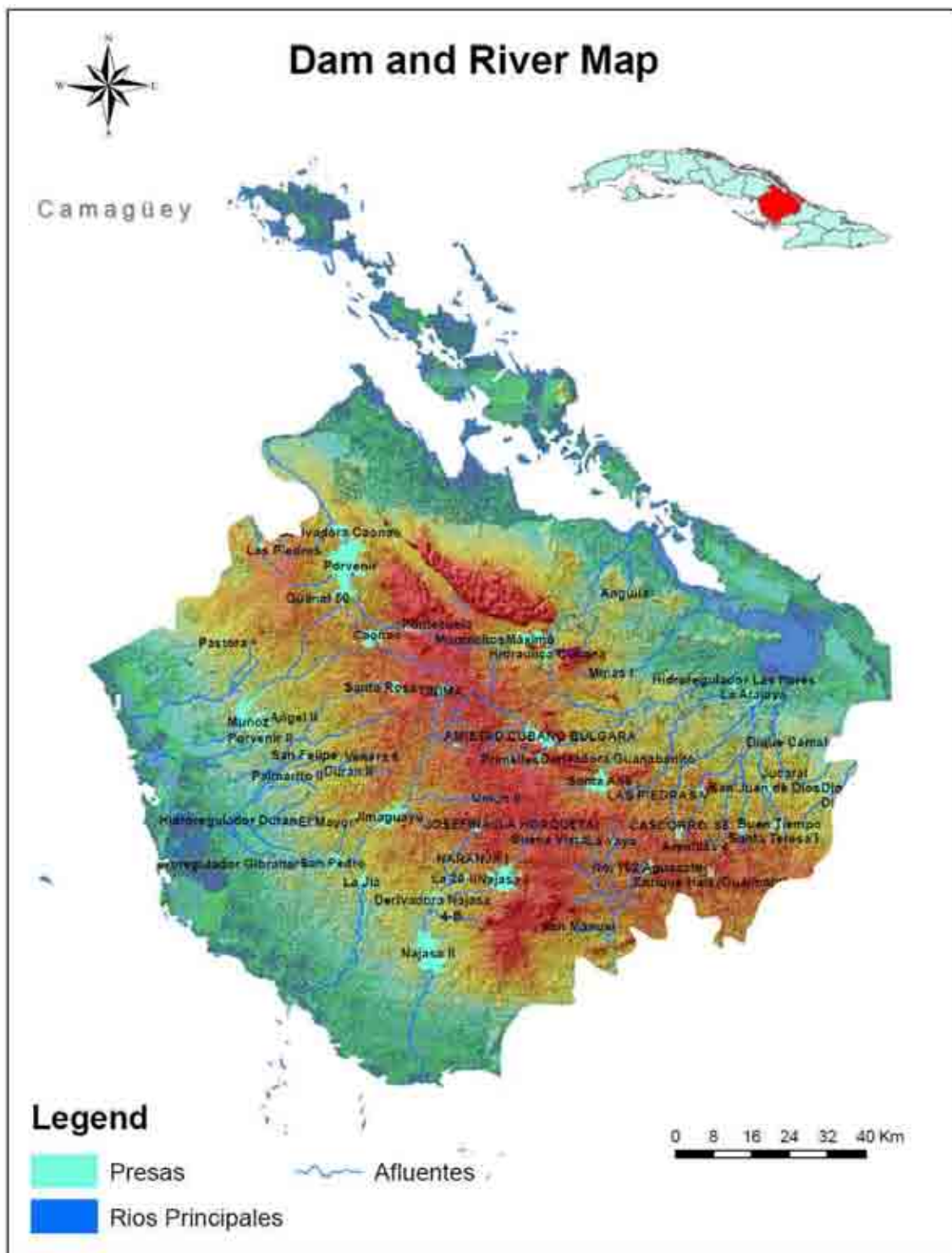


Vegetations Along the Sea Shore of Camaguey Province

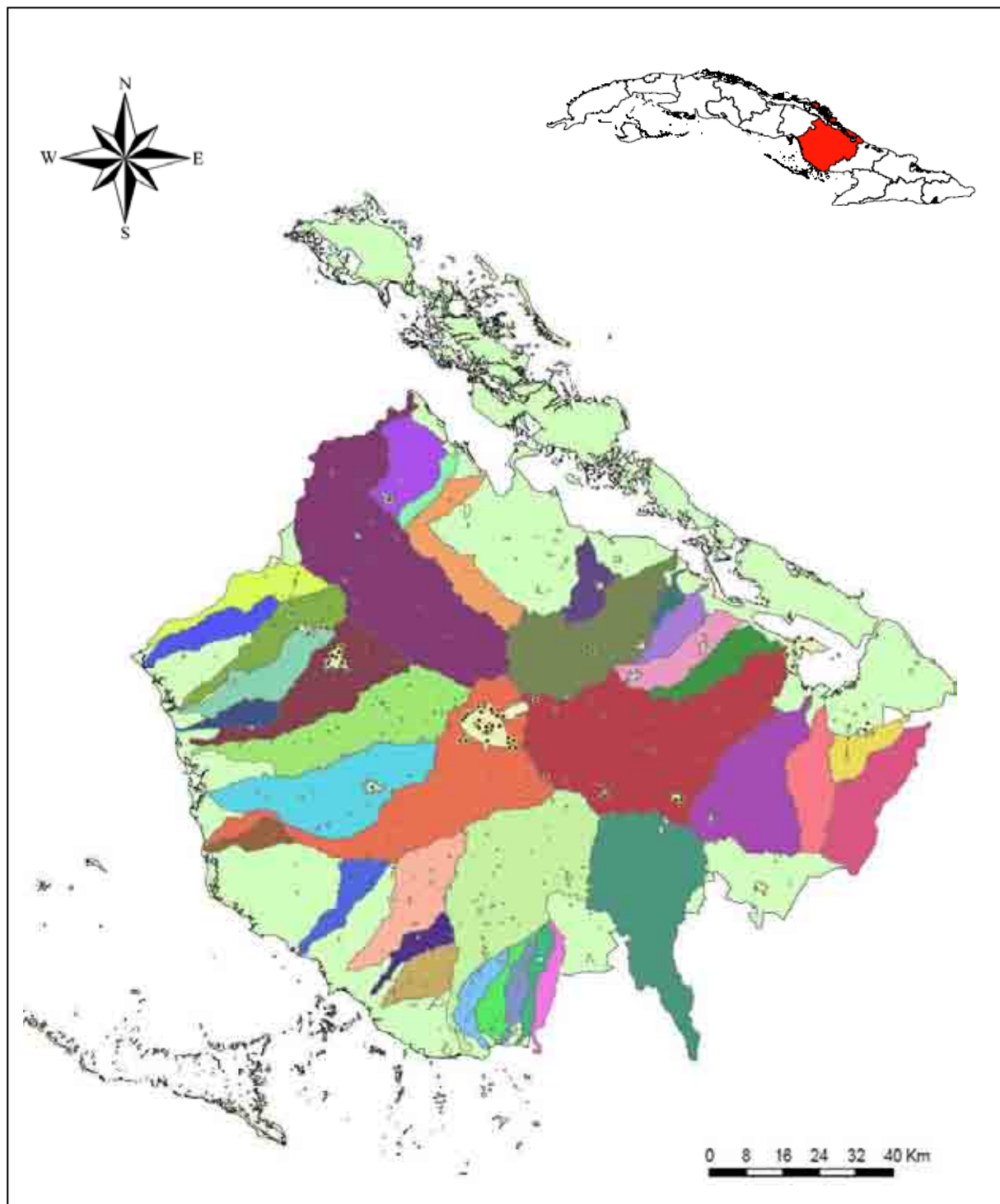


Vegetation Classification Map of Camaguey Province

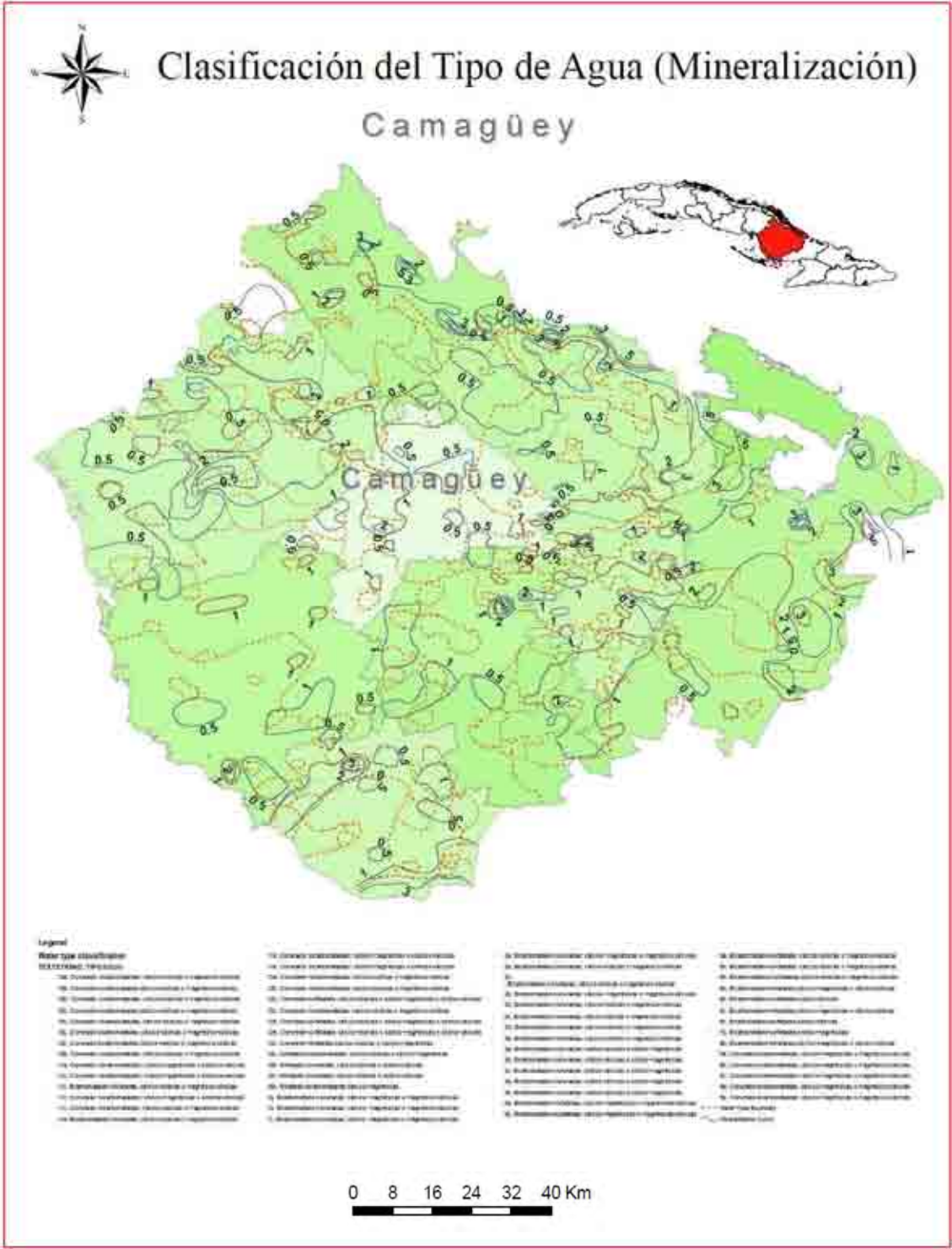




River Basins and Main Pollution Source Distribution Map of Camaguey Province



Type Classification of Groundwater Quality in Camaguey Province



Water: Soluble Solid Map

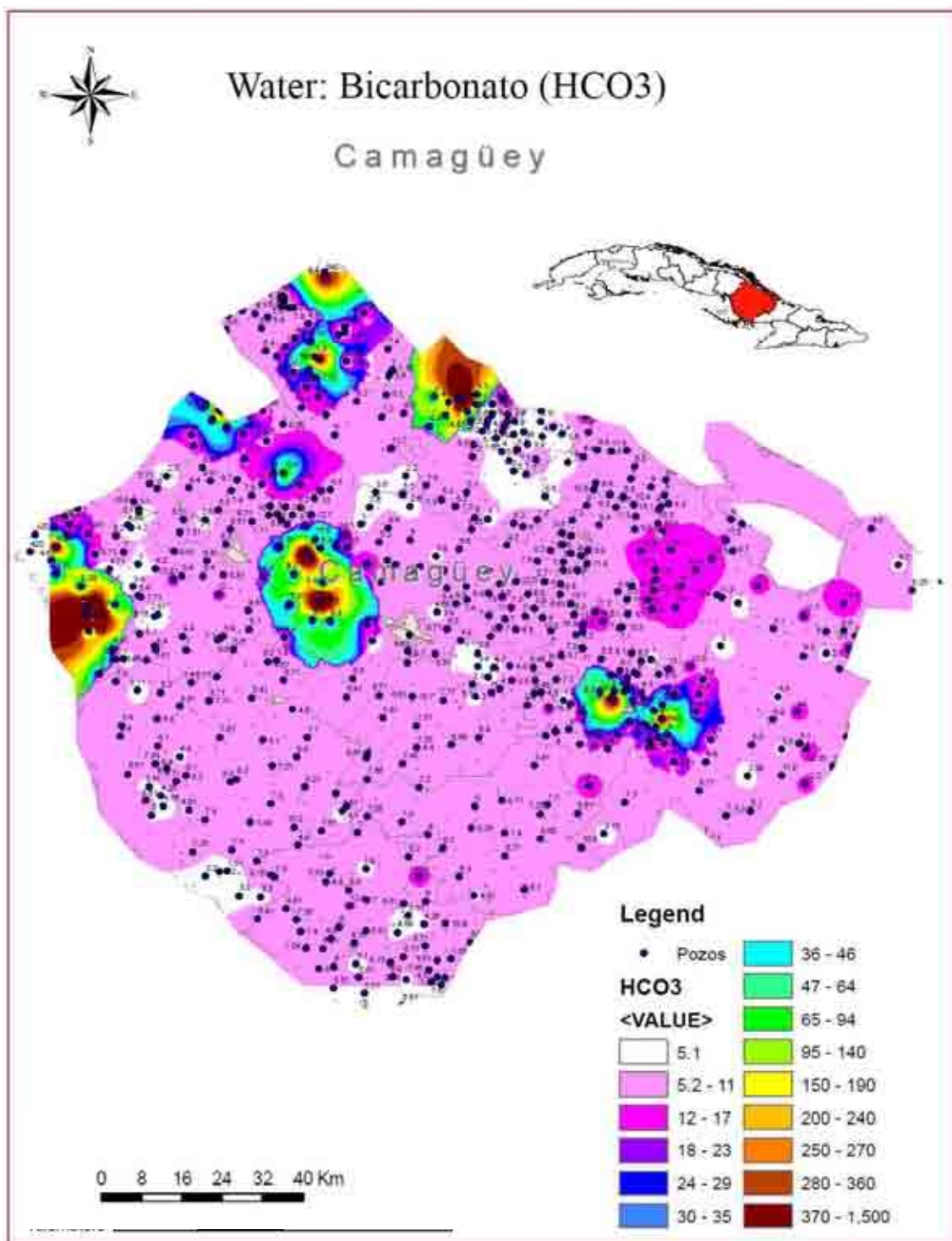
Camagüey

0 8 16 24 32 40 Km

Legend

Well	<VALUE>	210 - 300	610 - 700	1,100 - 1,100
IDW of Well	4.5 - 50	310 - 400	710 - 800	1,200
	51 - 100	410 - 500	810 - 900	1,300 - 1,300
	110 - 200	510 - 600	910 - 1,000	

Groundwater Quality (HCO_3) Distribution Map of Camaguey Province



Town and Village Distribution in Esmeralda Municipal , Camaguey Province

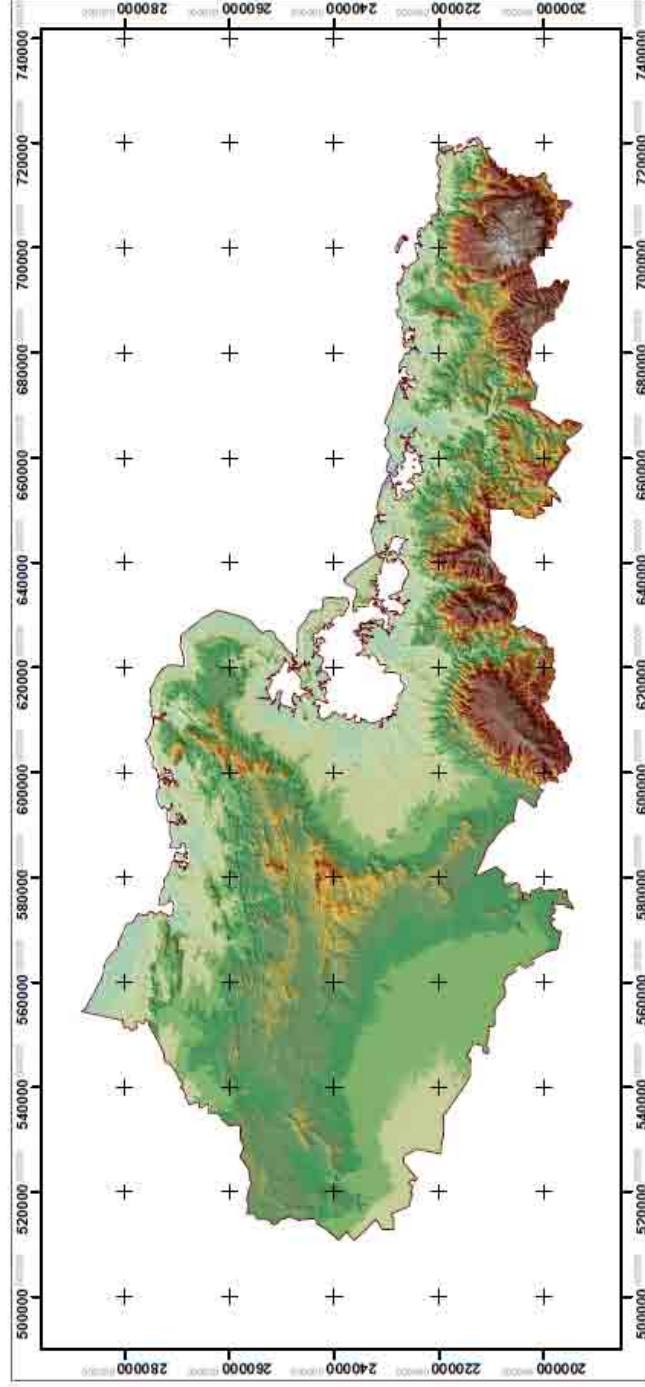


[illegible]

