

## 第Ⅱ部 各 論

## 第1章 既存資料解析

### 1-1 地質概要

ボリヴィアの地質はプレカンブリア紀、古生代、中生代、第三紀と第四紀層および中生代と第三紀火成岩の貫入岩から構成されている (Fig. I-3-1)。

地質構造区は細かく8つに分かれ、西から東へ、西アンデス、西アルチプレーノ、東アルチプレーノ、東アンデス、インターアンデス、サブアンデス、ベニ・チャコ平原、アマゾンクラトンと呼ばれる (Fig. II-1-1)。

調査対象地域は西アンデスとアルチプレーノに属する。

#### 1) 西アンデス

西アンデスには、中～古生界基盤岩類の南北性隆起軸に沿って噴出した第三紀～現世の火山岩類が広範に分布し、火山体の間には陸成～浅海成の堆積物が存在している。

西アンデスは、西部の優地向斜—火山弧と東部の劣地向斜から構成され、ヘルシニア造山運動に引き続き漸新世後期に始まったナスカプレートの南米プレートへの沈み込み（アンデス造山運動）に呼応して発達した。この火山活動に伴って、多数の成層火山が形成されている。

劣地向斜の頁岩、砂岩はジュラ期後期から白亜紀初期を通して孤立した背弧海盆に堆積した。

白亜紀後期までの一時期に、優地向斜の外側に溶岩流や火山砕屑岩が堆積した。

その後西アンデスの大部分の地区は隆起し、陸成堆積物が劣地向斜に交差して堆積し、ペルーやチリの海岸バソリスを構成する大規模花崗岩系深成岩体（プルトン）が優地向斜で生じた。

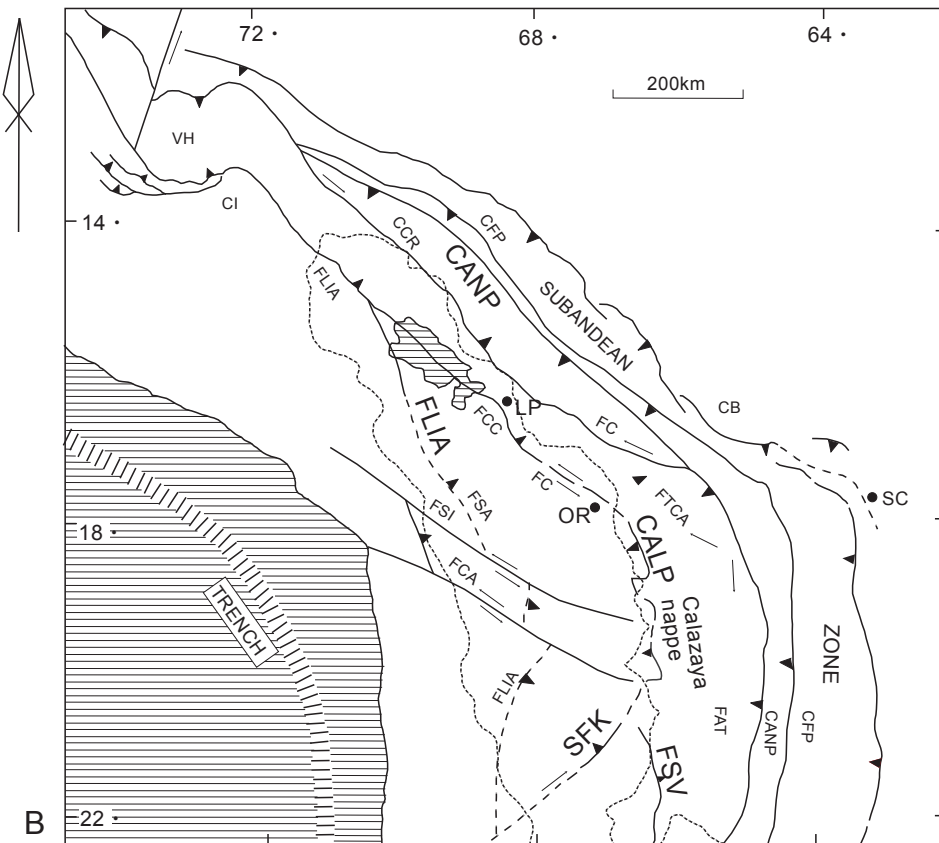
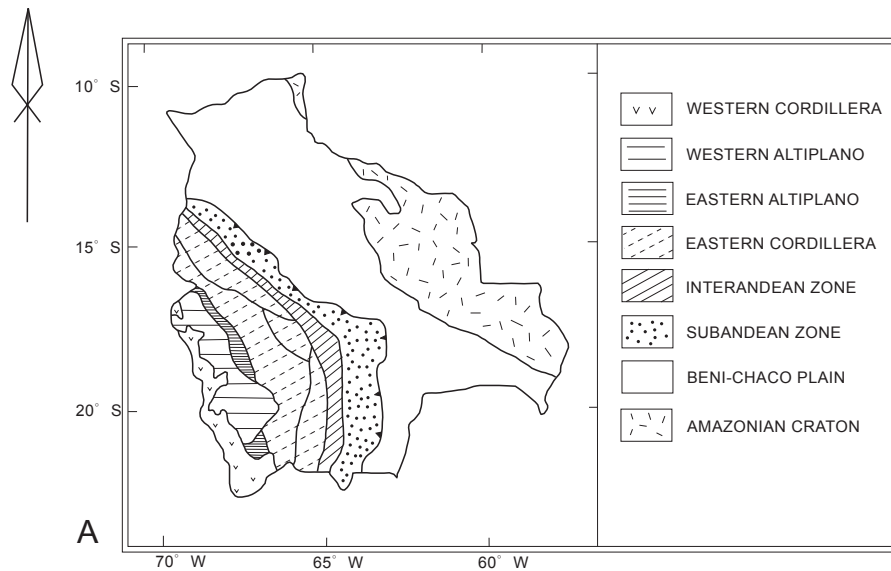
山稜を形成する火山岩類は中新世後期～鮮新世の安山岩、流紋岩溶岩を主とし、山頂付近には第四紀のデイサイト類も存在している。

#### 2) アルチプレーノ

アルチプレーノには、原生界ないし古生界を基盤とし、白亜紀～現世の膨大な火山噴出物と陸成堆積物の累層が広範囲に存在している。

アンデス造山運動が始まり、アルチプレーノを含む大陸縁に沿って造構運動が顕著になった。

陸成堆積作用は、白亜紀後期に始まり新生代、更新世の大半を通じて引き続いた。陸成堆積物は、白亜紀後期の陸成モラッセ堆積物（赤色層）と、始新世～漸新世の前地盆堆積物（砂岩、砂



Position of the Calazaya nappe within the Bolivian orocline (from Sempere et al., 1991). Fine dotted line: boundary of the present-day endreic Altiplano basin. FLIA=Intra-Andean Boundary Fault. CANP=Main Andean Thrust. CALP=Main Altiplanic Thrust. SFK=Khenayani Fault System. FSV=San Vicente Fault. LP= La Paz. SC=Santa Cruz. OR=Oruno.

