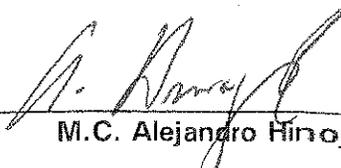


BIBLIOTECA
CICHSB

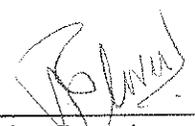
TESIS DEFENDIDA POR

María Cristina Noyola Medrano

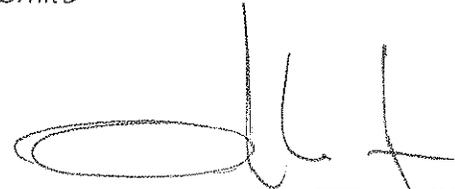
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ


M.C. Alejandro Hinojosa Corona

Director del Comité


Dr. Carlos Francisco Flores Luna

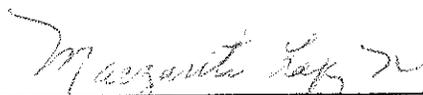
Miembro del Comité


Dr. Jesús Arturo Martín Barajas

Miembro del Comité


M.C. Jorge Torres Rodríguez

Miembro del Comité


Dra. Margarita López Martínez

Jefe del Departamento de Geología


Dr. Federico Graef Ziehl

Director de Estudios de Posgrado

20 de septiembre de 1999

**BIBLIOTECA
CICSEB**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA.**



**DIVISIÓN CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**APLICACION DE LA PERCEPCION REMOTA (LANDSAT TM) EN LA
CARACTERIZACION LITOLOGICA DE LA FRANJA COSTERA ENTRE
PUERTECITOS Y BAHIA DE SAN LUIS GONZAGA, BAJA CALIFORNIA,
MEXICO.**

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO
EN CIENCIAS presenta:

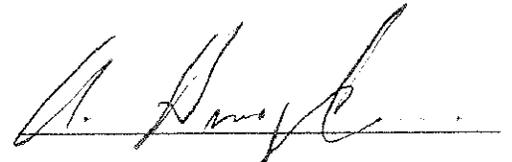
MARIA CRISTINA NOYOLA MEDRANO

Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 1999.

RESUMEN de la tesis de **MARIA CRISTINA NOYOLA MEDRANO**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA** con especialidad en **GEOLOGIA**. Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 1999.

APLICACION DE LA PERCEPCION REMOTA (LANDSAT TM) EN LA CARACTERIZACION LITOLOGICA DE LA FRANJA COSTERA ENTRE PUERTECITOS Y BAHIA DE SAN LUIS GONZAGA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO.

Resumen aprobado por:



M. en C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de tesis.

La franja costera entre Puertecitos y la Bahía de San Luis Gonzaga tiene una longitud de 100 km y cubre un área de aproximadamente 3000 km². La litología está constituida por rocas metasedimentarias del Paleozoico – Cretácico, intrusivos tonalíticos y granodioríticos del Cretácico, rocas volcánicas principalmente ignimbritas, domos riolíticos, flujos de lava andesítica - dacítica y domos dacíticos, todos de edad Mioceno – Plioceno, sedimentos marinos y continentales del Plioceno y aluviones del Cuaternario.

En este estudio se analizó una imagen Landsat Thematic Mapper (TM) del 20 de julio de 1987 utilizando algunas técnicas de la percepción remota como la combinación de bandas, clasificación no supervisada, componentes principales, cociente de bandas, clasificación supervisada mejorada y el análisis de firmas espectrales, con la finalidad de obtener mapas litológicos de la zona de estudio a escala 1:100,000 y 1:250,000.

La mejor combinación de bandas obtenida es la TM 742 en rojo, verde y azul respectivamente. Dicha combinación permitió identificar las unidades litológicas más grandes como las tobas que cubren la mayor parte de la zona de estudio, además discrimina bien las unidades de metasedimentos y rocas graníticas de la parte central y sur respectivamente. Con la clasificación no supervisada se logró una buena aproximación inicial obteniéndose 21 clases litológicas de las cuales 9 son de rocas ígneas, 2 de rocas metamórficas y 10 son de sedimentos; sin embargo, con esta clasificación se presentaron problemas de confusiones de clases. Mediante la técnica de componentes principales se obtuvo una imagen en falso color utilizando las segundas componentes de los pares de bandas TM 5 y 7, 4 y 7, 2 y 7 en rojo, verde y azul respectivamente, lográndose un mayor contraste entre las diferentes unidades litológicas, lo que ayudó a identificarlas más fácilmente incluyendo a las unidades pequeñas de menos de 10 píxeles. Con la técnica de cociente de bandas se diferenciaron unidades con base en la mineralogía y el intemperismo

de las distintas unidades de roca. Los polígonos envolventes con las diferentes coberturas litológicas se lograron mediante la reclasificación y generalización de una clasificación supervisada mejorada obteniéndose 26 clases litológicas diferentes de las cuales 13 pertenecen a rocas ígneas, 3 son de rocas metamórficas y 10 corresponden a sedimentos. El análisis de firmas espectrales permitió establecer diferencias entre las distintas unidades litológicas mediante la comparación de los valores de brillo de cada tipo de roca.

El mapa litológico resultante de la clasificación supervisada mejorada fue evaluado por los métodos de matriz de confusión e índice kappa (κ). La evaluación resultó en un 79.01% de confiabilidad y con un κ de 0.733 por lo cual se considera que el resultado cumple con los esquemas de evaluación y permite recomendar el uso de este mapa para estudios posteriores sobre la zona de estudio.

Palabras clave: Percepción remota, Landsat TM, procesamiento de imágenes, litología.

ABSTRACT of the thesis of **MARIA CRISTINA NOYOLA MEDRANO**, presented as partial requirement to obtain **MASTER IN SCIENCES** grade in **EARTH SCIENCES** with speciality in **GEOLOGY**. Ensenada, Baja California, Mexico. September, 1999.

APPLICATION OF REMOTE SENSING (LANDSAT TM) TO THE LITHOLOGIC CHARACTERIZATION OF THE COASTAL ZONE BETWEEN PUERTECITOS AND SAN LUIS GONZAGA BAY, BAJA CALIFORNIA, MEXICO.

ABSTRACT

The coastal zone between Puertecitos and San Luis Gonzaga Bay, has a length of 100 km and covers an area of approximately 3000 km². The lithology is composed of Paleozoic-Cretaceous metasedimentary rocks, Cretaceous tonalite and granodiorite intrusives, volcanic rocks (principally ignimbrites, rhyolitic domes, flows of andesitic-dacitic lava and dacitic domes) whose ages vary from the Miocene to the Pliocene, marine and continental sediments of Pliocene age and Quaternary alluvium.

A Landsat Thematic Mapper (TM) image acquired on July 20th of 1987 was analyzed using remote sensing techniques, among them are false color composites, unsupervised classification, principal components, bands ratio, enhanced supervised classification and spectral signatures analysis, to finally derive lithologic maps of the study zone at scales of 1:100,000 and 1:250,000.

The most useful combination of bands selected for the false color composites was TM 742 in red, green and blue respectively, this combination allowed to identify the largest lithologic groups like tuffs group that cover most of the area, besides this combination differentiates the metasedimentary units and granitic rocks from the central and south parts of the image. With the unsupervised classification, a good initial approximation was obtained with 21 lithologic classes, from which 9 pertain to igneous rocks, 2 to metamorphic and 10 to sedimentary rocks; however with this classification class confusions problems occurred. With the principal components technique, a false color image was generated using the second component of the pair of bands TM 5 & 7, 4 & 7, 2 & 7 in red, green and blue respectively, achieving a bigger contrast between the different lithologic units, including small units as small as 10 pixels. With the band ratio technique, information related to the mineralogy and weathering of the distinct rock units was revealed. With the enhanced supervised classification method and a further generalization process, lithologic polygons were extracted with the coverages of 26 different lithologic classes, from which 3 belong to metamorphic rocks, 10 to sediments

and 13 classes to igneous rocks. The spectral signatures analysis showed the differences between the distinct lithologic units and the brightness value for each kind of rock.

The resulting lithologic map obtained from the enhanced supervised classification was evaluated by the methods of confusion matrix and kappa index κ . The assessment showed a 79% reliability with a κ of 0.733, and the map so is considered acceptable for use in further research.

Keywords : Remote sensing, Landsat TM, digital image processing, lithology.

DEDICATORIA.

A Marco por su cariño, lealtad y comprensión en todo momento.

A mis padres por la fuerza y la fé que infundieron en mí.

A Claudia por nuestra amistad de tantos años.

AGRADECIMIENTOS.

A mi director de tesis M.C. Alejandro Hinojosa Corona, por su valiosa colaboración, no sólo en el aspecto técnico, sino moral y económico.

A los miembros del comité de tesis, Dr. Arturo Martín, Barajas, M.C. Jorge Torres Rodríguez y Dr. Carlos Flores Luna, por sus comentarios y correcciones al manuscrito.

A Guadalupe Martínez Vázquez y a Ma. del Carmen Pérez Aguilar por su ayuda en los trámites administrativos; a Víctor Frías Camacho, Julián Javier Delgado Jimenez. José de Jesús Mojarro Bermudez y Luis Gradilla Martínez por el apoyo técnico en los equipos de cómputo.

A todos mis profesores, compañeros y amigos, por la confianza y apoyo que depositaron en mí durante mi estancia en el posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

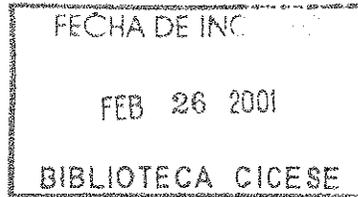
CONTENIDO

I. INTRODUCCION.	1
I.1. ESCENARIO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO.	8
I.2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA MULTIESPECTRAL LANDSAT TM.	9
I.3. OBJETIVO.	14
I.4. MATERIALES Y MÉTODOS.	15
II. PROCESADO DE LA IMAGEN LANDSAT THEMATIC MAPPER.	18
II.1 PRETRATAMIENTO.	18
II.1.1 Corrección atmosférica.	18
II.1.2 Corrección geométrica.	21
II.1.3 Radiancia.	26
II.2 TRATAMIENTO.	27
II.2.1 Composición de color ó falso color.	27
II.2.2 Clasificación no supervisada.	29
II.2.3 Análisis de componentes principales.	32
II.2.4 Firma espectral.	36
II.2.5 Cociente de bandas.	38
II.2.6 Clasificación supervisada mejorada.	39

II.3	POST-PROCESAMIENTO (SUPERVISADA Y NO SUPERVISADA).....	42
II.4	EVALUACIÓN DE EXACTITUD.	44
III.	LITOLOGIA.	47
III.1	ROCAS DEL BASAMENTO (PALEOZOICO – CRETÁCICO).....	49
III.1.1	<i>Metasedimentos 1, Paleozoico (Pzm1).</i>	49
III.1.2	<i>Metasedimentos 2, Cretácico (Km2).</i>	50
III.1.3	<i>Metasedimentos 3, Cretácico (Km3).</i>	51
III.1.4	<i>Basamento granítico, Cretácico (Kg).</i>	52
III.2	ROCAS DEL TERCIARIO.....	53
III.2.1	<i>Andesitas y dacitas, Mioceno (Tma).</i>	53
III.2.2	<i>Secuencia volcanoclástica, Mioceno (Tsv).</i>	54
III.2.3	<i>Andesita Potrero, Mioceno (Tb).</i>	56
III.2.4	<i>Complejo dacítico, Mioceno (Td).</i>	57
III.2.5	<i>Domos riolíticos e ignimbritas, Mioceno Medio (Tmr).</i>	57
III.2.6	<i>Tobas e ignimbritas, Plioceno (Tpr).</i>	59
III.2.7	<i>Andesita Volcán Prieto, Plioceno (Tpa).</i>	61
III.2.8	<i>Sedimentos marinos y no marinos, Plio-Cuaternario (Tps) y (PQcs).</i>	63
III.3	DEPOSITOS DEL CUATERNARIO.....	64
III.3.1	<i>Aluvión 1 (Qal1).</i>	65
III.3.2	<i>Aluvión 2 (Qal2).</i>	66
III.3.3	<i>Aluvión 3 (Qal3).</i>	68
III.3.4	<i>Aluvión 4 (Qal4).</i>	69

III.3.5	<i>Tefras (Qvt)</i>	69
III.3.6	<i>Travertino (Qtr)</i>	69
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	72
IV.1.	<i>Combinación de bandas (falso color)</i>	72
IV.2.	<i>Clasificación no supervisada</i>	80
IV.3.	<i>Análisis de componentes principales</i>	84
IV.4.	<i>Cociente de bandas</i>	95
IV.5	<i>Clasificación supervisada mejorada</i>	100
IV.6	<i>Firma espectral</i>	103
IV.7	<i>Evaluación del método</i>	111
IV.8	DISCUSIÓN.....	115
	CONCLUSIONES	128
	LITERATURA CITADA	131
	ANEXOS	142
1.	FACTORES QUE CAUSAN DISTORCIONES GEOMETRICAS EN LAS IMAGENES DE SATELITE.....	142
2.	TABLA MOSTRANDO LOS PUNTOS DE CONTROL SELECCIONADOS PARA GEORREFERIR LA IMAGEN LANDSAT TM CON SUS RESPECTIVOS ERRORES INDIVIDUALES.	148
3.	DESCRIPCION DE LOS PUNTOS VERIFICADOS EN CAMPO.....	151
4.	CALCULO DE LA MATRIZ DE COVARIANZA Y DE LA MATRIZ DE CORRELACION.....	162

5.	METODO DE MAXIMA SIMILITUD.....	166
6.	COMPILACION DE LA MATRIZ DE ERROR (MATRIZ DE CONFUSION).....	170
7.	MAPA LITOLÓGICO Y ESPACIOMAPA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	174



LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1.	CARACTERÍSTICAS DE REFLECTANCIA ESPECTRAL DE MATERIALES COMUNES DE LA SUPERFICIE TERRESTRE EN EL RANGO VISIBLE E INFRARROJO CERCANO Y MEDIO. TAMBIÉN SE INDICA LA POSICIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES DE ALGUNAS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE MÁS COMUNES. MODIFICADO DE RICHARDS (1993).....	3
2.	MAPA DE LA ZONA DE ESTUDIO MOSTRANDO CON RECUADROS LAS ÁREAS QUE HAN SIDO ESTUDIADAS A DETALLE. CUADRO 1 (MARTÍN-BARAJAS ET AL., 1993; 1995; 1997; MARTIN-BARAJAS Y STOCK, 1993), CUADRO 2 (NAGY, 1997); CUADRO 3 (DELATTRE, 1984; PHILLIPS, 1984; 1993; WEBSTER Y DELATTRE, 1993). CUADRO 4 (FLETCHER ET AL., 1997; MARTÍN-BARAJAS ET AL., EN PRENSA). EL RESTO DE LA ZONA HA SIDO MAPEADA POR EL INEGI Y POR GASTIL ET AL. (1975).	5
3.	MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. EN LA FIGURA INFERIOR IZQUIERDA SE MUESTRA UN RECUADRO CON ACHURADO DIAGONAL QUE SEÑALA EL ÁREA DE ESTUDIO QUE SE PRESENTA AMPLIADA EN LA FIGURA SUPERIOR DERECHA Y CON LAS PRINCIPALES RUTAS DE ACCESO	7
4.	A) ESQUEMA DE LA PLATAFORMA ESPACIAL UTILIZADA PARA OBTENER LAS IMÁGENES THEMATIC MAPPER (TM); SE AGREGA UNA FIGURA HUMANA (~2M) COMO ESCALA; B) FIGURA MOSTRANDO A DETALLE EL SISTEMA TM; C) CARACTERÍSTICAS DE BARRIDO EN EL SISTEMA TM. MODIFICADO DE SABINS (1997) Y RICHARDS (1993)	10
5.	A) ORBITAS HELIOSÍNCRONAS (CÍRCULO SÓLIDO) Y COBERTURAS DE LAS IMÁGENES (PATRÓN DE LÍNEAS) GENERADOS EN UN DÍA; B) SISTEMA DE REFERENCIA MUNDIAL UTILIZADO EN LA SEGUNDA GENERACION DE LANDSAT (4 Y 5) PARA EL ETIQUETADO DE LAS TRAYECTORIAS Y RENGLONES. MODIFICADO DE SABINS (1997) Y CAMPBELL (1996).....	13
6.	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO LA METODOLOGÍA A SEGUIR PARA EL PROCESAMIENTO Y OBTENCIÓN DE DATOS DE LA IMÁGEN THEMATIC MAPPER (TM) DEL 20 DE JULIO DE 1987.....	16

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

FIGURA	PAGINA
7. ILUSTRACIÓN DE UN CASO HIPOTÉTICO MOSTRANDO EL EFECTO ATMOSFÉRICO SOBRE EL PATRÓN DE BRILLO OBSERVADO EN LOS 6 HISTOGRAMAS DE UNA IMÁGEN LANDSAT TM	20
8. ESQUEMA MOSTRANDO LOS PUNTOS DE CONTROL QUE SE UTILIZARON PARA GEORREFERIR LA IMÁGEN. CON LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL SE PROCURA CUBRIR TODA EL ÁREA QUE ABARCA LA IMÁGEN TM. EL RECUADRO DE LÍNEA DISCONTÍNUA REPRESENTA LA ESCENA TM DEL 20 DE JULIO DE 1987 Y EL RECUADRO CON LÍNEA CONTÍNUA REPRESENTA LA ZONA DE ESTUDIO	22
9. SISTEMAS DE COORDENADAS DEFINIDOS PARA LA IMÁGEN Y EL MAPA CON LOS PUNTOS DE CONTROL ESPECIFICADOS. MODIFICADO DE RICHARDS (1993).....	24
10. LOCALIZACIÓN DE LOS CENTROS DE PÍXELES DENTRO DE LAS MALLAS CORRESPONDIENTES AL MAPA Y A LA IMÁGEN MEDIANTE EL USO DEL MAPEO DE POLINOMIO. MODIFICADO DE RICHARDS (1993)	24
11. CONVOLUCIÓN CÚBICA. CADA VALOR ESTIMADO (PUNTOS NEGROS) ES PRODUCTO DEL AJUSTE DE VALORES DE LOS 16 PÍXELES (CÍRCULOS BLANCOS) MÁS CERCANOS AL PÍXEL CENTRAL. MODIFICADO DE CAMPBELL (1996)	25
12. ESQUEMA DEL AGRUPAMIENTO EN DOS DIMENSIONES POR MEDIO DE LA OPTIMIZACIÓN ITERATIVA SELECCIONANDO DOS CLASES (MÉTODO DE ISODATA). COMO SE OBSERVA EL MÉTODO PERMITE UNA REDUCCIÓN PROGRESIVA EN LA SCE (SUMA DEL CUADRADO DE LOS ERRORES). MODIFICADO DE RICHARDS (1993)	31
13. DOS VISTAS EN PERSPECTIVA DE LA ZONA DE ESTUDIO; (A) VIENDO AL OESTE Y (B) VIENDO HACIA EL NOROESTE. EN AMBOS DIAGRAMAS SE PUEDE APRECIAR LA ZONA DE MAYOR ALTITUD (CERRO POTRERO) Y LAS ZONAS DE PLAYA QUE SON LAS QUE PRESENTAN LAS ELEVACIONES MENORES CON RESPECTO AL NIVEL MEDIO DEL MAR. LA ESCALA HORIZONTAL ES 1:700,000 Y LA ESCALA VERTICAL TIENE UNA EXAGERACIÓN DEL 0.90 CON RESPECTO DE LA ESCALA.....	48
14. PUNTO P-61; AFLORAMIENTO DE ESQUISTO DE MICA, EN SUPERFICIE FRESCA SE PRESENTAN DE COLOR GRIS OSCURO Y EN SUPERFICIE DE INTemperismo SE PRESENTAN DE COLOR NEGRO Y ROJIZO	50

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

FIGURA		PAGINA
15.	PUNTO P-28; AFLORAMIENTO DE TONALITA DE GRANO MEDIO PRESENTANDO COLOR CREMA EN SUPERFICIE FRESCA Y COLORES ROSA Y BEIGE EN SUPERFICIE DE INTEMPERISMO	52
16.	PUNTO P-30; ACERCAMIENTO DE UN AFLORAMIENTO DE ANDESITA PERTENECIENTE AL GRUPO Tsv. SE PUEDE OBSERVAR GRANDES CRISTALES DE HORNBLENDA ALINEADOS, EN SUPERFICIE FRESCA ESTA ROCA MUESTRA COLORES NEGROS Y EN SUPERFICIE DE INTEMPERISMO PRESENTA COLORES ROJIZOS Y AMARILLOS; LAS SUPERFICIES INTEMPERIZADAS SE PRESENTAN RUGOSAS	55
17.	A) PUNTO P-91; TOBA SOLDADA (Tpr) DESCANSANDO SOBRE LA UNIDAD BASAL DE Tpr QUE ES UNA TOBA PUMICÍTICA SIN SOLDAR. SON NOTABLES LOS CAMBIOS NO SOLO EN EL SOLDAMIENTO SINO TAMBIÉN EN LA COLORACIÓN DEBIDO AL SOLDAMIENTO. B) PUNTO P-72; SE PRESENTA LA TOBA LÍTICA DENSAMENTE SOLDADA DE COLOR MARRÓN, PERO INTEMPERIZADA A LAJAS Y CON SUPERFICIES BRECHADAS	60
18.	PUNTO P-79; VISTA HACIA EL ESTE DEL VOLCÁN PRIETO EL CUAL ESTÁ CONSTITUIDO POR ANDESITA BASÁLTICA QUE EN SUPERFICIE FRESCA PRESENTA COLORES NEGRO Y EN SUPERFICIE DE INTEMPERISMO SE MUESTRAN COLORES NEGROS Y ROJIZOS	62
19.	PUNTO P-93; AFLORAMIENTO DE SEDIMENTOS MARINOS (Tps) CONSTITUIDOS POR LODOLITAS COLOR AMARILLO CON PRESENCIA DE YESO. ESTA SECUENCIA ESTÁ SUBYACIENDO A LAS TOBAS LÍTICAS DEL PLIOCENO (Tpr)	64
20.	PUNTO P-28A; ASPECTO DEL ALUVIÓN 1 (Qal1) QUE SE ORIGINA A PARTIR DE ROCAS VOLCÁNICAS Y ROCAS GRANÍTICAS, PRESENTANDO EN CAMPO COLORES CREMA A GRIS CLARO	66
21.	PUNTO P-3; SE MUESTRA UNA CLARA DIFERENCIA ENTRE UN ALUVIÓN QUE HA ESTADO EN CONSTANTE MOVIMIENTO (LADO DERECHO DE LA FOTO) Y UN ALUVIÓN QUE NO HA SIDO REMOVIDO POR UN INTERVALO LARGO DE TIEMPO (LADO IZQUIERDO DE LA FOTO). ESTE SEGUNDO ALUVIÓN FORMÓ UNA CAPA EXTERNA CONOCIDA COMO BARNIZ DEL DESIERTO LO QUE LE DA UN ASPECTO MÁS OSCURO CON RESPECTO AL ALUVIÓN MOSTRADO EN EL LADO DERECHO DE ESTA FOTOGRAFÍA	67