オルギン県

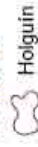
Topography Map of Province Holguín

Mapa Topográfico Provincia de Holguín

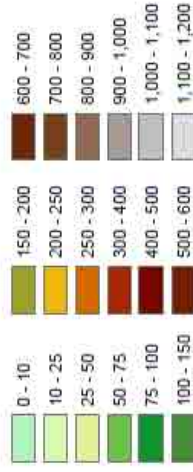


Leyenda

Fronteras



Relieve (m)



Proyecto de Cooperación Técnica
Mejoramiento de la capacidad de desarrollo y manejo del
agua subterránea para la adaptación al cambio climático
en la República de Cuba



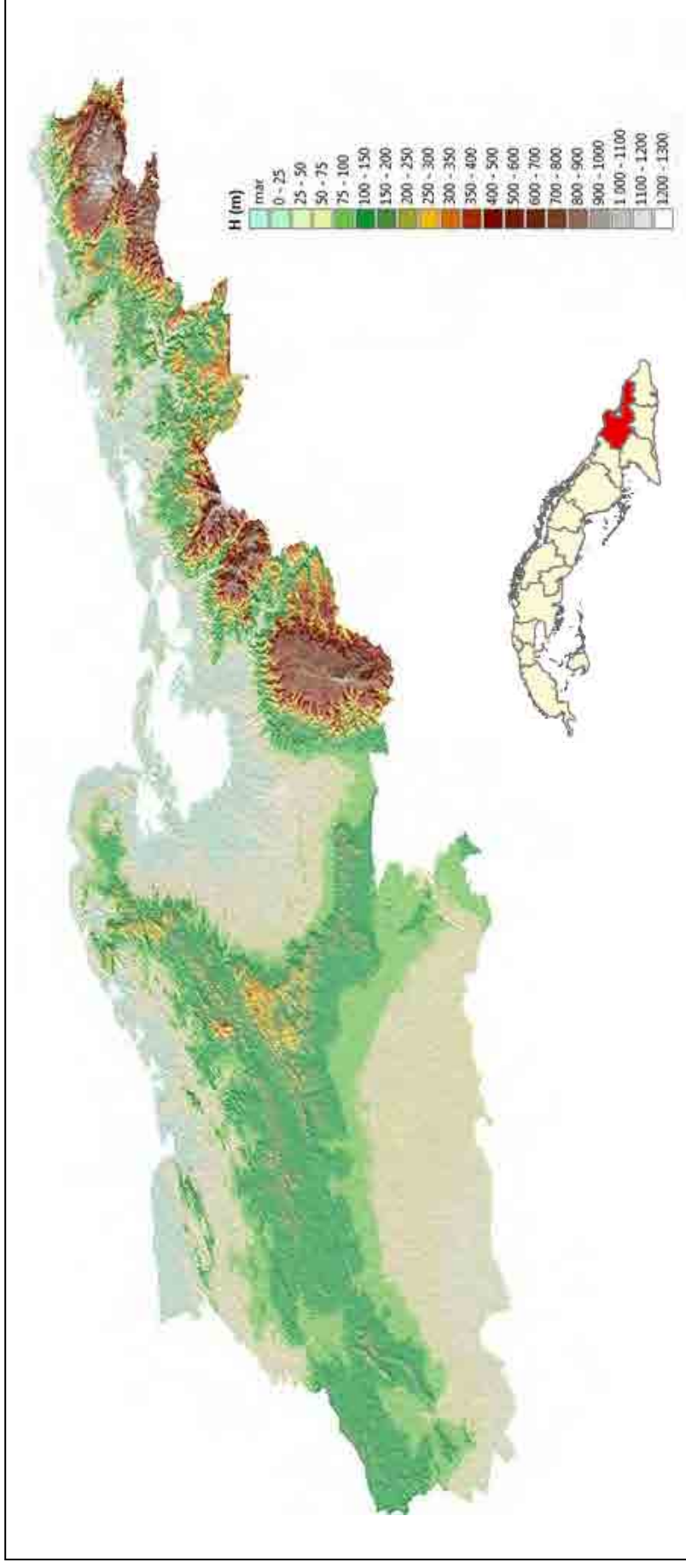
Creado por Grupo de Investigaciones RAUDAL

Escala

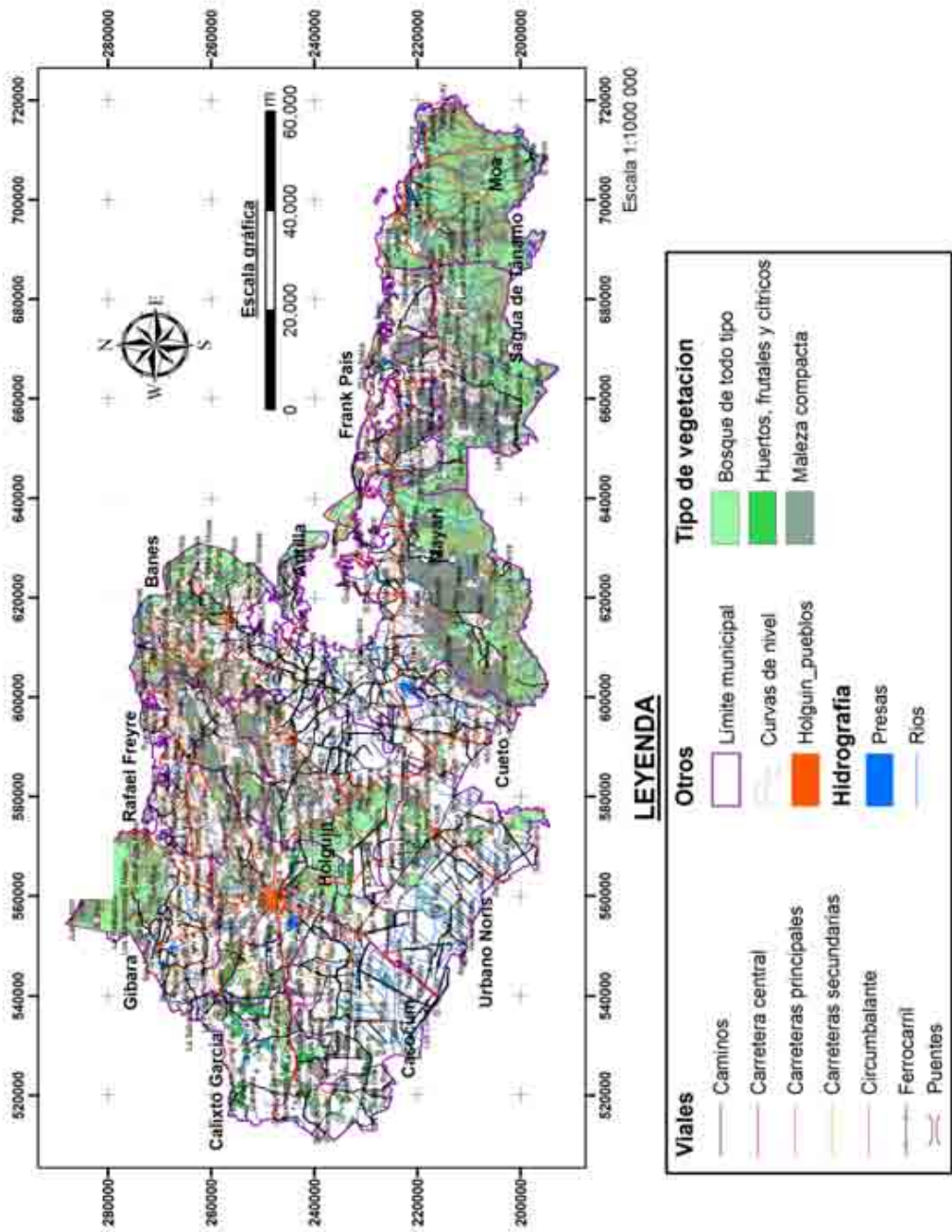
1: 1 000 000 1 cm = 10 km



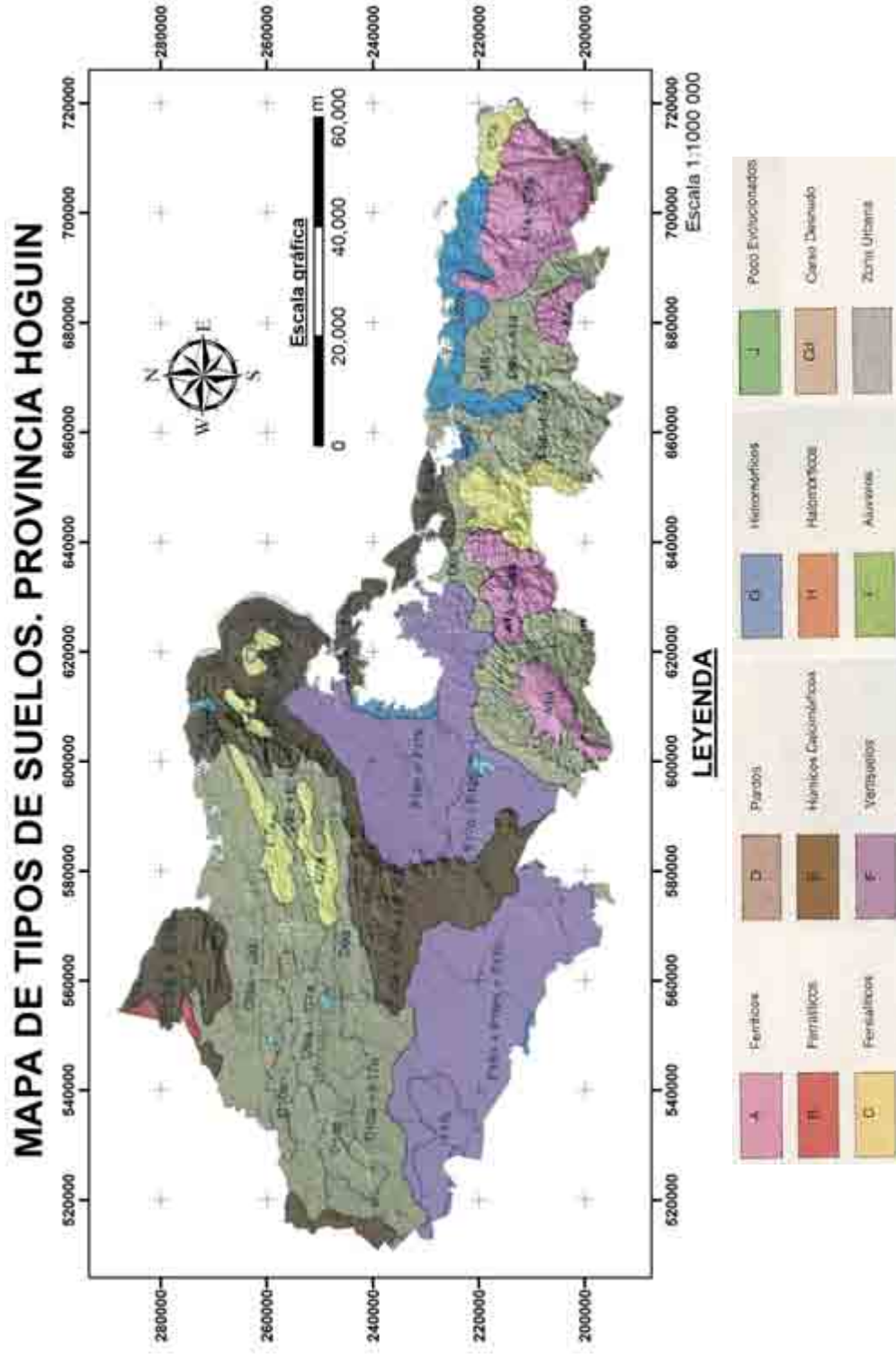
3 Dimensional Map of Province Holguin



Geographic Features of Province Holguin

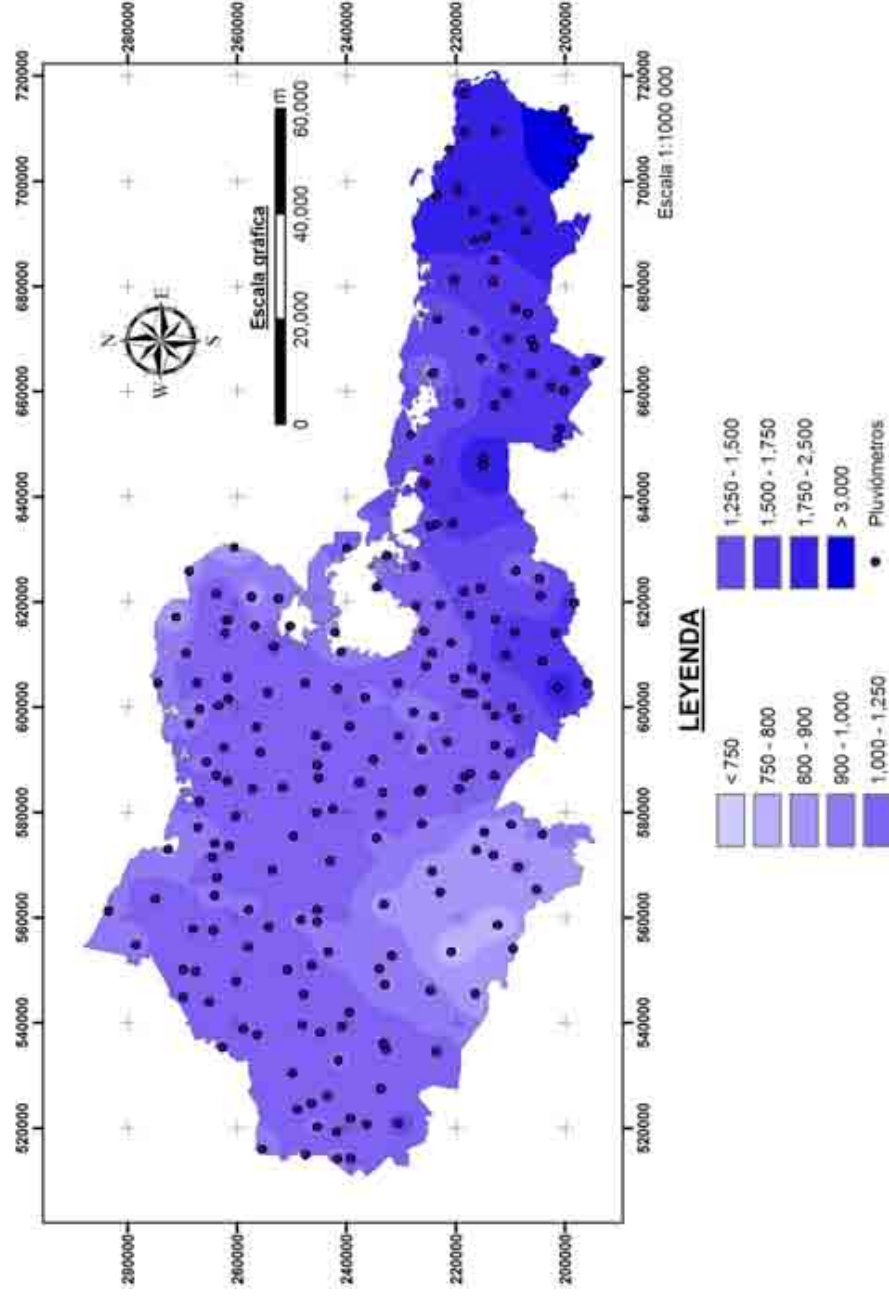


Soil Classification Map of Province Holguin



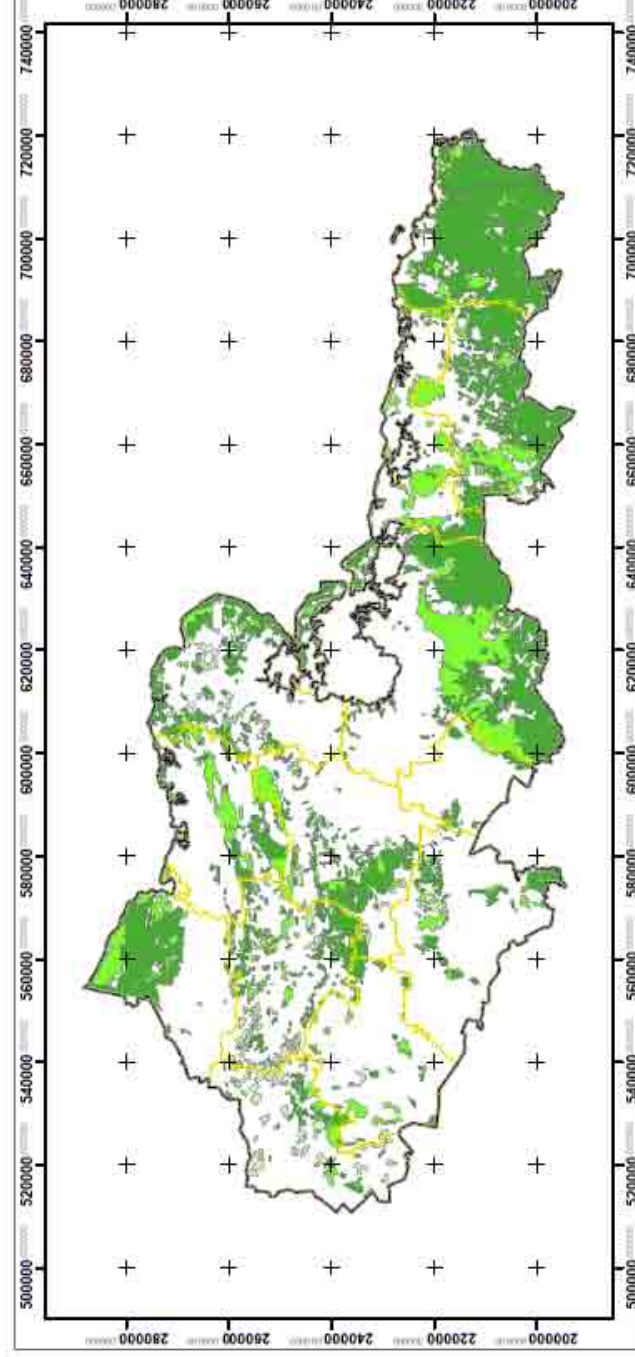
Average Precipitation Distribution in Province Holguín (2000-2011)

PRECIPITACIÓN MEDIA HIPERANUAL. PERIODO 2000-2011. PROVINCIA HOLGUÍN



Vegetation Distribution Map in Province Holguín

Mapa de Vegetación Provincia de Holguín



Leyenda

- Fronteras**
- Holguín
 - Municipios
- Vegetación**
- Bosque de todo tipo
 - Huertos, frutales y cítricos
 - Maleza compacta