CB=Chapare buttress. CCR=Cordillera Real Thrust. CFP=Main Frontal Thrust. CI=Cuzco indenter. FAT=Auiquil-Tupiza fault. FC=Cochabamba Fault. FCA=Chita-Africa Fault. FCC=Coniri Thrust Front. FE=Eucaliptus fault. ESA=San Andres Fault. ESI=Sevaruyo-Incapuquio fault. FTCA=Toracari Fault-Arque Thrust. VH=Wilcabamaba hinge.

**Fig.II-1-1 Structural Geology of the Central Andes**

A: Modified from Baby et al., 1992b, with Western Cordellera volcanic arc added.  
 B: From Baby et al., 1992a. Additional structure names from Sempere et al., 1988.

岩・泥岩互層)で構成されている。

その後アルチプラーノの大部分は大きな氷河湖に覆われた。その名残が現在の塩湖である。

火成活動は中新世～鮮新世に生じ、南部では中新世に安山岩質の噴出活動が、北部では中新世～鮮新世に流紋岩質火砕岩類の噴出活動が継続し、膨大な量の陸成火山噴出物が堆積している。

### 3) 東アンデス

東アンデスでは、先カンブリア紀を基盤として堆積した古生代～中生代の厚い堆積岩類(劣地向斜堆積物)がカレドニア期(オルドビス紀)、ヘルシニア期(デボン紀～三畳紀)、アンデス期(白亜紀～新生代)の造山運動を被り、南北系の軸をもつ衝上断層や複雑な褶曲構造が形成されている。

ヘルシニア造山運動の終焉(二畳紀～三畳紀)とともに、本地域は張力変動の場(環境)となり、過アルカリ質火山活動と花崗岩質深成岩の侵入が生じている。

花崗閃緑岩やアダメロ岩の深成岩は主に東アンデスの北部でバソリスやラコリスとして生じている。一方、中部や南部にみられる貫入岩は半深成岩や火山岩タイプでストックや火山ネックとして現れているが、例外としてポトシ近くのカリ・カリ(Kari Kari)深成岩(花崗閃緑岩)がある。

その後、プレートの沈み込みが始まり、ジュラ紀から新生代にかけて続く、カルクアルカリ質火山活動が引き起こされた。

アンデス造山期(第三紀)に東アンデスは東西の圧縮変動により隆起し、褶曲帯や衝上断層帯が形成され、西側では安山岩質火山活動とそれに引き続く半深成岩の貫入や、アルチプラーノ側への押し被せなどが生じている。

オルロ地域では北西―南東に走る背斜や向斜の褶曲軸が数多く存在する。さらに褶曲軸に平行な断層が顕著に発達している。

アルチプラーノと東アンデスは普通これらの断層で境されている。

地質構造と岩相は地形に反映されており、山脈は褶曲軸や断層に平行になっている。

## 1-2 調査地域の鉱化作用概要

西アンデス、アルチプラーノ、東アンデスを含む地域は金属鉱床が集中する地帯であり、そこにはアルカリ玄武岩に伴う銅鉱化作用や古第三紀の赤色砂岩層に伴う堆積性銅鉱化作用、ポリビア型と称され錫・銀を主体とする多金属鉱化作用及び金・銀を主体とする浅熱水鉱化作用が知ら

れている (Fig- I -3-4, Fig II -1-2)。

東アンデスからアルチプレーノにかけてポリ ヴィア型多金属鉱脈鉱床が認められ、アルチプレーノ中央部の北から南にかけてはアルカリ玄武岩や赤色砂岩に伴われる銅鉱床が存在する。

西アンデスには、中新世のデイサイト質火山岩中に胚胎する小規模な浅熱水性金・銀鉱脈が知られており、これらの一部は、銅、鉛、亜鉛、ビスマスなどの硫化鉱物を伴っている。

### アルカリ玄武岩および古第三紀の赤色砂岩層に伴う堆積性銅鉱化作用

アルチプレーノ中央の北から南にかけて分布が知られているが、比較的規模が小さくその大部分がすでに採掘済みである。

漸新世後期のアルカリ玄武岩に自然銅や赤銅鉱などが細脈状もしくは鉱染状に認められる鉱床と、古第三紀の赤色岩層中に黄銅鉱、斑銅鉱、自然銅、二次銅鉱などが層状や鉱染状に認められる鉱床の2つのタイプがある。

後者のタイプの代表はコロコロ鉱山で、このためにコロコロ型銅鉱化作用と呼ばれている。

### 新第三紀火山活動に関係するポリ ヴィア型多金属鉱脈鉱床

ポリビア型多金属鉱脈鉱床は、中～浅深度に貫入した火成岩に関係する細脈や微脈群で形成される鉱床で、錫、銀、金、銅、鉛、亜鉛、タングステン、ビスマス、アンチモンなど多種類の金属の一部ないしは全部を含有している。

鉱床は安山岩質～デイサイト質な貫入岩（岩株、岩脈群）に関係しており、火山岩と関係あるものはまれで、主に古生代の堆積岩や変堆積岩（変成岩）が分布する東アンデスと、陸成堆積物や火山岩が堆積したアルチプレーノに存在している。