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

FIGURA		PAGINA
22.	COMBINACIÓN TM742 EN ROJO, VERDE Y AZUL. LOS PRINCIPALES CONTRASTES SE OBSERVAN EN LAS ROCAS METAMÓRFICAS (VERDE OSCURO) DEL CENTRO DE LA IMAGEN Y EL CINTURON DE METASEDIMENTOS QUE SOBREYACE A ESTA UNIDAD. TAMBIÉN SE PUEDE APRECIAR CONTASTES ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE ALUVIÓN; EN COLOR BLANCO (PARTE INFERIOR) ES QAL4, AL CENTRO EN COLOR GRIS OSCURO SE PRESENTA QAL3, EN LA PARTE SUPERIOR EN COLOR GRIS CLARO SE OBSERVA QAL2 Y EN COLOR BLANCO VIOLÁCEO QAL1.....	73
23.	COMBINACIÓN TM574 EN ROJO, VERDE Y AZUL. ESTA IMAGEN MUESTRA CONTRASTES SIMILARES A LOS DE LA FIGURA 22. TANTO EN LA FIGURA 22 COMO EN ESTA IMAGEN SE OBSERVA UNA FUERTE INFLUENCIA DE LA BANDA QUE EN ESTA COMBINACIÓN CONTROLA EL CANAL AZUL	74
24.	COMBINACIÓN TM321 EN ROJO, VERDE Y AZUL. ESTA IMAGEN DESPLIEGA COLORES SINTÉTICOS MUY CERCANOS A LOS TONOS REALES (NATURALES). ESTAS TONALIDADES SON SEMEJANTES A LOS COLORES DE LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS DE COLOR.....	75
25.	COMBINACIÓN TM751 EN ROJO, VERDE Y AZUL. ESTA COMBINACIÓN FUE OBTENIDA POR EL MÉTODO ESTADÍSTICO. EN ESTA IMAGEN SE OBSERVAN ALGUNOS CONTRASTES COMO EL QUE SE APRECIA ENTRE LAS DISTINTAS UNIDADES DE TOBAS (PARTE SUPERIOR DE LA IMAGEN) EN COLORES AMARILLO Y COLOR VIOLETA. EN LAS UNIDADES DE METASEDIMENTOS NO SE APRECIAN DIFERENCIAS TAN CLARAS COMO EN LA COMBINACIÓN TM742 (FIGURA 22).....	78
26.	A) SALIDA DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA CON 40 CLASES Y B) MAPA TEMÁTICO OBTENIDO A PARTIR DE UNA RECLASIFICACIÓN Y SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN MOSTRADA EN EL INCISO (A). EN LA SEGMENTACIÓN SE UTILIZARON 14 POLÍGONOS PARA SEPARAR ALGUNAS CLASES COMO PZM1, Tb Y TPA MOSTRADAS COMO UNA SOLA CLASE (VERDE) EN LA IMAGEN (A), SE SEPARARON EN 3 CLASES EN LA IMAGEN (B). PARA GENERALIZAR LA INFORMACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA SE UTILIZÓ UN FILTRO DEMOCRÁTICO (MAJORITY)	81

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

FIGURA		PAGINA
27.	A) SALIDA DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA CON 80 CLASES Y B) MAPA TEMÁTICO OBTENIDO A PARTIR DE UNA RECLASIFICACIÓN Y SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN (A). PARA LA SEGMENTACION SE UTILIZARON 25 POLÍGONOS CON LO QUE SE OBTUVO UN MAPA CON MAYOR DETALLE EN LAS FRONTERAS ENTRE CLASES (MAPA B) A DIFERENCIA DEL MAPA OBTENIDO DE LA CLASIFICACIÓN CON 40 CLASES, PRESENTADO EN LA FIGURA 26	83
28.	A) IMAGEN DE LA PRIMERA COMPONENTE PRINCIPAL, EN DONDE SE OBSERVA LA MAYOR INFORMACIÓN ESPECTRAL YA QUE SE TIENE LA CONTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE TODAS LAS IMAGENES. ESTA IMAGEN PRESENTA VALORES BAJOS (GRIS OSCURO) PARA LA UNIDAD METAMÓRFICA PZM I EN EL CENTRO DE LA IMAGEN Y VALORES ALTOS (BLANCO) EN ZONA DE ALUVIONES (PARTE INFERIOR). B) IMAGEN DE LA SEGUNDA COMPONENTE QUE MUESTRA CON VALORES ALTOS ZONAS RICAS EN CARBONATOS (KM2, CENTRO DE LA IMAGEN) Y CON VALORES BAJOS ARROYOS Y ALUVIONES FORMADOS A PARTIR DE ROCA INTRUSIVA.....	85
29.	A) IMAGEN DE LA TERCERA COMPONENTE PRINCIPAL MOSTRANDO CONTRASTES ENTRE ROCAS RICAS EN CARBONATOS Y PLAGIOCLASAS (PARTE INFERIOR DE LA IMAGEN EN COLOR NEGRO) Y ROCAS CON ALTOS CONTENIDOS DE PIROXENOS (PARTE SUPERIOR DE LA IMAGEN EN COLOR BLANCO BRILLANTE). B) IMAGEN DE LA CUARTA COMPONENTE EN LA CUAL SE OBSERVA UNA DIFERENCIA ENTRE TONALITAS Y GRANODIORITAS (PARTE INFERIOR DE LA IMAGEN EN COLOR GRIS OSCURO Y BLANCO); EN LA PARTE SUPERIOR DE LA IMAGEN SE OBSERVA UNA DIFERENCIA ENTRE ALUVIONES CON BARNIZ DEL DESIERTO Y ALUVIONES SIN BARNIZ (DIFERENCIAS EN GRISES)/	86
30.	IMAGENES MOSTRANDO LA QUINTA Y SEXTA COMPONENTE, EN LAS CUALES SE OBSERVA RUIDO EN FORMA DE BANDEAMIENTO Y SE OBSERVAN CONTRASTES TENUES ENTRE ALUVIONES Y ROCA. EN LA CP5 SE LOGRA OBSERVA UNA DIFERENCIA ENTRE LOS ALUVIONES DE LA PARTE NORTE ORIGINADOS A PARTIR DE ROCAS VOLCÁNICAS E INTRUSIVAS (COLOR GRIS OSCURO) Y LOS ALUVIONES DE LA PARTE SUR ORIGINADOS A PARTIR DE ROCA INTRUSIVA (GRIS CLARO).....	87

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

FIGURA	PAGINA
31. A) IMAGEN MOSTRANDO EL CONTRASTE ENTRE LA REGIÓN VISIBLE E INFRARROJO CERCANO, OBSERVANDO VALORES ALTOS EN LA REGIÓN DE TOBAS (PARTE SUPERIOR) Y VALORES BAJOS PARA ALUVIONES ORIGINADOS DE ROCA INTRUSIVA; B) IMAGEN MOSTRANDO CONTRASTES ENTRE LA REGIÓN VISIBLE E INFRARROJO MEDIO MOSTRANDO CON VALORES ALTOS ZONAS RICAS EN CARBONATOS (PARTE INFERIOR) Y EN PIROXENOS (PARTE SUPERIOR); C) IMAGEN MOSTRANDO CONTRASTES ENTRE LAS REGIONES INFRARROJO CERCANO Y MEDIO. ESTA IMAGEN MUESTRA MAYORES CONTRASTES QUE LAS IMAGENES (A) Y (B).....	91
32. A) IMAGEN MOSTRANDO EL CONTRASTE ENTE DOS BANDAS DEL RANGO VISIBLE. SE PRESENTAN CON VALORES ALTOS (BLANDO BRILLANTE) LOS ALUVIONES ORIGINADOS A PARTIR DE ROCA INTRUSIVA, ADEMAS SE CONTRASTAN LAS ZONAS DE ALUVIONES (GRIS CLARO) CON ROCA (GRIS OSCURO). B) IMAGEN MOSTRANDO EL CONTRASTE ESPECTRAL ENTRE DOS BANDAS DEL RANGO INFRARROJO MEDIO. SE OBSERVAN CONTRASTES ENTRE LAS UNIDADES DE ROCA INTRUSIVA (PARTE INFERIOR), TAMBIÉN MARCA DIFERENCIAS ENTRE ALUVIONES DEL NORTE Y ALUVIONES DEL SUR	92
33. A) COMBINACIÓN DE LAS TRES PRIMERAS COMPONENTES OBTENIDAS POR EL MÉTODO ESTÁNDAR Cp123 EN ROJO, VERDE Y AZUL; B) IMAGEN EN FALSO COLOR CON LAS CP2 DE LOS PARES DE BANDAS TM 5 Y 7, 4 Y 7, 2 Y 7 EN ROJO, VERDE Y AZUL. EN LA FIGURA (B) SE APRECIAN MEJORES CONTRASTES QUE EN LA IMAGEN (A) COMO SE PRESENTA EN LA PARTE INFERIOR DE AMBAS IMAGENES DONDE EL CONTRASTE DE ROCA INTRUSIVA SE PRESENTA EN COLORES AZUL Y ROSA EN LA IMAGEN (B) Y NO SE OBSERVA MUY CLARO EN LA IMAGEN (A).....	94
34. A) IMÁGEN MOSTRANDO LA RELACIÓN 5/7 QUE RESALTA CON VALORES ALTOS LAS ZONAS DE CARBONATOS (PARTE INFERIOR) Y ZONAS RICAS EN PIROXENOS Y ARCILLAS (PARTE NORTE). B) IMAGEN QUE PRESENTA LA RELACIÓN 3/1 QUE RESALTA EN COLOR BLANCO BRILLANTE LAS ZONAS QUE PRESENTAN MAYORES CONCENTRACIONES DE ÓXIDOS DE FIERRO (PRODUCTO DE INTEMPERISMO)	96

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACION)

FIGURA		PAGINA
35.	A) COCIENTE 5/4 X 3/4 MOSTRANDO CON VALORES ALTOS (BLANCO BRILLANTE) ZONAS RICAS EN SÍLICE (CUARCITA, EN LA PARTE MEDIA DE LA IMAGEN) Y PLAGIOCLASA (INTRUSIVOS, PARTE INFERIOR DE LA IMAGEN) DISTINGUIENDO A LAS ROCAS FÉLSICAS DE LAS ROCAS MÁFICAS; B) IMAGEN EN FALSO COLOR MOSTRANDO CON COLOR VERDE LAS ZONAS CON MAYOR CONTENIDO DE ÓXIDOS DE FIERRO (PRODUCTO DE INTEMPERISMO), ADEMÁS SE APRECIAN DIFERENCIAS ENTRE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS QUE OCUPAN LAS MAYORES EXTENSIONES DE ÁREA	97
36.	SALIDA DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA MEJORADA. EN ESTA IMAGEN SE PRESENTAN 26 CLASES (13 DE ROCA ÍGNEA, 10 DE SEDIMENTOS Y 3 DE ROCA METAMÓRFICA). LOS INTRUSIVOS SE MUESTRAN EN DOS ROSAS DIFERENTES (PARTE INFERIOR DE LA IMAGEN), LOS TRES TIPOS DE ROCA METAMÓRFICA SE MUESTRAN EN COLOR AZUL (ESQUISTOS), VERDE (CUARCITA) Y BLANCO (MÁRMOL). TAMBIÉN SE OBSERVAN 4 COLORES PARA DIFERENCIAR LAS UNIDADES DE TOBA (PARTE SUPERIOR DE LA IMAGEN).....	101
37.	FIRMAS ESPCTRALES DEL GRUPO DE ROCA METAMÓRFICA.....	104
38.	FIRMAS ESPECTRALES DE LOS DIFERENTES SEDIMENTOS QUE CONSTITUYEN A LA ZONA DE ESTUDIO.....	105
39.	FIRMAS ESPECTRALES REPRESENTANDO A LAS DIFERENTES UNIDADES DEL GRUPO DE ROCA ÍGNEA.....	106
40.	FIRMAS ESPECTRALES DE QAL1 Y QAL4 Y DE LAS ROCAS QUE ORIGINARON A ESTOS ALUVIONES	108
41.	FIRMA ESPECTRAL DE QAL2 Y DE LAS ROCAS QUE LE DAN ORÍGEN	109
42.	FIRMA ESPECTRAL DE QAL3 Y DE LAS ROCAS QUE DAN ORÍGEN A ESTE ALUVIÓN...	110

LISTA DE TABLAS

TABLA		PAGINA
I.	CARACTERÍSTICAS DEL PATRÓN DE ÓRBITA Y DEL BARREDOR DEL SISTEMA LANDSAT TM. MODIFICADA DE SABINS, (1997).....	11
II.	DATOS DE CALIBRACIÓN PARA EL SENSOR TM. LOS VALORES REGISTRADOS ESTAN EN UNIDADES DE MILIWATTS POR CENTÍMETRO CUADRADO POR ESTERRADIAN. TOMADA DE MARKHAM Y BAKER (1985)	26
III.	RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CADA UNA DE LAS BANDAS DEL SENSOR TM. TOMADA Y MODIFICADA DE CAMPBELLS (1996).....	28
IV.	MATRIZ DE COVARIANZA PARA LA IMÁGEN TM DEL 20 DE JULIO DE 1987	34
V.	MATRIZ DE CORRELACIÓN OBTENIDA DE LA IMÁGEN LANDSAT TM DEL 20 DE JULIO DE 1987	36
VI.	CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ROCA DESCRITOS EN EL TEXTO. LOS DATOS FUERON RECOPIADOS DE TRABAJOS ANTERIORES	71
VII.	TODAS LAS POSIBLES COMBINACIONES ENTRE LAS 6 BANDAS TM. EN LA SEGUNDA COLUMNA SE PRESENTA EL FACTOR DE ÍNDICE ÓPTIMO (FIO) SEGUIDO POR LA COLUMNA QUE MUESTRA CUÁL ES LA MEJOR COMBINACIÓN DE BANDAS PARA REALIZAR LA FOTOINTERPRETACIÓN. LAS TRES MEJORES COMBINACIONES ESTAN REMARCADAS CON LETRAS MÁS OSCURAS	79
VIII.	EIGENVECTORES OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS DATOS DE LA IMÁGEN TM DEL 20 DE JULIO DE 1987. EL RENGLÓN INFERIOR CONTIENE LOS PORCENTAJES DE VARIANZA DE CADA COMPONENTE.....	84
IX.	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN, PORCENTAJES DE VARIACIÓN MAPEADAS EN CP1 Y CP2 Y LOS EIGENVECTORES RESULTANTES PARA CADA PAR DE BANDAS	89
X.	RELACIÓN QUE GUARDAN LOS COLORES CON RESPECTO A LA COMBINACIÓN QUE SE REALIZA CON LOS COCIENTES 5/7, 3/1 Y 5/4 x 3/4	99
XI.	COLORES Y VALORES MEDIOS RELACIONADOS A LAS DIFERENTES UNIDADES LITOLÓGICAS. ESTAS VARIABLES FUERON OBTENIDAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA MEJORADA	102

LISTA DE TABLAS (CONTINUACION)

TABLA	PAGINA
XII. MATRIZ DE ERROR CON DATOS DE CLASIFICACION SUPERVISADA CON RESPECTO A TODAS LAS FUENTES DE INFORMACION DISPONIBLES	113
XIII. MATRIZ DE ERROR CON DATOS DE CLASIFICACION SUPERVISADA CON RESPECTO A TODAS LAS FUENTES DE INFORMACION DISPONIBLES	114
XIV. COMPARACION DEL ETIQUETADO DE CLASES UTILIZADO EN ESTE TRABAJO CON RESPECTO A LA NOMENCLATURA UTILIZADA EN OTROS TRABAJOS REALIZADOS SOBRE LA ZONA DE ESTUDIO.....	126

APLICACION DE LA PERCEPCION REMOTA (LANDSAT TM) EN LA CARACTERIZACION LITOLOGICA DE LA FRANJA COSTERA ENTRE PUERTECITOS Y BAHIA DE SAN LUIS GONZAGA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO.

I.- INTRODUCCION.

Desde tiempos remotos el hombre se ha preocupado por conocer el planeta que habita. De este hecho parte el interés por la cartografía del terreno con diferentes finalidades como pueden ser militares, catastrales, turísticos, hidrológicos y geológicos entre otros. Un hecho importante en el desarrollo de las técnicas cartográficas es la invención de la fotografía pues permite que el conocimiento del terreno no sea sólo a través de representaciones gráficas sino que se pueda tener una visión más real de la superficie del terreno. Actualmente se puede hacer uso de técnicas más sofisticadas como la percepción remota para obtener información de la superficie terrestre.

La percepción remota se puede definir como la práctica de la obtención y manipulación de imágenes de la superficie de la Tierra (tanto agua como superficies emergidas) tomadas a distancia, es decir, no se tiene contacto directo con estas superficies. Esta práctica permite la adquisición de imágenes de alta calidad dentro de bandas espectrales angostas (Goetz *et al.*, 1985) con el cubrimiento de grandes áreas de terreno. Los datos resultantes abarcan los dominios espacial y espectral que proveen una fuente potencial de información para estudios de cubierta vegetal (Coppin y Baur, 1994; Ekstrand, 1996), geomorfológicos (Short y Blair, 1987; Torres-Rodríguez, 1994; Klein e

Isacks, 1998), prospección minera (Rowan *et al.*, 1974; Rowan *et al.*, 1977; Drury, 1987; Ribeiro-de-Almeida *et al.*, 1995 ; Vincent, 1997 ; Harris *et al.*, 1998) y litológicos tanto en regiones áridas (Sultan *et al.*, 1987 ; Cendrero *et al.*, 1990 ; Stock y Commenetz, 1992 ; Knick *et al.*, 1997) como en zonas tropicales y regiones polares (Abrams, 1980 ; Lang *et al.*, 1987 ; Gupta, 1991 ; Rivard y Arvidson, 1992; Jansma y Lang, 1996 ; Hernández-Alvarez, 1995 ; Sabins, 1997).

En la figura 1 se presentan diferentes tipos de imágenes de satélite las cuales varían en su poder de definición espectral y resolución espacial. La primera generación de imágenes Landsat (1, 2 y 3) presenta 3 bandas que cubren desde el rango visible hasta el infrarrojo cercano con una resolución espacial de 79 x 79 m. Las imágenes Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) tienen una resolución espacial de 1.1 km y su definición espectral está definida por 5 bandas que van desde la región visible hasta el infrarrojo lejano (Richards, 1993; Campbell, 1996; Sabins, 1997). Las imágenes Nimbus Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) tienen 6 bandas espectrales que alcanzan hasta el infrarrojo lejano (térmica) con una resolución espacial de 5 km en la región visible y de 1.25 km para la región del infrarrojo lejano (Richards, 1993; Campbell, 1996). En las imágenes Multispectral Scanner Subsystem (MSS) la definición espectral está dada por cuatro bandas que cubren el rango visible, infrarrojo cercano y medio, además de contener una banda térmica; la resolución espacial de cada banda es de 79 x 79 m y la banda térmica tiene una resolución espacial de 237 m (Richards, 1993; Campbell, 1996). Le Système Pour l'Observation de la Terre (SPOT) tiene tres bandas espectrales que cubren el rango visible – infrarrojo cercano, con una resolución de 20 X 20 m en su modo multiespectral y en el modo pancromático tiene una resolución de 10 X 10 m (Richards, 1993; Campbell,

1996; Sabins, 1997). Las imágenes Indian Remote Sensing Satellites (IRS) presentan cuatro bandas que cubren un rango espectral que va desde el visible hasta el infrarrojo medio, su resolución espacial es de 25 m (www.eds.dofn.de/www_eds/ids/ids_iris/ir32e01.htm).

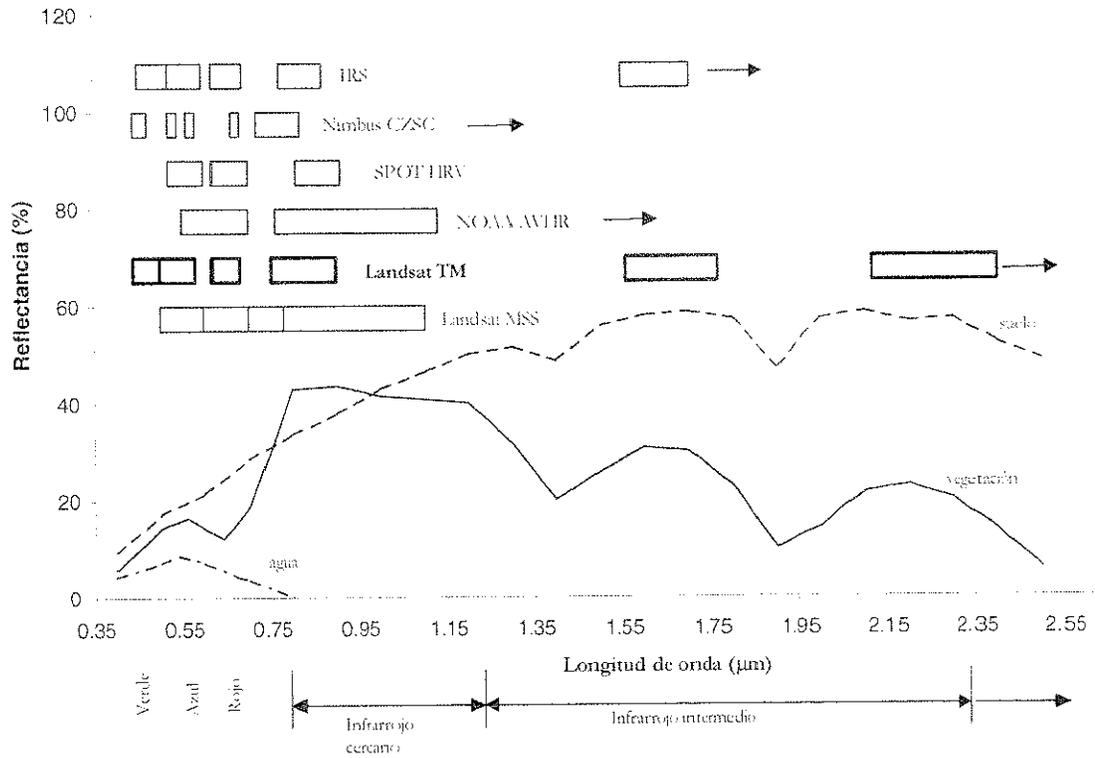


Figura 1. Características de reflectancia espectral de materiales comunes de la superficie terrestre en el rango visible e infrarrojo cercano y medio. También se indica la posición de las bandas espectrales de algunas de las imágenes de satélite más comunes. Modificado de Richards (1993).

Las imágenes Thematic Mapper (TM) son consideradas como una versión mejorada de las imágenes MSS. Una escena adquirida por el sensor TM tiene un cubrimiento de 185 x 185 km. con siete bandas espectrales (Markham y Baker, 1985; Campbell, 1996; Sabins, 1997). Seis de las bandas TM detectan el reflejo visible y la radiación infrarroja (0.45 a 2.35 μm) con una resolución espacial de 30 x 30 m. La banda térmica (10.4 a 12.5 μm) tiene una resolución espacial de 120 m.

Una de las funciones de los gobiernos estatales es promover el desarrollo económico y social procurando mantener el equilibrio del medio ambiente que lo sustenta. El Plan de Ordenamiento Ecológico del Territorio (POET) define un marco general de referencia que garantiza el uso adecuado y la conservación de los recursos naturales. Para poder obtener el equilibrio entre el crecimiento urbano y el medio ambiente se requiere el conocimiento de los recursos naturales del territorio.

El presente estudio forma parte del proyecto "Caracterización de recursos naturales de la zona costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga, Baja California, apoyados en imágenes multiespectrales de alta resolución", con financiamiento del Sistema de Investigación Regional del Mar de Cortés (SIMAC). El proyecto pretende obtener una base de datos actualizada de la distribución espacial de los recursos naturales con la finalidad de poder aprovecharlos y planear de una manera más adecuada su desarrollo.