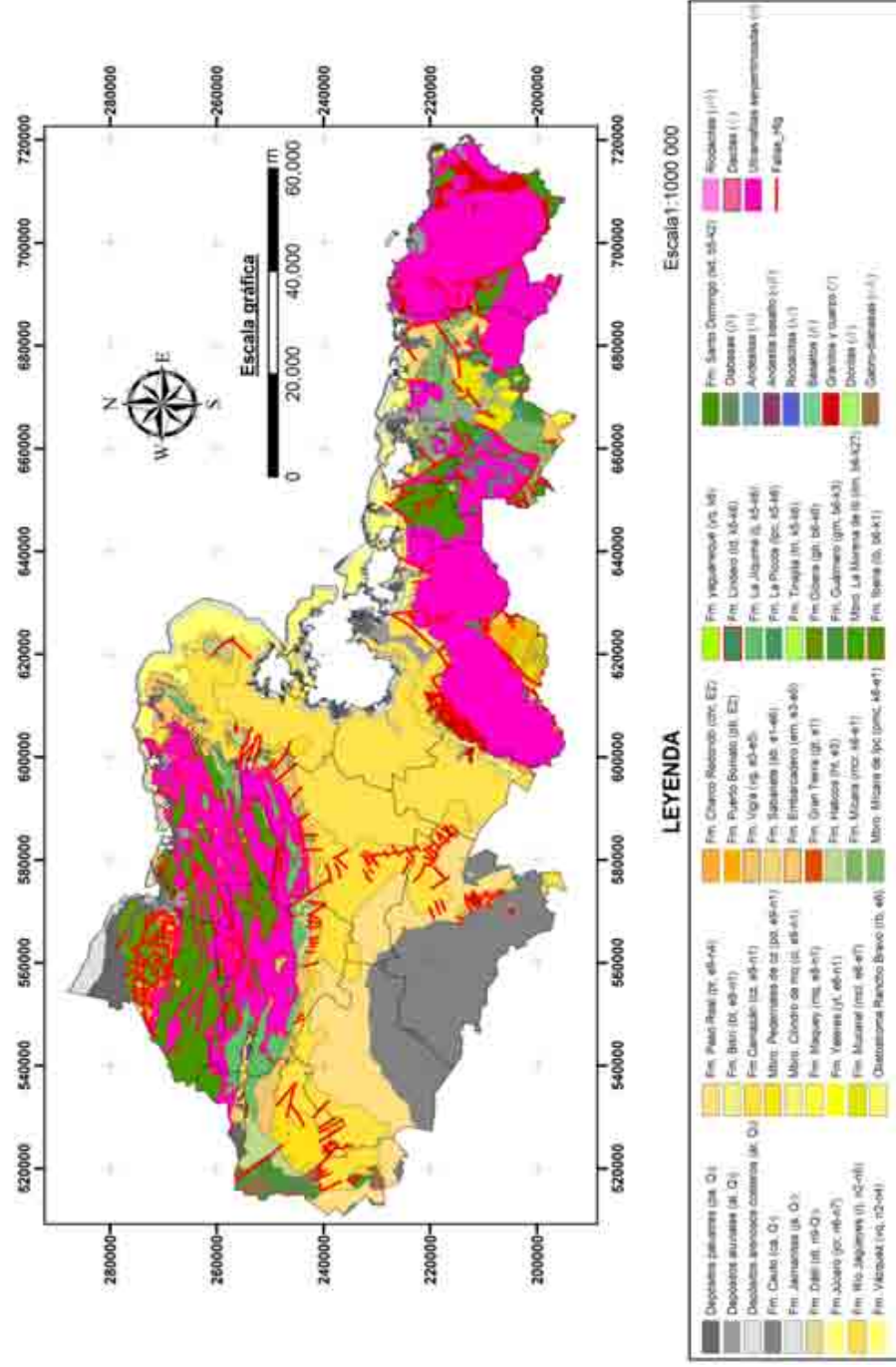
Proyecto de Colaboración Técnica
Mejoramiento de la capacidad de desarrollo y manejo del
agua subterránea para la agricultura y cambio climático
en la República de Cuba

JICA

Creado por Grupo de Investigaciones RAUDAL

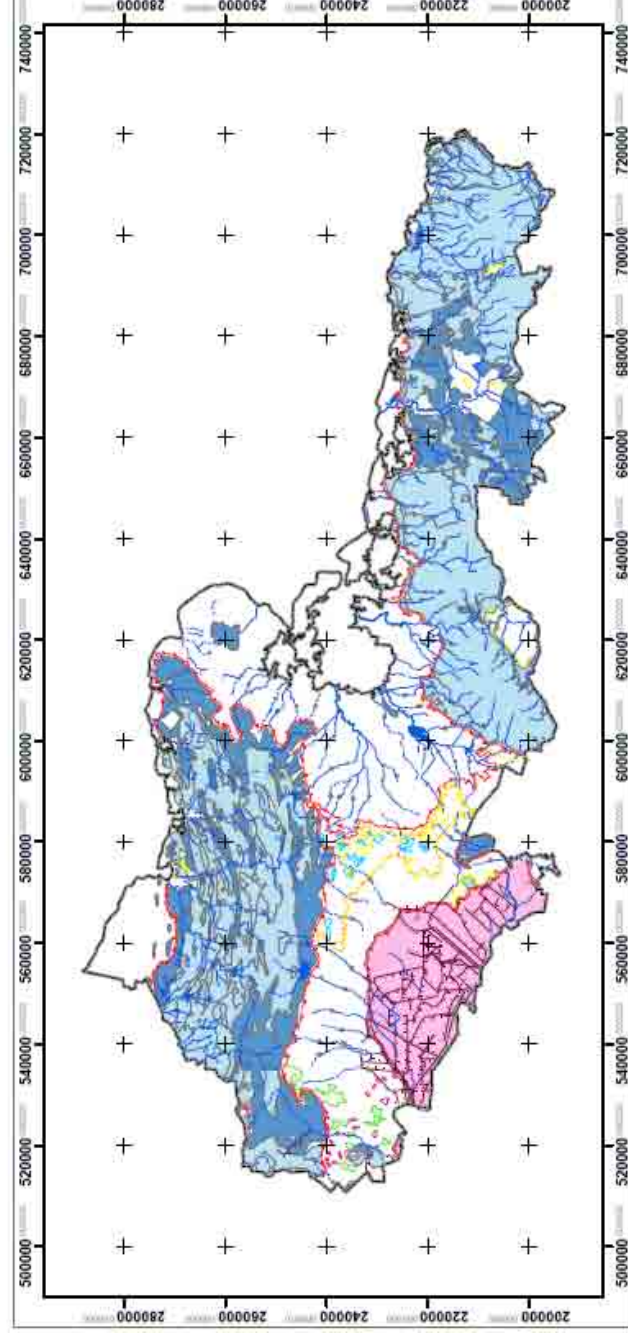
Escala
1: 1 000 000 1 cm = 10 km
10 0 10 20 30 40 Km

MAPA GEOLÓGICO DE LA PROVINCIA HOLGUÍN



Groundwater Basin Division Map in Province Holguín

Mapa Hidrogeológico Zonación de Acuíferos Provincia de Holguín



Legenda

Fronteras
Holguín

Hidrografía
Ríos
Arroyo
Canal
Embalses

Acuíferos

Acuíferos en estratos
con recursos de agua
limitada
Acuíferos locales en
rocas fisuradas
Acuíferos sin recursos
de agua subterránea

Acuíferos Cársico

Límite de región cársica
Límite de sistema cársico
Campo de lapies
Dolina o uvala
Inselberg

Tipo de Ríos

Río cársico
Río transcorriente

Proyecto de Colaboración Técnica
Mejoramiento de la capacidad de desarrollo y manejo del
agua subterránea para la adaptación al cambio climático
en la República de Cuba

JICA
MAG
CUBA
AGUA

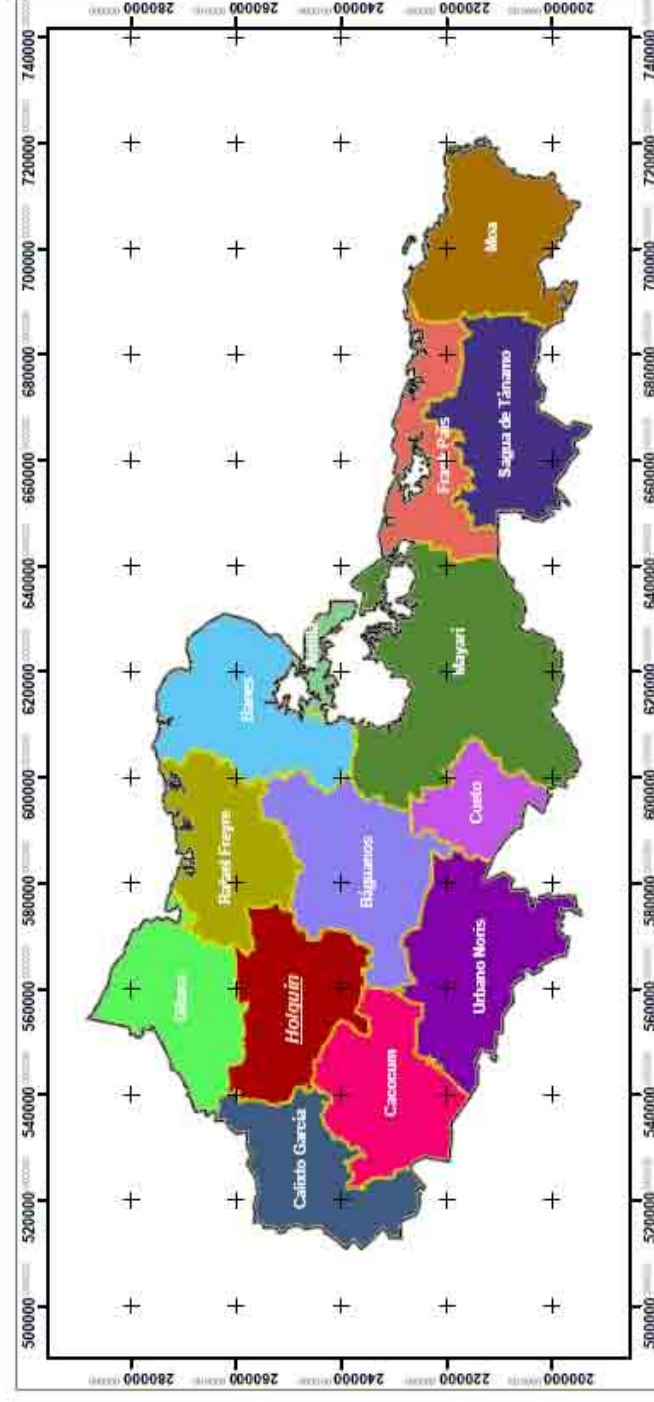
Creado por: Grupo de Investigaciones RAUDAL

Escala
1: 1 000 000 1 cm = 10 km

10 0 10 20 30 40 Km

Administrative Division of Province Holguín

Mapa de División Política - Administrativa Provincia de Holguín



Leyenda

Fronteras



Superficie (Km²) / Población / Densidad (P x Km²)

Calixto García	86.23 / 12 473 / 130	Holguín	620.55 / 51 077 / 82	Baraguán	705.42 / 59 457 / 84	Pinar del Río	837.03 / 44 782 / 54
Cacaocum	324.56 / 37 404 / 115	Ciego	623.72 / 72 084 / 114	Sagua de Tanamo	747.12 / 65 062 / 87	Mayarí	1344.71 / 107 768 / 80
Urbano Noris	600.45 / 28 683 / 57	Moja	881.94 / 44 443 / 67				
	815.01 / 59 352 / 97		864.44 / 313 125 / 471				

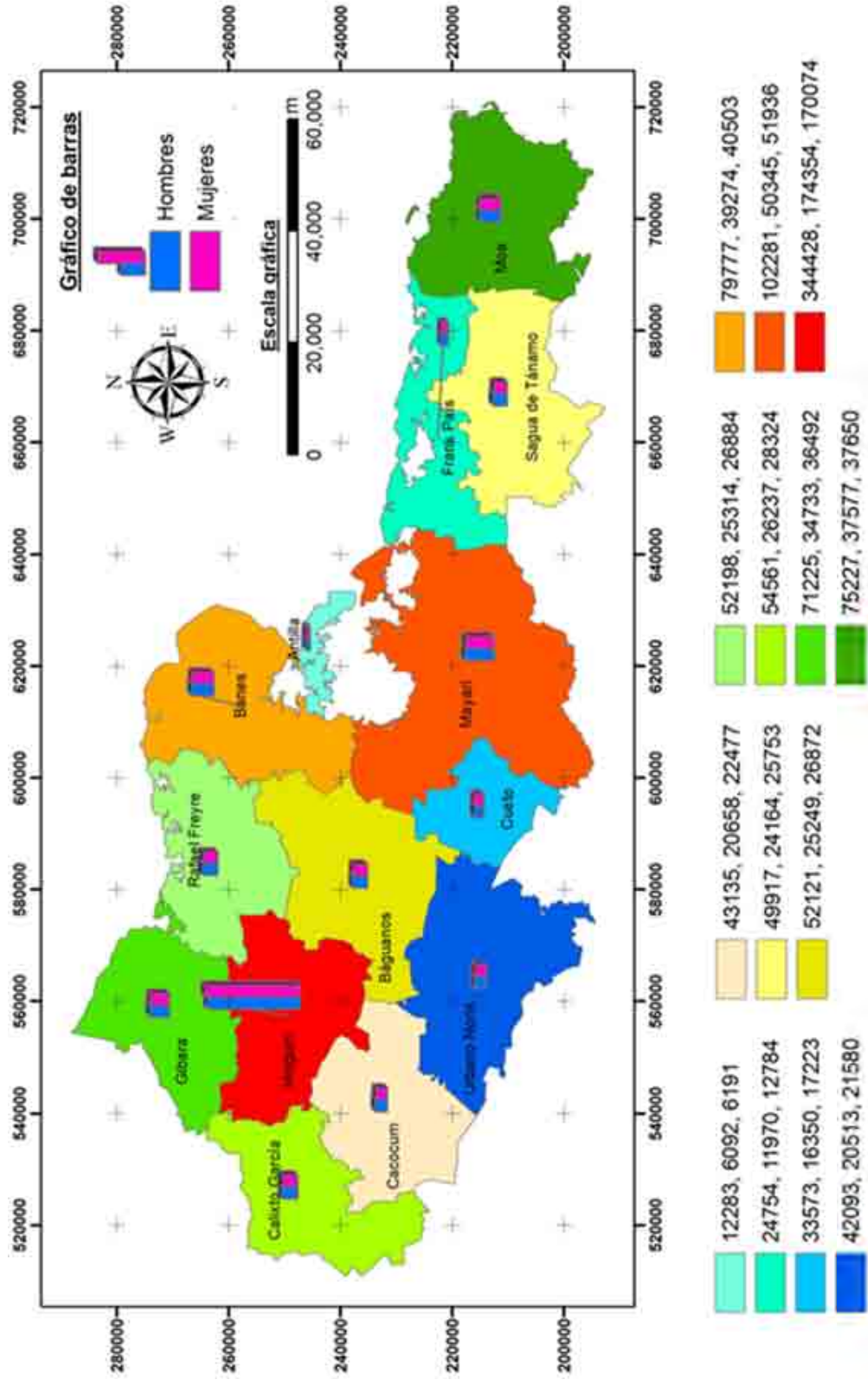
Proyecto de Colaboración Técnica
Mejoramiento de la capacidad de desarrollo y manejo del
agua subterránea para la adaptación al cambio climático
en la República de Cuba

jica

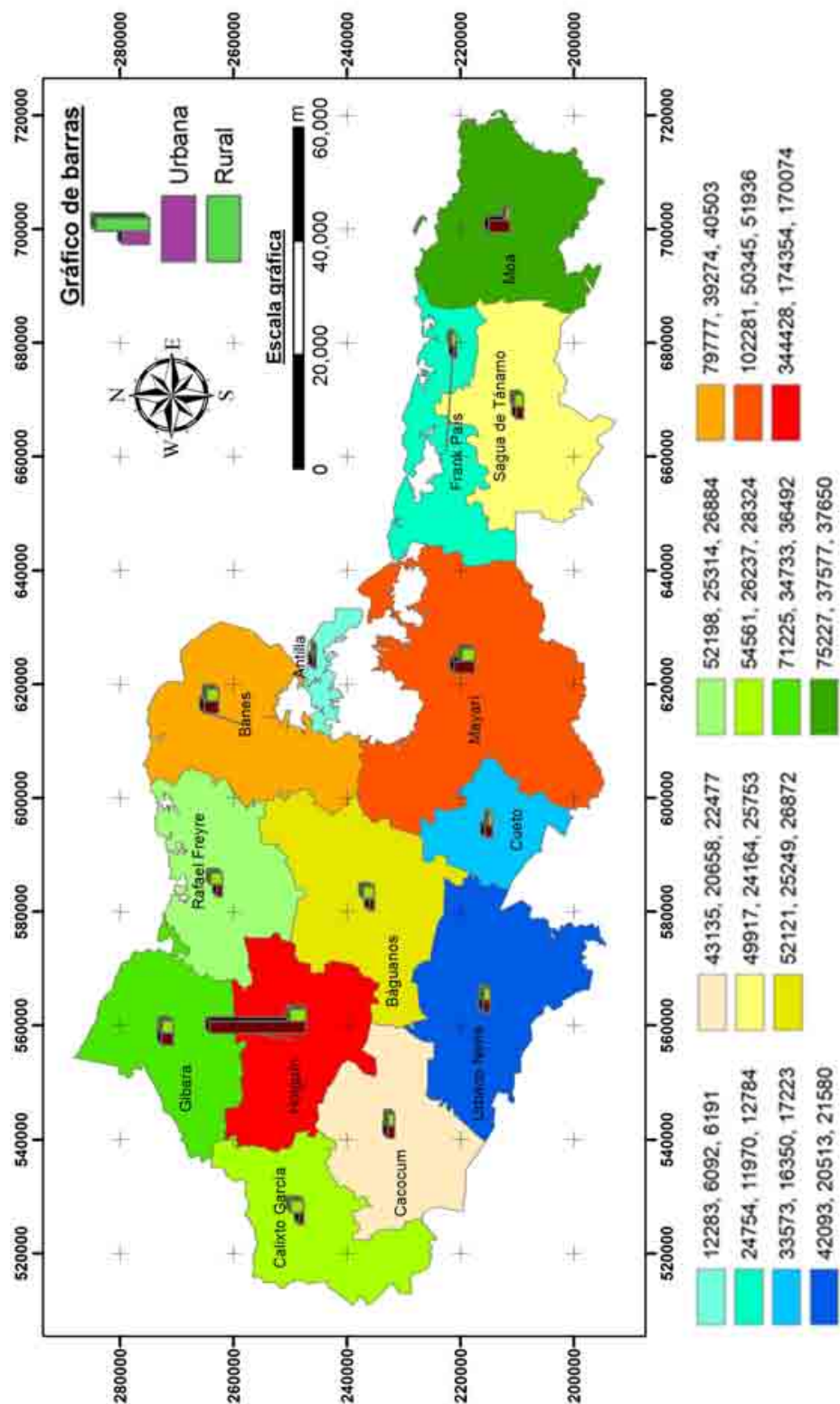
Creado por: Grupo de Investigaciones RAUDAL