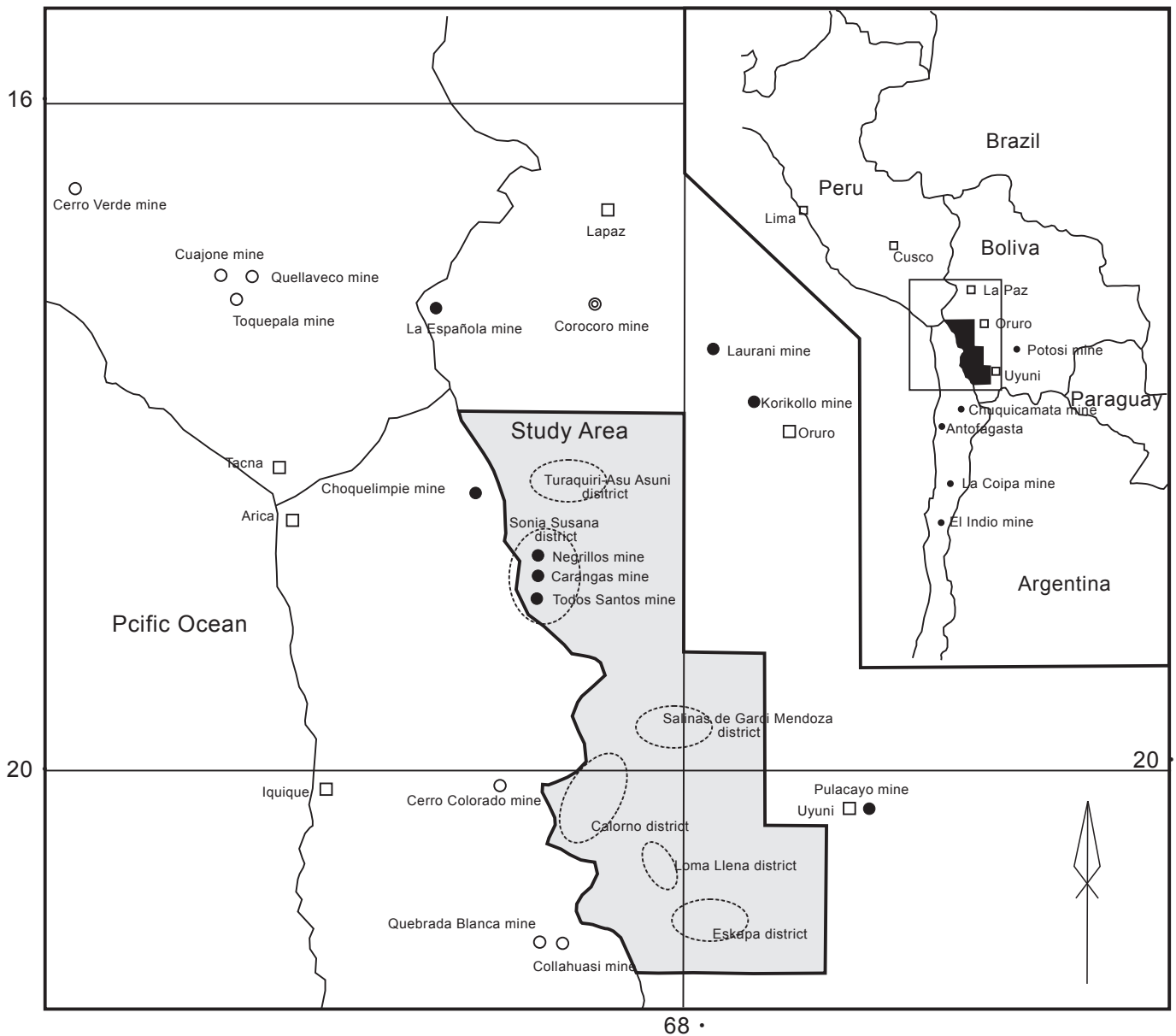
これらの鉱床の多くは垂直や水平方向への連続が良好である。

鉱脈の 90%（重量比）以上が黄鉄鉱、白鉄鉱、磁鉄鉱などの硫化鉱物で構成されており、非硫化物の脈石に乏しいのが本鉱化作用の特徴である。

熱水変質では、石英—絹雲母—黄鉄鉱の組み合わせが特徴的で、鉱床上部や外郭部には粘土化が進み明礬石を含む変質部が存在している。

鉱床生成の時期は三疊紀、漸新世、中新世の3時期とされているが、大部分の鉱床は中新世（中～後期）に形成されている。

流体包有物の均質化温度と塩濃度の測定結果や地質層序の復元などから、大部分のポリビア型



**Legend**

- Epithermal precious metal deposits
  - Porphyry copper deposits
  - ⊙ Others
  - Ore showings
- 0 100km

Fig.II-1-2 Location Map of the Ore deposits and Showings in the Adjacent Area

多金属鉱床は地表下 0.5 km～2 kmの深度で形成されたと推測されている。

アルチプレーノのポリヴィア型多金属脈鉱床は、上部第三系～第四系に覆われ解明されていない部分もあるが、相対的に錫とタングステンが少なく銅に富む銅・鉛・亜鉛脈鉱床が多い。

鉱床生成の時代は中新世とされており、東アンデスの鉱化作用に見られる東から西への帯状配列の一部をなしていると解釈されている。

様々な鉱床タイプが知られているが、次の2つに大別される。

#### 銀と錫に富む鉱床タイプ

本タイプの鉱化作用は東アンデスに見られるもので、銀—錫—鉛—亜鉛—タングステン—ビスマス—金などの鉱物学的に複雑な組み合わせを有している。

代表的な鉱床としてセロ・リコ・デ・ポトシ鉱山、プラカヨ鉱山、ワヌニ鉱山などが挙げられる。

銀の硫酸塩鉱物に富む鉱床と、上部銀ゾーンの剝削（浸食）が進んで下部の錫ゾーンが現れている鉱床の2種類がある。

#### 銀、金および銅に富む鉱床タイプ

本タイプの鉱化作用はアルチプレーノに見られ、その代表として現在稼行中のコリ・コージョ鉱山が挙げられる。

コリ・コージョ鉱山は銀、金、少量の銅を伴う鉱床で、外観上は含金・銀硫化鉄鉱床に類似しているが、鉛、亜鉛、アンチモン、錫などの存在が認められていることから多金属鉱床に分類されている。