El conocimiento litológico detallado que se tiene para la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga (Stock, 1989; Phillips, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Martín-Barajas *et al.*, 1997; Nagy, 1997; Fletcher, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa) cubre aproximadamente el 40 % de toda la extensión de la zona de estudio

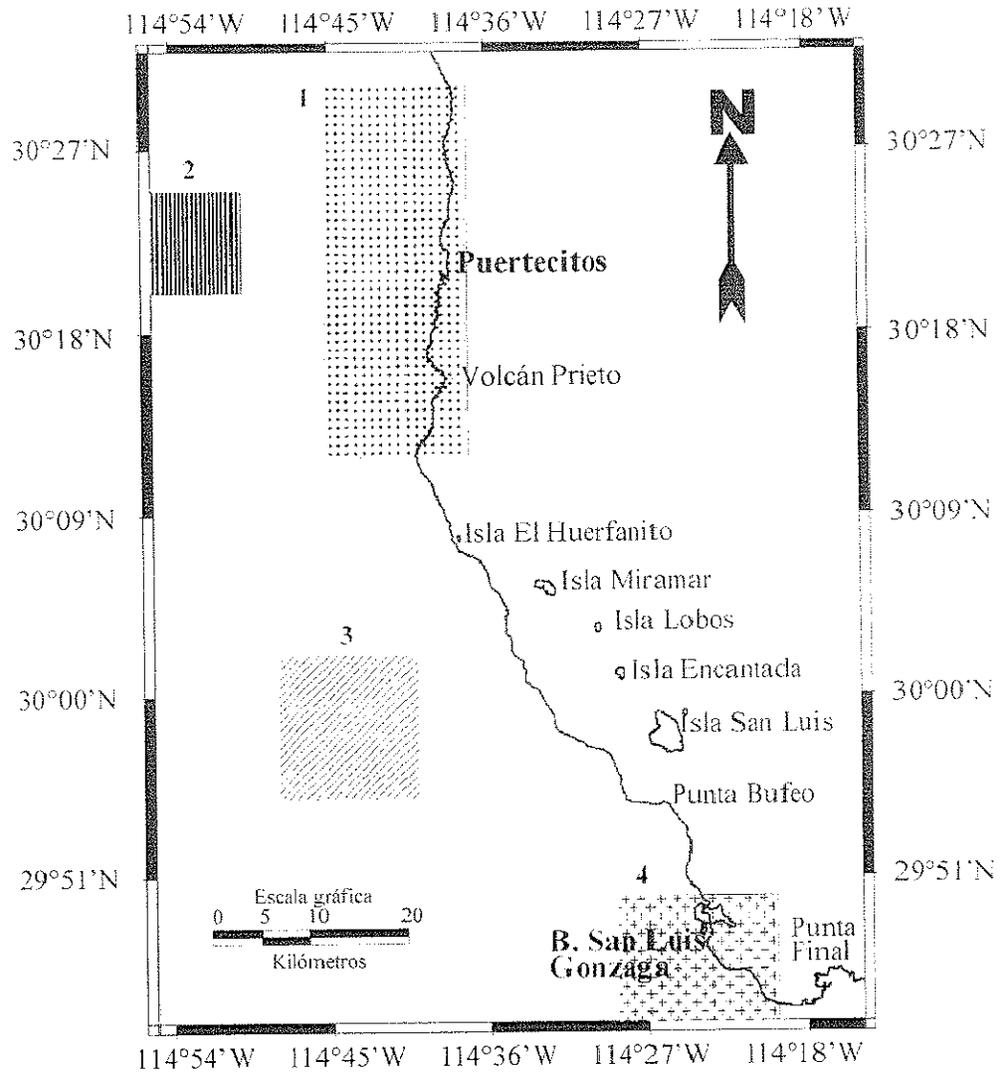


Figura 2 Mapa de la zona de estudio mostrando con recuadros las áreas que han sido estudiadas a detalle. Cuadro 1 (Martín-Barajas *et al.*, 1993; 1995; 1997; Martín-Barajas y Stock, 1993:), cuadro 2 (Nagy, 1997), cuadro 3 (Delattre, 1984; Phillips, 1984; 1993; Webster y Delattre, 1993), cuadro 4 (Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa). El resto de la zona ha sido mapeada por el INEGI y por Gastil *et al.*, (1975).

(figura 2). La información que cubre al restante 60 % (Gastil *et al.*, 1975 ; Cetenal, 1977 ; 1979 ; 1981 ; INEGI, 1980) fue obtenida de fotointerpretación de fotografías aéreas y verificación regional basado en un número reducido de muestras en el campo, por lo que el mapeo resultante es una simplificación de la zona caracterizada por tener una amplia cobertura con algunas zonas inaccesibles por medios de transporte convencionales.

El propósito de este trabajo es demostrar que se pueden hacer inferencias litológicas valiosas a partir del análisis espectral de los datos de la imagen TM. Con base a este enfoque se pretende afinar detalles en la distribución espacial y la identificación de las fronteras entre las diferentes unidades litológicas que constituyen a la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga. Para lograr este propósito se trabaja la información espectral de sensores remotos utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes. Las técnicas que se utilizan en este trabajo básicamente son la combinación de bandas para obtener imágenes en falso color, los métodos de realce (análisis de componentes principales y cociente de bandas) y métodos de clasificación (no supervisado y supervisado mejorado) sobre los datos del barredor multiespectral TM. Para la identificación de las diferentes unidades litológicas se tomarán como base las descripciones realizadas por otros autores (Stock, 1989; Nagy, 1997; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Martín-Barajas *et al.*, 1997; Fletcher *et al.*, 1997; Buch y Delattre, 1993; Phillips, 1993) y las observaciones realizadas durante las etapas de trabajo de campo.

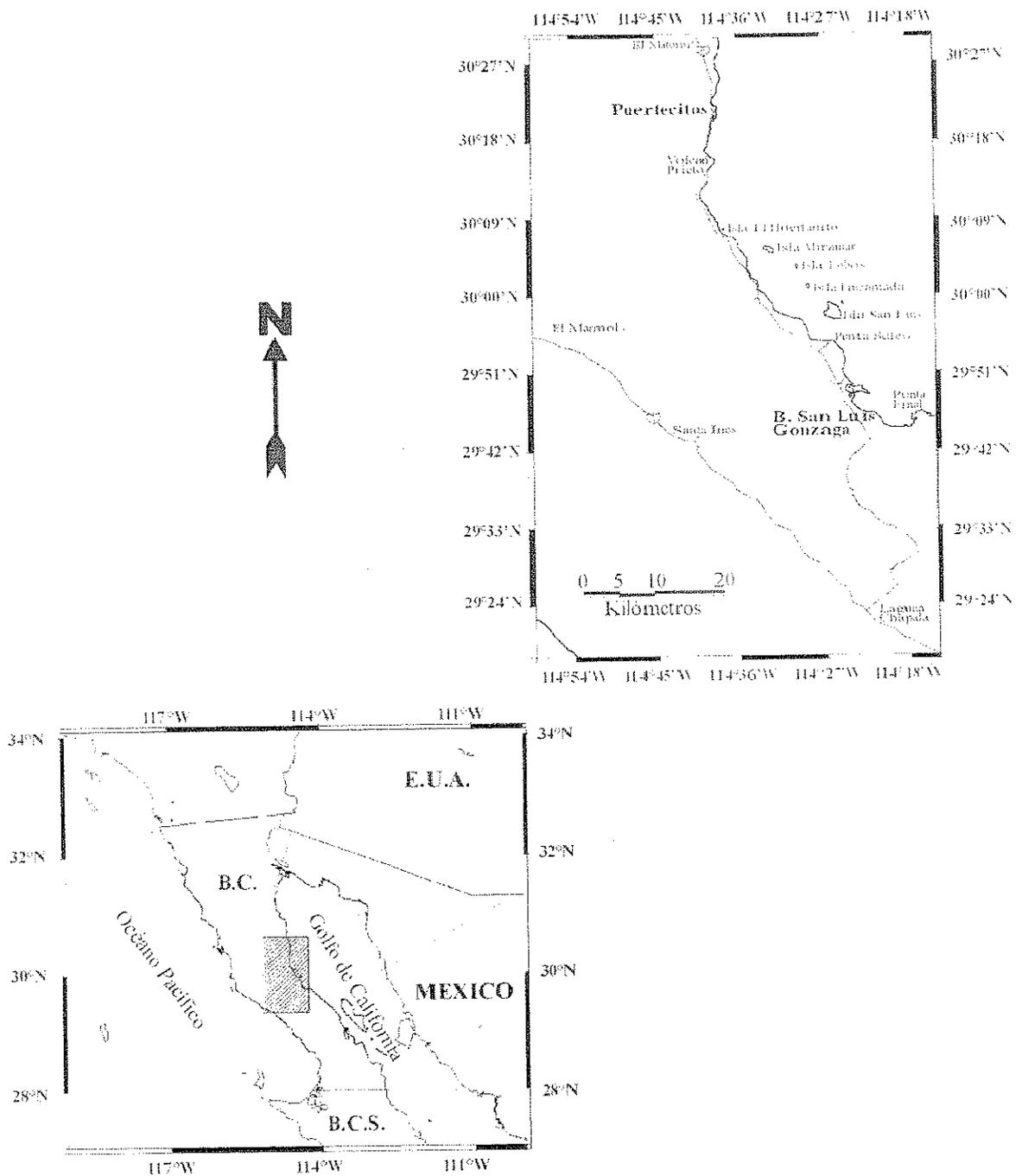


Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio. En la figura inferior izquierda se muestra un recuadro con achurado diagonal que señala el área de estudio que se presenta ampliada en la figura superior derecha con las principales rutas de acceso.

I.1. Escenario geográfico y geológico.

La zona costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga constituye una franja de ~ 3000 km² que se ubica en la porción media oriental del estado de Baja California, en el municipio de Ensenada, entre los paralelos 29°40' y 30°30' y los meridianos 114°15' y 114°55' (figura 3). El acceso por la costa del Golfo es a través de la carretera estatal número 5 (~85 km) que parte de San Felipe, B.C. Hacia el oeste, el acceso es por un camino de terracería de ~ 60 km que parte del poblado Laguna Chapala hacia el oriente de la carretera transpeninsular.

El área de estudio engloba porciones de dos de las grandes provincias fisiográficas que conforman al país: La Península de Baja California y La Llanura Sonorense. La zona de Puertecitos y áreas adyacentes se presentan dentro de la Provincia de la Llanura Sonorense caracterizada por topofomas de lomeríos y llanuras con pendientes suaves y planas. Por otra parte, la zona de San Luis Gonzaga se encuentra dentro de la Provincia de la Península de Baja California en la cual se presentan topofomas que varían desde sierras altas y abruptas hasta llanuras con pendientes suaves y planas (INEGI, 1984). Las elevaciones en el área de estudio varían de 0 msnm en las zonas de playa hasta 1360 msnm en la punta del Cerro Agualtosa en la parte sur de la zona de estudio (Cetenal, 1981).

Como se mencionó en el apartado anterior existen estudios detallados con respecto a la geología y tectónica de la zona de Puertecitos (Stock, 1989; Stock *et al.* 1991; Martín-Barajas y Stock, 1993; Martín-Barajas *et al.* 1993; Martín-Barajas *et al.* 1995; Martín-Barajas *et al.*, 1997) y de la zona de San Luis Gonzaga (Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa). A grandes rasgos la secuencia estratigráfica de la

zona consiste principalmente de rocas metasedimentarias (Paleozoico-Cretácico); la secuencia batolítica del Cretácico; rocas volcanoclásticas, tobas soldadas, lavas y brechas andesíticas y dacíticas del Mioceno; sedimentos marinos y no marinos del Plioceno y depósitos aluviales del Cuaternario (para mayor detalle en las descripciones de las diferentes unidades litológicas ver el capítulo III y el anexo 3).

Estructuralmente la zona se encuentra afectada por fallas normales de gran ángulo con orientación N-NW a N-NE que forman parte del sistema del Escarpe principal del Golfo (Dokka y Merriam, 1982). Hacia la parte norte de la zona de estudio, el escarpe del golfo está bien definido por la falla de San Pedro Martir, y en la zona de San Luis Gonzaga está definido por una zona de fallas normales de aproximadamente 3 a 5 km de ancho (Martín-Barajas *et al.*, 1995; Fletcher *et al.*, 1997). La mayoría de las fallas macroscópicas cortan a las rocas Cenozoicas y Mesozoicas que incluyen a las secuencias prebatolíticas, al batolito y a la secuencia volcánica. Los depósitos sedimentarios del Plio-Cuaternario y los depósitos de abanicos aluviales modernos también están cortados por fallamiento normal y presentan evidencias de levantamientos significativos (Stock, 1989; Stock *et al.*, 1991; Martín-Barajas y Stock, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Fletcher *et al.*, 1997).

I.2. Características del sistema multispectral Landsat TM.

El sistema Thematic Mapper (TM) es un dispositivo de barrido mecánico (figura 4a) como el del Multispectral Scanner (MSS), pero en el primero se mejoraron las características espectrales, espaciales y radiométricas. El sistema TM consiste de un

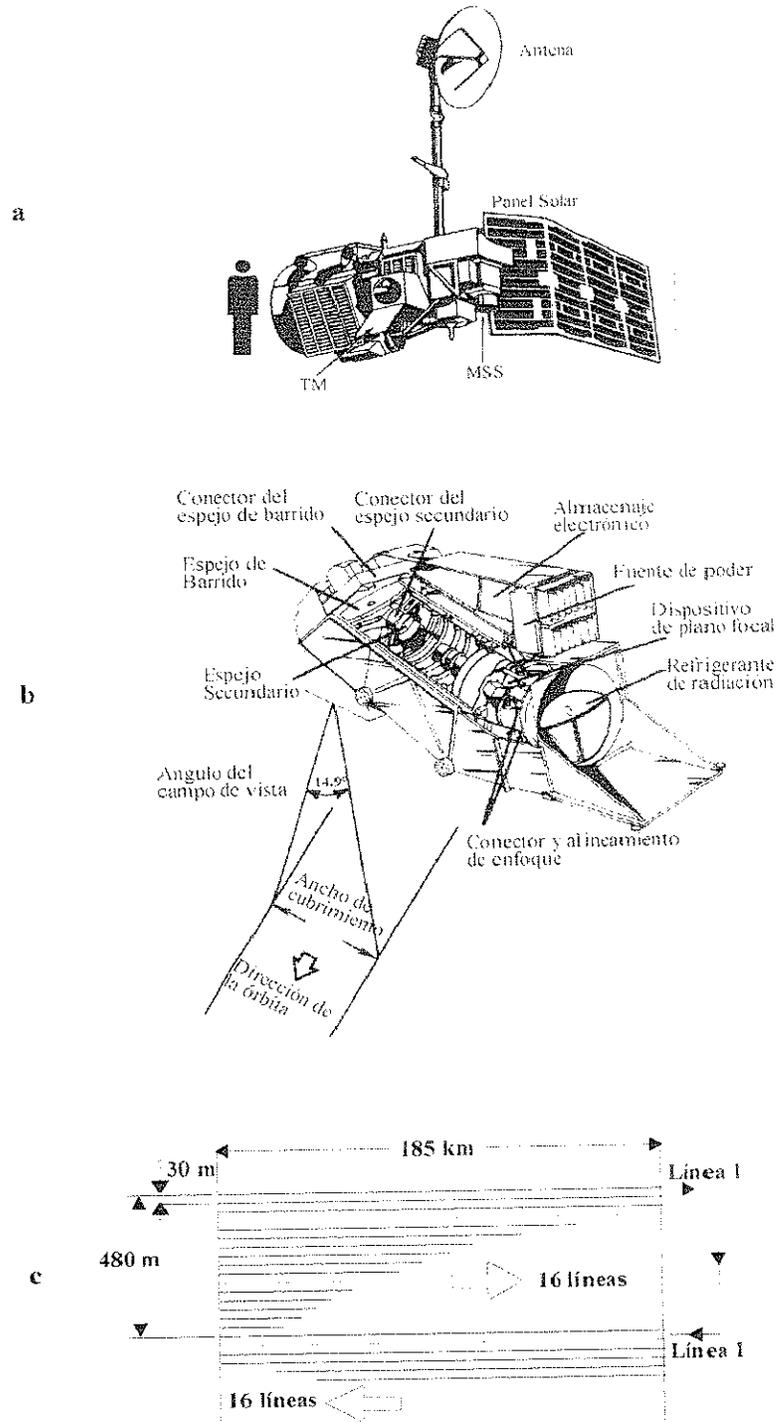


Figura 4. **a)** Esquema de la plataforma espacial utilizada para obtener las imágenes Thematic Mapper (TM); se agrega una figura humana (~2 m) como escala. **b)** Figura mostrando a detalle el sistema TM. **c)** Características de barrido en el sistema TM. Modificado de Sabins (1997) y Richards (1993).

barredor de trayectoria transversal con un espejo de barrido oscilante y un arreglo de 16 detectores para cada una de las bandas visible y del infrarrojo. Los datos son registrados tanto en rastreos hacia el oeste y hacia el este, lo cual permite un barrido más lento, con un mayor tiempo de duración y con una relación señal - ruido mayor que en las imágenes MSS. Con una altitud de 705 km y el ángulo de campo de vista de 14.9° se tiene un cubrimiento de barrido de 185 km de ancho (figura 4b y 4c). La TM originalmente fue diseñada con 5 bandas que cubrían del rango visible al infrarrojo reflejado y la banda 6 (infrarrojo térmico). Sin embargo, algunos usuarios señalaron que la información dentro

Tabla I. Características del patrón de órbita y del barredor del sistema Landsat TM. Modificada de Sabins, (1997).

Descripción	Sistema Landsat TM
Altitud	705 km
Órbitas por día	14.5
Número de órbitas (path)	233
Repetición de ciclo	16 días
Grado de traslape de imágenes en el ecuador	7.6 por ciento
Paso por el ecuador	10:45 am.
Tiempo de operar	Desde 1982 hasta el presente
Sistemas de imágenes:	
Barredor multiespectral	Sí
Mapeo temático	Sí
Región espectral:	
Visible e infrarrojo reflejado	0.45 a 2.35 μm
Infrarrojo térmico	10.5 a 12.5 μm
Cantidad de bandas espectrales	7
Cubrimiento de terreno:	
Dirección Este-Oeste	185 km
Dirección Norte-Sur	170 km
Campo de vista instantáneo (CVI)	
Visible e infrarrojo reflejado	0.043 mrad
Infrarrojo térmico	0.17 mrad
Resolución espacial:	
Visible e infrarrojo reflejado	30 x 30 m
Infrarrojo térmico	120 x 120 m

de la banda espectral del 2.1 al 2.4 μm tenía un gran valor para el mapeo geológico y la exploración mineral. Por esta razón la banda 7 fue agregada para adquirir estos datos que son ampliamente utilizados (Lang *et al.*, 1987; Gupta, 1991; Hernández-Alvarez, 1995; Vincent, 1997; Sabins, 1997). Un resumen de las características del sistema TM es presentado en la tabla I.

Las características orbitales de la segunda generación de Landsat (4 y 5) son un poco diferentes en la forma con respecto a la generación anterior (1,2 y 3). La generación de Landsat 4 y 5 fue puesta en órbita de la misma manera que la generación anterior. Las órbitas son heliosíncronas (figura 5a) y los datos son adquiridos nominalmente a las 10:45 a.m., tiempo local del ecuador. La plataforma espacial tiene una altitud de ~ 705 km (menor que en la primera generación de 920 km) con la finalidad de alcanzar una resolución mayor que la de la generación anterior y facilitar la renovación de la plataforma. Ahora bien, la primera generación de Landsat producía imágenes con cubrimientos adyacentes sobre días sucesivos. Sin embargo, los Landsat 4 y 5 adquieren cubrimientos adyacentes con intervalos de 7 días. Los trayectos sucesivos del satélite están separados en el ecuador por $\sim 2,752$ km; los huecos entre las trayectorias sucesivas son cubiertas en 16 días de barrido. Los trayectos adyacentes están separados en 172 km.

El hecho de que las órbitas tengan una elevación menor permite una repetición de ciclo de 16 días, es decir, 14.56 órbitas por día. Esto corresponde a un total de 233 revoluciones por cada ciclo. Debido a que este patrón difiere de los Landsat iniciales, los Landsat 4 y 5 requieren un nuevo sistema de referencia mundial WRS (por sus siglas en

inglés) para la etiquetación de las trayectorias y los renglones (figura 5b). La designación de los renglones permanece como en la primera generación, pero para la numeración de las

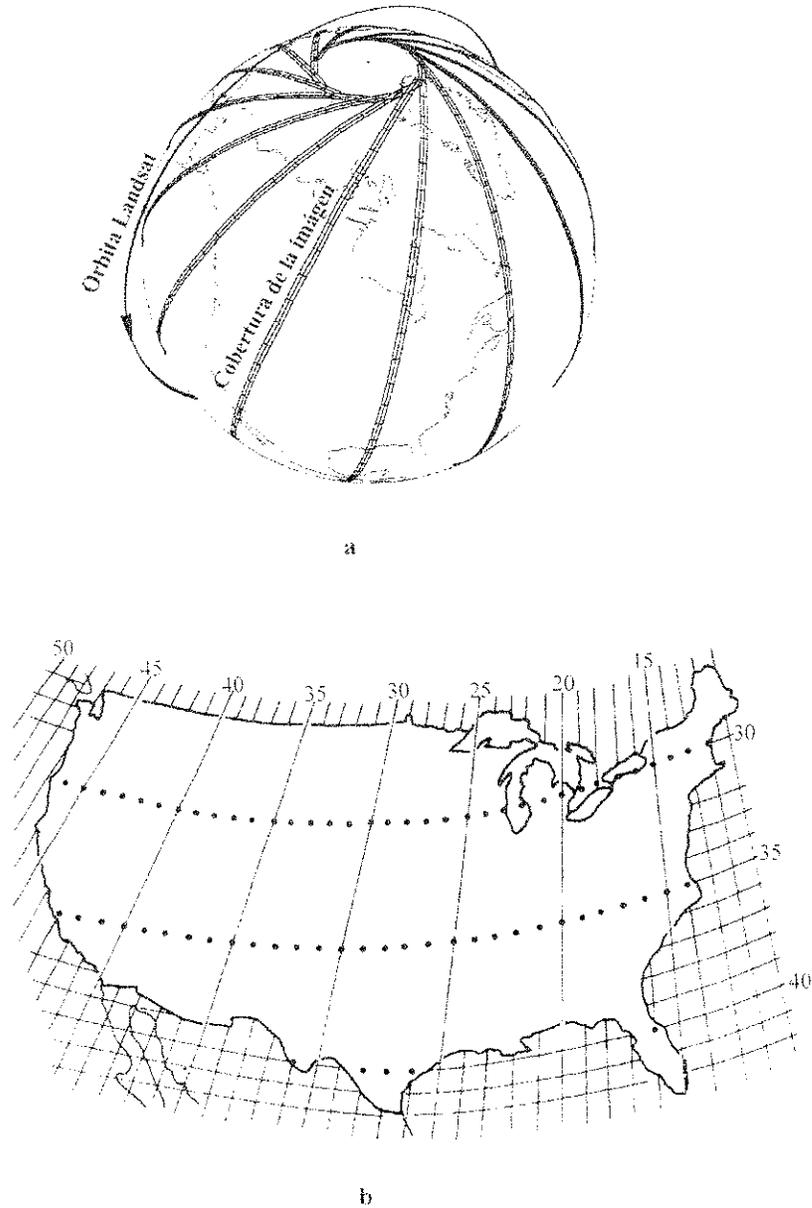


Figura 5. **a)** Orbitas heliosíncronas (círculo sólido) y coberturas de las imágenes (patrón de líneas) generados en un día. **b)** Sistema de referencia mundial utilizado en la segunda generación de Landsat (4 y 5) para el etiquetado de las trayectorias y renglones. Modificado de Sabins (1997) y Campbell (1996).

trayectorias se requirió un nuevo sistema. En total hay 233 trayectorias y 248 renglones con el renglón 60 ubicado en el Ecuador. Las comunicaciones para los Landsat 4 y 5 fueron conectadas con una red de rastreo y transmisión de datos de satélites (TDRSS por sus siglas en inglés). Esta red está dentro de órbitas geosincronizadas que permiten la transmisión de los datos del sensor directamente a una estación receptora ubicada cerca de White Sands, Nuevo México.

1.3 Objetivo.

Realizar un reconocimiento a nivel regional de la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga con la finalidad de identificar a las diferentes unidades litológicas que constituyen a esta zona.

Con la finalidad de cumplir el objetivo propuesto en el párrafo anterior surge el planteamiento de las siguientes metas:

- a) Identificación espectral y caracterización de las diferentes unidades litológicas que constituyen a la zona de estudio.
- b) Generación de una base de datos detallado referente a la litología de la zona.
- c) Obtención de mapas litológicos en escala 1:100,000 y 1:250,000.
- d) Elaboración de la cartografía base de la zona de estudio en formato digital.