Escala
1: 1 000 000 1 cm = 10 km
10 0 10 20 30 40 km

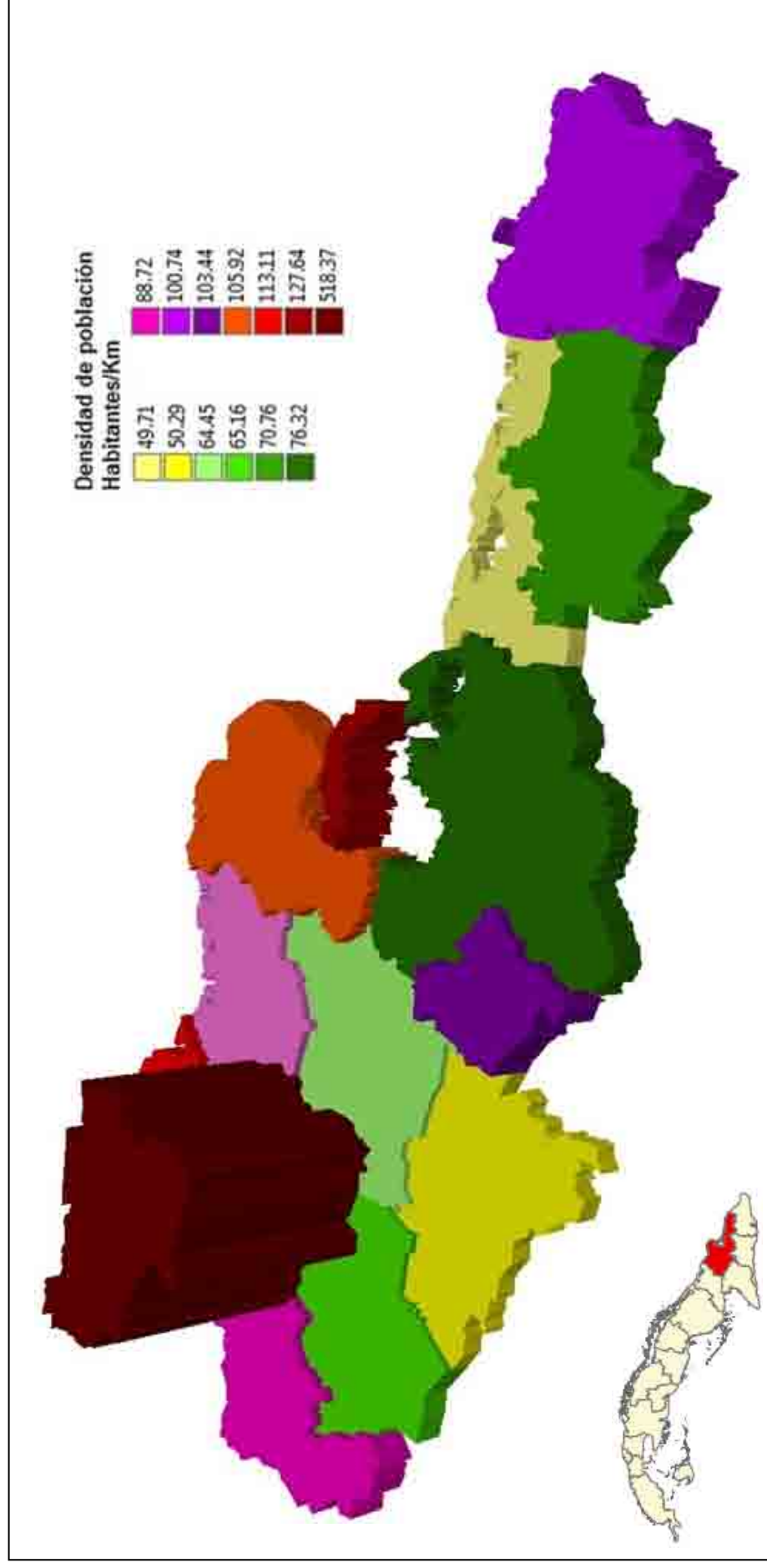
Population Distribution in Province Holguin



Population Distribution in Province Holguin

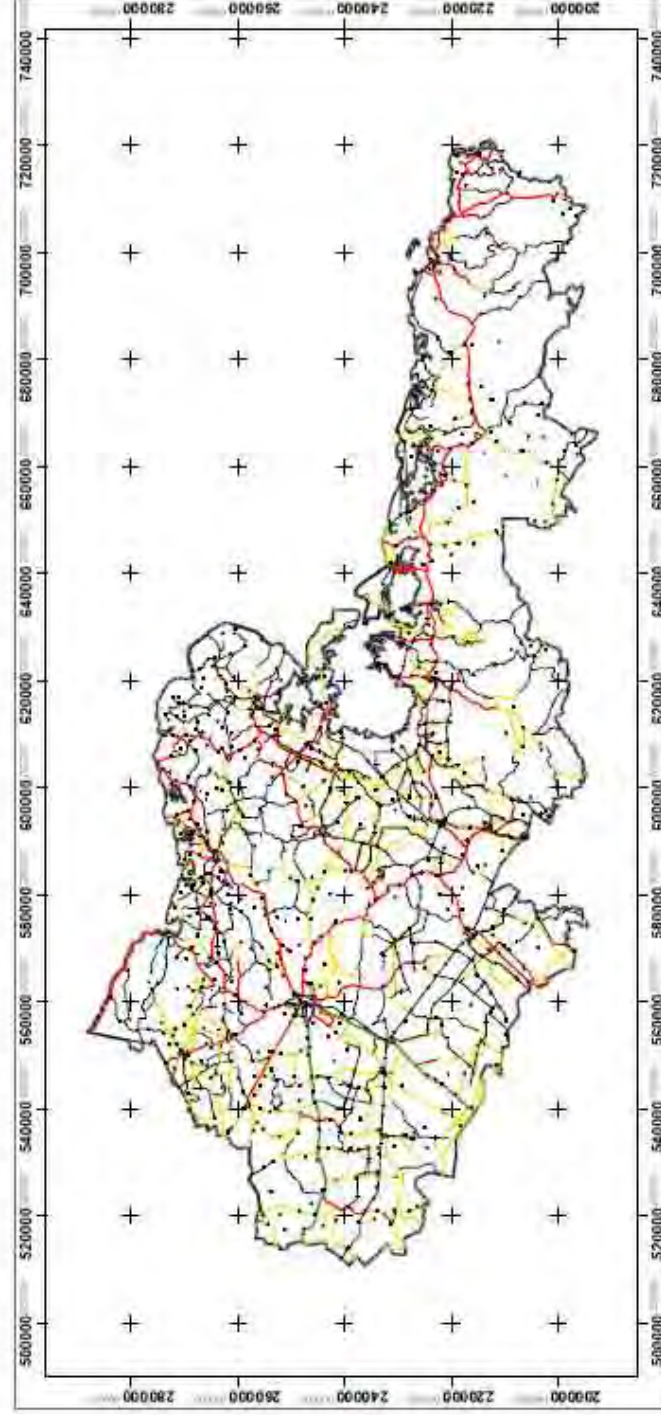


3 Dimensional Population Distribution Map of Province Holguin



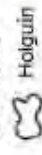
Roads Map of Province Holguín

Mapa de Carreteras Provincia de Holguín



Leyenda

Fronteras



Holguín

Viales



Carretera Central



Circunvalante



Carreteras principales



Carreteras secundarias



Caminos



Ferrocarril

Población



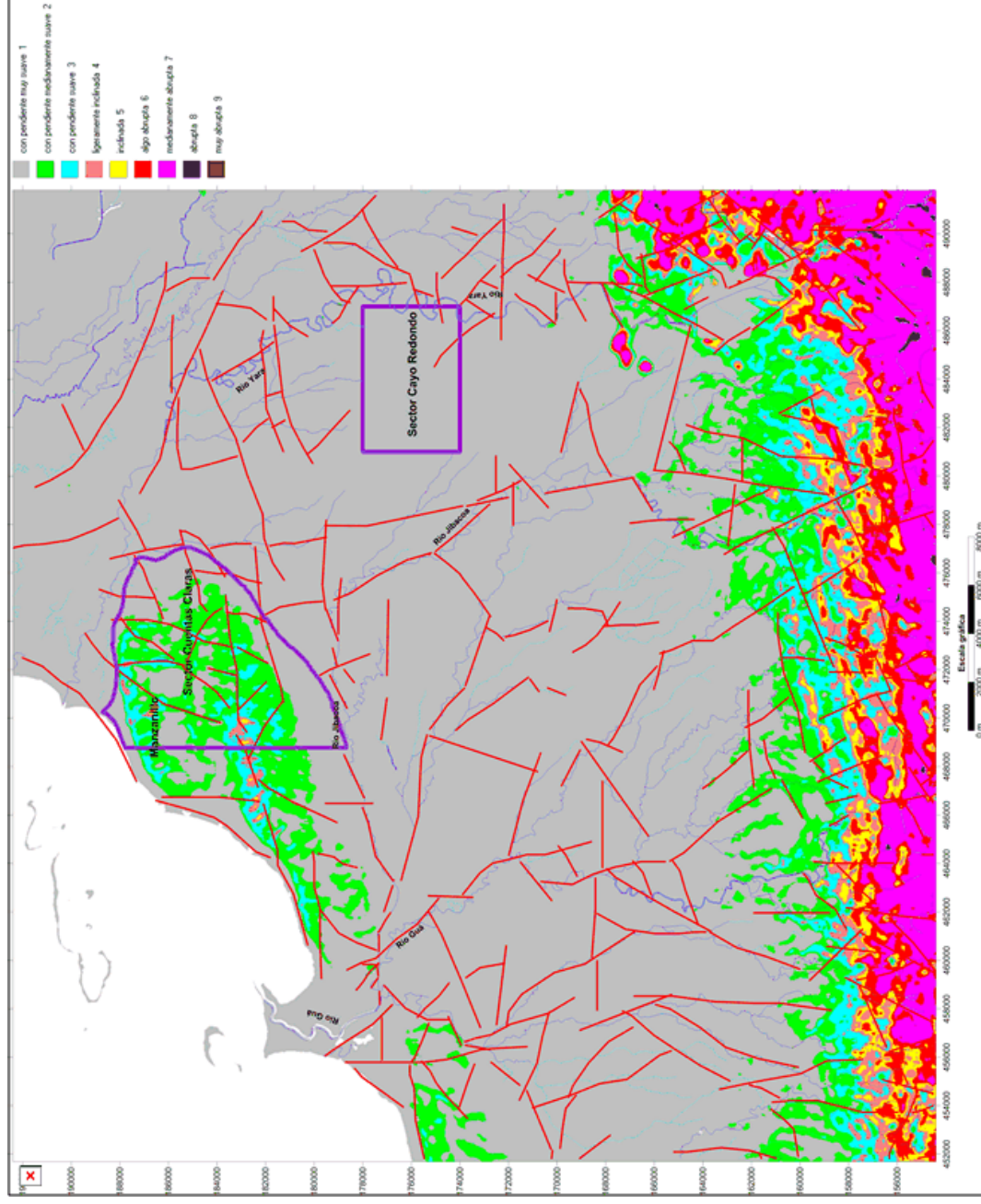
Zonas pobladas

Proyecto de Coordinación Técnica
Mejoramiento de la capacidad de desarrollo y manejo del
agua subterránea para la adaptación al cambio climático
en la topografía de Cuba

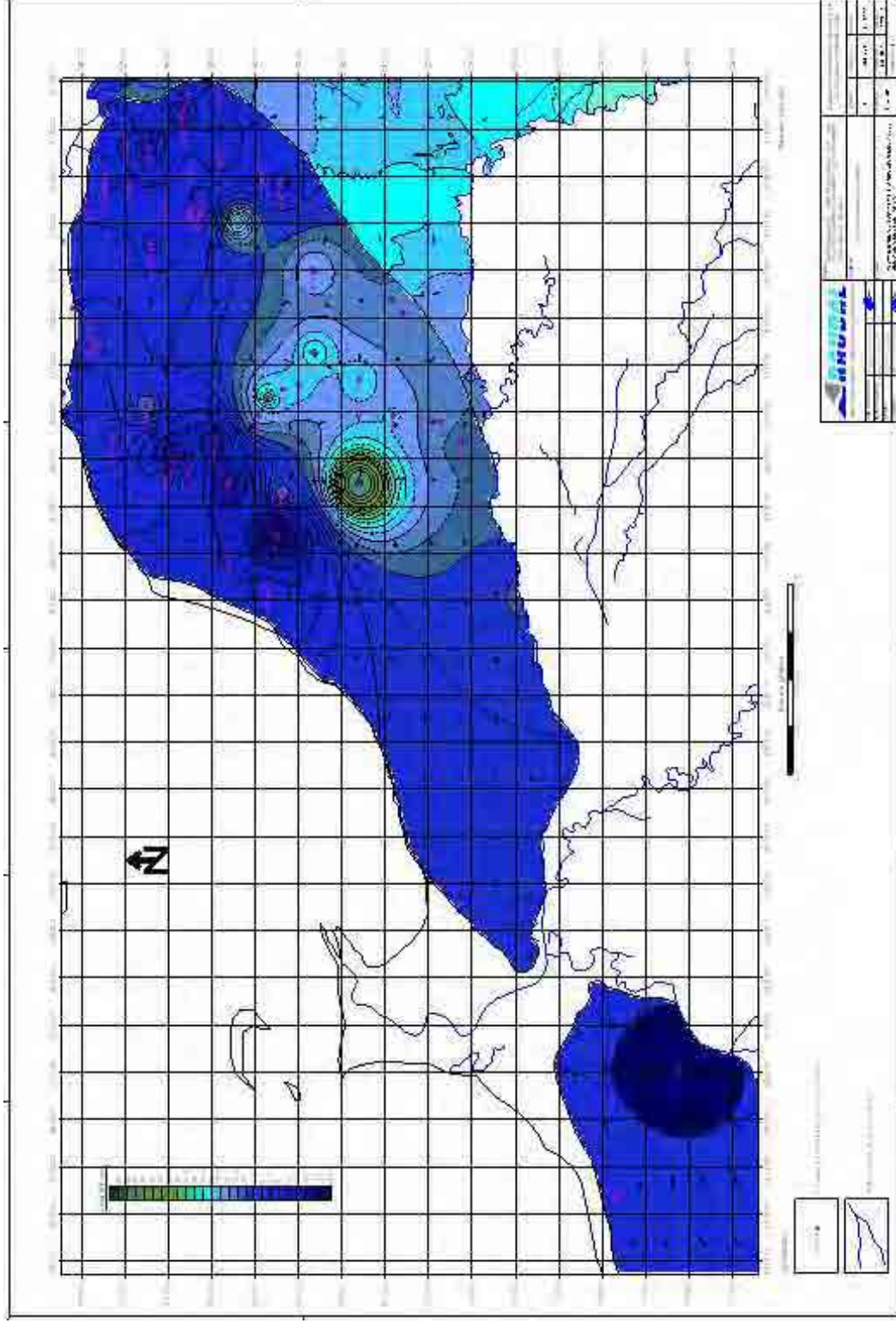
Orsco por Grupo de Investigaciones RAUDAL

Escala
1:1 000 000 1 cm = 10 km
10 0 10 20 30 40 Km

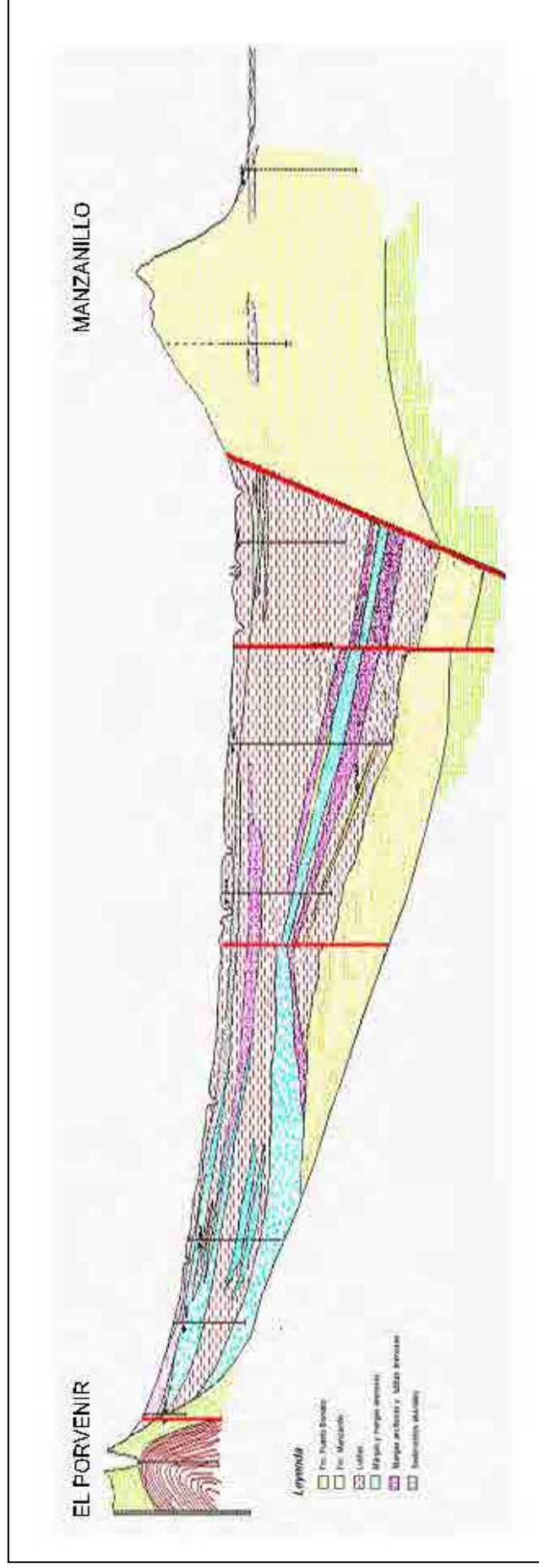
Geology Structure (Faults Distribution) Map of Survey Area Estudio, Holguin