#### **新第三紀火山活動に関する浅熱水性金・銀鉱床**

火山岩に胚胎する浅熱水貴金属鉱床は、空間的にも時間的にも成層火山の噴火センター、カルデラおよび火山コンプレックス内のドームに関係している。アデュラリアー絹雲母型（低硫化系）と硫酸酸性型（高硫化系）の両方の鉱床を含んでおり、それぞれサブタイプが知られている。

年代測定結果は、大部分の貴金属鉱床が中新世中期(17～9Ma)に、いくらかは鮮新世—更新世(5～1.2Ma)に形成されたことを示している。そして現在も、活熱水システムや噴気段階の成層火山に付随して形成中と考えられている。

鉍化作用は、黄鉄鉍、硫砒銅鉍脈の発達で特徴づけられ、周辺部にはベースメタルと銀を伴う脈が発達している。

このタイプの鉍床としてラウラニ(Laurani)鉍山が挙げられる。

#### 浅所の半深成貫入活動に関する浅熱水性鉍床

ラ・エスパニョーラ(La Española)鉍山の小規模に採掘された石英脈は、明礬石・カオリンを伴う高硫化系浅熱水鉍脈と言われており、その他の鉍化作用は、ボリビア型多金属鉍脈鉍床に比べベースメタルや錫の含有に乏しい。

これらの珪化変質を伴う鉍化作用は火山活動または浅い半深成岩活動に関係して形成された浅熱水性の貴金属鉍床と解釈され、金、銀、硫化鉍物鉍染状鉍化部の下部には斑岩金型鉍化作用の存在（斑岩型金鉍化作用の縁辺部（上部）に相当すると考えられている）も期待されている。



## 第2章 衛星画像解析

### 2-1 目的

衛星データの持つスペクトル情報及びテクスチャー情報を利用し、地質単元区分図、リニアメント図を作成して広域的な地質構造を把握し、併せて鉱化変質帯を示唆すると考えられるスペクトル異常域を抽出することにより、調査地域における鉱物資源賦存ポテンシャル評価のための基礎資料を提供することを目的として解析を実施した。

### 2-2 画像判読・解析

衛星画像解析に使用した LANDSAT TM データ 7 シーンを Table II-2-1 に示す。

Table II-2-1 List of LANDSAT TM data

Scene No.	Path	Row	Date
1	1	72	1987.05.30
2	2	72	1986.11.10
3	233	75	1986.05.30
4	1	73	1987.05.30
5	1	74	1986.10.02
6	233	73	1986.08.08
7	233	74	1989.07.23

作成された 7 シーンのカラー合成画像と比演算結果異常域画像を用いて、各シーン毎に縮尺 25 万分の 1 で地質単元、地質構造、変質帯の判読作業を実施した。Fig. II-2-1 に判読に使用した LANDSAT TM 7 シーンのカラー合成画像のモザイクを示す。

地質判読作業は、50 万分の 1 の地質図 (U.S. Geological survey Bulletin, 1975) を参考にした。7 シーンの地質単元区分を 1 つにまとめたものを Fig. II-2-2 に示す。また、判読図の地質単元と既存地質図の地質単元の対比を Table II-2-2 に示す。

地質構造の判読結果を Fig. II-2-3 にスペクトル異常域画像の判読作業により変質帯として抽出した箇所を Fig. II-2-4 に示す。変質帯の抽出作業では、沖積層分布域及び急峻な西南向き斜面にみられる太陽光の陰の部分等に表れるスペクトル異常域は除外した。

粘土化・炭酸塩化変質帯の存在を示唆すると解釈されるスペクトル異常域は緑色、鉄酸化物変質帯の存在を示唆すると解釈されるスペクトル異常域は赤色、粘土化・炭酸塩化変質帯と酸化鉄帯の両方の存在を示唆すると解釈されるスペクトル異常域は黄色を示す。