1.4. Materiales y métodos.

El cumplimiento del objetivo es posible dado que se cuenta con el siguiente material:

- Una imagen Landsat Thematic Mapper (TM) con 6 bandas espectrales del 20 de julio de 1987 (verano) renglón 39, trayectoria 38, ID= LT50338039008720110.
- Estación de trabajo marca Sun Microsystems modelo Sparc 10 con 96 Mbytes de memoria Ram y 8 Gbytes en espacio de disco.
- Tableta digitalizadora de 36 por 48 pulgadas marca Summagraphics.
- Programa de cómputo para el procesamiento de imágenes ERMAPPER 5.2 para UNIX con 5 licencias flotantes.
- Sistema de información geográfica GRASS versión 4.1 con un conjunto de datos espaciales en particular sobre el estado de Baja California.
- Dispositivos para la lectura de cintas de 8 y 4 mm en la red de computo de CICESE.
- Plotter DesigJet 650C con resolución de 300 dpi e impresora HP LaserJet 5P.
- Equipo portátil de posicionamiento global por satélite (GPS).
- Cartas topográficas y geológicas elaboradas por Cetenal, escala 1:50,000
- Vehículo con doble tracción para el trabajo de campo.

La metodología seguida en este trabajo se presenta de manera esquematizada en la figura 6. Los datos digitales a trabajar son de una imagen Thematic Mapper (TM) facilitadas CALTECH (Californian Institute of Technology). La descripción detallada del procesamiento de la imagen es abordada en el capítulo II de este trabajo.

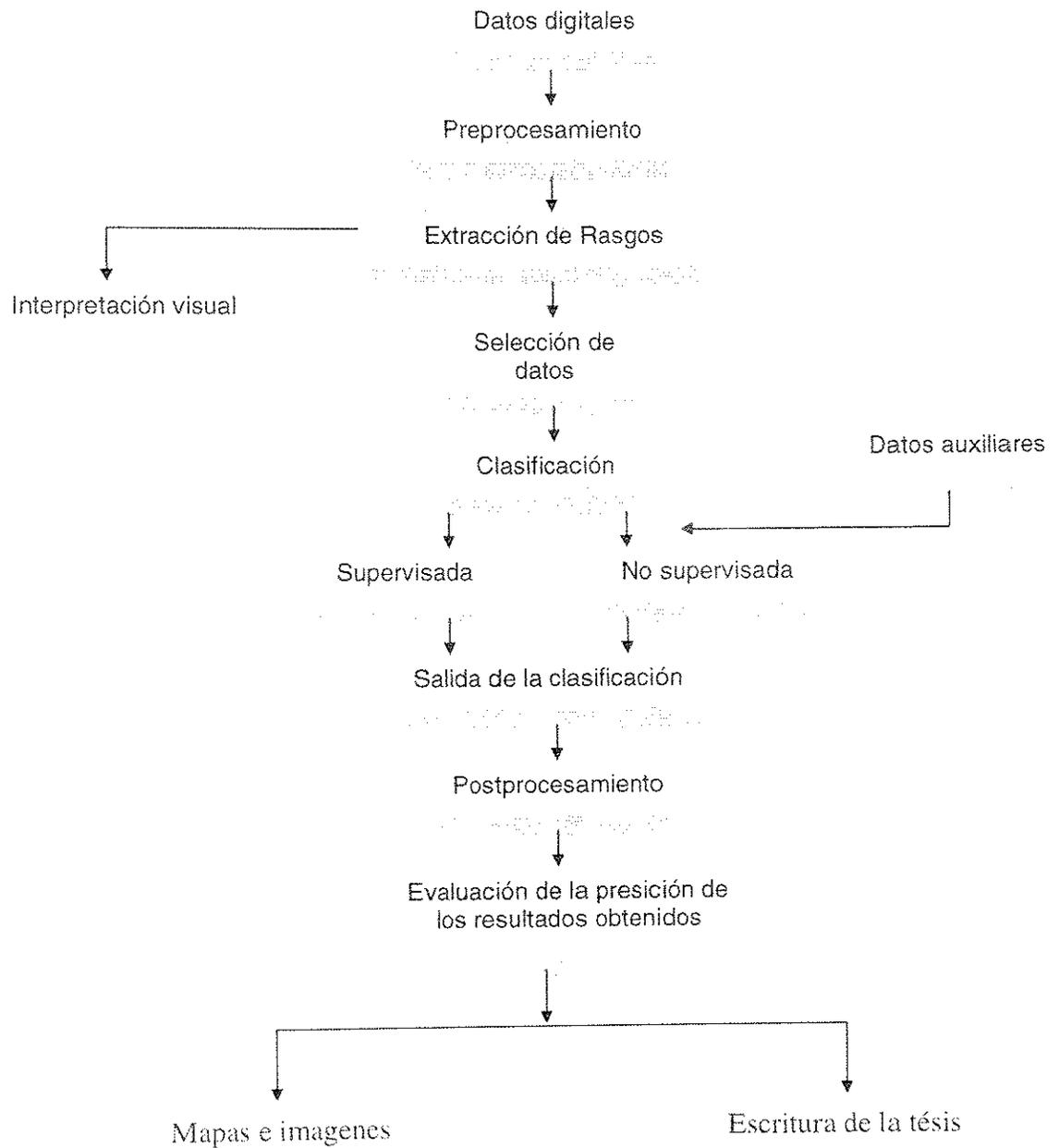


Figura 6. Diagrama esquemático mostrando la metodología a seguir para el procesamiento y obtención de datos de la imagen Thematic Mapper (TM) del 20 de julio de 1987.

La leyenda para los mapas obtenidos en este trabajo, se establecieron con base a la leyenda propuesta en trabajos previos sobre la zona de estudio (Martín-Barajas *et al.*, 1995; Fletcher *et al.*, 1997) y los colores fueron tomados conforme a los mapas de INEGI. Para cada imagen etiquetada se estableció una correspondencia entre el índice de la imagen etiquetada y la leyenda unificada.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron salidas de campo con la finalidad de identificar el tipo de litología presente en la zona de estudio. Los datos obtenidos de la visita de campo se compararon con los tipos de litología obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes TM y la fotointerpretación. Estos datos extra también ayudaron tanto en la clasificación de las imágenes como en las etapas de evaluación de confiabilidad del mapa explicados en el capítulo II.

Finalmente se evaluó la confiabilidad del mapa obtenido en este trabajo (ver detalles en el capítulo II). Esta práctica permite sustentar que los mapas obtenidos mediante las técnicas de procesamiento de imágenes son lo suficientemente confiables para ser utilizados en el desarrollo de estudios posteriores sobre la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga.

II. PROCESADO DE LA IMAGEN LANDSAT THEMATIC MAPPER.

II.1 PRETRATAMIENTO.

La escena de la imagen Landsat TM del 20 de julio de 1987 tiene un total de 6897 líneas y en cada línea contiene 7603 celdas. En el presente trabajo fue necesario obtener una subescena de 3195 líneas con 2325 celdas por línea con la finalidad de cubrir exclusivamente la zona de estudio. En la figura 8 está representada gráficamente la escena completa de la imagen TM y también se señala la fracción que se utilizó en este estudio. Proporcionalmente, la subescena que se trabajó representa aproximadamente el 15 % del total de la imagen Landsat TM.

II.1.1 Corrección atmosférica.

La dispersión atmosférica resulta de múltiples interacciones entre los rayos de luz, los gases y las partículas de la atmósfera, produciendo una reducción en la razón de contraste de las imágenes (Sabins, 1997). Los efectos atmosféricos afectan de manera diferente a las distintas bandas de un sensor. Por ejemplo, en el caso del barredor multiespectral Landsat TM la mayor dispersión atmosférica se presenta en la banda 1 y la menor dispersión atmosférica está en la banda 7 (Richards, 1993).

Hay diferentes maneras de corregir el efecto atmosférico contándose con métodos sencillos como el método de corrimiento de histograma (Richards, 1993; Chávez, 1989; Campbell, 1996; Sabins, 1997; Vincent, 1997) hasta esquemas más detallados y

complicados en donde entran en juego parámetros de humedad, inclinación solar, temperatura, visibilidad y presión atmosférica.

En el presente estudio se realiza la corrección atmosférica por medio del método de corrimiento de histograma, en donde se comparan los valores de los números digitales (ND) de la banda 7 con los valores de los números digitales de las demás bandas (Sabins, 1997). Antes de realizar cualquier corrimiento de histograma se asume que en cada banda deben existir algunos pixeles con valores cercanos a cero, pero que por efectos atmosféricos se agregó un valor constante a cada pixel dentro de la banda. El histograma de la banda 7 muestra que los ND de los valores de brillo más bajos son cero, en cambio en las otras bandas se observa que no hay pixeles con valores digitales cercanos a cero y que estos valores difieren de una banda a otra (figura 7). Para la imagen TM del 20 de julio de 1987 los valores inferiores de cada banda son: banda 1 = 68, la banda 2 = 17, la banda 3 = 12, la banda 4 = 5, la banda 5 = 1, la banda 7 = 0 y la banda 6 (térmica) no se trabajó porque no está disponible. El siguiente paso en este método consiste en restar los valores mencionados arriba a cada uno de los pixeles contenidos dentro de cada banda correspondiente. El método de corrimiento de histograma es explicado con más detalle en Sabins (1997), Campbell (1996), Richards (1993) y Chávez (1989).

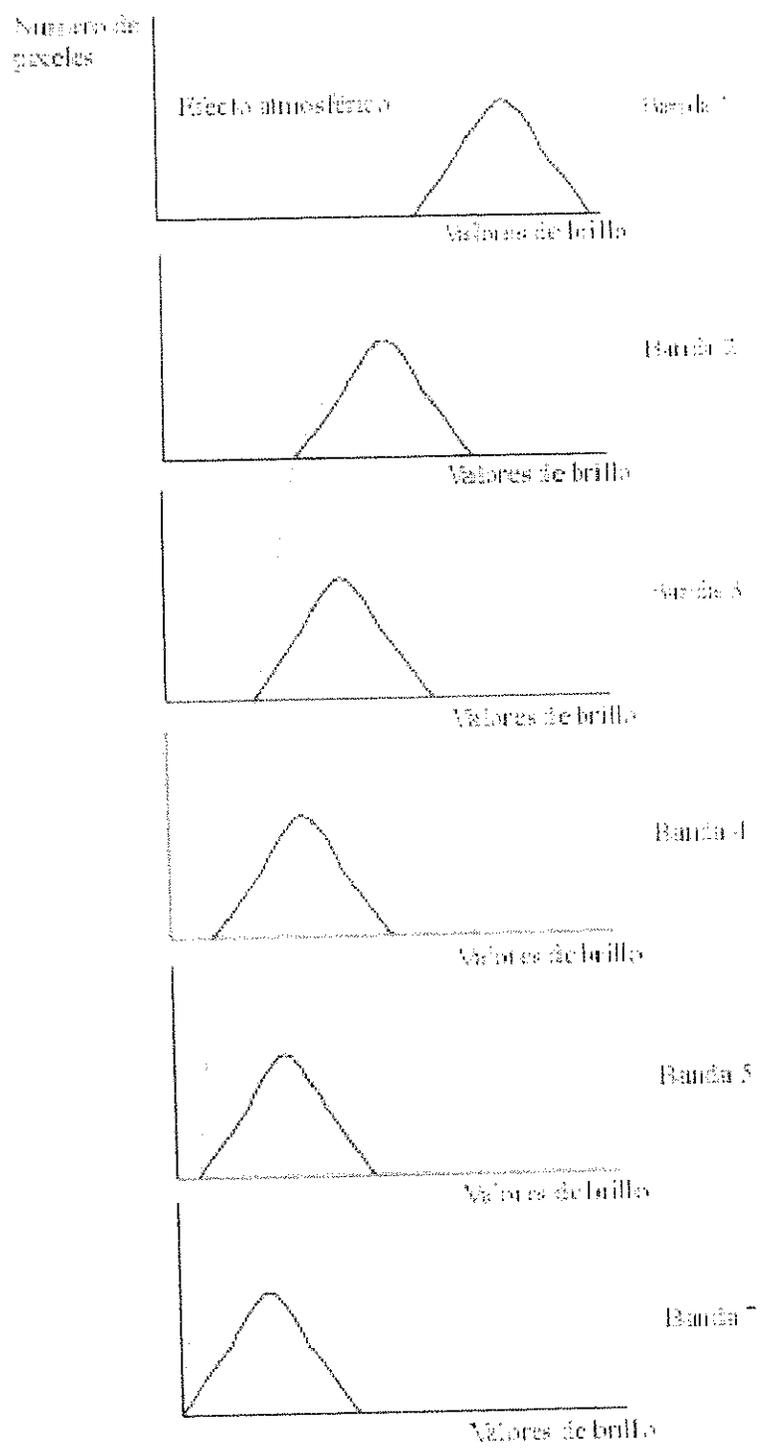


Figura 7. Ilustración de un caso hipotético mostrando el efecto atmosférico sobre el patrón de brillo observado en los 6 histogramas de una imagen Landsat TM.

II.1.2 Corrección geométrica.

Existen varios factores que pueden causar distorsión geométrica en una imagen de satélite y sus efectos pueden ser bastante severos. Entre estos factores se pueden mencionar: a) la rotación de la tierra durante la adquisición de la imagen, b) el ancho de campo de vista del sensor, c) la curvatura de la tierra, d) calibración incorrecta del sensor, d) variaciones en la altitud de plataforma y la velocidad y e) efectos panorámicos relacionados a la geometría de la imagen (Richards, 1993). Para mayor explicación de cada tipo de efecto ver Anexo 1.

El primer paso para la corrección geométrica consiste en georeferir la imagen a partir de un mapa base. La georreferenciación consiste en reconocer rasgos de la imagen cuyas posiciones son conocidas llamándose a estos sitios “puntos de control en el terreno” (Richards, 1993; Campbell, 1996; Sabins, 1997; Vincent, 1996). Para este procedimiento es necesario contar con material cartográfico en forma de mapas referidos a algún sistema de coordenadas (geográficas, UTM, etc). Se seleccionaron 36 puntos de control dispersos sobre la imagen procurando cubrir toda su extensión (figura 8), mediante la identificación de rasgos terrestres como puntas rocosas en la línea de costa, intersecciones de carreteras, picos elevados de geformas de fácil reconocimiento (volcanes o sierras pequeñas). La ubicación de los puntos elegidos fue verificada en los mapas topográficos de CETENAL escala 1:50,000 y la proyección utilizada es la Transversa Universal de Mercator (UTM) dentro de la zona 11.

Posteriormente se realizó la rectificación para lo cual se definieron dos sistemas de coordenadas cartesianos como se muestra en la figura 9, un sistema de coordenadas

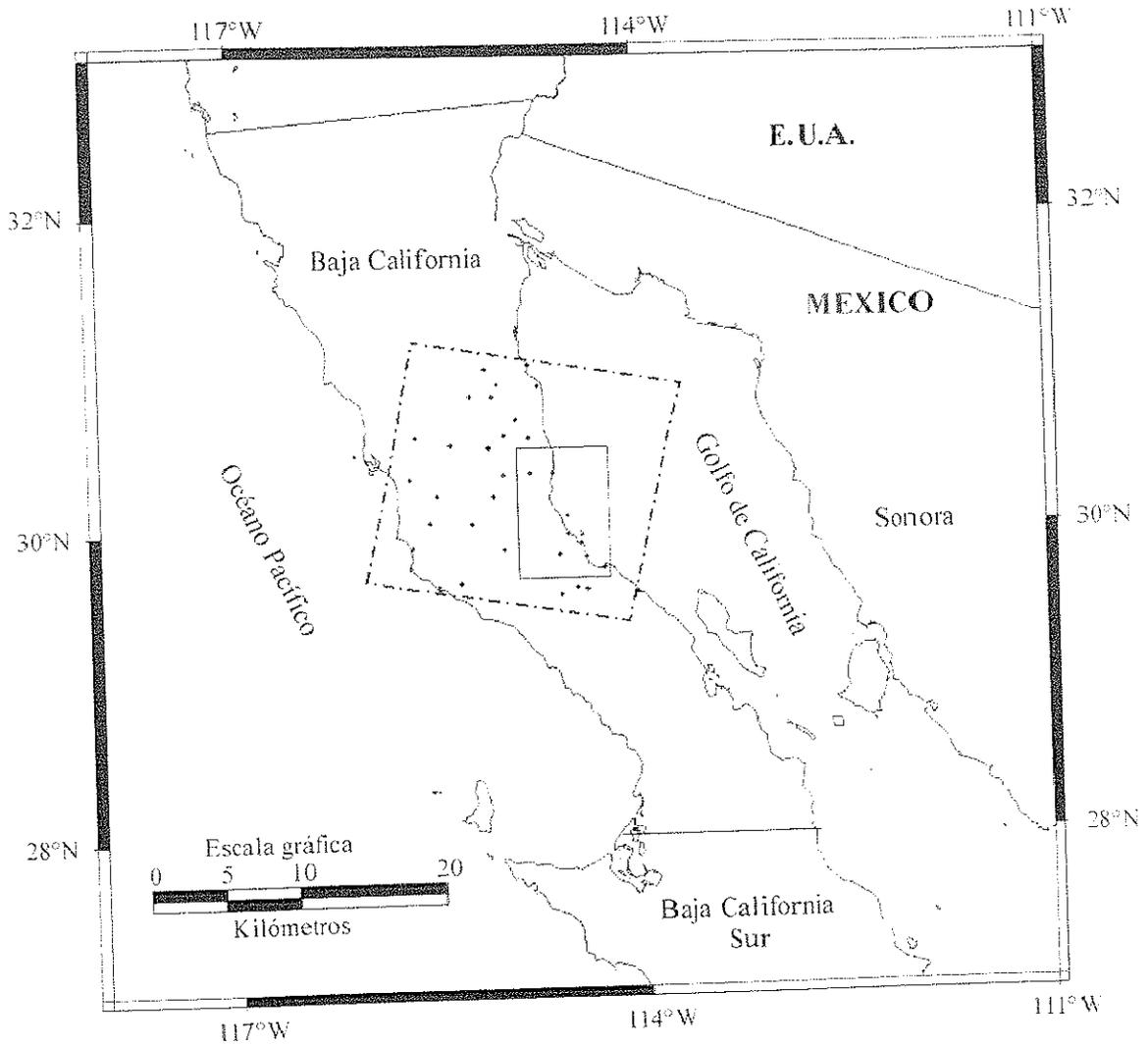


Figura 8. Esquema mostrando los puntos de control que se utilizaron para georreferir la imagen. Con la distribución de los puntos de control se procura cubrir toda el área que abarca la imagen TM. El recuadro de línea discontinua representa la escena TM del 20 de julio de 1987 y el recuadro con línea continúa representa la zona de estudio.

describe la ubicación de los puntos en el mapa (x,y) y el otro sistema de coordenadas define la localización de los pixeles correspondientes dentro de la imagen. Ambos sistemas de coordenadas se pueden relacionar mediante un par de funciones de mapeo f y g :

$$u = f(x, y) \quad \text{y} \quad v = g(x, y) \quad (1)$$

Las formas explícitas para estas funciones de mapeo generalmente no se conocen por lo que se eligen como polinomios de primero, segundo o tercer grado (Richards, 1993). Por ejemplo, para el caso de un polinomio de segundo grado se tiene que:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (2)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (3)$$

El número mínimo de puntos de control requerido para una aproximación polinomial de primer grado es de tres puntos, mientras que se necesitan seis y diez puntos para los polinomios de segundo y tercer grado respectivamente. Sin embargo, es recomendable utilizar suficientes puntos de control de tal manera que si algunos puntos contienen errores de posición, éstos no tendrán una influencia notoria sobre los coeficientes polinomiales (Richards, 1993; Sabins, 1997; Campbell, 1996).

Después de que se determina el mapeo polinomial, se construye una versión de la imagen corregida geoméricamente. Para este paso se construye una retícula que actúa como una malla en donde cada nodo representa el centro del pixel en la imagen corregida. El espaciamiento en la malla se elige de acuerdo al tamaño del pixel que se requiere en la imagen corregida. Generalmente, los centros de los pixeles en las mallas no

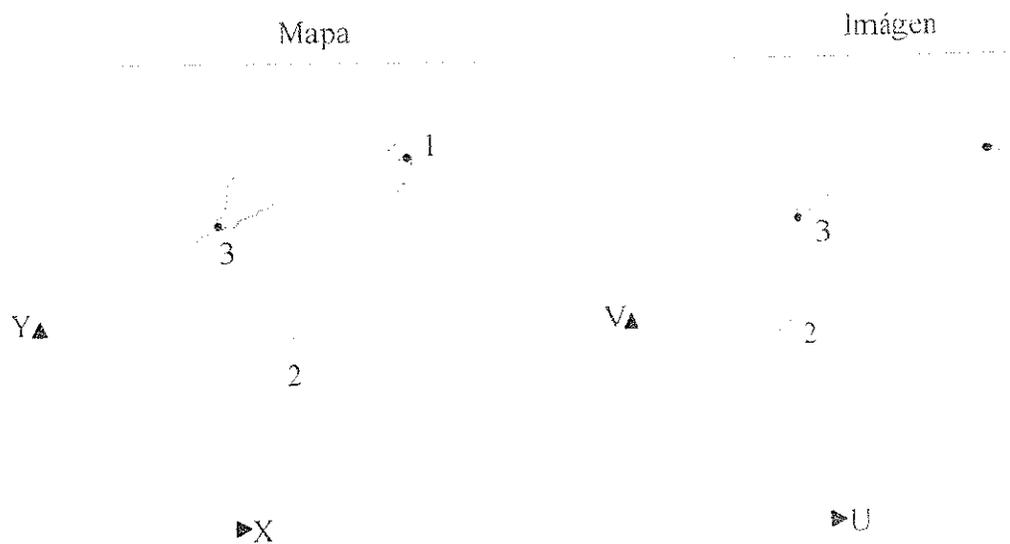


Figura 9. Sistemas de coordenadas definidos para la imagen y el mapa con los puntos de control especificados. Modificado de Richards (1993).

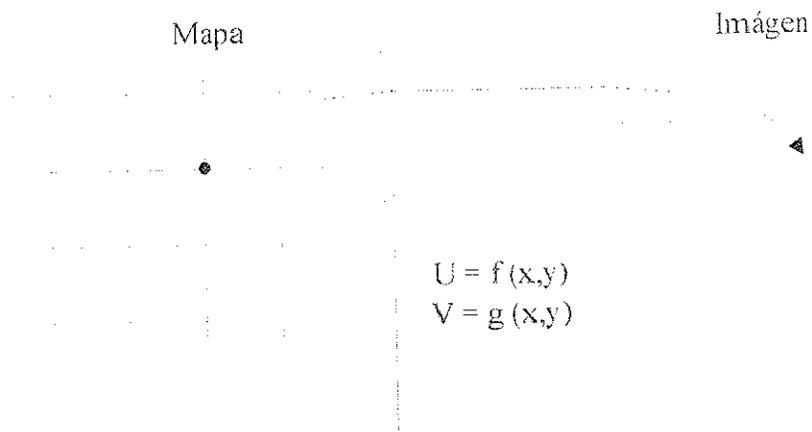


Figura 10. Localización de los centros de píxeles dentro de las mallas correspondientes al mapa y a la imagen mediante el uso del mapeo de polinomio. Modificado de Richards (1993).

corresponden exactamente con los centros de píxeles en la imagen original como se observa en la figura 10.

Para remediar el problema de falta de correspondencia de los centros de píxeles se utilizan técnicas de interpolación para obtener el valor de brillo correspondiente de cada punto en la imagen corregida. Existen tres técnicas para remuestreo: a) asignación del vecino más cercano, b) interpolación bilineal y c) interpolación cúbica (Richards, 1993; Campbell, 1996). Para este caso se utilizó la interpolación cúbica como técnica de remuestreo. Esta técnica utiliza un ajuste de valores dentro de un grupo que involucra a 16 píxeles cercanos al píxel central (figura 11). La imagen resultante es de alta calidad estética y se utiliza para fines fotointerpretativos. Los valores de error y desviación estandar obtenidos mediante la corrección geométrica son mostrados en el anexo 2.