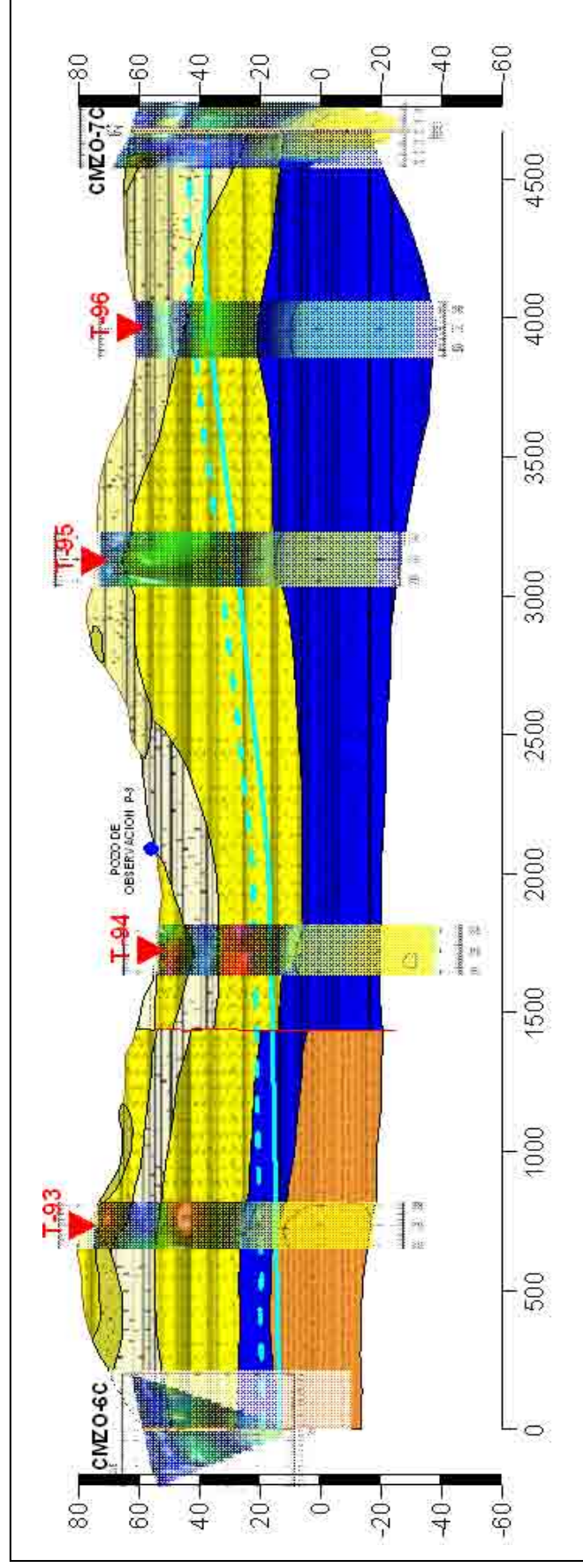
Groundwater Level and Flow Directions (1) of Manzanillo City



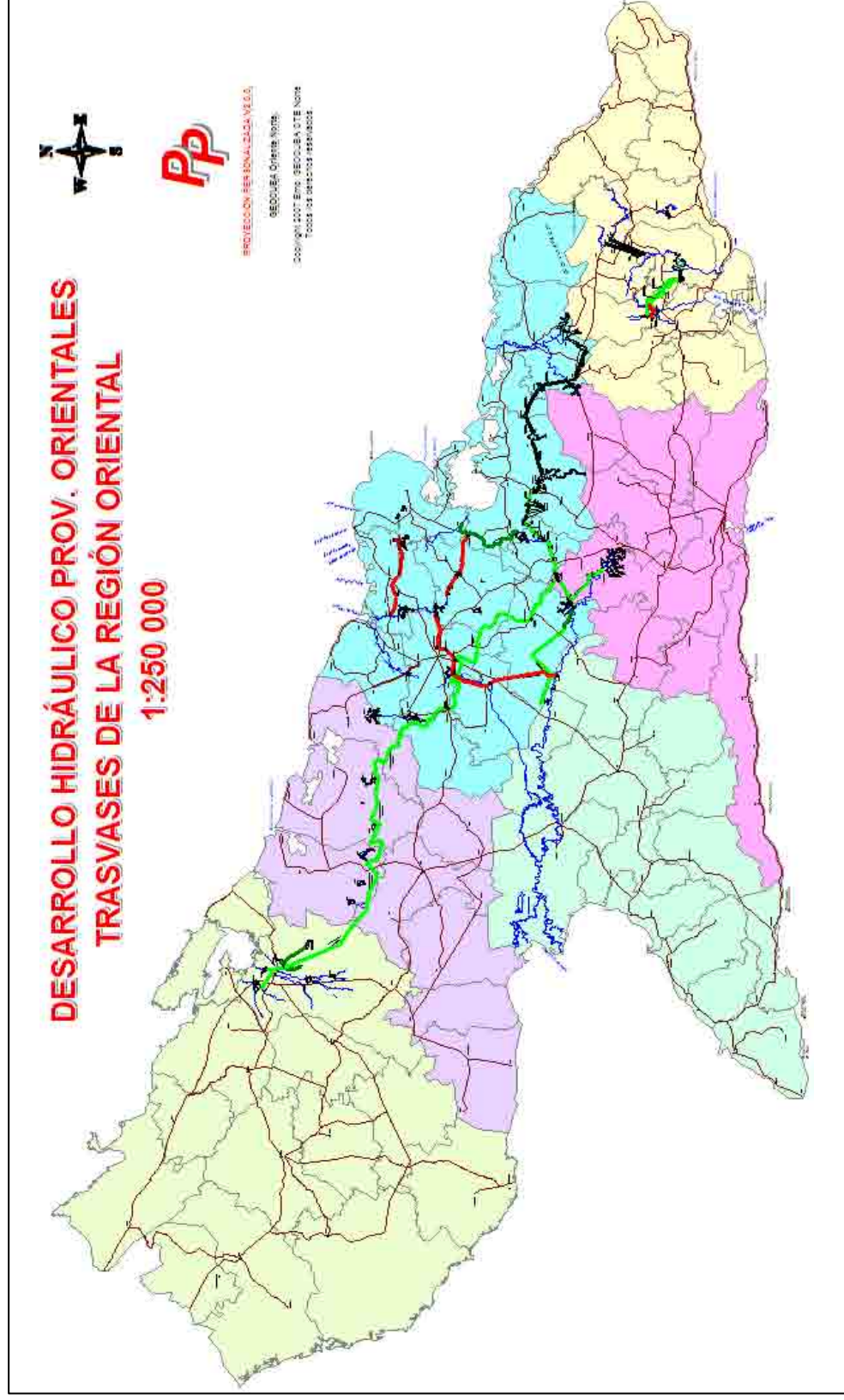
Geological Profile of Manzanillo City



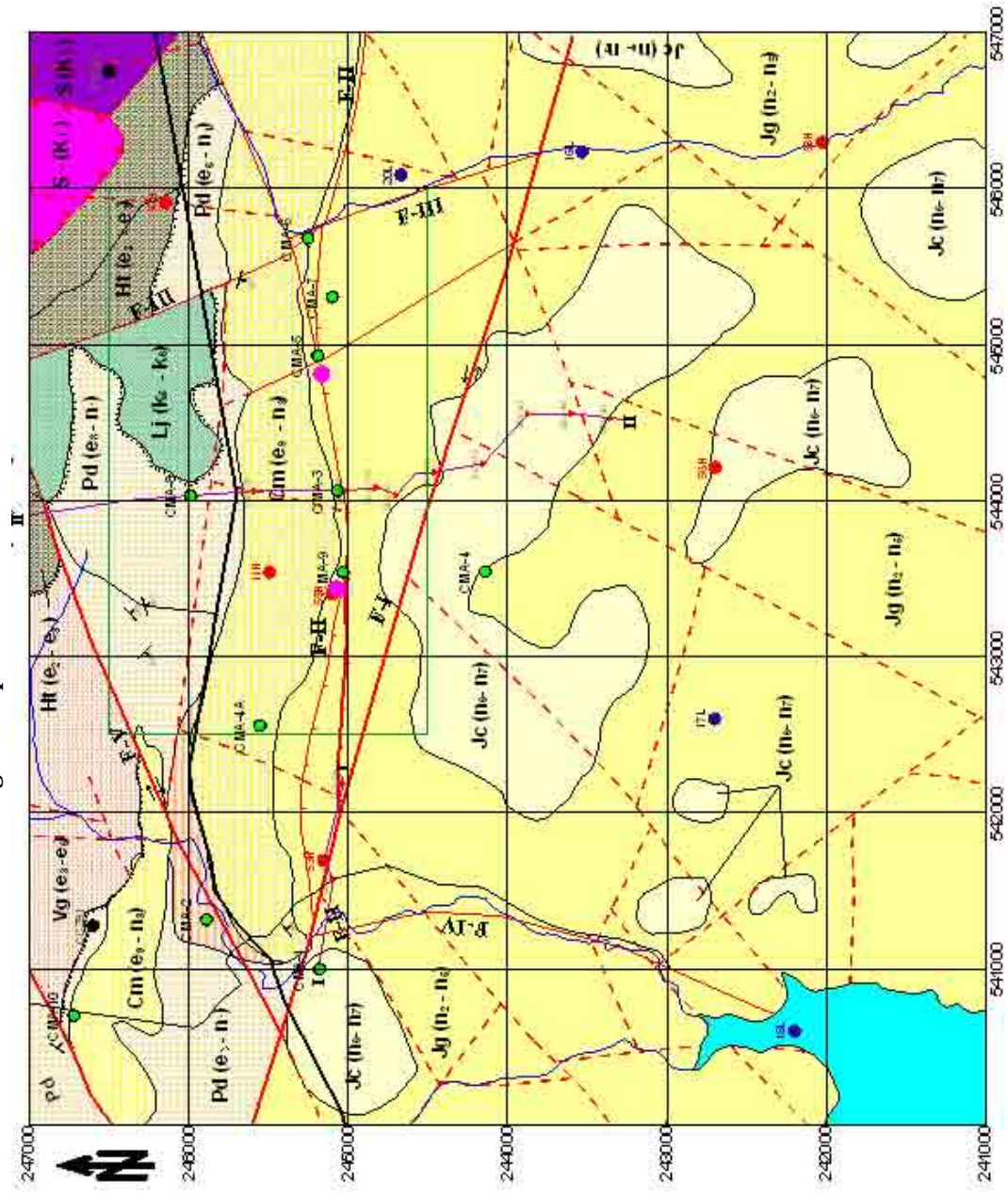
Geological Profile_2 of Manzanillo City



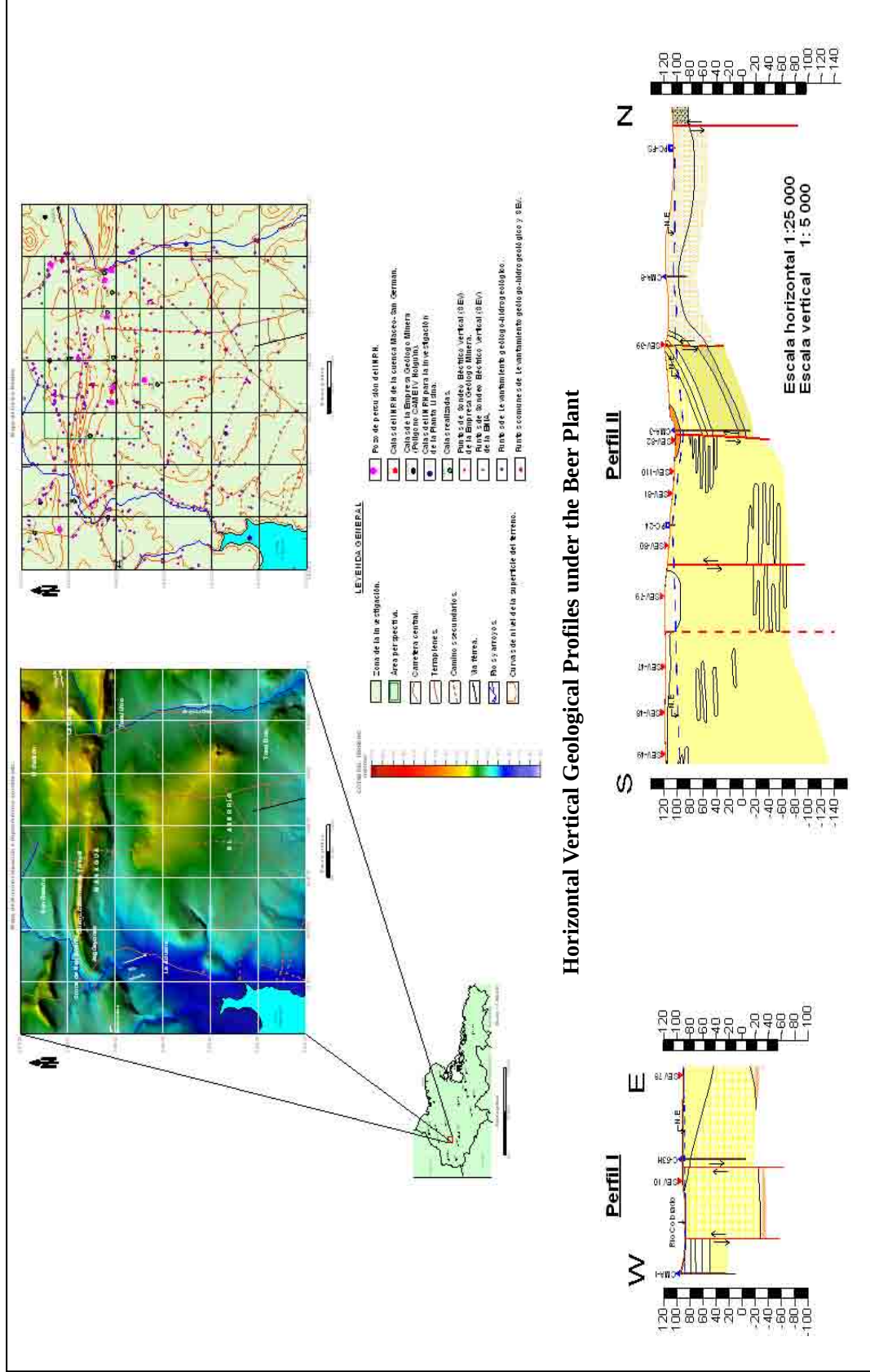
Route Map of tunnel channel and pipeline for water convey plan



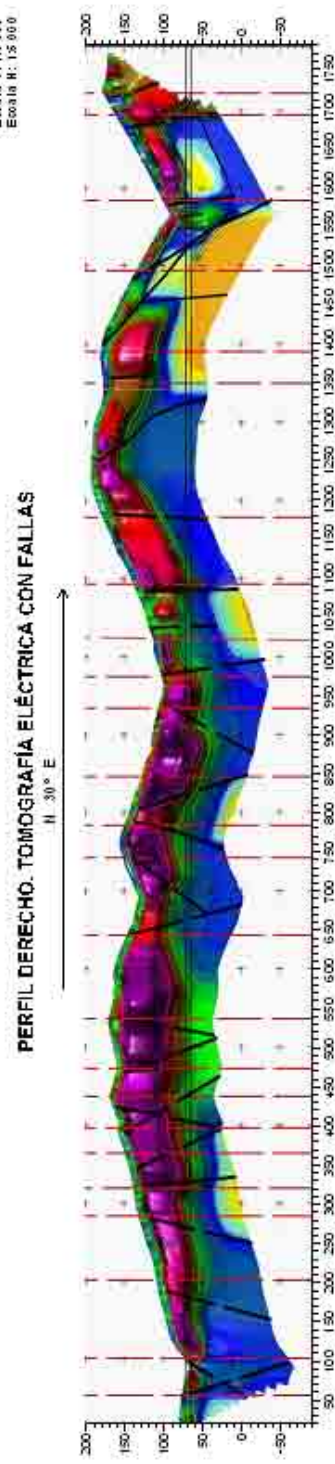
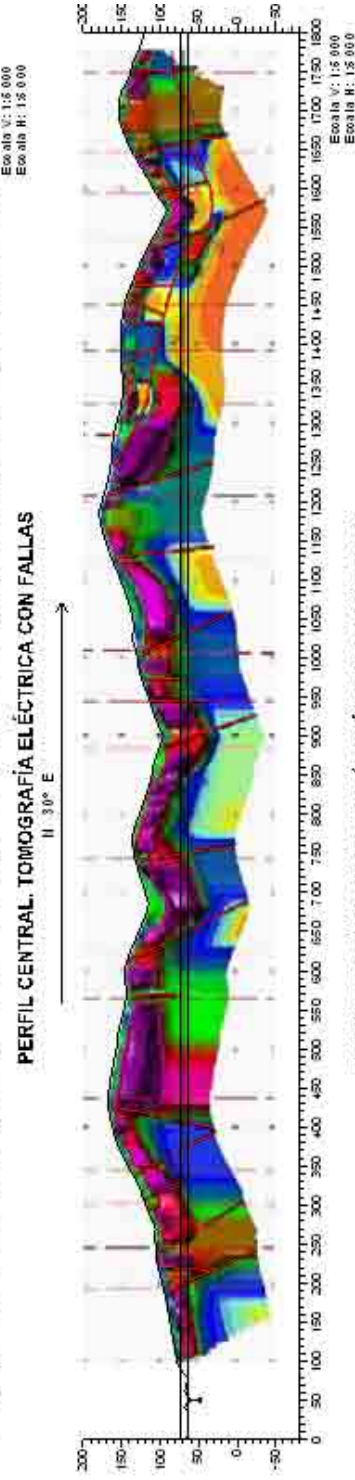
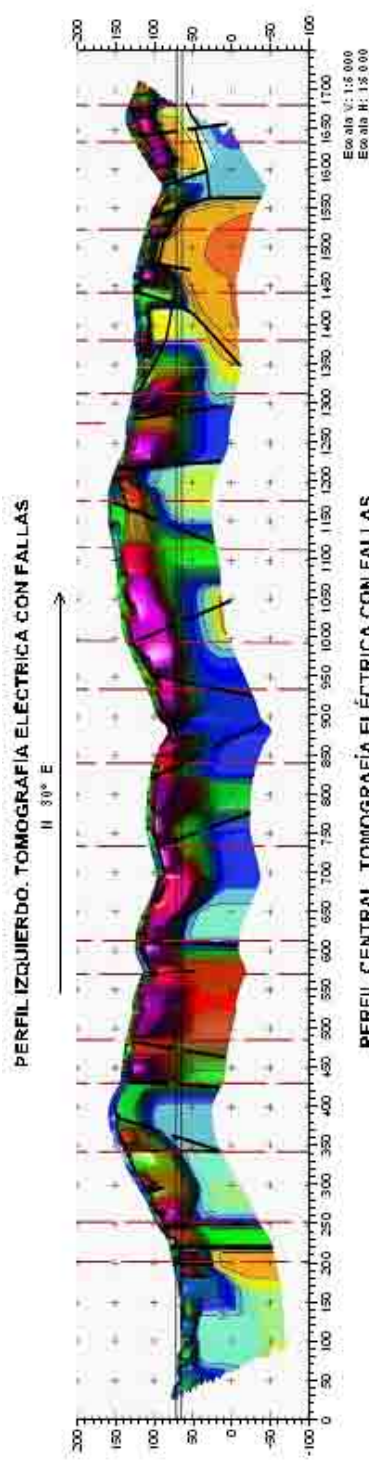
Geological Map in and around the Beer Plant