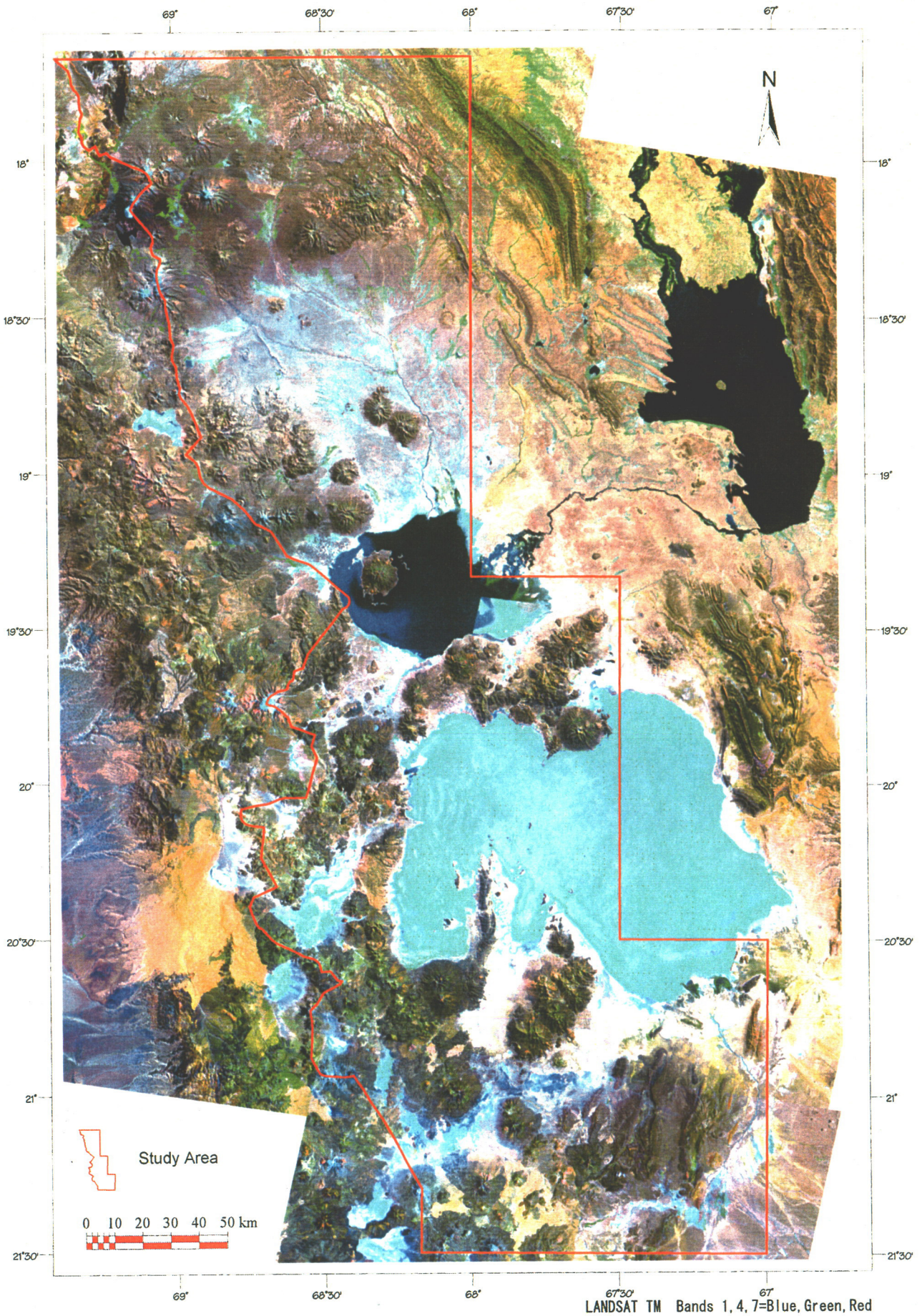


Fig.II-2-1 LANDSAT TM Color Composite Image

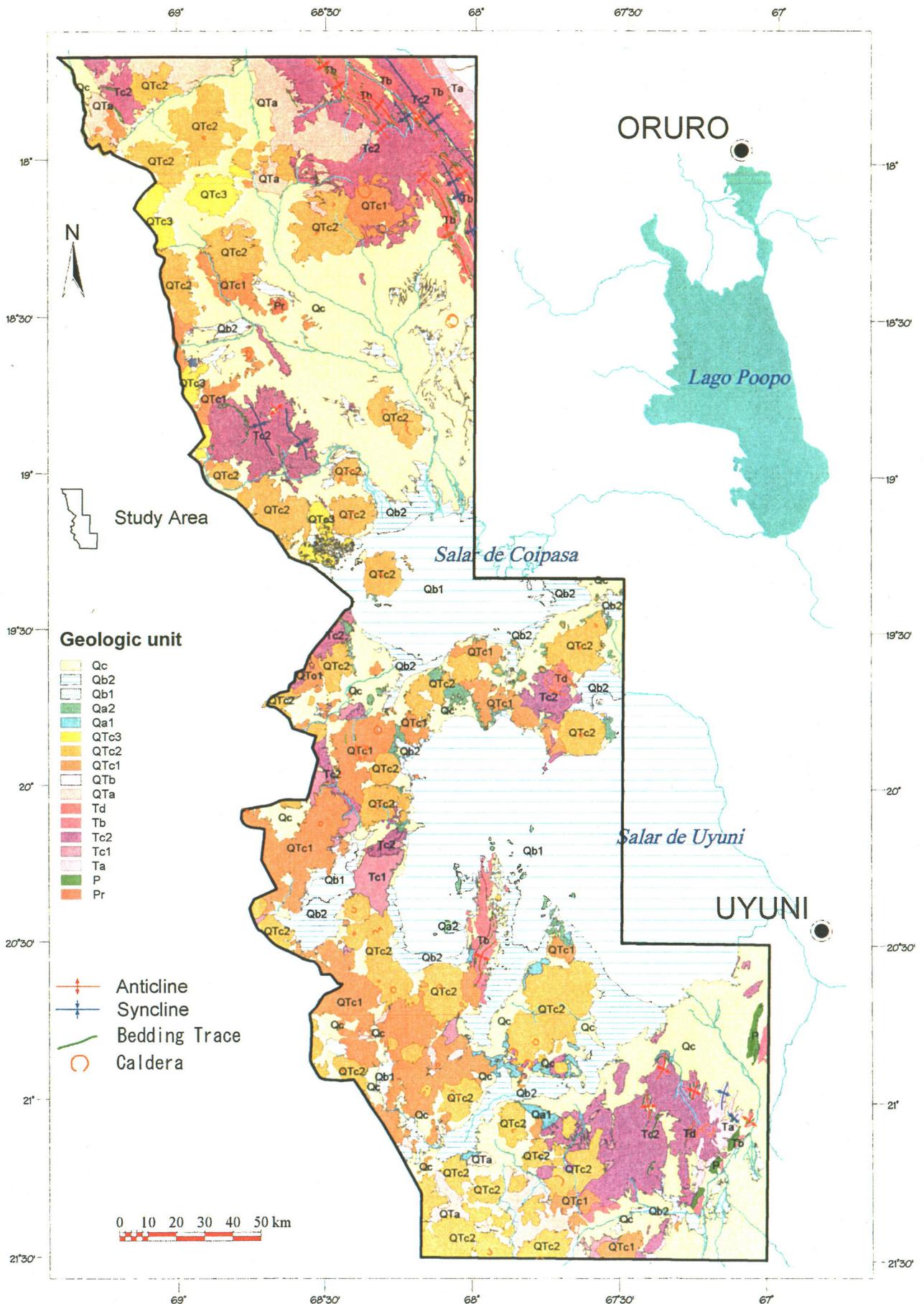


Fig. II-2-2 Geologic Interpretation Map of the LANDSAT TM Image

Table II-2-2 List of geologic unit

GEOLOGIC UNIT	COLOR on LANDSAT TM Color Composite Image	TEXTURE	DRAINAGE		ROCK RESISTANCE	BEDDING	LINEAMENT DENSITY	LITHOLOGY	GEOLOGICAL CORRELATION (U. S. Geological survey Bulletin, 1975)	
			PATTERN	DENSITY						
Qc	brownish gray, dark gray ~ light gray, pale brown	fine	dichotomic, dendritic	low - middle	low	-	rare	alluvium, talus deposit	Qau	Surficial deposits (Holocene and Pleistocene)
Qb2	white, bluish white, dark ~ pale brown	fine	dichotomic	low	low	-	-	salt	Qs	Salt deposits (Holocene and Pleistocene)
Qb1	blue, light blue	fine	-	-	low	-	-			
Qa2	grayish brown, brownish gray	medium	parallel, dendritic	middle - high	high	poor bedded	-	limestone	Ql	Lacustrine deposits (Qa2: Minchin Limestone) (Holocene and Pleistocene)
Qa1	yellowish gray	fine	parallel, dendritic	middle - high	low	poor bedded	-	lake deposits		
QTc3	dark bluish gray, dark green	coarse - medium	radial, sub-dendritic	low	high	-	low	andesite, dacite	QTev	Stratovolcano deposits (Holocene to Miocene)
QTc2	dark brown ~ brown, dark gray	fine - medium	radial	low	high	-	low	andesite, dacite		
QTc1	dark gray ~ gray, brown	coarse - medium	sub-dendritic	middle - high	high	-	low	andesite, dacite		