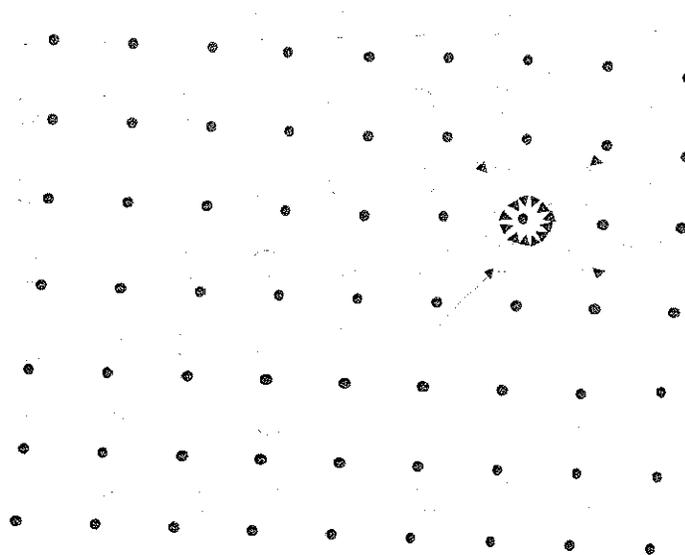


Figura 11. Interpolación cúbica. Cada valor estimado (puntos negros) es producto del ajuste de valores de los 16 píxeles (círculos blancos) más cercanos al píxel central. Modificado de Campbell (1996).

II.1.3 Radiancia.

La radiancia es una variable medida directamente por el sensor. Basicamente, la radiancia es la cantidad de luz que el sensor percibe del objeto que esta siendo observado. Por efectos de la atmósfera parte de la luz se dispersa y este efecto es registrado por el sensor. La radiancia depende de las características de la iluminación (intensidad y dirección), la orientación y posición del objeto y del comportamiento de la luz en presencia de la atmósfera. Las unidades de radiancia son W / m^2sr (Watts/metro cuadrado esterradian).

Tabla II. Datos de calibración para el sensor TM. Los valores registrados están en unidades de miliwatts por centímetro cuadrado por esterradian. Tomada de Markham y Baker (1985).

Sensor y banda	Lmin.	Lmax.	Rango
TM 1	-0.15	15.21	15.36
TM 2	-0.28	29.68	29.96
TM 3	-0.12	20.43	20.55
TM 4	-0.15	20.62	20.77
TM 5	-0.037	2.719	2.756
TM 7	-0.015	1.438	1.453

En este trabajo se realizan los cálculos de radiancia como un paso previo para el análisis de cociente de bandas. La radiancia se calcula a partir de los números digitales de la imagen aplicando la siguiente ecuación:

$$Radiancia = \frac{ND}{D_{max}}(L_{max} - L_{min}) + L_{min} \quad (4)$$

donde: ND es el número digital del píxel para un sensor dado, D_{max} es el número digital máximo del sensor (para la imagen Landsat TM el valor mínimo es 0 y el máximo es 255), L_{max} y L_{min} (tabla II) son las medidas de radiancia del sensor (Campbell, 1996).

II.2 TRATAMIENTO.

II.2.1 *Composición de color ó falso color.*

Hay dos tipos fundamentales de despliegue de imágenes (Richards, 1993). Una manera de despliegue es utilizando una tabla de color en tonos de gris para cada banda, donde el color negro corresponde a un brillo digital de valor 0 mientras que el blanco corresponde a valores digitales más altos que en la imagen TM se puede alcanzar y su máximo valor es de 255.

El segundo producto, es una imagen de composición de color (falso color) en la cual se seleccionan bandas espectrales a las cuales se les asigna uno de los colores primarios (azul, verde y rojo). Cuando existen más de tres canales espectrales, entonces se pueden realizar una serie de combinaciones de los colores primarios que permiten desplegar compuestos con colores sintéticos. Esta técnica es bastante útil y comúnmente utilizada para la interpretación geológica a partir de una imagen de satélite (Richards, 1993; Sultan et al, 1987; Rivard y Arvidson, 1992; Chávez, 1989; Hernández-Alvarez, 1995; Ribeiro-de Almeida et al, 1995, Jansma y Lang, 1996; Vincent, 1997; Sabins, 1997).

Para realizar estas combinaciones se utilizaron dos procedimientos: a) el procedimiento empírico en donde se seleccionaron tres bandas en base al conocimiento

Tabla III. Resumen de las características de cada una de las bandas del sensor TM. Tomada y modificada de Campbells (1996).

Banda	Resolución Espacial	Definición espectral	Algunas aplicaciones
1	30 m	Azul-verde 0.45 – 0.52 μm	Penetración de agua clara, batimetría, mapeo de costas, absorción de clorofila, distinción entre coníferas y vegetación caducifolia.
2	30 m	Verde 0.52 – 0.59 μm	Registro de radiación verde reflejada de la vegetación fresca, reflejo en aguas turbias, evaluación de la lozanía de la vegetación
3	30 m	Rojo 0.63 – 0.69 μm	Absorción de la clorofila que es importante para la discriminación del tipo de vegetación.
4	30 m	Infrarrojo cercano 0.76 – 0.90 μm	Indicación de la estructura celular de la planta, biomasa, lozanía de la vegetación, absorción completa de cuerpos de agua lo que facilita la delineación de costas.
5	30 m	Infrarrojo medio 1.55 – 1.75 μm	Indicativo de la humedad de la vegetación, mapeo de suelos húmedos, diferencia entre nubes y nieve, penetración de nubes poco densas.
6	120 m	Infrarrojo lejano 10.4 – 12.5 μm	Análisis de la densidad de vegetación, discriminación de suelos húmedos, mapeo termal, relación de valores de brillo con temperatura.
7	30 m	Infrarrojo medio 2.08 – 2.35 μm	Discriminación de tipos de roca, mapeo de zonas con alteración hidrotermal, absorción de los iones de hidróxido.

apriori de las propiedades espectrales de cada banda (tabla III) y las recomendaciones obtenidas de trabajos anteriores (Potter y Rossman, 1977; Rowan *et al.*, 1977; Abrams, 1980; Sultan *et al.*, 1987; Rivard y Arvidson, 1992; Yésou *et al.*, 1993; Hernández-Alvarez, 1995; Ribeiro de Almeida *et al.*, 1995; Sabins, 1997) y b) el factor de índice óptimo (FIO) desarrollado por Chávez *et al.* (1982). Este método es un procedimiento estadístico basado en la varianza y la correlación de cada banda. La varianza de las bandas, indicada por la desviación estandar está relacionada a la información contenida en cada banda y los coeficientes de correlación de las bandas son indicadores de redundancias entre las bandas. Para la obtención del FIO se utiliza la siguiente ecuación:

$$FIO = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{|r_{(1,2)}| + |r_{(1,3)}| + |r_{(2,3)}|} \quad (5)$$

donde: σ_1 , σ_2 , σ_3 son las desviaciones estandar de cada banda y $r_{(i,j)}$ son los coeficientes de correlación entre las bandas i , j .

Los resultados de ambos procedimientos serán discutidos en el capítulo IV

II.2.2 Clasificación no supervisada.

La clasificación no supervisada es aquella en la cual los pixeles son asignados a clases espectrales sin que se tenga un conocimiento previo de la existencia o nombres de estas clases (Richards, 1993; Campbell, 1996). El método utilizado para esta clasificación es el de algoritmo isodata también conocido como K-medias o medias movibles (Ball y Hall, 1965; Duda y Hart, 1973). El algoritmo opera como un proceso de optimización iterativa (figura 12) y se desarrolla de la siguiente manera:

1o.- Se seleccionan C puntos como candidatos a centros de agrupamiento (m)

$$m_i, i = 1, \dots, C \quad (6)$$

2o.- Cada pixel de la imagen es revisado y asignado a cierto grupo m_i en base a su distancia euclidiana en el espacio multispectral

$$d(x_1, x_2) = \left[\sum_{i=1}^N (x_{1i}^2 - x_{2i}^2) \right]^{1/2} \quad (7)$$

teniendo que x_1 y x_2 son dos puntos en el espacio multispectral (vector centro de agrupamiento y vector del pixel) y N es el número de componentes espectrales. El pixel será asignado a aquel grupo cuyo centro tenga una menor distancia.

3o.- La nueva serie de medias que resulta del agrupamiento producido en el segundo paso es registrada y almacenada.

4o.- Si $m_i - \hat{m}_i < \text{umbral}$ para todas las i , el proceso termina. Por otra parte \hat{m}_i (vector centro de agrupamiento del paso anterior) es redefinida como el valor actual m_i y el procedimiento regresa al paso 2. Con frecuencia el umbral es definido en términos del porcentaje de cambios entre un paso y el anterior.

Los datos recopilados de trabajos previos (Stock, 1989; Martín *et al.*, 1993; Martín *et al.*, 1995, Martín *et al.*, 1997, Fletcher *et al.*, 1997) y de las cartas geológicas de CETENAL (1977), CETENAL (1979), CETENAL (1981) arrojaron un total de 21 clases entre rocas y sedimentos por lo que se propuso realizar una clasificación no supervisada con 40 clases que es casi el doble del número de clases recopiladas y otra clasificación con 80 clases con la finalidad de poder determinar la mayor cantidad de clases espectrales

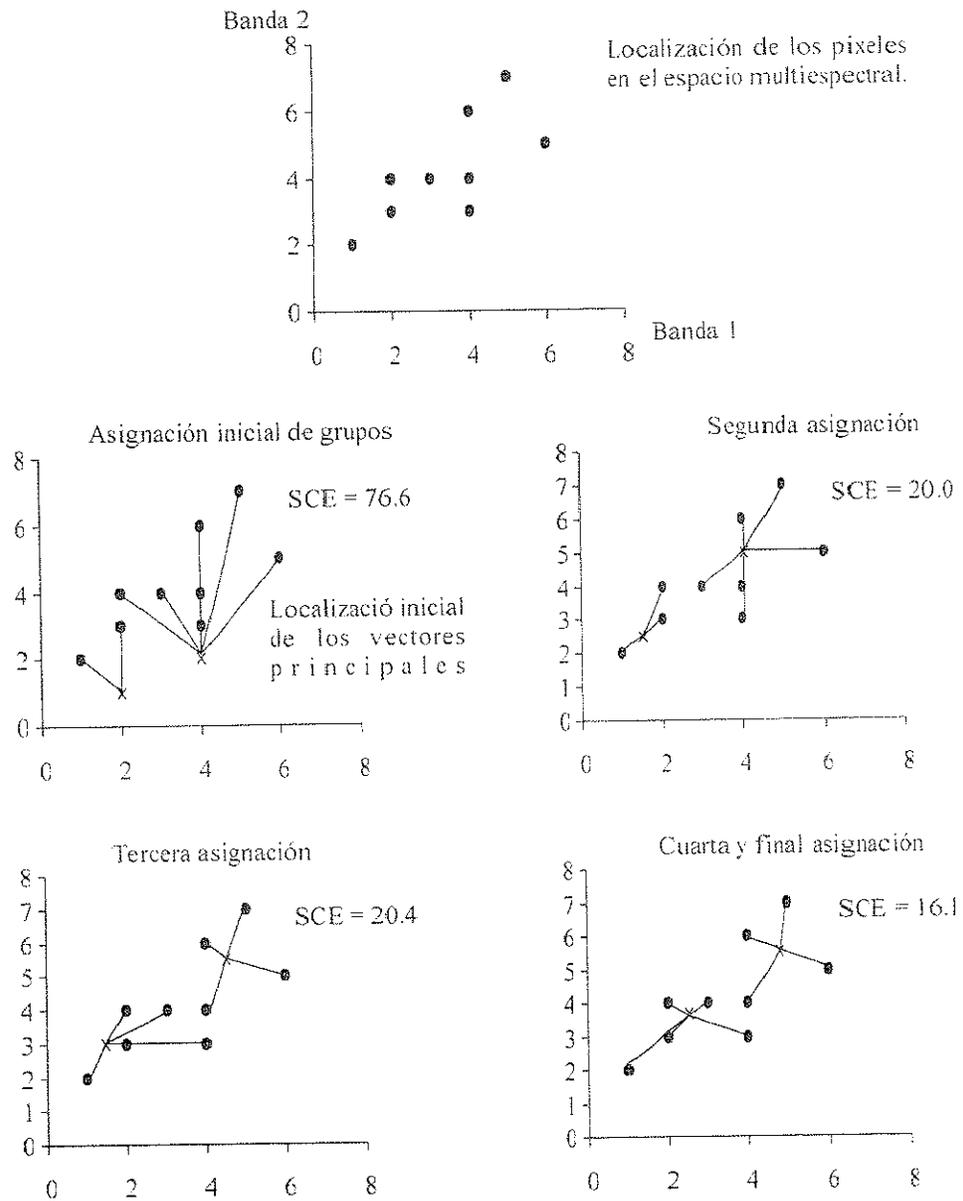


Figura 12. Esquema del agrupamiento en dos dimensiones por medio de la optimización iterativa seleccionando dos clases (método de isodata). Como se observa el método permite una reducción progresiva en la SCE (suma del cuadrado de los errores). Modificado de Richards (1993).

existentes en la imagen. Las condiciones para que terminaran las iteraciones en el proceso de clasificación fueron las siguientes: a) que el proceso de obtención de 40 clases se detuviera cuando se alcanzaran 100 iteraciones o cuando el porcentaje sin cambio alcanzado entre una iteración y la anterior fuera del 98.0 %, es decir que cuando el 98.0 % de los píxeles no sufriera un reacomodo en las clases espectrales; b) que el proceso de obtención de 80 clases se detuviera cuando se alcanzaran 200 iteraciones o cuando se alcanzara un porcentaje sin cambio del 98.0 %. Finalmente en ambas clasificaciones se alcanzó primero el porcentaje sin cambio.

Después se procedió a realizar una etiquetación y reclasificación de la imagen en donde se unieron a varias clases espectrales dentro de una clase dependiendo del tipo de litología. Este procedimiento de reagrupamiento manual o generalización se explica con más detalle en el apartado 2.7 de este capítulo.

II.2.3 Análisis de componentes principales.

La naturaleza multiespectral o multidimensional de los datos manejados en las imágenes de satélite permite que estos datos puedan ser acomodados por medio de vectores en el espacio con un número de ejes o dimensiones iguales al número de componentes espectrales asociados a cada píxel. Así por ejemplo, los datos del Landsat MSS (4 bandas) están dentro de un espacio de cuatro dimensiones, los datos del Skylab EREP (13 bandas) son acomodados en un espacio de trece dimensiones y los datos del Landsat TM (7 bandas) están en un espacio de 7 dimensiones. La posición de los píxeles dentro del espacio

multiespectral puede ser descrito por vectores cuyos componentes son las respuestas espectrales individuales de cada banda.

El análisis de componentes principales (ACP) (también conocido como Hotelling, transformada de Karhunen-Loeve o eigenvectores) es una técnica de realce de imagen para desplegar el máximo contraste espectral de las n bandas espectrales. En esencia, el ACP consiste en una transformación matemática que genera imágenes nuevas referidas como componentes o ejes, los cuales son combinaciones lineales de las imágenes originales. El ACP permite al usuario generar una serie nueva de ejes rotados que son ortogonales entre sí y cada imagen nueva no tienen correlación espectral con respecto a las otras imágenes nuevas. La mayor proporción de la variabilidad de los datos está presente sobre el primer componente (CP1) disminuyendo esta variabilidad en los componentes siguientes. La suma de la variabilidad de todos los componentes es igual al total de la variabilidad presente en las imágenes originales.

Independiente de la estructura de las clases existentes, para el ACP se hace uso de la media global m y de la varianza global Σ (sumatoria de los datos). La posición promedio de un pixel-vector en el espacio multiespectral estará definida por el valor esperado del vector x , de acuerdo a:

$$m = \varepsilon\{x\} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K x_j \quad (8)$$

donde m es la media global, ε es la espectación del operador y x_j es el j ésimo pixel-vector de un total K . Mientras el parámetro m define la posición esperada de un pixel en el

espacio multiespectral, la matriz de covarianza estimará el grado de dispersión de los píxeles alrededor de la media.

Para el análisis de componentes principales es importante el concepto de la matriz de covarianza (Anexo 4) ya que en ella se ve si existe correlación entre las respuestas de las n bandas. Si las bandas están altamente correlacionadas los valores fuera de la diagonal principal de la matriz de covarianza son más grandes en comparación con los valores de la diagonal principal. Si por otro lado, las bandas tienen muy poca correlación los valores fuera de la diagonal están muy cercanos a cero. Los valores de la matriz de covarianza para la imagen TM utilizada en este estudio están indicados en la tabla IV. A partir de la matriz de covarianza se calcula la transformada de componentes principales (Anexo 4).

Tabla IV Matriz de covarianza para la imagen TM del 20 de julio de 1987.

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	1010.663	697.154	1149.344	925.021	1697.835	1063.039
B2	697.154	514.306	871.089	725.074	1357.574	833.873
B3	1149.344	871.089	1536.842	1297.660	2481.757	1512.065
B4	925.021	725.074	1297.660	1149.475	2194.036	1315.650
B5	1697.835	1357.574	2481.757	2194.036	4455.564	2660.220
B7	1063.039	833.873	1512.065	1315.650	2660.220	1609.466

El análisis de componentes principales ha sido tratado por varios autores (Richards, 1993; Davis, 1986; Drury, 1987; Chavez y Kwarteng, 1989; Yésou *et al.*, 1993;

Ribeiro de Almeida *et al.*, 1995; Hernández-Alvarez, 1995; Sabins, 1997) en diversos estudios geológicos, de implementación y mejoramiento de esta técnica. El ACP generalmente se complementa con otras técnicas de realce digital como: filtros detectores de bordes o despliegues de falso color con la finalidad de facilitar las labores de interpretación.

Existen dos maneras de efectuar el ACP: a) el método estándar y b) el método selectivo. En este trabajo se realizaron los dos métodos.

En el método estándar se utilizaron las 6 bandas de la imagen TM (1 a la 7) cubriendo el rango visible – infrarrojo intermedio. Se calcularon 6 componentes principales (CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 y CP6) y se elaboró una imagen de falso color con CP1, CP2 y CP3 en rojo, verde y azul respectivamente.

Para el método selectivo se generaron la primera y la segunda componente de los siguientes pares de bandas TM:

- 1) TM 2 y 4 (visible – infrarrojo cercano)
- 2) TM 2 y 7 (visible - infrarrojo medio)
- 3) TM 4 y 7 (infrarrojo cercano – infrarrojo medio)
- 4) TM 1 y 2 (visible azul – verde)
- 5) TM 5 y 7 (infrarrojo medio)

Para la selección de estos pares se utilizó la matriz de correlación mostrada en la tabla V. Los tres primeros pares fueron seleccionados para mapear el contraste espectral entre dos bandas que tienen alta correlación y que cubren rangos espectrales diferentes. El cuarto par fue seleccionado para mapear el contraste espectral de dos bandas que son

adyacentes y están altamente correlacionadas. El último par es similar al cuarto par, excepto que las bandas no están adyacentes pero están altamente correlacionadas y ubicadas dentro de un mismo rango del espectro electromagnético.

Finalmente se realizó una imagen en falso color con los CP2 obtenidos de los pares TM2-7, TM4-7 y TM5-7 en azul, verde y rojo respectivamente, con el objeto de observar las variaciones que se presentan en todo el rango espectral.

Tabla V. Matriz de correlación obtenida de la imagen Landsat TM del 20 de julio de 1987.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Banda 1	1.000					
Banda 2	0.967	1.000				
Banda 3	0.922	0.980	1.000			
Banda 4	0.858	0.943	0.976	1.000		
Banda 5	0.800	0.897	0.948	0.969	1.000	
Banda 7	0.833	0.917	0.961	0.967	0.993	1.000

II.2.4 Firma espectral.

El término de firma espectral ha sido utilizado para referirse a la respuesta espectral de un rasgo que es observado sobre un rango de longitud de onda (Campbell, 1997).

El concepto fundamental de firma espectral expresa que los materiales despliegan respuestas espectrales únicas que pueden permitir la identificación (con sólo la información espectral) de afloramientos individuales, suelos, vegetación, etc, desde las imágenes de satélite.

Existen diversos trabajos que tratan este tema (Clark, 1957; Rowan et al, 1974; Rowan et al, 1977; Bowers y Rowan, 1996; Goetz et al, 1985; Hunt, 1977; Clark, 1957;

Lang et al, 1987; Gupta, 1991; Rivard y Arvidson, 1992; Rivard, et al, 1993), algunos de estos estudios sólo se dedican a la experimentación en laboratorio de las características espectrales de diferentes materiales entre los que se pueden citar a diferentes tipos de minerales, rocas y plantas. Con los trabajos realizados en estos laboratorios se da origen a las bibliotecas espectrales. Los estudios enfocados al mapeo de alguna zona utilizan la aplicación de las características espectrales de las rocas y minerales con el objeto de facilitar el trabajo de identificación de rasgos sobre la imagen de satélite.

Hay diferentes maneras de obtener las firmas espectrales de minerales puros y roca: a) mediante el análisis en el laboratorio (Rowan *et al.*, 1974; Goetz et al, 1985; Hunt, 1977; Rowan et al, 1977; Gupta,1991); b) análisis in situ por medio de espectroradiómetros portátiles (Sultan *et al.*, 1987; Vincent, 1996; Bowers y Rowan, 1996) y c) análisis directos sobre la imagen de satélite (Sultan et al, 1987; Vincent, 1997; Sabins, 1997).

En este trabajo se realizó el análisis directo sobre la imagen TM. Las firmas espectrales de cada clase litológica se graficaron de la siguiente manera (ver figuras 35 a 40 en el capítulo IV): en el eje "x" se ubicaron los valores intermedios del ancho de cada banda utilizando las unidades en μm ; en el eje "y" se graficaron los valores medios de cada clase espectral (litológica) obtenida durante la clasificación supervisada, estos valores son los ND de los pixeles agrupados en las diversas clases. Los ND no tienen unidades y para este caso están representando las diferencias en brillo de cada clase (pixeles agrupados).

II.2.5 Cociente de bandas.

El cociente de bandas consiste en una división del valor de un pixel dentro de una banda entre el valor del pixel correspondiente dentro de otra banda (Sabins, 1997; Vincent, 1997). Este proceso normalmente se realiza después de haber hecho las correcciones atmosférica y de radiancia. Las bandas seleccionadas para un proceso de cociente espectral usualmente están en diferentes rangos de longitud de onda. Los cocientes espectrales son atractivos porque aumentan la información composicional, mientras que suprimen otro tipo de información de la superficie terrestre tal como expresiones topográficas y diferencias en el tamaño del grano.

En una imagen de cociente los extremos blanco y negro de una escala de grises representan los píxeles que tienen las diferencias más grandes en reflectividad entre las dos bandas espectrales. Las firmas más oscuras son áreas donde el denominador del cociente es más grande que el numerador e inversamente, en las firmas más brillantes el numerador es más grande que el denominador. Cuando el numerador y denominador son iguales no existen diferencias entre las dos bandas (Sabins, 1997).

Para la realización de los cocientes de bandas primero se realiza un estiramiento del histograma con la finalidad de incrementar el contraste en la imagen (Rowan et al., 1974). Después se utilizaron algunos cocientes estándares establecidos en trabajos previos (Sultan et al., 1987; Gupta, 1991; Hernández-Alvarez, 1995; Ribeiro de Almeida et al., 1995; Vincent, 1996; Sabins, 1997; Harris et al., 1998). Estos cocientes son obtenidos en base al conocimiento de las características espectrales de algunos materiales terrestres incluyendo vegetación, agua, suelos, minerales y rocas (Anexo 4). Por lo tanto los

cocientes utilizados aquí son el cociente 5/7 que resalta arcillas (fases relacionadas a hidróxidos), piroxenos y carbonatos, 3/1 para resaltar materiales ferrosos y el producto de 5/4 x 3/4 que es útil en la discriminación entre rocas máficas y félsicas (Sultan et al. 1987; Hernández-Alvarez, 1995; Vincent, 1997; Sabins, 1997). Finalmente se establece una combinación de color entre las siguientes relaciones: 3/1, 5/7, 5/4 x 3/4 verde, rojo y azul respectivamente como una herramienta para facilitar la identificación y el mapeo de las diferentes unidades litológicas.