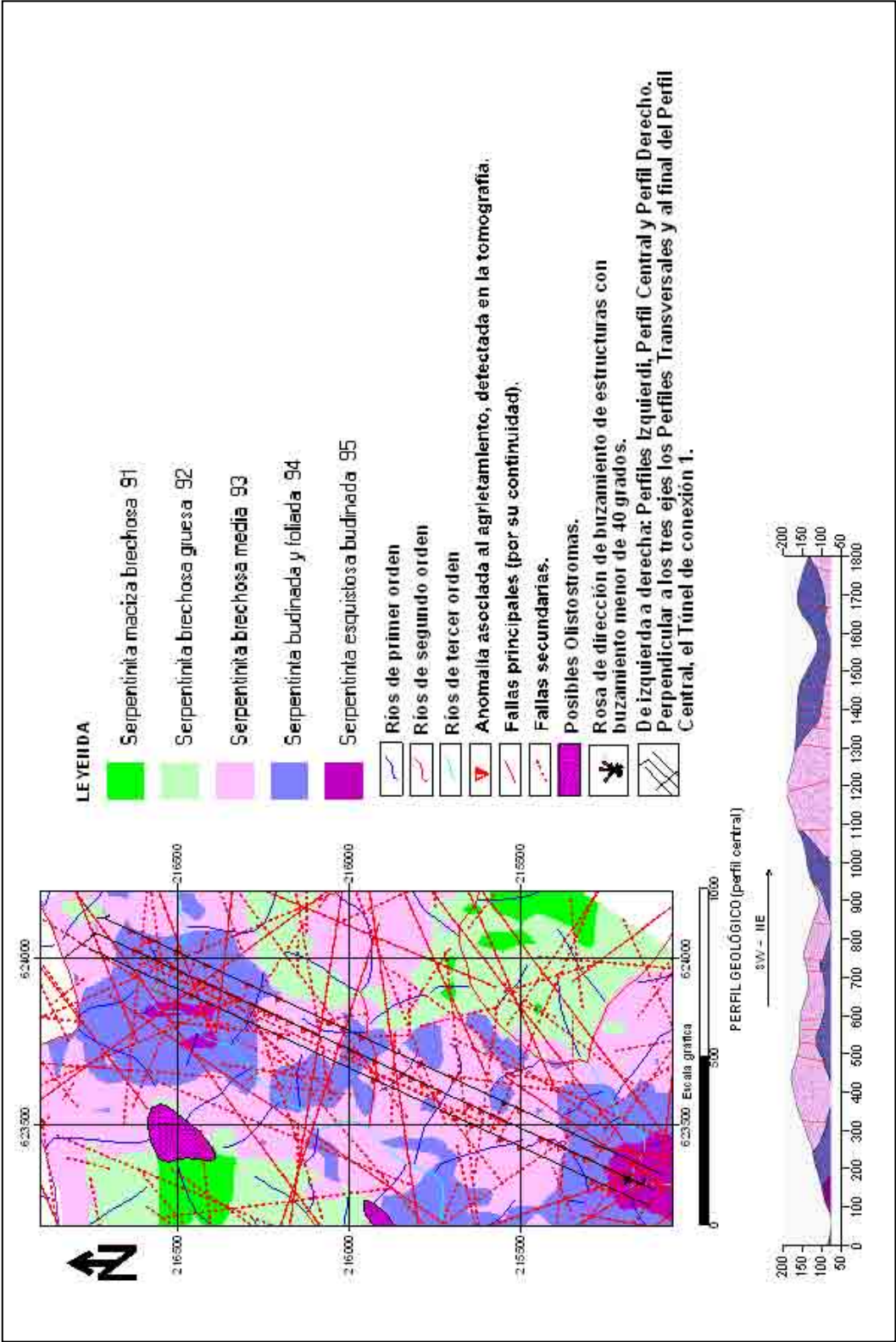
Topography in and around the Beer Plant



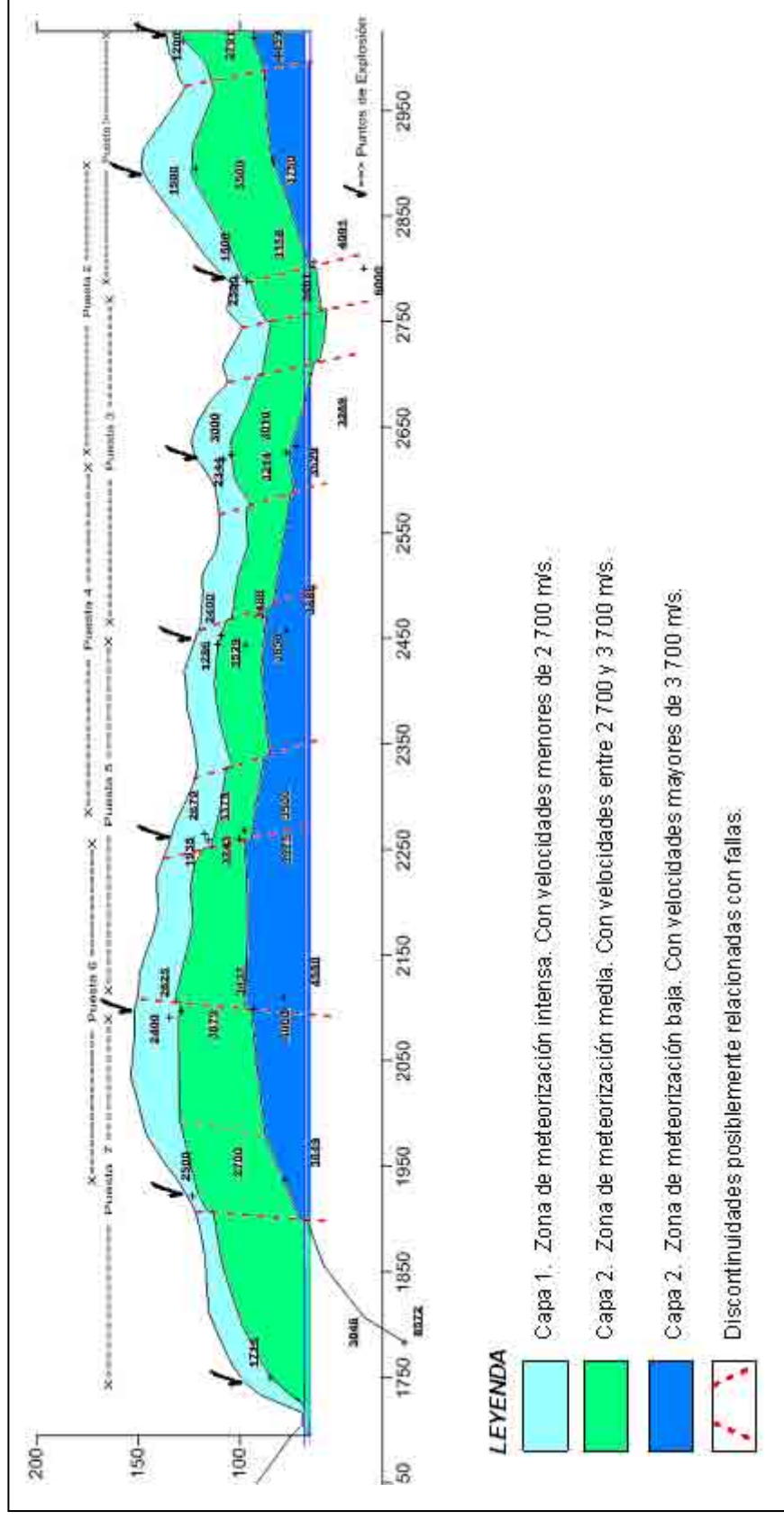
Profiles of Tunnel Rout



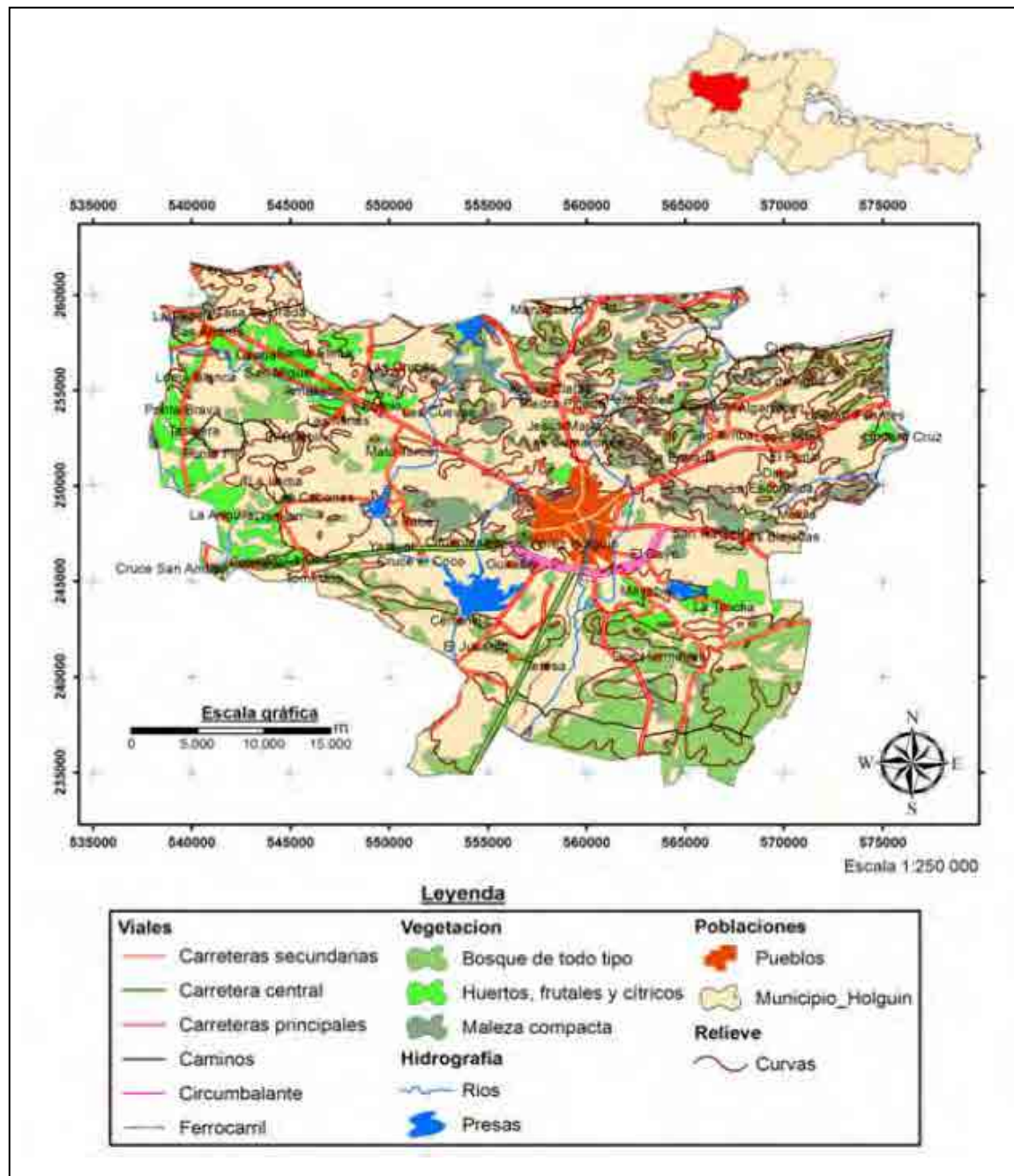
Geological Map Geological Profile of Tunnel Rout



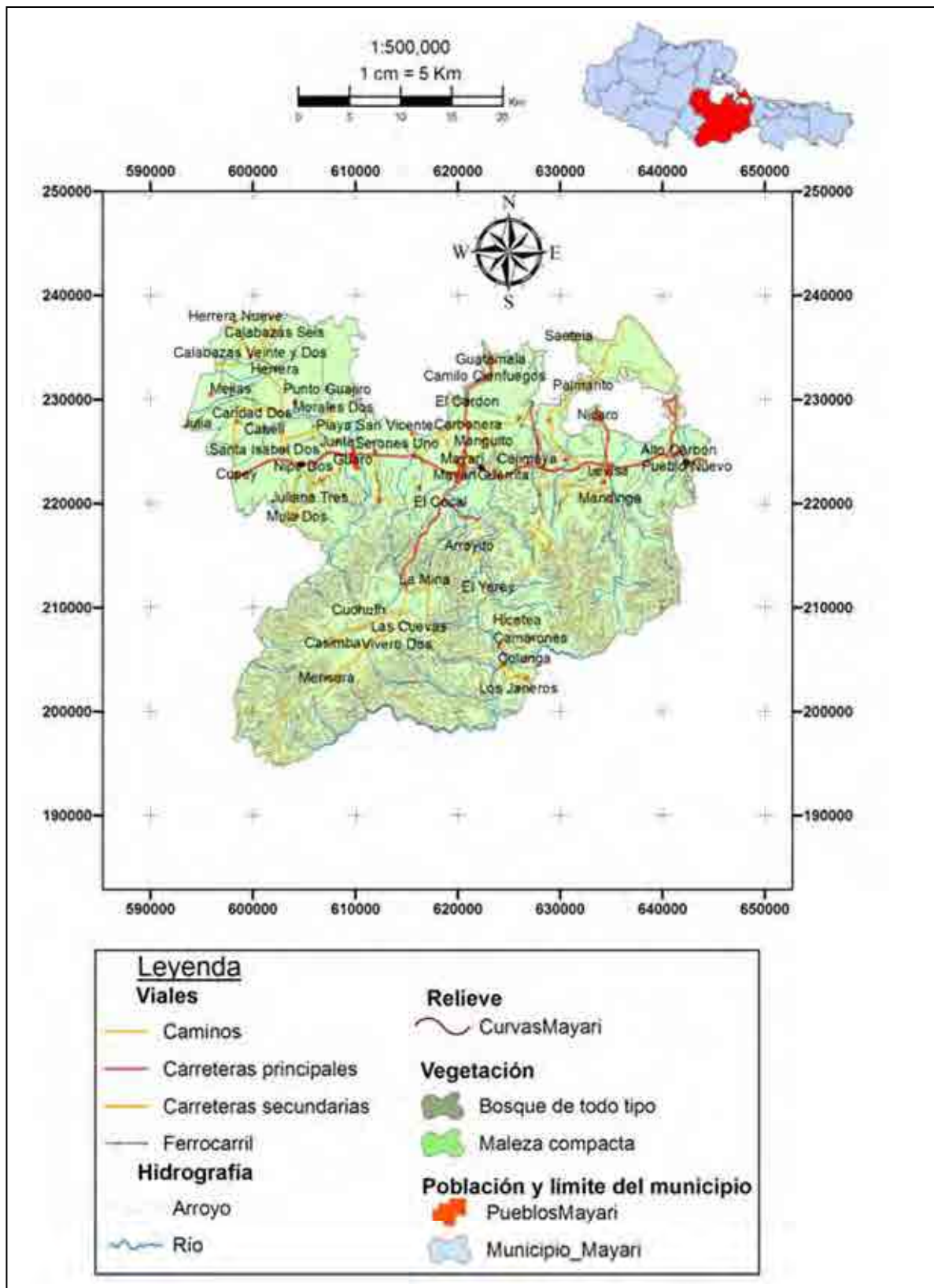
Profile of Tunnel Rout



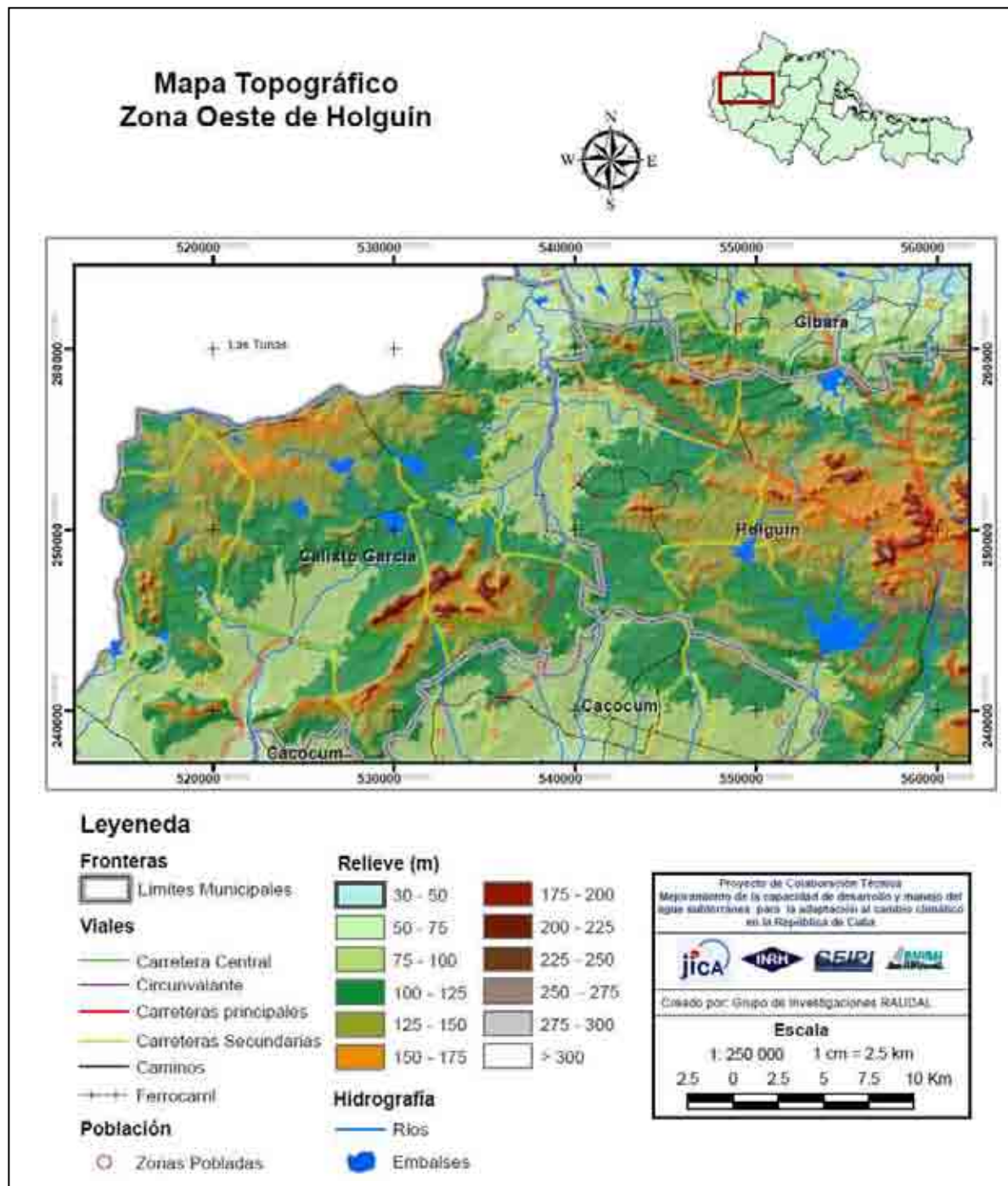
Geographic Features of Holguin City, Holguin