QTb	brownish gray ~ light gray, yellowish gray	medium	pinnate	high	middle	-	-	conglomerate, sandstone, shale	QTs	Sedimentary rocks (Pleistocene and Pliocene)
Qta	pale brown, grayish brown	fine	parallel, dendritic, sub-dendritic	high	middle	-	-	ignimbrite	QTig	Ignimbrite (Perez tuff) (Pleistocene to Miocene)
Td	brownish gray, dark ~ light gray, reddish brown	medium	sub-dendritic	middle	high	-	-	dacite	Tl	Intrusive rocks (Pliocene to Oligocene)
Tc2	dark ~ pale brown, dark ~ light gray, grayish green	medium	parallel, dendritic, sub-dendritic, pinnate, radial	middle - high	high - middle	poor bedded - well bedded	low	volcanic rocks, pyroclastic rocks	Tvd Tig	Volcanic rocks, Pyroclastic rocks (Tc2: Tagua Formation, Mauri Formation, Carangas Formation, Murmuntani Formation) (Tc1: Quemez Formation) (Miocene and Oligocene)
Tc1	pale brown	fine	colinear, dendritic	high	middle	poor bedded	low	ignimbrite		
Tb	dark gray, brown, yellowish brown	medium	parallel, dendritic	high	middle	poor bedded - well bedded	low	conglomerate, sandstone, shale	Ts2	Sedimentary rocks (Pliocene to Oligocene)
Ta	dark brown ~ brown, brownish gray	fine	parallel, dendritic	low - middle	middle	bedded - well bedded	low	conglomerate, sandstone, shale	Ts1	Sedimentary rocks (Oligocene to Paleocene)
P	brown, yellowish brown	medium	trillitic	middle	high	bedded - well bedded	low	sandstone, shale	Pzs	Sedimentary rocks (Paleozoic)
Pr	light brown ~ brown, dark gray	coarse - medium	sub-dendritic	middle	high	-	low	gneiss	QTig	Gneiss (Proterozoic)