II.2.6 Clasificación supervisada mejorada.

La clasificación supervisada puede ser definida informalmente como el proceso en el cual se hace uso de muestras de identidad conocida para clasificar píxeles de identidad desconocida. Para esta clasificación se asume que cada clase espectral puede ser descrita por una distribución probabilística que determina la pertenencia de un píxel a una clase dada en el espacio espectral. El tipo de distribución utilizada para este tipo de clasificación es la normal o Gaussiana porque presenta características que permiten las descripciones matemáticas de los procesos de clasificación.

La distribución normal multidimensional en el espacio multiespectral se expresa de la siguiente manera:

$$p(x) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\{-1/2(x-m)'\Sigma^{-1}(x-m)\} \quad (9)$$

donde x es la localización de un pixel-vector en un espacio de N componentes espectrales, m es la posición promedio de la clase espectral y Σ es la matriz de covarianza que describe la dirección de dispersión de los datos en el espacio. La distribución normal multidimensional queda definida completamente por su vector promedio (m) y por su matriz de covarianza (Σ). Entonces si se conoce m y Σ para cada clase espectral en una imagen, cada pixel en la imagen puede ser examinado y etiquetado dentro de la clase correspondiente de acuerdo a la probabilidad calculada para un pixel dentro de una posición en particular.

Los pasos esenciales que se siguieron para realizar la clasificación supervisada fueron los siguientes:

- 1.- Identificación del tipo de clases que se van a utilizar para segmentar la imagen. Estas clases son informativas y pueden ser, por ejemplo, agua, regiones urbanas, pastos, etc. Para este caso se utilizaron 26 clases en base al tipo de litología de la zona de estudio incluyéndose también al agua.

- 2.- Selección de los grupos de pixeles que van a conformar la serie de clases. Estos pixeles se manejan en forma de áreas de entrenamiento (polígonos). Las áreas de entrenamiento se establecieron con base a criterios de campo, mapas previos de la zona (Gastil *et al.*, 1975; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Nagy, 1997; Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa; CETENAL, 1977; CETENAL, 1979; CETENAL, 1981), fotointerpretación de la combinación de bandas TM742 en rojo, verde y azul y algoritmos de componente principales. Es importante que las áreas de entrenamiento sean muestras homogéneas de la clase en cuestión y que el rango de variabilidad intracase sea incluido.

Por esta razón es recomendable utilizar más de una área de entrenamiento por clase. Para cada clase se utilizó un rango de 3 a 7 áreas de entrenamiento.

3.- Por medio de las áreas de entrenamiento se estima el algoritmo clasificador que será utilizado en este proceso, es decir, se realiza la estadística de las áreas de entrenamiento (media, desviación estandar, matriz de covarianza, etc.) y se escoge el método que utilizará el clasificador que para este caso es el de Máxima Similitud Mejorada incluyendo a los pixeles vecinos (Maximum Likelihood). Este método involucra a grupos de pixeles que contienen datos espectrales y temáticos. Los esquemas alternativos para clasificación mejorada incluyen series de datos de probabilidad apriori a partir de datos no espectrales ya que se busca el máximo aprovechamiento de los datos temáticos dentro de un contexto espacial para clasificar datos espectrales (Strahler, 1980; Richards *et al.*, 1982). Una explicación más detallada del método de máxima similitud se encuentra en el Anexo 5.

4.- Se utiliza el algoritmo clasificador para realizar el procedimiento de clasificación con base a las clases informativas previamente establecidas. En este nivel la imagen entera esta segmentada en grupos de interés, es decir, está típicamente clasificada. Mientras que en el paso No. 2 es necesario hacer la clasificación a mano de una proporción de todos los pixeles, en este nivel la computadora realiza la clasificación de toda la imagen.

5.- Finalmente se obtiene un mapa que resumen los resultados de la clasificación. A partir de este resultado se continúa con un proceso de reclasificación y generalización con la finalidad de obtener un mapa final.

II.3 Post-Procesamiento (supervisada y no supervisada).

Después de haber realizado las clasificaciones (supervisada y no supervisada) se observó que algunas clases se confunden con otras por lo que fué necesario separar o agrupar algunas clases, con la finalidad de lograr un mapa más cercano a la realidad. Este procedimiento se lleva a cabo a través de dos técnicas. La primera es conocida como reclasificación y consiste en establecer esquemas de correspondencia de muchas clases a una reagrupando clases declaradas como distintas en una sola. Esta reasignación es guiada por el conocimiento de la zona de estudio que tenga el intérprete.

La otra técnica se plantea como el problema inverso (separación de clases), es decir, las clases que son reconocidas en el campo o mapas como distintas fueron agrupadas en una sola clase por el clasificador. Esta técnica se realiza aplicando una segmentación espacial a la imagen, delineando polígonos que engloban zonas con una propiedad particular conocida y que ayudará a separar las clases confundidas. Esto se hace estableciendo funciones como:

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } [\text{pixel } (x) = \text{clase } (a)] \text{ y } [\text{en región } (h)] \\
 &\text{entonces pixel } (x) \text{ toma clase conocida } (C) \\
 &\text{si no pixel } (x) = \text{pixel } (x) \qquad \qquad \qquad (10)
 \end{aligned}$$

esta regla se aplica para todos los pixeles.

Existen variaciones en la fórmula presentada anteriormente como se presenta a continuación:

Si [pixel (x) = clase (a) ó pixel (x) = clase (b) ó ... pixel (x) = clase (n)] y [en región (h)]
 entonces pixel (x) se asigna a clase conocida (C)
 si no pixel (x) = pixel (x) (11)

Si [pixel (x) en región (h)]
 entonces pixel (x) se asigna a clase conocida (C)
 si no pixel (x) = pixel (x) (12)

Todos éstos son ejemplos que permiten hacer una reclasificación o reagrupamiento en base a una segmentación espacial de la imagen en regiones conocidas.

Después de realizar la reclasificación se utilizó un filtro de mayoría (majority) para suavizar la salida de la reclasificación y para quitar el ruido producido durante la clasificación. El filtro de mayoría es considerado como un filtro democrático ya que asigna un pixel a la clase proporcionalmente más abundante (Richards, 1993).

Finalmente se hizo una generalización de clases, para lo cual se hizo una segmentación de la imagen con la finalidad de eliminar aquellas clases que a escala 1:100,000 y 1:250,000 son menores a 1 mm y se reagruparon con la clase circundante, ya que la generalización tiene como fin presentar las clases que sean más representativas en la zona de estudio.

II.4 Evaluación de exactitud.

La evaluación de exactitud consiste en la comparación de dos mapas. uno basado sobre el análisis de imágenes satélite (mapa a evaluar) y otro basado en una fuente de información diferente (Card, 1982; Congalton et al, 1988; Stehman, 1992; Campbell, 1996). Sobre la imagen de satélite se escoge cierto número de muestras (píxeles). La selección de la muestra puede ser de manera sistemática estratificada o de manera aleatoria como lo describen Card (1982), Stehman (1992) y Campbell (1996).

En este estudio se aplica la técnica aleatoria que consiste de los siguientes pasos :

- 1.- Se eligieron 2000 puntos aleatorios para cubrir toda el área de estudio. Los puntos aleatorios se pueden obtener de programas como Matlab y Excel. Para este caso se utilizaron puntos aleatorios obtenidos de Excel.
- 2.- Se realiza la comparación del mapa reclasificado obtenido de la clasificación supervisada con respecto a los mapas existentes de la zona de estudio (Martín *et al.*, 1995 ; Fletcher *et al.*, 1997; Busch y Delattre, 1993; Phillips, 1993; Nagy, 1997 ; Gastil *et al.*, 1975 ; CETENAL, 1977 ; CETENAL, 1979 ; CETENAL, 1981). La comparación puede hacerse a mano o realizarse por medio de algún programa de sistemas de información geográfica (SIG) como el GRASS si se cuenta con toda la información en formato digital (digitalizados, georreferidos y etiquetados). En este caso se hizo el análisis a mano, ya que no se tienen disponibles en formato digital todos los mapas de la zona.
- 3.- Con base a la comparación mencionada en el punto anterior se obtiene la matriz de error llamada también "matriz de confusión" (Congalton et al, 1988;

Campbell, 1996). Los valores de la matriz de error se muestran en el capítulo IV y la metodología para obtenerla se presenta en el anexo 6.

Después de obtener la matriz de error se utiliza algún método para evaluar el grado de semejanza entre el mapa obtenido mediante el procesamiento de la imagen de satélite y los mapas de referencia. Existen diversas maneras de manipulación de la matriz de error (Sharma y Sarkar, 1998 ; Lunnetta *et al.*, 1991 ; Aronoff, 1982 ; Stehman, 1992 ; Hudson, 1987 ; Card, 1982 ; Foody, 1992), con algunos de estos métodos se obtiene el grado de semejanza de todas las clases contenidas en la imagen clasificada, pero también existen otras variantes donde se puede obtener el grado de semejanza para cada clase por separado.

El método que se utiliza en este trabajo es el método kappa (κ) de concordancia descrito por Foody (1992).

El índice kappa de concordancia se calcula a partir de la ecuación :

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (13)$$

donde P_o representa la proporción de clases que fueron catalogadas correctamente y P_e es la proporción de clases que fueron catalogadas incorrectamente. La P_e puede ser calculada a partir de los renglones y columnas marginales de la matriz de error mediante la siguiente fórmula:

$$P_e = \sum_{i=1}^n P_r(i)P_c(i) \quad (14)$$

Donde n es el número total de muestras, P_r es el valor obtenido del renglón marginal y P_c es el valor obtenido de la columna marginal. La variable P_o se calcula a partir de la diagonal principal de la matriz de error.

$$P_o = \frac{\text{Suma de la diagonal principal}}{N} \quad (15)$$

donde N es el número total de muestras.

La escala del índice kappa varía de -1 a 1. Cuando el porcentaje correcto se aproxima a 100 y la cantidad de clases incorrectas está muy cercana a 0, el valor de kappa se aproxima a 1 indicando una clasificación perfecta. Por otra parte, cuando la cantidad de clases incorrectas se incrementa considerablemente (<50 %) y el porcentaje correcto disminuye el valor de kappa asume valores negativos indicando una clasificación pobre. Cuando el valor de kappa es igual a 0 sugiere que la cantidad de clases incorrectas es igual a la cantidad de clases correctas.

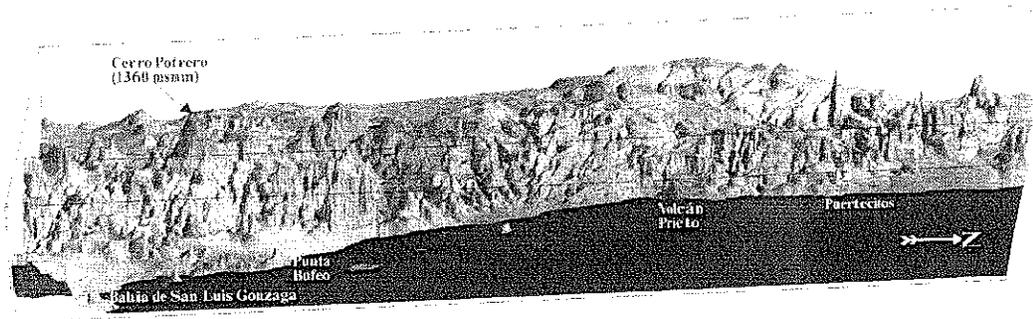
III. LITOLOGIA.

La franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga tiene una extensión de aproximadamente 3,000 km². Morfológicamente está constituida principalmente por playas arenosas, abanicos deltaicos y secciones de costa rocosa formada por mesetas y algunos edificios volcánicos de edad Mioceno-Plioceno. Los principales tipos de roca dentro de la franja, del más antiguo al más joven son: rocas metamórficas del Paleozoico-Mesozoico, cuerpos graníticos cretácicos, secuencias volcanosedimentarias terciarias (Mioceno-Plioceno), sedimentos marinos y no marinos en depósitos recientes (Buch, 1984; Phillips, 1984; Delattre, 1984; Stock, 1989; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Buch y Delattre, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Fletcher *et al.*, 1997; Nagy, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa).

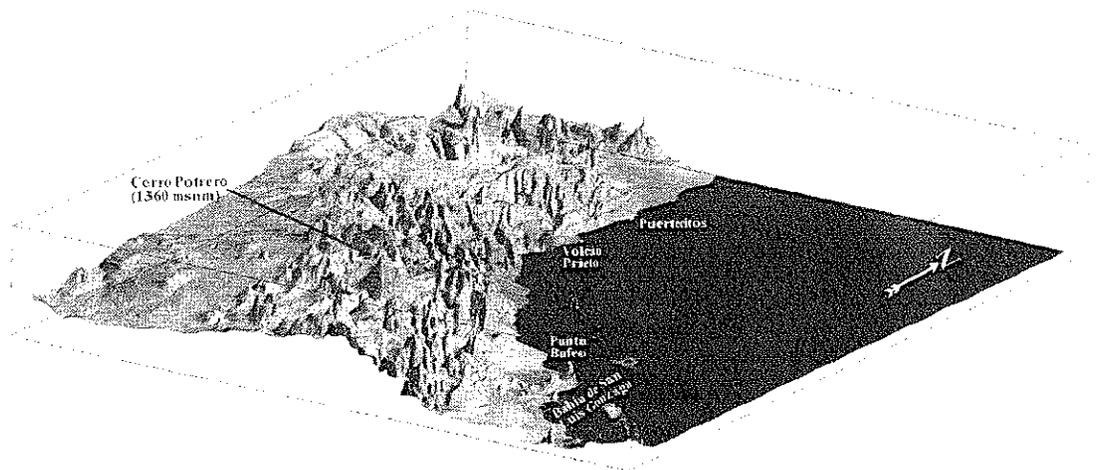
Las elevaciones en el área de estudio varían desde 0 msnm en las zonas de playas hasta 1360 msnm en el Cerro Potrero (Cerro Agualtosa según INEGI) ubicado hacia la parte SSE de esta zona (figura 13). La cubierta de vegetación en general es escasa, sin embargo sobre los cauces de arroyos y en zonas cercanas a las playas se presentan incrementos de vegetación de tipo matorral y escasos árboles (palo verde, mezquite, pata de elefante, etc.).

Las descripciones de los diferentes tipos de roca se compilaron de trabajos anteriores realizados sobre esta zona (Buch, 1984; Phillips, 1984; Delattre, 1984; Stock, 1989; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Buch y Delattre, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Fletcher *et al.*, 1997; Nagy, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa) y se complementan con las verificaciones realizadas durante las etapas de trabajo de campo. La tabla VI es una

compilación de la composición mineralógica de cada tipo de roca y en el anexo 3 se presentan breves descripciones de todos los sitios visitados en las etapas de campo.



a



b

Figura 13. Dos vistas en perspectiva de la zona de estudio; (a) viendo al oeste y (b) viendo hacia el noroeste. En ambos diagramas se puede apreciar la zona de mayor altitud (Cerro Potrero) y las zonas de playa que son las que presentan las elevaciones menores con respecto al nivel medio del mar. La escala horizontal es 1:700,000 y la escala vertical tiene una exageración del 0.90 con respecto de la escala horizontal.

III.1 ROCAS DEL BASAMENTO (Paleozoico – Cretácico).

III.1.1 *Metasedimentos I, Paleozoico (Pzml).*

Las rocas metamórficas prebatolíticas (Gastil *et al.*, 1975) afloran hacia la parte central de la zona de estudio (anexo 7). En esa zona este grupo litológico está constituido por las formaciones El Mármol, Zamora, El Volcán, El Indio y la unidad 2 de la formación La Olvidada, descritas en trabajos anteriores (Phillips, 1984; Delattre, 1984; Buch, 1984; Buch y Delattre, 1993; Webster y Delattre, 1993; Phillips, 1993). Estas unidades son reunidas en este trabajo como un solo grupo debido a que su respuesta espectral no permite hacer la distinción de las diferentes formaciones (para mayor detalle ver la figura 22 en el capítulo IV). Esta unidad consiste principalmente en intercalaciones de capas de argilita, filita y esquisto con horizontes delgados y discontinuos de metarenisca, conglomerado, mármol y lentes de pedernal. La argilita se presenta en capas delgadas alternadas rítmicamente de colores gris oscuro a gris claro en superficie fresca y con colores de intemperismo de café a negro, con algunas manchones anaranjados de óxidos de hierro sobre fracturas. Predominantemente, están compuestas de cuarzo microcristalino con trazas de calcita y andalusita, tanto en las capas oscuras, como en las capas claras. Las capas oscuras contienen altas concentraciones de material de origen orgánico y mica (Buch, 1984; Delattre, 1984; Buch y Delattre, 1993). El esquisto y la filita presentan colores gris oscuro a negro en superficie fresca y rojizo a negro en superficie de intemperismo (figura 14; puntos de verificación 12, 15, 34A, 34B, 53C, 61 Anexo 3). Las capas de esquisto y filita se distinguen por la presencia de capas muy delgadas de biotita y cristales grandes de estauroлита y granate. Cerca del contacto con las rocas graníticas la biotita de las rocas

metamórficas se encuentra alterada hidrotermalmente a clorita, que producen una coloración verde brillante, dando como resultado exposiciones de filita con bandeamiento verde alternadas con capas de pedernal blanco (Phillips, 1984; Phillips, 1993).

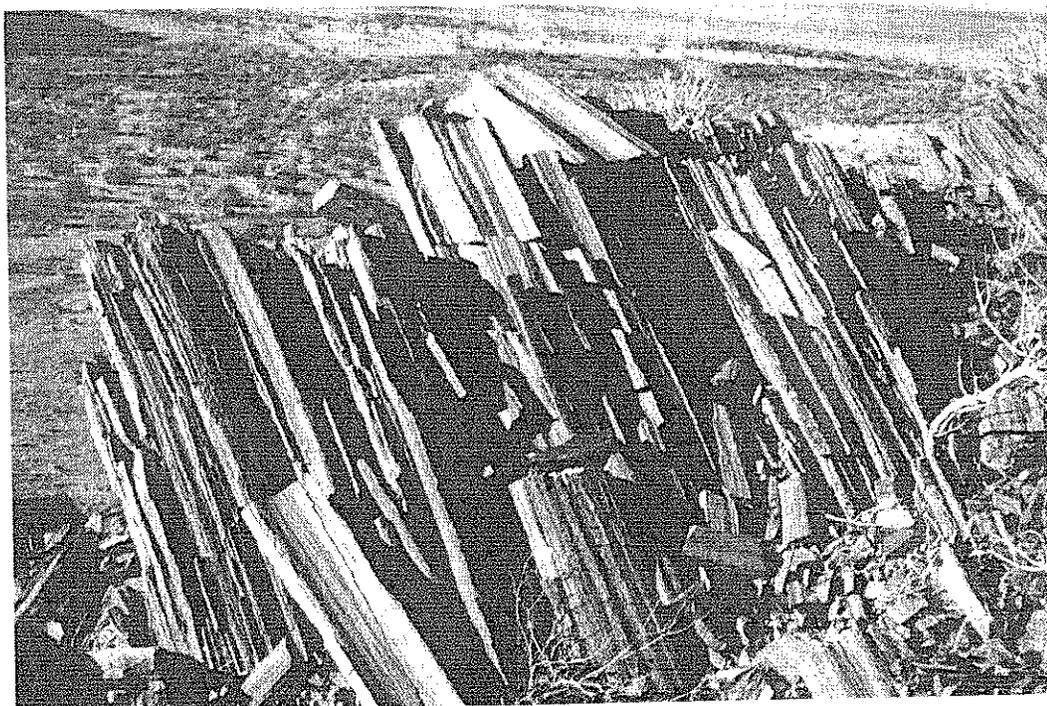


Figura 14. Punto P-61; afloramiento de esquistos de mica, en superficie fresca se presentan de color gris oscuro y en superficie de intemperismo se presentan de color negro y rojizo

III.1.2 Metasedimentos 2, Cretácico (Km2).

Estas rocas corresponden a la subunidad 1 de la formación La Olvidada (Phillips, 1984; Phillips, 1993). Esta unidad es distintiva porque constituye una franja que marca el límite superior de Pzml (anexo 7). Consiste principalmente de un metaconglomerado

sobreyacido por capas de cuarcita, mármol y filita de plagioclasa, cuarzo y mica. El metaconglomerado presenta colores grisáceos y está confinado a lentes discontinuos que incluyen guijarros alargados de cuarcita. La cuarcita presenta colores gris claro a blanco en superficie fresca y colores rosáceos en superficie de intemperismo. La cuarcita está constituida por cuarzo redondeado y presenta horizontes ricos en biotita. El mármol presenta colores gris oscuro, es comunmente silíceo, rico en materia orgánica y está restringido a lentes delgados y discontinuos. La recristalización ha borrado la textura original de la caliza. La filita de plagioclasa, cuarzo y mica presenta colores gris oscuro en superficie fresca y color negro rojizo en superficie de intemperismo; exhibe una textura esquistosa constituida por cristales de cuarzo del tamaño de la arena y fragmentos líticos. Los fragmentos líticos son volcániclasticos constituidos por fenocristales de plagioclasa y una matriz recristalizada. La alteración hidrotermal produce colores rojos y blancos en esta unidad (Phillips, 1984; Phillips, 1993).

III.1.3 Metasedimentos 3, Cretácico (Km3).

Corresponde a la subunidad 3 de la formación La Olvidada (Phillips, 1984; Phillips, 1993). Esta unidad al igual que Km2, constituye una franja que divide a Pzm1 (anexo 7). La unidad Km3 consiste en intercalaciones de lentes gruesos de metaconglomerado, cuarcita y metandesita. La metandesita presenta color café, ocurre en forma de flujos masivos, aunque localmente se preservan algunas estructuras de almohadilla. La capa de metaconglomerado consiste en clastos amigdaloides de metandesita y clastos bien redondeados de cuarcita y presenta colores marrón. Estos clastos estan soportados en una

matriz rica en biotita. El horizonte de cuarcita de color café claro se presenta como capas delgadas y masivas que contienen fragmentos de conchas (Phillips, 1984; Phillips, 1993).

III.1.4 Basamento granítico del Cretácico (Kg).

El basamento granítico aflora en la parte sur de la zona de estudio y sobre la línea de costa en Punta Bufo (mapa litológico anexo). Está constituido de tonalita y granodiorita (Gastil *et al.*, 1975; Fletcher *et al.*, 1997). Las tonalita de biotita y hornblenda es de color gris claro a blanco en superficie fresca y rosáceo a blanco en superficie de intemperismo (Figura 15; puntos de verificación 25, 26, 27A, 27B, 28, 53A, 58, Anexo 3). Presenta textura equigranular constituida por plagioclasa, feldespato, biotita, hornblenda y cuarzo.