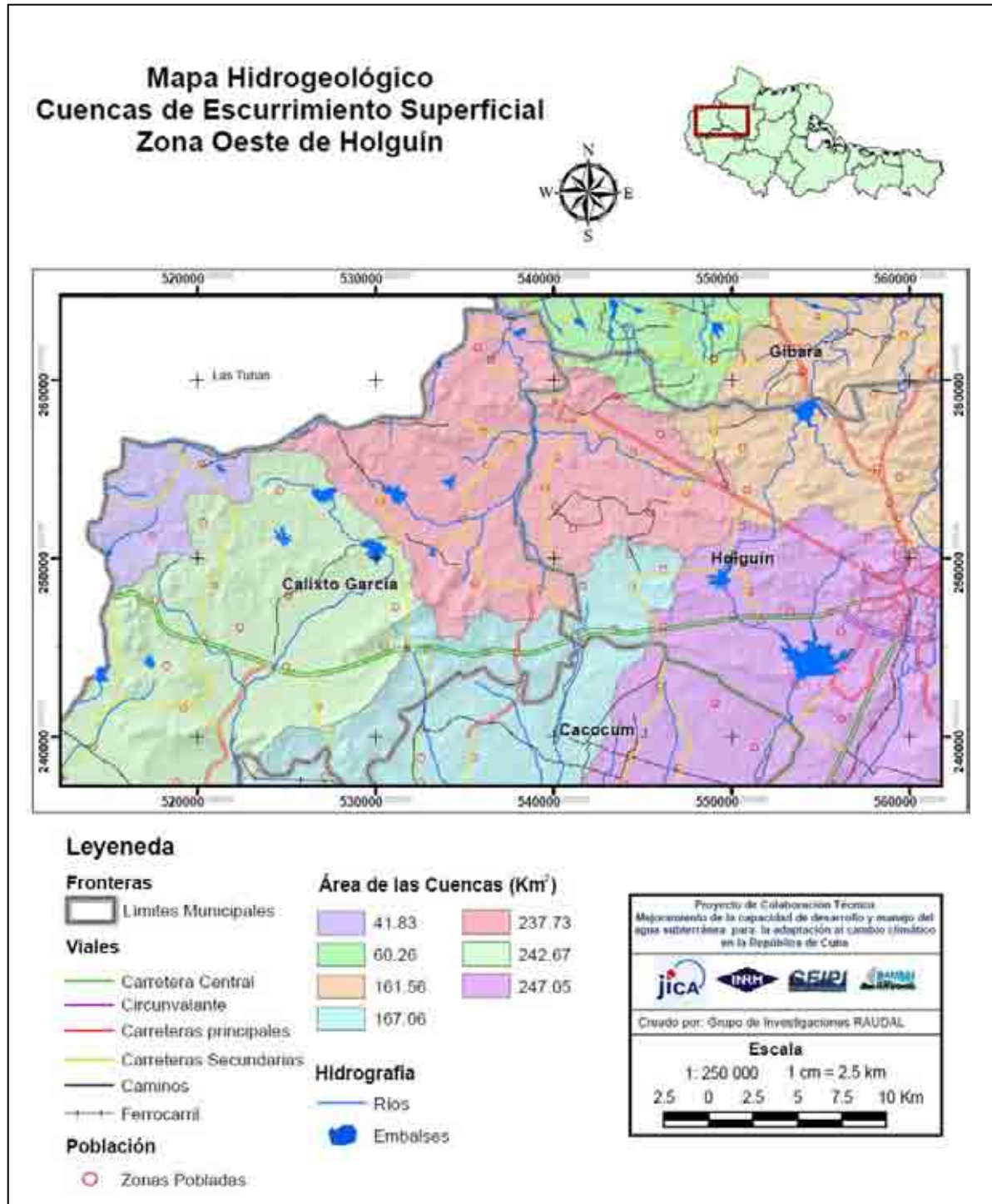
Geographic Features of Mayali City, Holguin



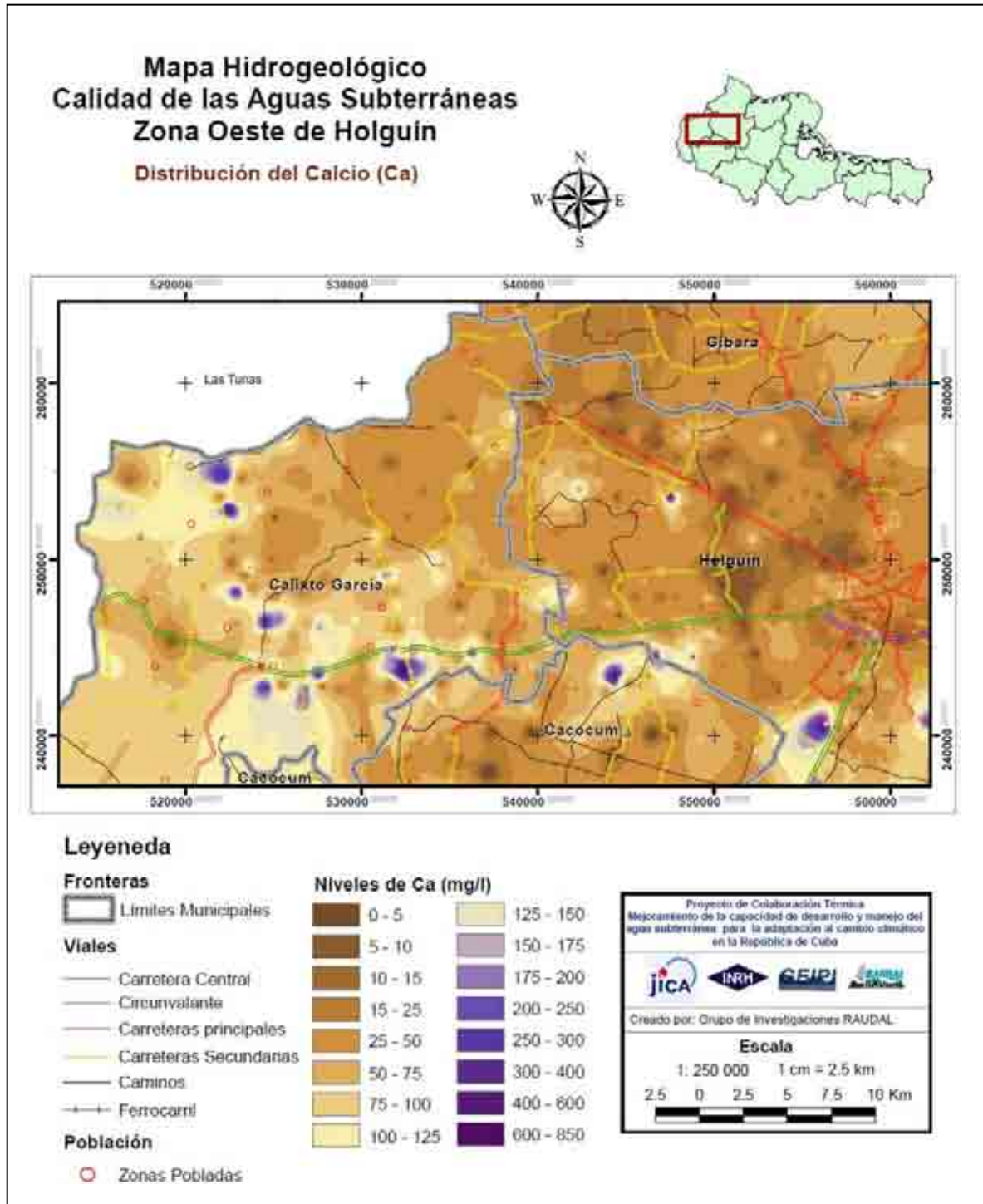
Topography of Zone Oeste, Holguín



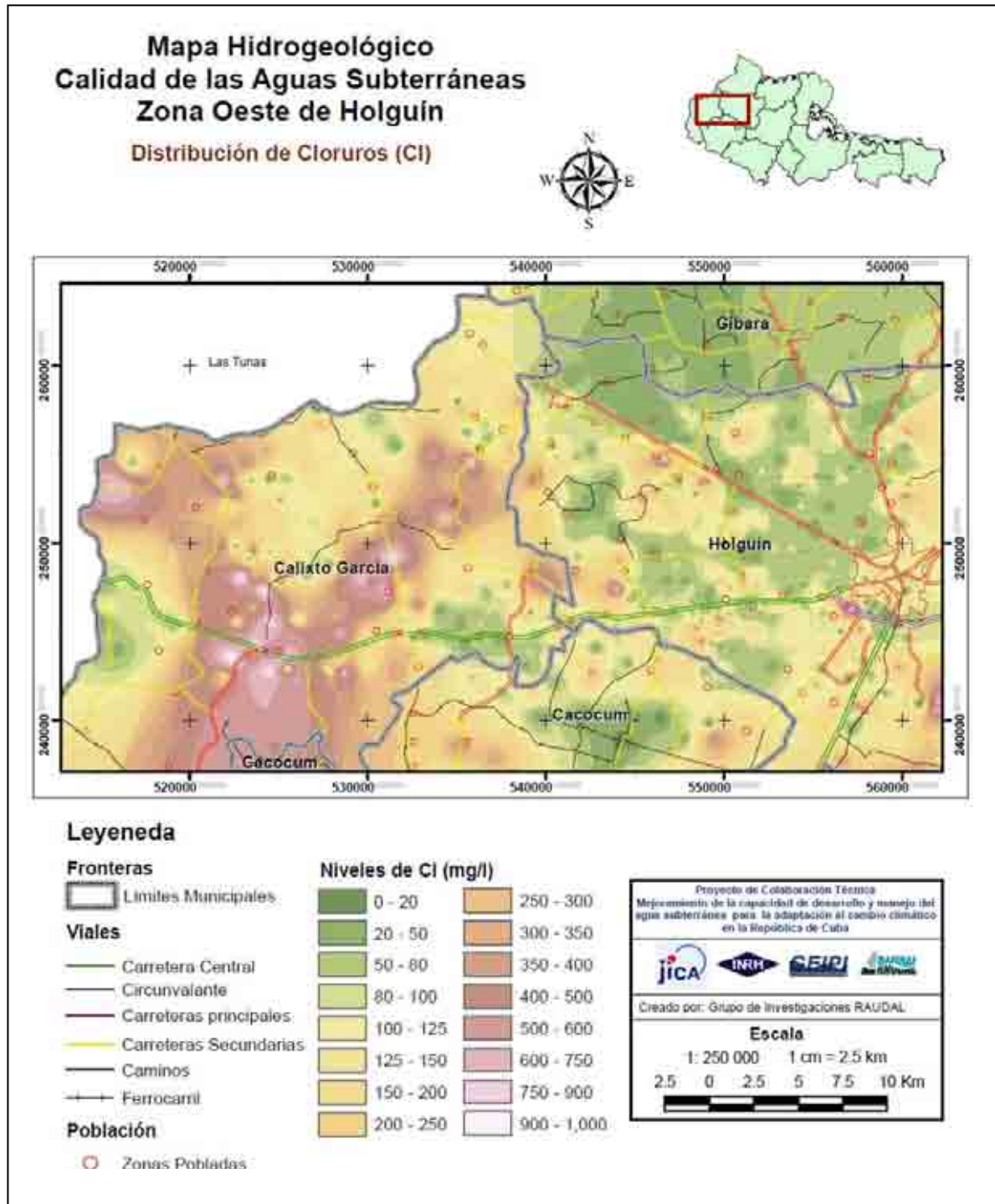
Groundwater Basin Distribution in Zone Oeste, Holguín



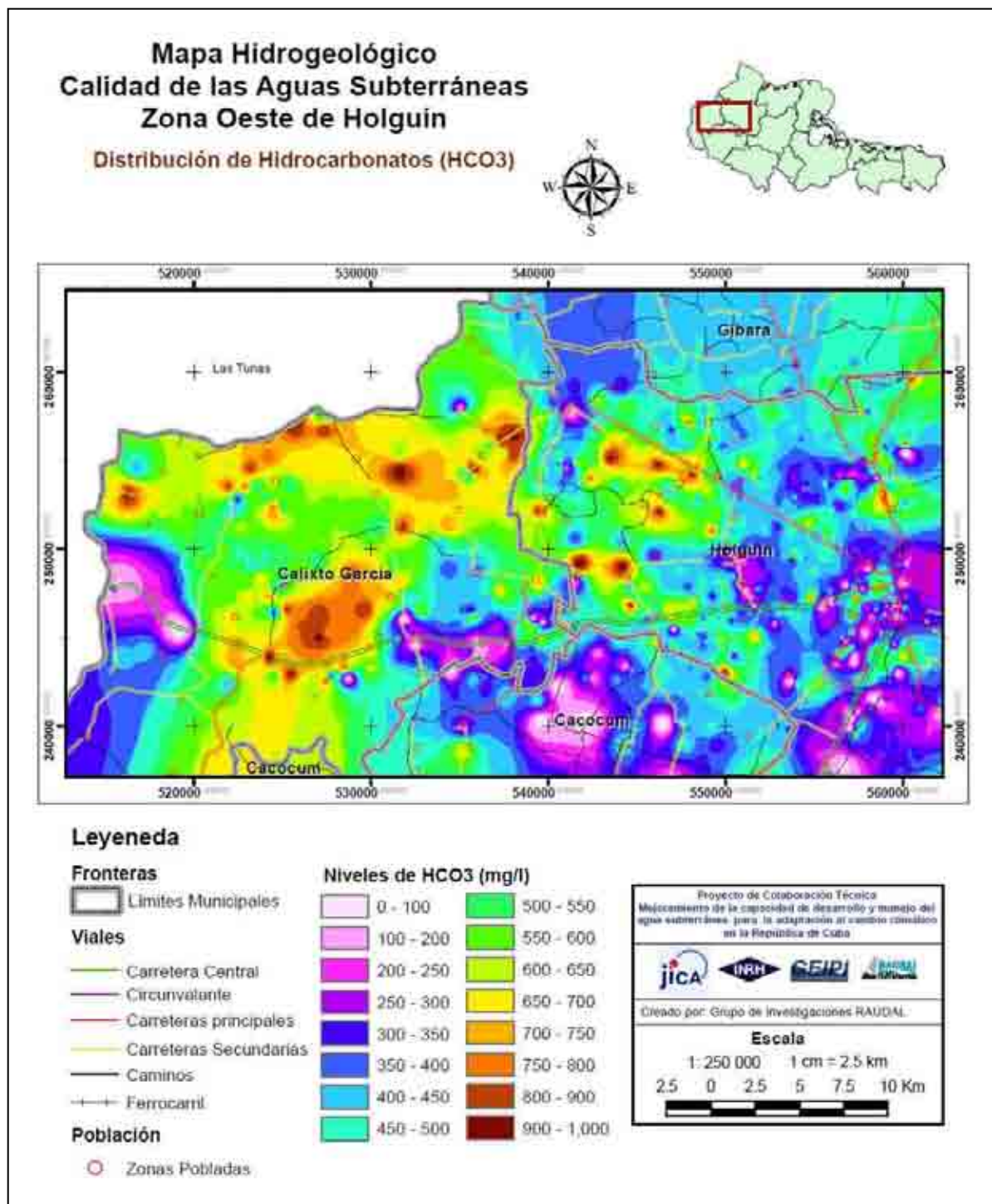
Groundwater Quality (Ca) Distribution in Zone Oeste, Holguín