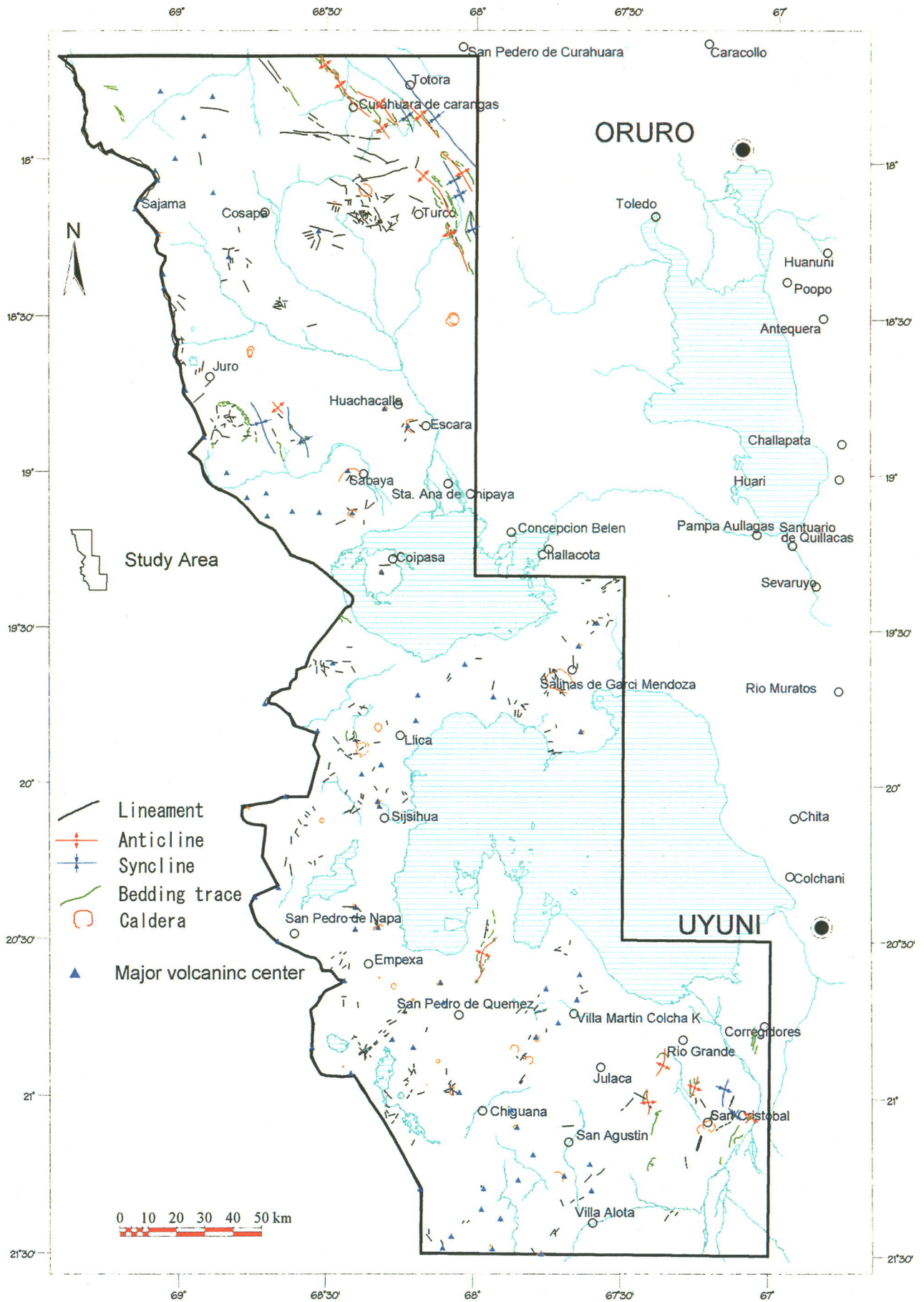


Fig. II-2-3 Extracted Lineament Map of the LANDSAT TM Image

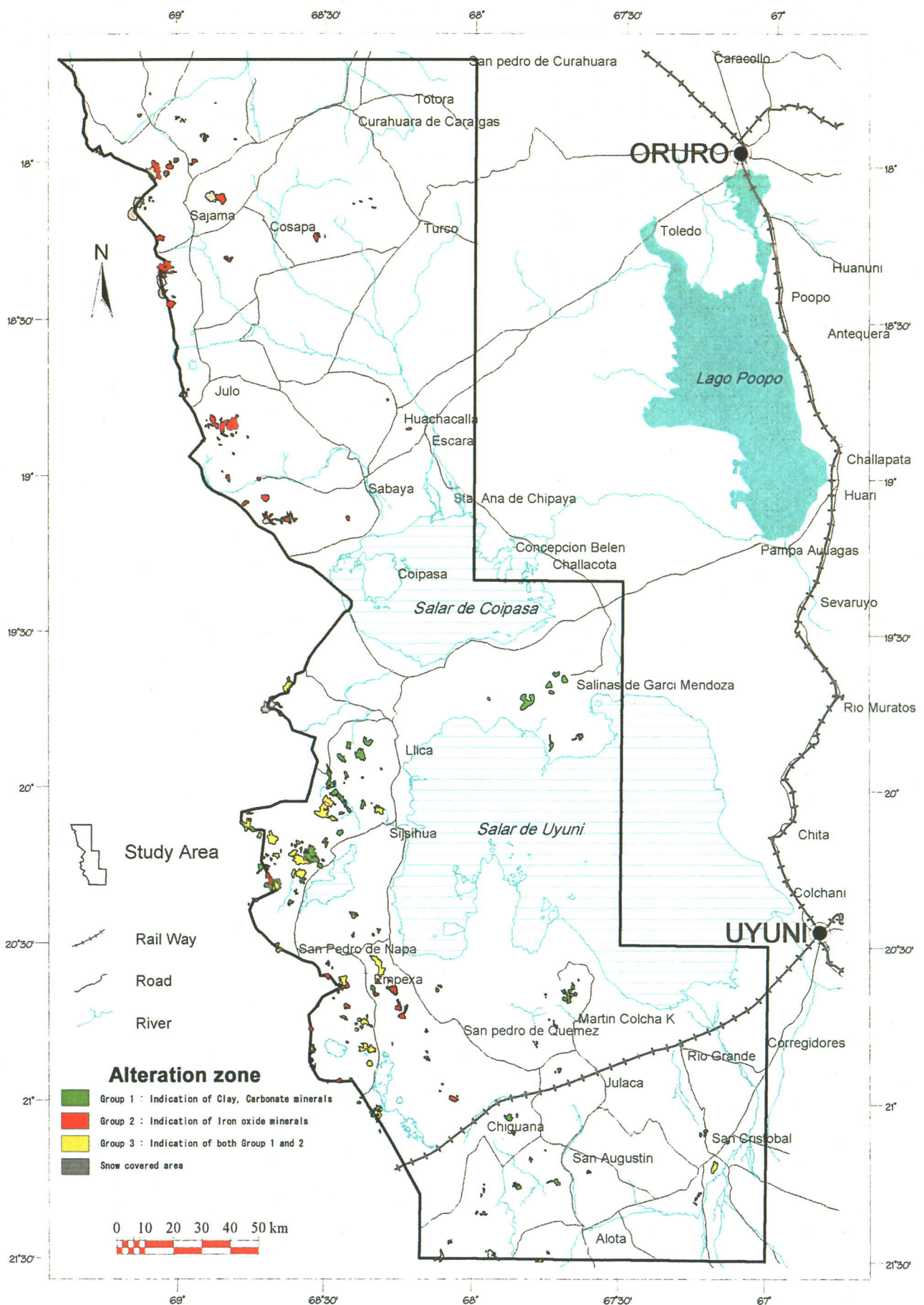


Fig.II-2-4 Extracted Alteration Map of LANDSAT TM Image

### 2-3 解析結果総括

解析結果の総括を下記に記す。

- (1) カラー合成画像の判読の結果、鉍化作用に関係するとされる中新世～完新世の火山活動に伴う溶岩、火山砕屑岩は、本解析では QTc1 , QTc2, QTc3 の3つの地質単元に区分された。QTc2 及び QTc3 は明瞭な成層火山の地形を示すのが特徴で、QTc3 ではさらに爆裂火口や溶岩流の形跡がはっきりと認められる。これらに対し QTc1 の成層構造は浸食作用の影響により不明瞭である。
- (2) 変質帯を示唆すると考えられるスペクトルの異常域は、地質単元 Tc2, QTc1 , QTc2 及び QTc3 に認められた。地質単元 Tc2 と QTc1 では、浸食の進んだ火山岩・火山砕屑岩中に変質帯が抽出された。一方、地質単元 QTc2 , QTc3 では成層火山の火口内部やその周辺に抽出された。現世の火山と推定される地質単元 QTc3 中に抽出された変質帯は、鉍化帯を胚胎するには新しすぎるので、探鉍有望地からは除外した。
- (3) リニアメントの判読結果は対象地域の構造運動史を反映しており、アンデス造山期以前の地質単元 P, Ta, Tb, Tc2 中には褶曲や衝上断層が認められるが、それ以降の地質単元中のリニアメントは疎であり、短く連続性がない。また、抽出された変質帯とリニアメントの関連性ははっきりしない。
- (4) 地質単元 QTc2 中に抽出された変質帯のうち成層火山の山頂付近に分布するもので、噴気性硫黄堆積物のあるものは探鉍有望地の候補から除外した。
- (5) 地質単元 QTc2 中に抽出された変質帯のうち成層火山の山頂付近に分布するものでチリとの国境にまたがって分布する変質帯は探鉍有望地の候補から除外した。
- (6) 単独に分布する2平方キロ未満の変質帯は探鉍有望地の候補から除外した。