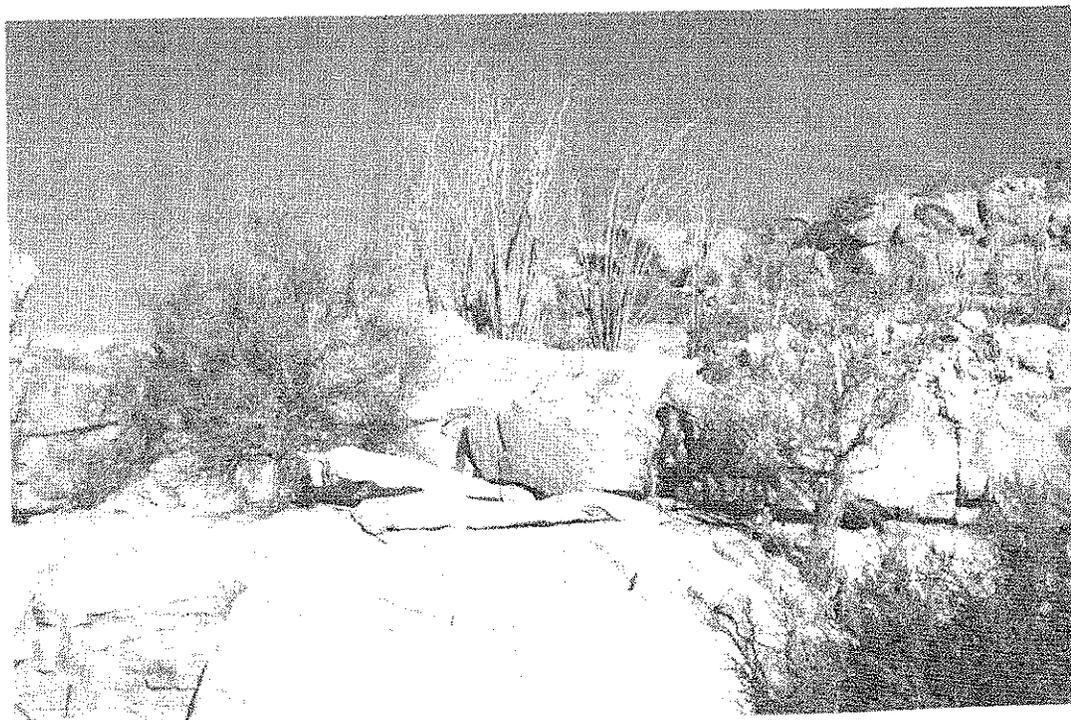


Figura 15. Punto P-28; afloramiento de tonalita de grano medio presentando color crema en superficie fresca y colores rosa y beige en superficie de intemperismo.

con abundantes enclaves de roca máfica ricos en hornblenda. Localmente se presentan diques pegmatíticos cortando a los granitoides, como es el caso de Punta Bufeo, en donde se observan diques pegmatíticos constituidos por plagioclasa, feldespato, cuarzo y micas (punto de verificación 52, 53B, anexo 3). La granodiorita aflora sobre el Escarpe principal del Golfo, cerca de Cerro Potrero (anexo 7). Esta unidad es reportada por Gastil *et al.* (1975) pero en ese trabajo no se proporciona una descripción detallada de esta roca y debido a la falta de acceso no fue posible muestrearla para contar con una descripción petrográfica. Sin embargo, es claramente diferenciable en la imagen TM (como se discutirá en el capítulo IV).

III.2 ROCAS DEL TERCIARIO.

III.2.1 Andesitas y dacitas, Mioceno (Tma).

Afloran en el Arroyo Los Heme en forma de una ventana estratigráfica que se extiende aproximadamente 4 km en dirección E – W (anexo 7) y en la esquina superior noroeste de la zona de estudio (Stock, 1989; Nagy, 1997; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995). En estas zonas afloran cuellos volcánicos, flujos de lava, brechas volcánicas y depósitos epiclásticos derivados de éstos. Los conductos o cuellos volcánicos más resistentes a la erosión forman estructuras pronunciadas con elevaciones de hasta 300 m sobre el nivel base del arroyo (Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995). Las lavas máficas asociadas a este grupo son de distribución restringida y presentan color negro en superficie fresca e intemperizan de manera variable pudiendo

ocurrir como unidades de bloques masivos o en afloramientos de aspecto lajeado de colores café claro a oscuro o café grisáceo (puntos de verificación, 66A, 68, Anexo 3). Estas lavas están constituidas por una matriz de grano fino con fenocristales de plagioclasa y cristales alineados de hornblendas, frecuentemente alterados a óxidos de hierro (Stock, 1989).

Las brechas volcánicas y los flujos epiclásticos afloran cerca de los cuellos volcánicos y están interestratificados con los flujos de lava. Asociado a las rocas andesíticas se han localizado remanentes de conos cineríticos. Los depósitos se componen de escoria y cenizas estratificadas que afloran con un espesor menor de 10 m (Martín-Barajas *et al.*, 1995). Estos depósitos presentan una coloración rojiza muy característica.

III.2.2 Secuencia volcanoclástica, Mioceno (Tsv).

Esta secuencia volcanoclástica se presenta en los arroyos tributarios al norte del Arroyo Alfredo y en la zona costera y forman parte de los cantiles de la costa entre Playa El Faro y Punta Bufe (anexo 7). Aflora en la base de la secuencia terciaria y está cubierta o intrusionada por otras unidades sedimentarias y volcánicas respectivamente. Este grupo incluye una secuencia volcanosedimentaria que constituye la base de la sección del Mioceno. Cercano a la costa la Tsv está constituida por flujos de lava, flujos piroclásticos y brechas que constituyen a los depósitos proximales de un centro volcánico del Mioceno medio (figura 16; punto de verificación 30, Anexo 3). En la base de la secuencia aflora una brecha tobácea color rosáceo, rica en cristales de plagioclasa y hornblenda. Esta brecha

corresponde a depósitos proximales o la fuente de un flujo piroclástico que hacia el poniente está interestratificado con depósitos epiclásticos distales. En las facies proximales esta brecha o aglomerado es monolitológica y presenta bloques de varios metros de diámetro con estratos con abundante pómez. Hacia la parte oeste de la zona de estudio en Tsv se observa un dominio de depósitos de lahar que incluye tobas líticas pumicíticas intercaladas de color rosáceo similares a los depósitos proximales del Arroyo Alfredo (Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa).

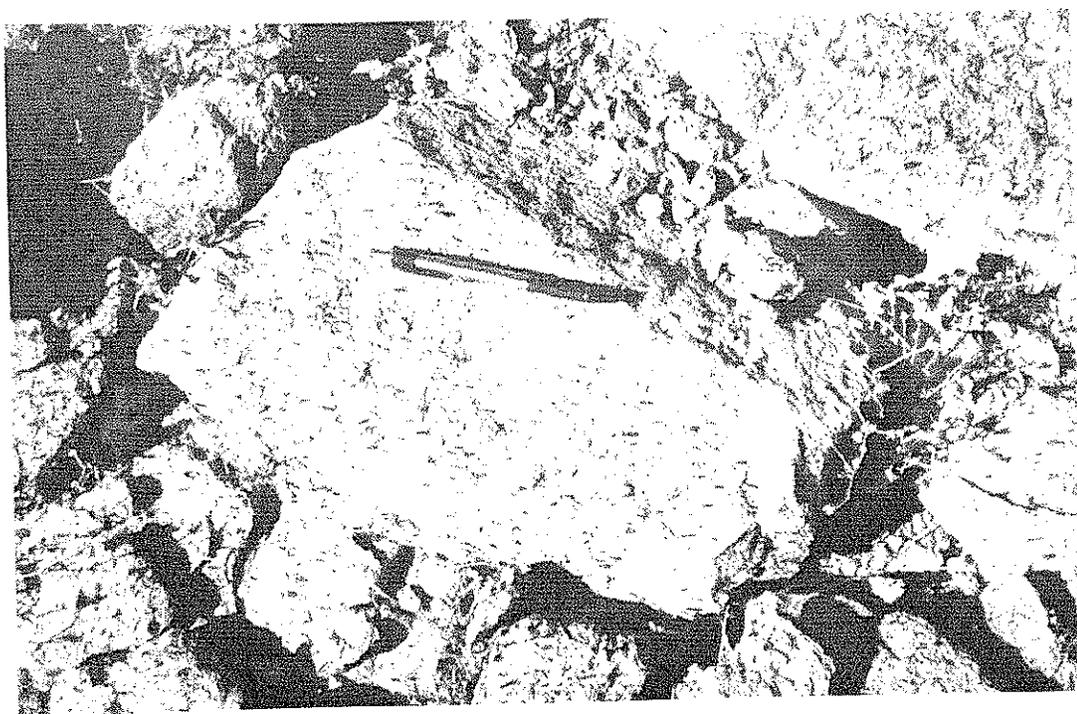


Figura 16. Punto p-30; acercamiento de un afloramiento de andesita perteneciente al grupo Tsv. Se puede observar grandes cristales de hornblenda alineados, en superficie fresca esta roca muestra colores negros y en superficie de intemperismo presenta colores rojizos y amarillos; las superficies intemperizadas se presentan rugosas.

En términos generales, la secuencia Tsv es litológicamente muy heterogénea e incluye depósitos medios a distales de conglomerado de peñascos dominado por clastos de andesita rojiza rica en cristales (plagioclasa \pm hornblenda). Los conglomerados y brechas

incluyen más de cuatro tobas de lapilli lítico pumicítico, ricas en cristales, que contrastan por sus colores rosáceos. Localmente también presentan flujos de basalto porfirítico con fenocristales de hornblenda oxidada, depósitos de cono cinerítico y también incluye flujos de lava y brechas de flujos de andesita, que presenta fenocristales de hornblenda y piroxenos oxidados (Fletcher *et al.*, 1997). Los flujos de lava y las brechas se presentan predominantemente hacia la costa y los conglomerados y tobas hacia el escarpe del golfo. Hacia la parte centro occidental de la Provincia Volcánica de Puertecitos (PVP), los depósitos epiclásticos afloran en los cauces de los arroyos. Otras facies proximales se han localizado en la zona de Cinco Islas y en el Arroyo Los Heme (Martín-Barajas *et al.*, 1995) y las facies distales se han reportado hasta la región noroeste de la PVP (Stock, 1989).

III.2.3 *Andesita Potrero, Mioceno (Tb).*

Esta unidad aflora en la parte sur del área de estudio, al oeste de Bahía de San Luis Gonzaga (anexo 7). La fuente más probable de estos flujos de lava son volcanes escudo (ejemplo Cerro Potrero en el mapa de Gastil ó Cerro la Agualtosa en el mapa de INEGI). Los flujos de lava individuales presentan brechas basales y aglomerados y frecuentemente se presentan las texturas pahochoe (Fletcher *et al.*, 1997). La roca sana es negra y lustrosa y rompe con fractura concooidal y en superficie de intemperismo se observan colores rojizos con tonalidades negras (puntos de verificación 30, 62, Anexo3). Los flujos de lava presentan diferentes grado de vesicularidad pero son pobres en cristales (< 5%) con plagioclasa, piroxeno y olivino. En esta secuencia no se presentan depósitos piroclásticos extensos y en las lavas se observa vesicularidad variable (Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa).

III.2.4 Complejo dacítico, Mioceno (Td).

El complejo aflora al poniente del camino de terracería entre los Arroyos Alfredo y Alfredo Sur, en el acantilado de Papá Fernández, en la Isla San Luis Gonzaga, al sur del arroyo Matomí y en el Arroyo Los Heme (anexo 7). Este grupo está constituido por un conjunto de domos de lava, brechas volcánicas y flujos de lava de composición predominantemente dacítica (Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas, en prensa). Los domos forman generalmente estructuras con elevaciones de hasta 300 m sobre el terreno con paredes de pendiente abrupta. Generalmente intrusionan a las secuencias volcanosedimentaria y a flujos de lava andesítica de Tsv y Tb. Los contactos de la intrusión varían de horizontales a subverticales, están fuertemente brechados y definidos por múltiples planos de cizalla con estrías (Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa).

Los domos dacíticos presentan coloraciones gris claro a gris oscuro en superficie fresca y color rojizo oscuro en superficie de intemperismo (puntos de verificación 20A, 20B, 43, 45 Anexo 3). La base y el núcleo del complejo dacítico está dominado por lavas y brechas de matriz de grano fino con 2 – 5 % de fenocristales de anfíbol de 1 a 1.5 mm (Fletcher *et al.*, 1997).

III.2.5 Domos riolíticos e ignimbritas, Mioceno Medio (Tmr).

Esta unidad agrupa a los domos y lavas de composición riolítica y a las tobas ignimbriticas que afloran en las partes norte y norponiente del área de estudio. También aflora localmente en la zona al oeste de Puertecitos y en el sur de la sierra San Fermín

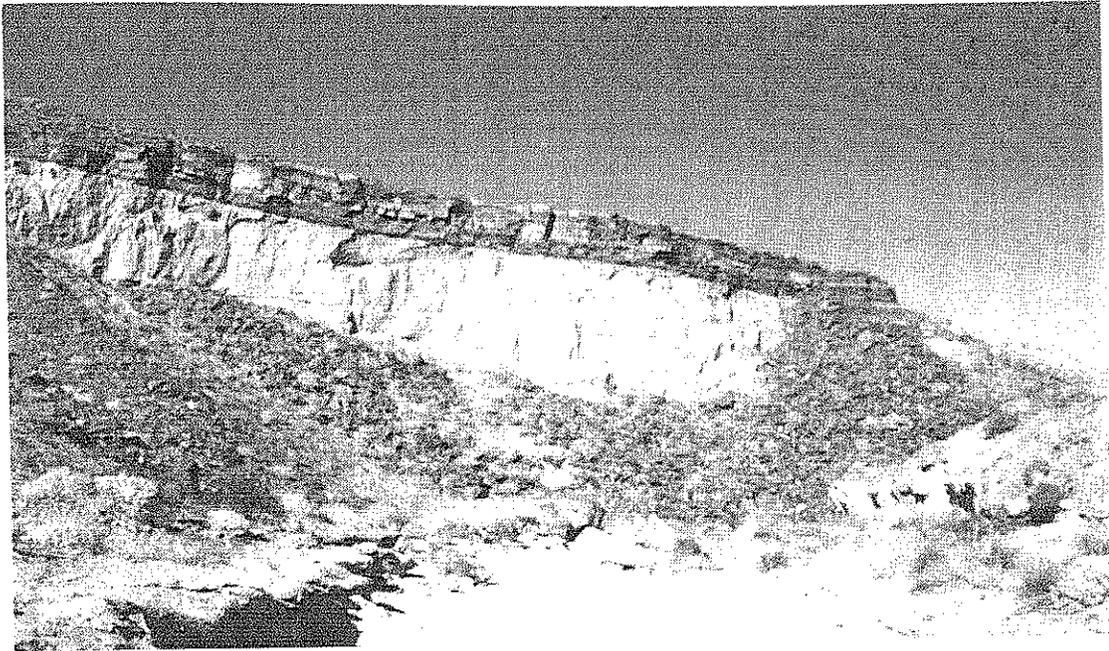
(Stock, 1989; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Nagy, 1997). El número de domos no se ha establecido debido a que las riolitas están en gran parte cubiertas por las ignimbritas de edad Mioceno Tardío-Plioceno. Sin embargo a lo largo del arroyo La Cantera, 6 km al oeste de Puertecitos, un sólo domo riolítico tiene una extensión de 3 km en dirección E-W. La base de la unidad Tmr consiste de una serie de lavas riolíticas vítreas de edad desconocida (Tmrl) pero posiblemente cercana a 6 Ma (Martín-Barajas *et al.*, 1995) la cual subyace a la Toba El Canelo (Tmc) que se acuña contra el flanco sur del domo. Una serie superior de flujos de riolita (Tmru) sobreyacen a la Toba El Canelo. En los bordes norte y sur del domo, las lavas riolíticas de Tmru sobreyacen a la Toba El Canelo, mientras que hacia el WSW, la Toba El Canelo subyace directamente a las ignimbritas del Plioceno (Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995). Los flujos riolíticos de la base de la secuencia (Tmrl) consisten de riolitas vítreas de aspecto masivo con zonas de brechamiento de flujo. Cercanos a la costa los flujos riolíticos muestran zonas de alteración con silicificación en las brechas. Otras zonas presentan flujos y tefras vítreas con obsidiana perlitizada y zonas de alteración de zeolitas y arcillas (Aparicio-Ceja, 1999). Las zonas alteradas presentan colores amarillo claro que contrasta con los tonos oscuros a gris claro de las riolitas (Stock *et al.*, 1991; Martín-Barajas y Stock, 1993; Aparicio-Ceja, 1999).

La secuencia de las Tobas El Canelo está formada por seis unidades que, en conjunto, tienen un espesor cercano a los 300 m y su fuente se ubica en el norte de la PVP. La unidad basal es una toba de cenizas no soldadas, color beige a gris rosado, ricas en cristales, principalmente plagioclasa, cuarzo, feldespatos potásico y minerales opacos, con una matriz vitroclástica y con fragmentos líticos. La unidad superior de Tmc está constituida por depósitos de ceniza de más de 75 m de espesor, con una matriz vitroclástica

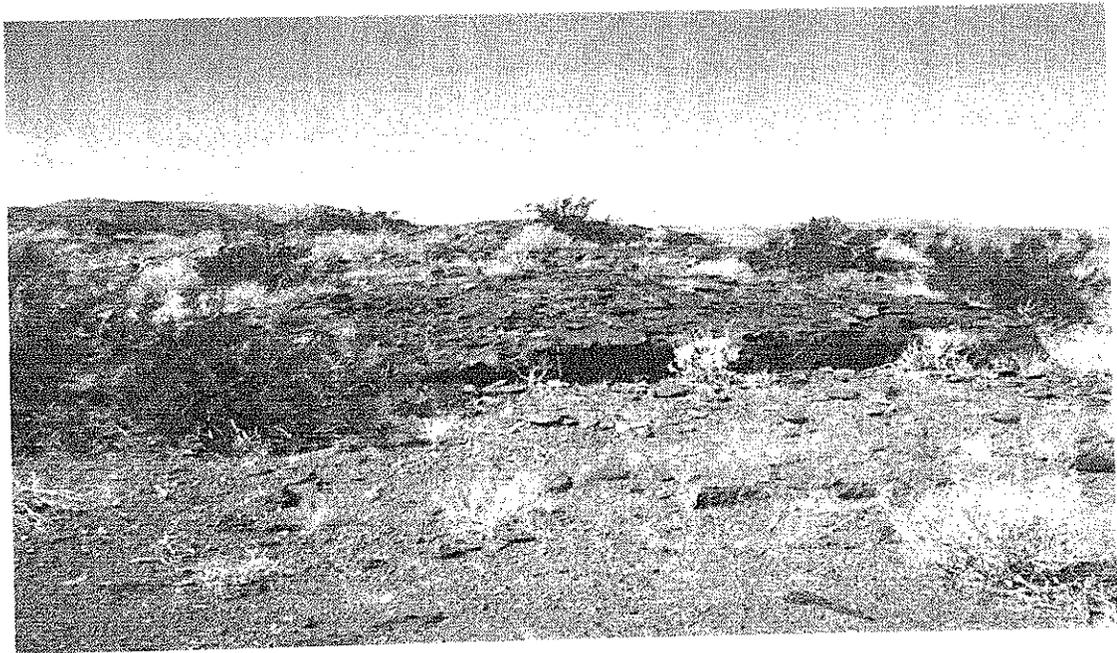
densamente soldada de color morado oscuro con fenocristales de clinopiroxeno (augita?), ortopiroxeno (hiperstena), plagioclasas y opacos. Gradúa hacia la cima a moderadamente soldada (Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Stock *et al.*, 1991).

III.2.6 *Tobas e ignimbritas, Plioceno (Tpr).*

Esta unidad es una de las más extensas y aflora en la franja centro oriental de la zona de estudio (anexo 7) formando las mesas y bloques basculados que se observan en la costa hacia el sur de Puertecitos (Martín-Barajas *et al.*, 1995). Las unidades de flujo de esta secuencia muestran cambios en el grado de soldamiento, así como también en la cantidad de fenocristales (generalmente < 10 %) y el grado de intemperismo (figuras 17a y 17b; para mayor detalle ver Anexo 3). En la parte cercana a la costa Tpr tiene un espesor superior a los 200 m y contiene más de 20 unidades de flujo (flujos de ceniza, flujos piroclásticos de lapilli pumicítico y lapilli lítico y piroclastos de caída libre). Hacia la parte norte y oeste de la zona de estudio el número de unidades disminuye 5 ó 4 unidades. La base de la secuencia está constituida por flujos piroclásticos de mayor espesor comparados con las unidades de la parte media y superior. La unidad basal está constituida por un depósito piroclástico no soldado, de lapilli pumicítico (figura 17a) que contiene ~ 50 a 60 % de pómez y vidrio volcánico (cenizas), 20 % de líticos y 20 % de fenocristales. Los fragmentos líticos incluyen riolita, andesita y roca granítica.



a



b

Figura 17. a) punto P-91; Toba soldada (Tpr) descansando sobre la unidad basal de Tpr que es una toba pumicítica sin soldar. Son notables los cambios no solo en el soldamiento sino también en la coloración debido al soldamiento. b) punto P-72; se presenta la toba lítica densamente soldada de color marrón, pero intemperizada a lajas y con superficies brechadas.

Esta unidad presenta coloraciones que varían del gris claro al amarillo claro. La variedad y proporción de los fragmentos y cristales es similar en toda la zona de estudio, aunque, en el área cercana al Volcán Prieto se han observado líticos de mayor tamaño (Martín-Barajas y Stock, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995). La cima de Tpr incluye hacia la costa depósitos de fragmentos aglutinados de lava y depósitos de ceniza densamente soldada con colores rojizo oscuro. En esta unidad la cantidad de fenocristales y líticos es típicamente menor al 10%. Los fenocristales de Tpr en general consisten en plagioclasa>piroxenos>opacos y se presentan abundantes fragmentos de pómez y fiammes en los depósitos no soldados y con mayor soldamiento, respectivamente. En la parte sur de la sierra San Fermín (extremo norte del área de estudio) aflora la parte distal de Tpr con espesores de 3 a 5 m, interstratificada con depósitos marinos someros (Martín-Barajas y Stock, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1997) y hacia el sur de la zona de estudio en la región de Cinco Islas en donde las tobas se acuñan y desaparecen.

III.2.7 Andesita Volcán Prieto, Plioceno (Tpa).

Esta unidad se localiza aproximadamente a 12 km al sur de Puertecitos (anexo 7). El Volcán Prieto es un edificio volcánico monogenético de 280 m de altura. Está constituido por depósitos de escoria y flujos de lava en bloques (Stock *et al.*, 1991; Martín-Barajas *et al.*, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995). Tpa presenta un aspecto lajeado, observándose un color gris oscuro en superficie fresca y color rojizo en superficie de intemperismo (figura 18; puntos de verificación 14, 79A, 80A, Anexo 3); tiene textura vesicular en la parte superior de los derrames y variaciones texturales de afanítica a

ligeramente porfirítica. Los flujos de lava faneríticos son de grano medio a grueso con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y olivino, también se presentan algunas vesículas rellenas de zeolitas y se observa palagonitización incipiente.

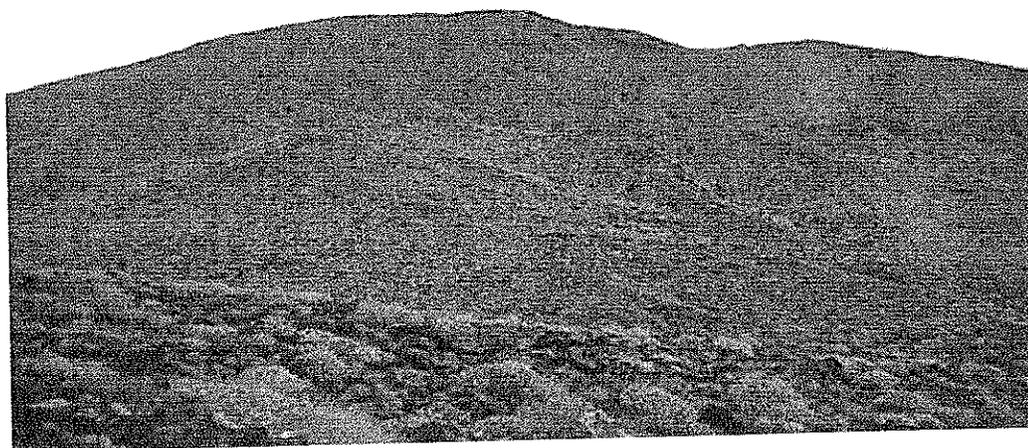


Figura 18. Punto P-79; vista hacia el este del Volcán Prieto el cual está constituido por andesita basáltica que en superficie fresca presenta colores negro y en superficie de intemperismo se muestran colores negros y rojizos.

Las lavas del Volcán Prieto sobreyacen a Tpr aunque en el flanco sur algunos flujos de lava subyacen a una unidad de cenizas soldadas que corresponde a la cima de la Tpr (Martín-Barajas *et al.*, 1995).

III.2.8 Sedimentos marinos y no marinos, Plio-Cuaternario (Tps) y (PQcs).