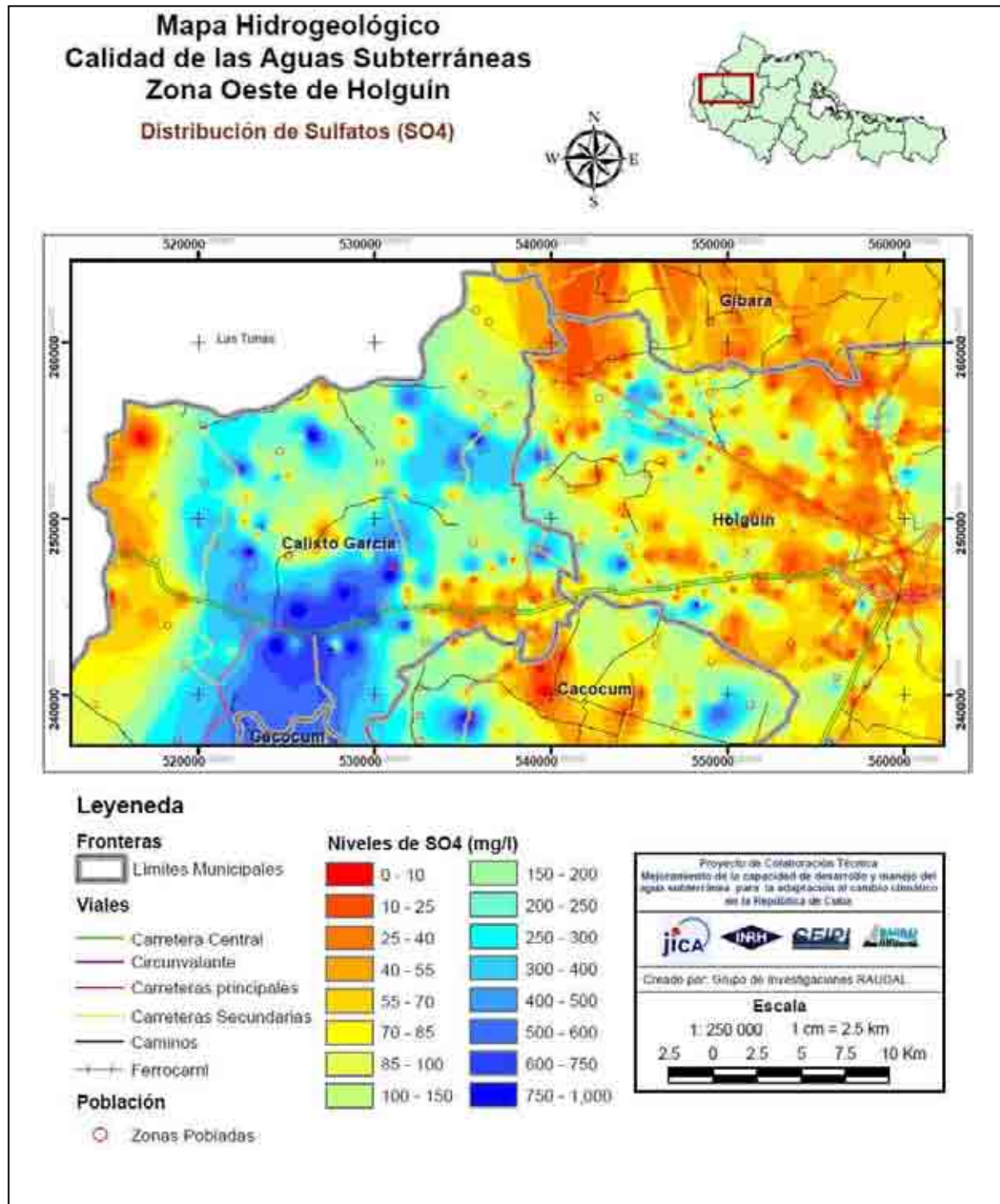
Groundwater Quality (Cl) Distribution in Zone Oeste, Holguín



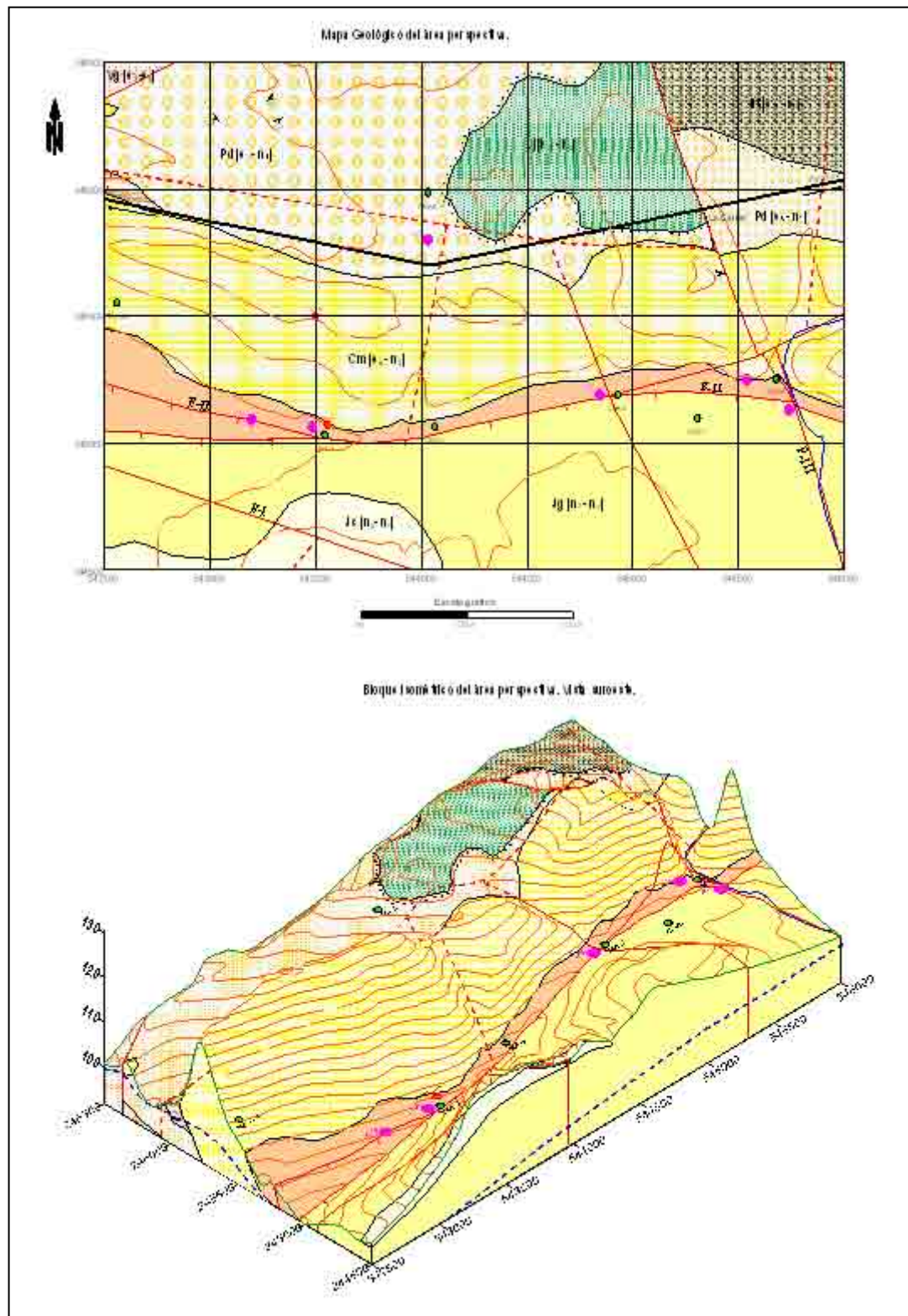
Groundwater Quality (HCO₃) Distribution in Zone Oeste, Holguín



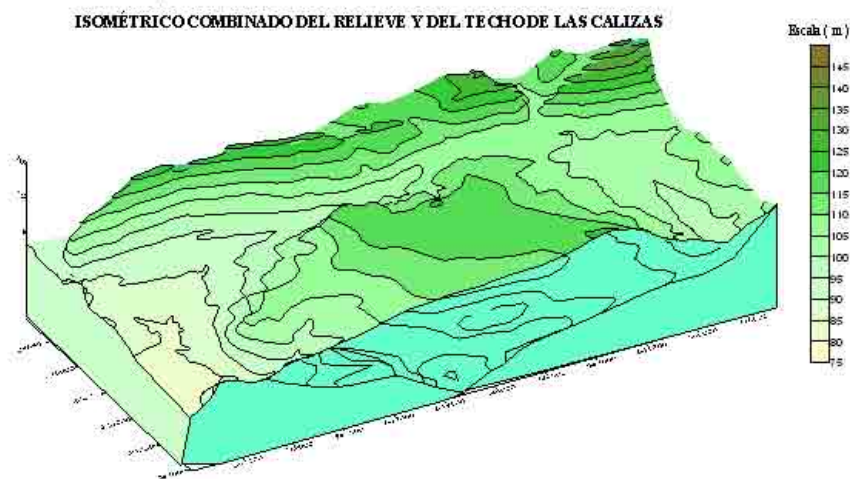
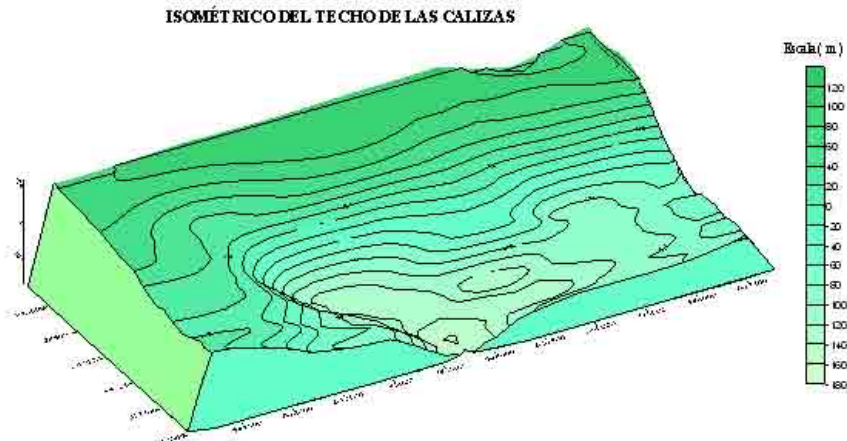
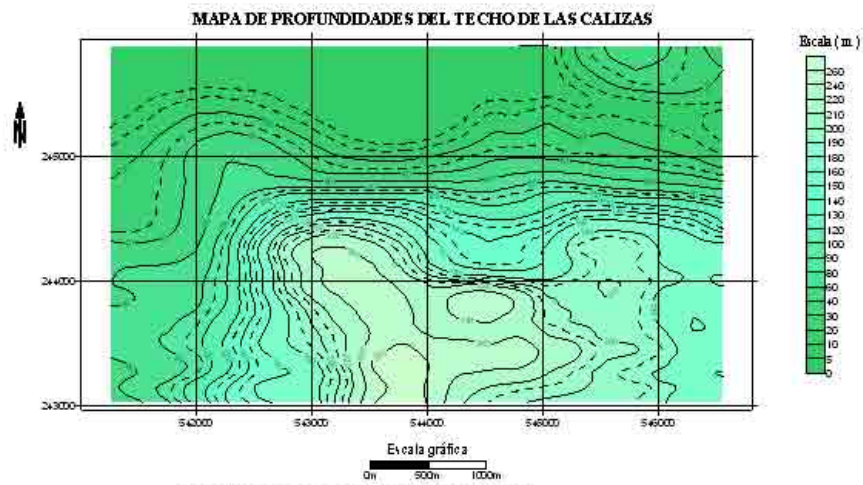
Groundwater Quality (SO4) Distribution in Zone Oeste, Holguín



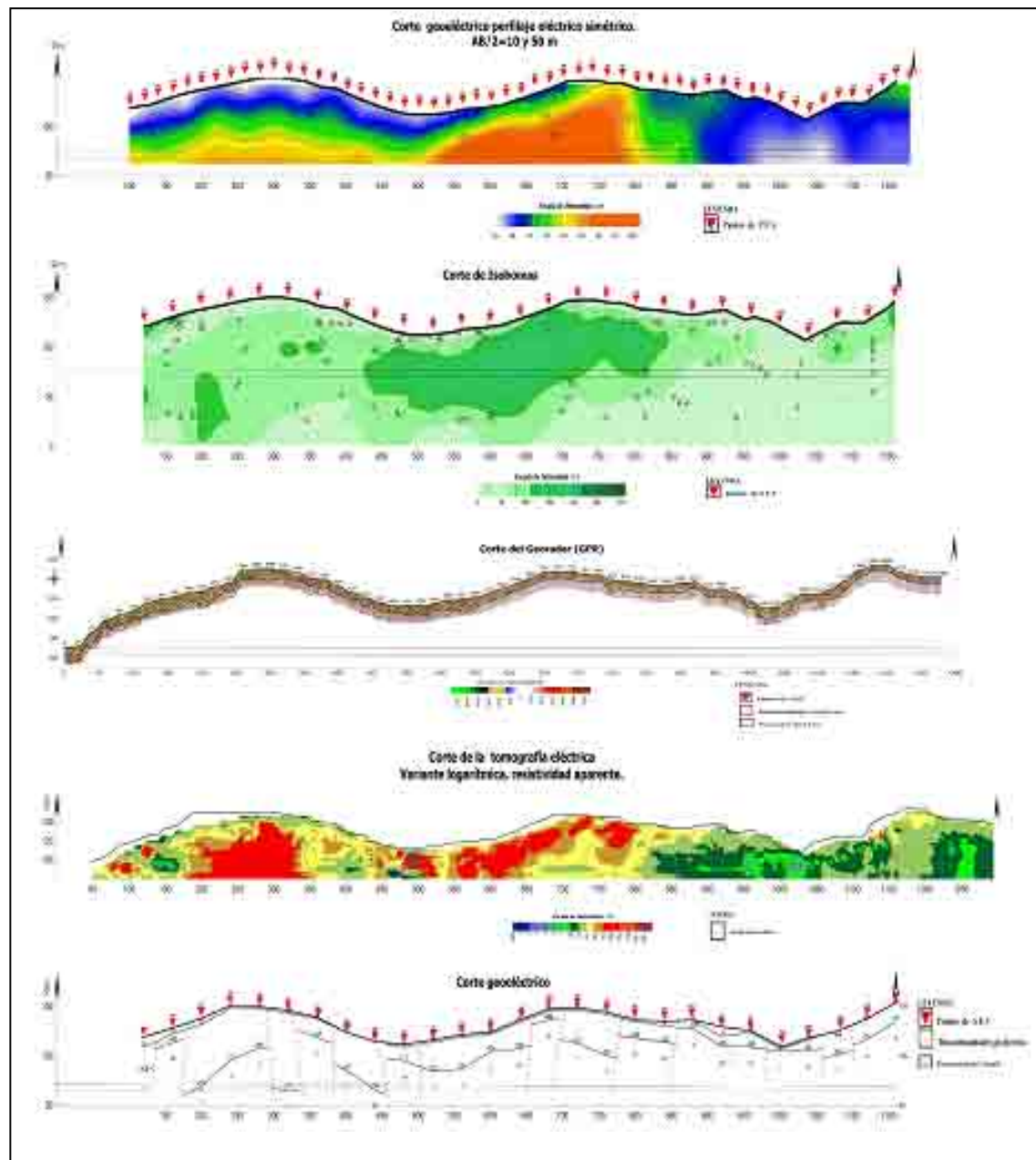
Geological map and profile in and dear the Beer Plant



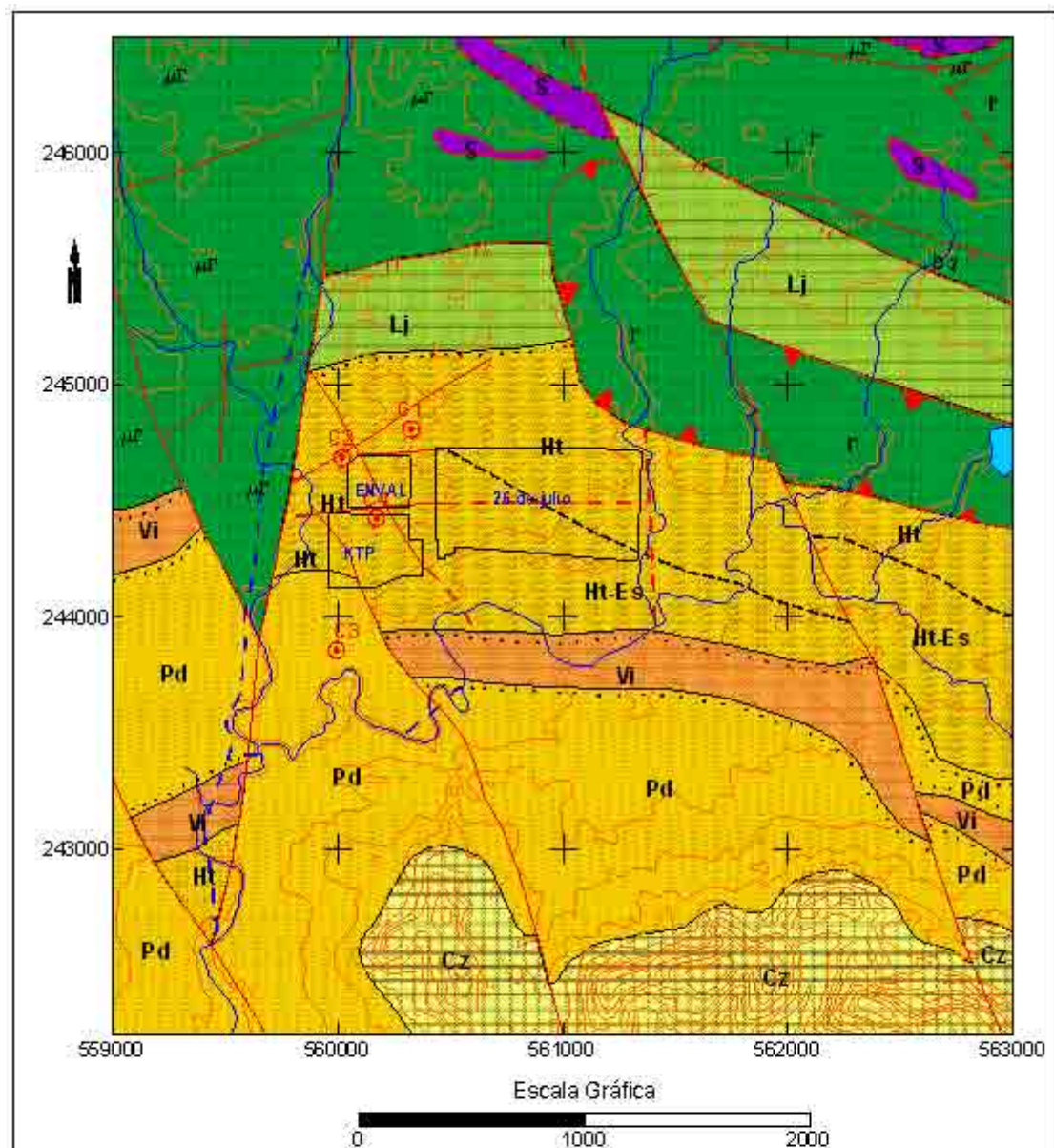
Map of Limestone layer thickness in and around the Beer Plant



Profile of Electric Resistant of the Tunnel Rout



Geological Map of Aluminio, Holguin.



		U.E.B.G.P. HOLGUIN GRUPO DE INGENIERIA GEOLOGICA E HIDROGEOLOGICA			INVESTIGACIONES HIDROGEOLOGICAS PARA ABASTO A LA EMPRESA DE ENVASES DE ALUMINIO HOLGUIN (ENVAL).		
		NOMBRE	FIRMA	FECHA			
Empresa Investigaciones Proyectos Hidráulicos Holguin	Jr. Dpto. Téc.	Ing. J. Iglesias R.		04/05	ESTUDIO HIDROGEOLOGICO.		
	Especialista	MSc. J. L. Blanco.		04/05			
	Especialista	Ing. José A. Díaz G.		04/05	MAPA GEOLOGICO ESQUEMATICO.		
	Dibujó	MSc. J. L. Blanco.		04/05			
	Revisó	Ing. A. Hidalgo H.		04/05			
					Escala: 1:25 000		Formato (mm): 215.59 X 279.4
					Código: H-G-56		Área: 0.06 m ²
					Plano N° 2a		