解析結果総括図を Fig. II-2-5 に示す。上記考察結果から選定した探鉍有望地と考えられる変質帯分布地区を図示するとともに、変質帯に関係する第三紀の火山岩類(単元 Tc2, QTc1 , QTc2)の分布、変質帯分布、リニアメント分布、既知鉍床・鉍徴地・堆積成硫黄鉍床分布を図中に重ね合わせて表示した。

探鉍有望地として選んだ地区の概要を Table II-2-3 に示す。変質帯の分布規模は、各地区での分布面積の合計が2～10平方キロを小、10～20平方キロを中、20平方キロ以上を大とした。

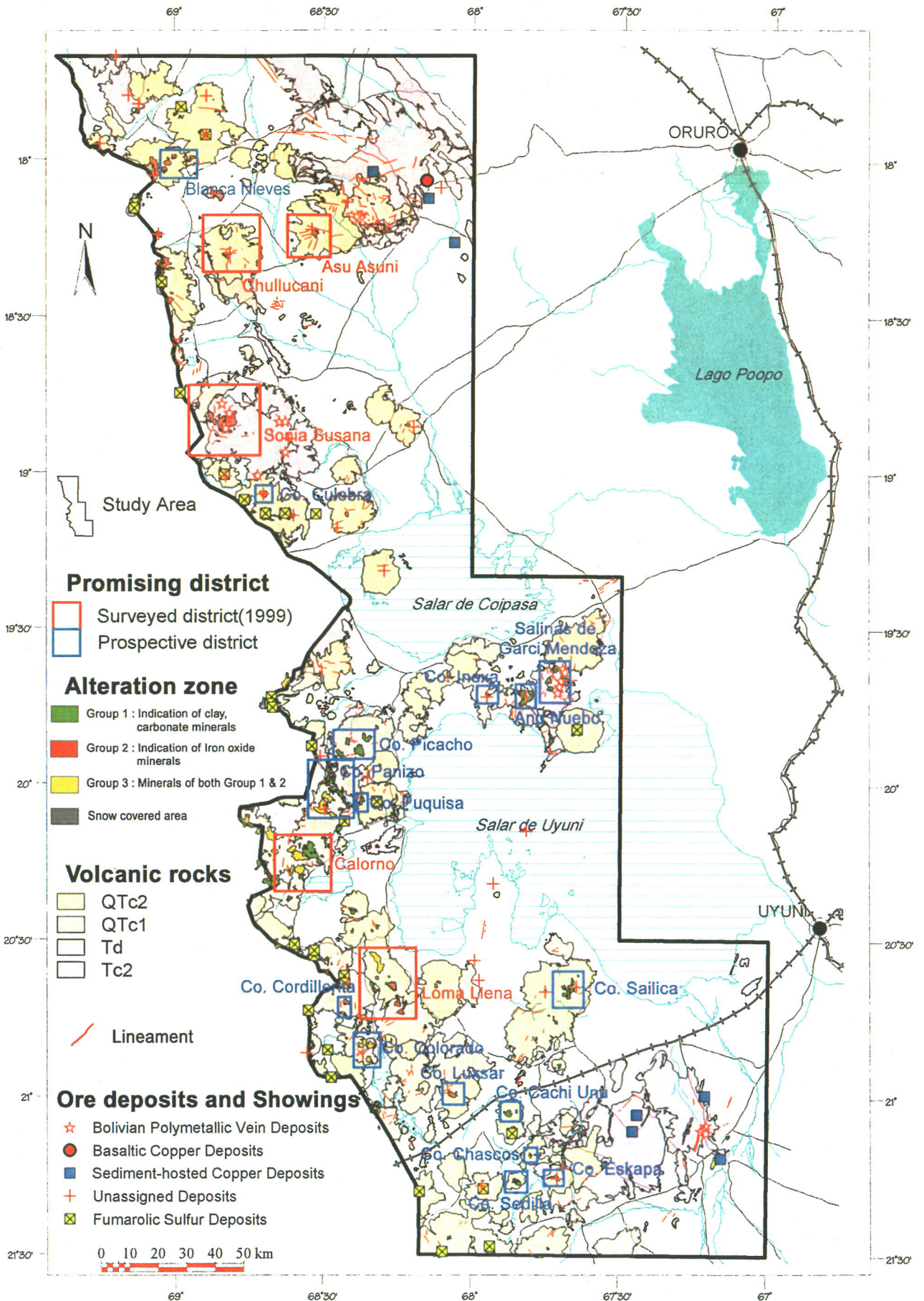


Fig. II-2-5 Integrated Map of Satellite Image Analysis



Table II-2-3 Summary of Prospective District

District	Location of alteration zone	Geologic unit of alteration zone	Indicated mineral	Scale of alteration zone (km <sup>2</sup> )
Blanca Nieves	Slope	QTc2	Iron oxide	9
Chullcani	Top of the Mt.	QTc2	Iron oxide	3
Asu Asuni	Top of the Mt.	QTc2	Iron oxide	4
Sonia Susana	Centre of Dome Struct.	Tc2	Iron oxide	28
Cerro Culebra	Top of the Mt.	QTc2	Iron oxide	5
Salinas de Garci Mendoza, Año Nuevo, Iñexa	Top of the Mt.	Tc2	Clay, Carbonate	26
Cerro Picacho	Widely distr.	QTc1	Clay, Carbonate	22
Cerro Panizo Cerro Puquisa	Widely distr.	QTc1	Iron oxide, Clay, Carbonate	40
Calorno	Widely distr.	QTc1	Iron oxide, Clay, Carbonate	30
Loma Llena	Widely distr.	QTc1	Iron oxide, Clay, Carbonate	27
Cerro Cordillerita	Slope	QTc1	Iron oxide, Clay, Carbonate	4
Cerro Colorado	Top of the Mt.	QTc1	Iron oxide, Clay, Carbonate	12
Cerro Sailica	Top of the Mt.	QTc2	Iron oxide, Clay, Carbonate	10
Cerro Luxsar	Top of the Mt.	QTc2	Iron oxide, Clay, Carbonate	4
Cerro Cachi Unu	Top of the Mt	QTc2	Clay, Carbonate	4
Cerro Sedilla Cerro Chascos	Top of the Mt	QTc2	Iron oxide, Clay, Carbonate	4
Cerro Eskapa	Slope	QTc2	Clay, Carbonate	2