Este grupo incluye a los sedimentos marinos del Terciario (Tms) y a los sedimentos continentales del Plio-Pleistoceno (PQcs). Tps aflora en la parte norte del área de estudio en Valle Curbina, Arroyo La Cantera y Arroyo Matomí. También afloran al noroeste de Bahía de San Luis Gonzaga gradando lateralmente a depósitos aluviales continentales (anexo 7) (Martín-Barajas et al, 1993; 1997; Fletcher *et al.*, 1997). La facies más distintiva y de mayor distribución consiste de una lodolita de color amarillo ocre, compuesta casi en su totalidad por material limo-arcilloso. Se presenta generalmente masiva, con algo de estratificación laminar y textura físil cuando está intemperizada. Los minerales evaporíticos (yeso, halita) son abundantes y se presentan en la matriz y rellenando fracturas (figura 19; puntos de verificación 93, 93A, 94, 99, Anexo 3). También Tps presenta facies de línea de costa representada por conglomerados marinos compuestos por guijarros y cantos de rocas volcánicas subredondeados en una matriz arenosa de grano grueso constituida de fragmentos líticos, vidrio volcánico y cristales. Son comunes los fragmentos de conchas y la calcita se presenta como cementante (puntos de verificación 5, 92, Anexo 3).

Los depósitos PQcs se localizan a lo largo de las costas y en colinas formadas por rocas más antiguas. Están constituidos por conglomerados y brechas de fuente local que representan ambientes de abanicos aluviales y depósitos de talud. Estos depósitos están constituidos predominantemente por fragmentos de rocas volcánicas y se distinguen del aluvión reciente (Qal) ya que éste último incluye mayor abundancia de fragmentos de rocas graníticas. También se presentan estratos de arenisca y arenisca conglomerática de

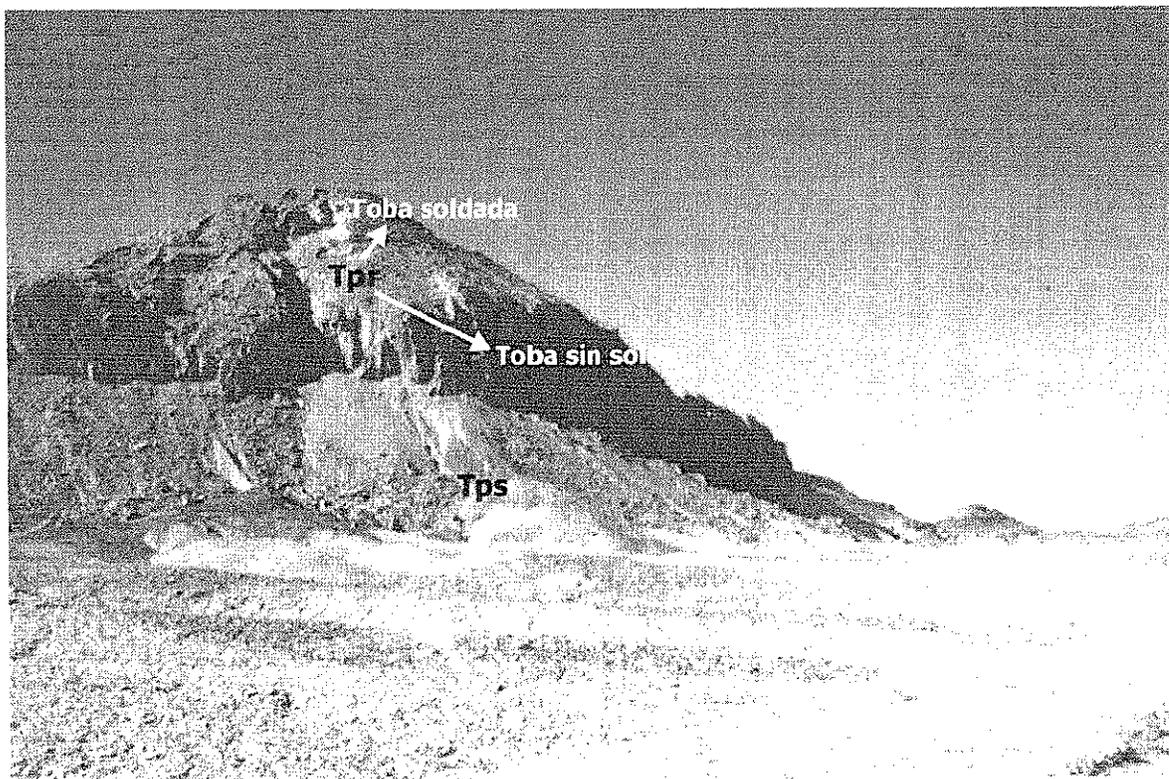


Figura 19. Punto P-93; afloramiento de sedimentos marinos (Tps) constituidos por lodolitas color amarillo con presencia de yeso. Esta secuencia está subyaciendo a las tobas del Plioceno (Tpr).

color gris oscuro con espesores de 2 a 3 m (puntos de verificación 32, 33, 33A, 37, 43A, 44, 45, 46, 57, Anexo 3). Estas areniscas contienen capas de lapilli pumicítico, capas de lapilli y cenizas líticas (Martín-Barajas *et al.*, 1993; 1997; Fletcher *et al.*, 1997).

III.3 DEPOSITOS DEL CUATERNARIO.

Para la clasificación de los depósitos del Cuaternario, primero se hizo una identificación espectral de las distintas zonas de aluviones. Estas primeras observaciones fueron complementadas con trabajo de campo que consistió en observaciones generales del

tipo de las arenas y clastos y la cantidad de fragmentos líticos contenidos en los diferentes aluviones. Para el caso de depósitos como el travertino, tefras recientes, y los aluviones con presencia de barniz del desierto, las observaciones de la imagen y de campo se complementaron con literatura anterior que incluye las descripciones de estos tipos de depósitos (Potter y Rossman, 1977; Rivard *et al.*, 1991; Dorn, 1991; Fletcher *et al.*, 1997; Martín-Barajas *et al.*, en prensa). Es necesario aclarar que se utilizaron las descripciones de campo y que no se hizo ningún trabajo de petrografía ni de granulometría de laboratorio para caracterizar los diferentes tipos de aluviones. El principal criterio de clasificación es la litología, aunque aluviones con litología similar puedan presentar respuestas espectrales distintas debido a la edad relativa y al intemperismo de los clastos.

III.3.1 Aluvión 1 (Qa1).

Se localiza en las partes norte y sureste de la zona de estudio constituyendo el abanico aluvial del Arroyo Matomí y a las planicies costeras que se ubican al norte y suroeste de Bahía de San Luis Gonzaga (anexo 7). Lo que caracteriza a Qa1 es que el aporte de roca volcánica (toba, andesita y dacita) es similar o superior a la proporción de roca granítica (figura 20; puntos de verificación 13, 28B, 29, 35, 55, 56, 58A, 98, Anexo 3). Esta unidad consiste de conglomerados y arenas de color gris claro a crema. La fracción arenosa está constituida por fragmentos de plagioclasa > cuarzo > biotita > hornblenda. En la fracción de gravas se observan fragmentos líticos que varían de menos de 1 cm hasta bloques de ~ 80 cm de rocas volcánicas y rocas graníticas.

III.3.2 Aluvión 2 (Qal2).

Este grupo está ampliamente distribuido constituyendo la mayoría de los depósitos aluviales en drenajes modernos, así como una parte de las planicies costeras ubicadas en las

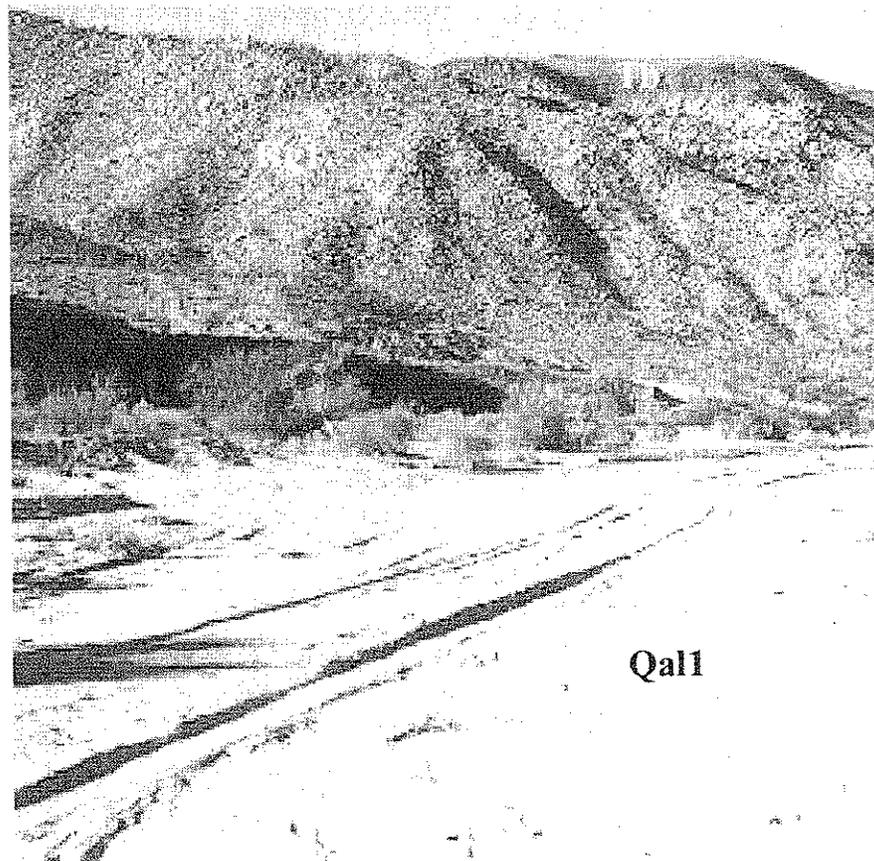


Figura 20. Punto P-28A; aspecto del aluvión 1 (Qal1) que se origina a partir de rocas volcánicas y rocas graníticas, presentando en campo colores crema a gris claro.

partes norte y centro oriental de la zona de estudio (anexo 7). Qal2 es diferenciable porque está originado a partir del aporte dominante de roca volcánica (toba, riolita, dacita), y localmente se pueden observar aportes menores (< 10%) de fragmentos de esquisto y mármol (puntos de verificación 30A, 30B, 65, 66, 72A, 73A, 82, 86, 95, 97, Anexo 3).

El Qal2 está constituido por depósitos arenosos de color gris a gris claro que contienen fragmentos líticos volcánicos > plagioclasa > cuarzo > biotita y que varían en tamaño de ~ 1 cm hasta bloques de ~ 1 m.



Figura 21. Punto P-3; se muestra una clara diferencia entre un aluvión removido recientemente (lado derecho de la foto) y un aluvión que no ha sido removido por un intervalo largo de tiempo (lado izquierdo de la foto). Este segundo aluvión formó una capa externa conocida como barniz del desierto lo que le da una coloración más oscura con respecto al aluvión mostrado en el lado derecho de la fotografía.

Dentro de la unidad Qal2 se presentan terrazas aluviales sobre el nivel base de los cauces de arroyos modernos. Lo que distingue al material que conforma a las terrazas aluviales con respecto a los depósitos de los cauces modernos es que los clastos que constituyen a las primeras están cubiertos por una película muy delgada (~ 1mm) cuya

coloración es un tono café rojizo con algunos manchones negros (figura 21: puntos de verificación 3, 96, Anexo 3). Esta cubierta se conoce con el nombre de barniz del desierto y se encuentra frecuentemente en la roca de las zonas desérticas (Potter y Rossman, 1977; Rivard *et al.*, 1991; Dorn, 1991). El barniz del desierto normalmente está constituido por ~ 60 % de arcillas, de 20 a 30 % de óxidos de manganeso y fierro y trazas de más de 30 compuestos tales como óxidos de cobre y zinc (Potter y Rossman, 1977; Rivard *et al.*, 1991; Dorn, 1991). El desarrollo del barniz del desierto está en función de la exposición al sol y la intemperie de los clastos que no han sido removidos durante algún tiempo por estar en una parte más elevada con respecto al cauce del arroyo (zona de mayor movimiento). Es una forma de intemperismo químico de los clastos en ambientes desérticos.

III.3.3 Aluvión 3 (Qal3).

Se concentra hacia la parte centro oriental de la zona de estudio constituyendo a uno de los abanicos aluviales formados por el Arroyo Zamora (anexo 7). Lo que caracteriza a Qal3 es el aporte predominante de roca metamórfica (esquisto y mármol) y en menor proporción se presentan fragmentos de andesita (< 5%) (puntos de verificación 16, 69, 70, 71, 72A, Anexo 3). El Qal3 está constituido por depósitos de conglomerados grises que consisten de fragmentos de fragmentos líticos metamórficos > fragmentos líticos volcánicos > biotita > cuarzo > plagioclasa.

III.3.4 Aluvión 4 (Qal4).

Se localiza en la parte sureste de la zona de estudio constituyendo zonas de playa (anexo 7). La fracción lítica de Qal4 presenta tamaños de ~1cm de diámetro y está constituida por roca granítica > roca volcánica. La fracción arenosa de Qal4 es de color crema a gris claro (puntos de verificación 41, 52, 87, Anexo 3) y consiste principalmente de cuarzo > fragmentos de conchas > plagioclasas > biotita.

III.3.5 Tefras (Qvt).

Estos depósitos se localizan al NW de Bahía de San Luis Gonzaga (anexo 7). Son depósitos de ceniza lítica y pumicítica de color gris oscuro a negro y que cubren al aluvión moderno en las partes bajas o protegidas de la erosión (puntos de verificación 38, 39, 40, 42, 50, 51, 54, Anexo 3). Los depósitos de ceniza tienen un espesor de 0.5 a 1 m y pueden llegar a tener 2 m en zonas en donde ha ocurrido retrabajamiento y mayor concentración de cenizas volcánicas. La fuente de estas cenizas es la Isla San Luis, un centro eruptivo Holocénico ubicado 10 km al NNE de Punta Bufeo. Las tefras son de composición dacítica (Fletcher et al, 1997; Faneros y Hausback, 1998).

III.3.6 Travertino (Qtr).

Los depósitos de travertino se localizan hacia la parte central y sur de la zona de estudio (anexo 7). El cuerpo más grande aflora a una elevación de 120 msnm, al pie de una fuerte pendiente producida por un escarpe de falla de un afloramiento de Tsv de ~180 m de

espesor y sobre un afloramiento de Pzm1. Los depósitos de travertino en la zona sur (San Luis Gonzaga) comprenden 5 cuerpos alineados a lo largo de 1.4 km. En planta, el conjunto de estos depósitos representan una superficie máxima de 0.2 km². Muestran superficies que siguen el relieve formado por la acumulación progresiva del carbonato de calcio y por la topografía del terreno (Fletcher *et al.*, 1997). Internamente presentan bandeamiento definido por cambio de color en las capas de carbonato. El color predominante es blanco o crema, pero algunas partes contienen impurezas orgánicas y pueden presentar coloraciones rosáceas, café rojizo y amarillo ocre (punto de verificación 63, Anexo 3).

Tabla VI. Características mineralógicas de los diferentes tipos de roca descritos en el texto. Los datos fueron recopilados de trabajos anteriores y de observaciones en muestras de mano durante las etapas de verificación de campo.

Unidad	Tipo de roca	ol	cpx	opx	pl	kl	lib	qz	op	bt	mc	c	vt	tr	bl	cl	um	se	he	pi	cb	mn	cal	esm	il	coq
Pzm1	esquistos (1)					x	xx	x	xx		xx															
Pzm1	argilita (1)										t		x								x	x				
Pzm1	filita (1)				xx			x																		
Pzm1	pedernal (1)							xx	x																	
Km2	cuarcita (2)							xx	x																	
Km2	marmol (2)							x			x	xx														
Km3	cuarcita (2)					x		xx																		
Kg	tonalita (3)				xx	x	xx	x		xx																
Kg	granodiorita (3)					x	x	x																		
Tsv	flujo de andesita (4)		x		xx				x																	
Tsv	brecha dacítica (4)		x		xx	x	xx	t					x													
Tsv	brecha de toba dacítica (4)		x	x	xx		x		xx																	
Tsv	toba dacítica (4)		x	x	xx	x	xx	t	x																	
Tb	flujo de andesita (4)		x	x	xx				x																	
Tb	flujo de dacita (4)		x	x	xx				t																	
Td	flujo de dacita (4)		t	xx	x	xx		x	x																	
Td	domo dacítico (4)		xx	x	xx		x		x																	
Tma	andesita (5)		x	x	xx				xx																	
Tnr	toba EJ Canelo sin soldar (5)					x			x																	
Tnr	toba EJ Canelo consolidada (5)		x	x	xx																					
Tnr	rolita miembro inferior (5)		x		xx				x																	
Tnr	rolita miembro superior (5)		x		xx	x			x																	
Tpr	toba sin soldar (5)		t		x		t			xx																
Tpr	toba soldada (5)		t	x	x	xx			x																	
Tpa	andesita (5)		x	x	xx				x																	
Tps	lodolita (6)					x																				
Tps	conglomerado (6)				x	xx																				
PQes	conglomerado (6)				xx	xx																				
Qal1	aluvión (7)				xx	x				x																
Qal2	aluvión (7)				xx	x				x																
Qal2	aluvión con bariz del desierto (7)				xx	x				x																
Qal3	aluvión (7)				x				x	xx																
Qal4	arena cuarzosa (7)				x				xx																	
Qvi	tefra (4)				x	x			x	x																
Qtr	travertino (4)								x					xx	x											

La estimación cualitativa de los minerales es la siguiente: (xx) abundante, (x) presente y (t) traza. La nomenclatura es ol=olivino, epx=clinopiroxeno, opx=ortopiroxeno, pl=plagioclasa, kt=feldespato potásico, lib=hornblenda, qz=cuarzo, bi=biotita, op=opacos, mc=mica, e=calcita, vd=vidrio, t=travertino, hl=halita, cl=clorita, fm=tremolita, se=sericita, he=hematita, pi=pirita, cb=material carbonáceo, mn=óxido de manganeso, cal=calcopita, esm=esneficita, il=ilita y coq=cocquina (conchas). Fuentes: (1) Webster y Delatre, 1993; (2) Phillips, 1993; (3) Gastil et al., 1975; (4) Martín-Barajas et al., en prensa (5) Martín-Barajas et al., 1995; (6) Martín-Barajas et al., 1997; (7) Descripción obtenida en campo.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSION.

IV.1 Combinación de bandas (falso color).

Con el objeto de facilitar la comprensión de la lectura de este capítulo se recomienda al lector tomar alguno de los dos mapas incluidos en el anexo 7 en donde además se incluyen los nombres comunes de las localidades utilizadas en las descripciones de las imágenes. Como se mencionó en el capítulo II, para la extracción de rasgos se utilizaron 5 técnicas de la percepción remota y de cada técnica se obtuvieron informaciones diversas como se describirá a continuación.

En la técnica de combinación de bandas se utilizaron dos procedimientos uno estadístico y el otro empírico. En el procedimiento empírico se utilizaron las siguientes combinaciones: a) TM321 en rojo, verde y azul respectivamente; b) TM742 en rojo, verde y azul y c) TM574 en rojo, verde y azul. Las imágenes resultantes mediante este procedimiento son mostradas en las figuras 22, 23, 24 y 25. Un análisis visual basado sobre los parámetros espectrales y el contraste de luminosidad de los diferentes colores compuestos permitieron determinar cuales son las combinaciones más informativas.

El mejor contraste entre las diferentes unidades litológicas es observado con la combinación TM742 en rojo, verde y azul (figura 22). El rasgo más notorio en esta combinación se presenta hacia el centro de la imagen y corresponde a la unidad de roca metamórfica (Pzm1) que es descrita con detalle en el capítulo III. Este rasgo presenta un color verde oscuro a casi negro y contrasta fuertemente con las unidades de roca metamórfica Km2 y Km3 que aparecen en color naranja y ocre respectivamente y que forman una franja que recorre a la unidad de Pzm1 con una dirección NW - SE. En la

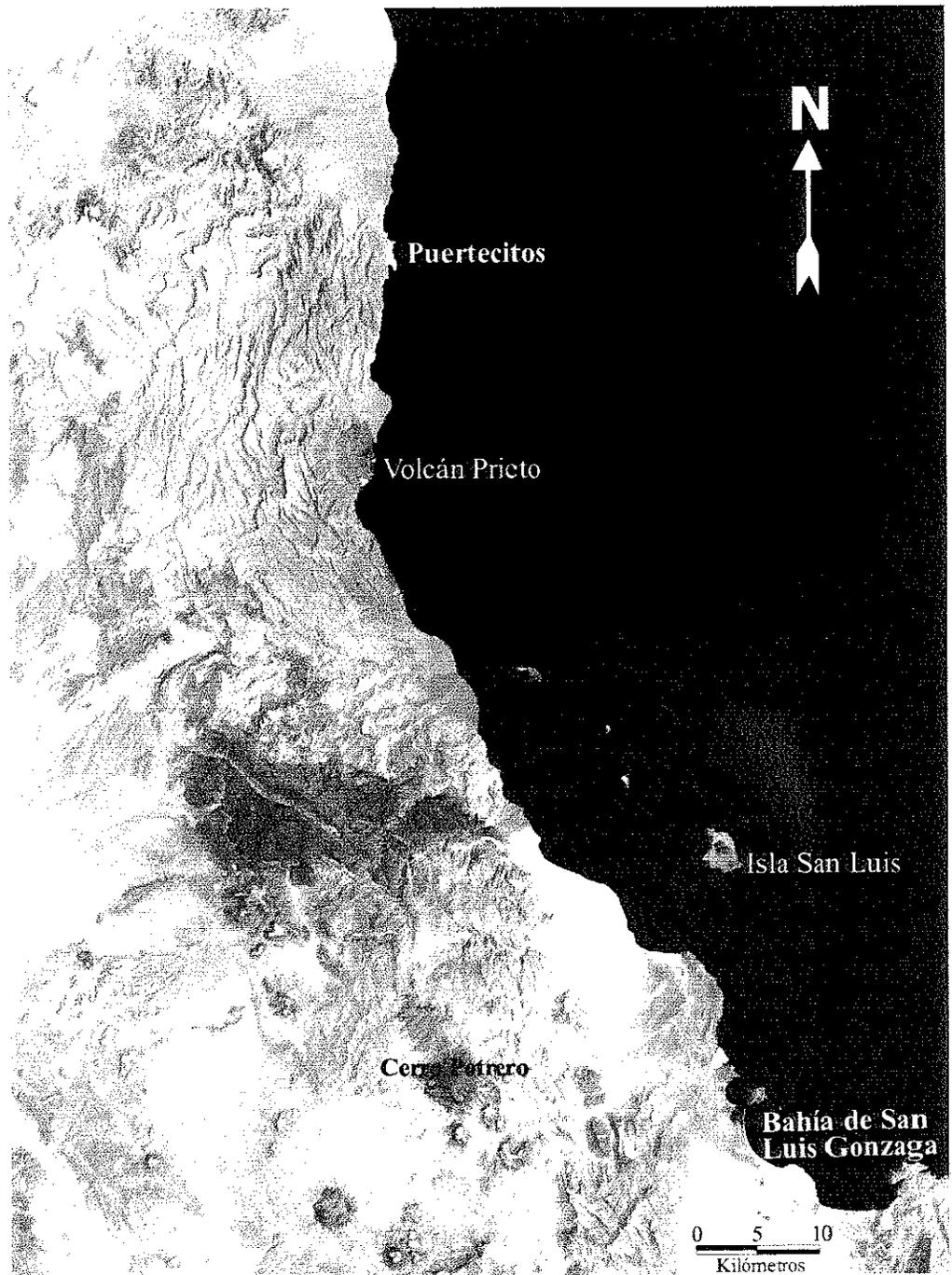


Figura 22. Combinación Tm742 en rojo, verde y azul. Los principales contrastes se observan en las rocas metamórficas (verde oscuro) del centro de la imágen y el cinturón de metasedimentos que sobreyace a esta unidad. También se puede apreciar contrastes entre los distintos tipos de aluvión; en color blanco (parte inferior) es Qa14, al centro en color gris oscuro se presenta Qa13, en la parte superior en color gris claro se observa Qa12 y en color blanco violáceo Qa11.

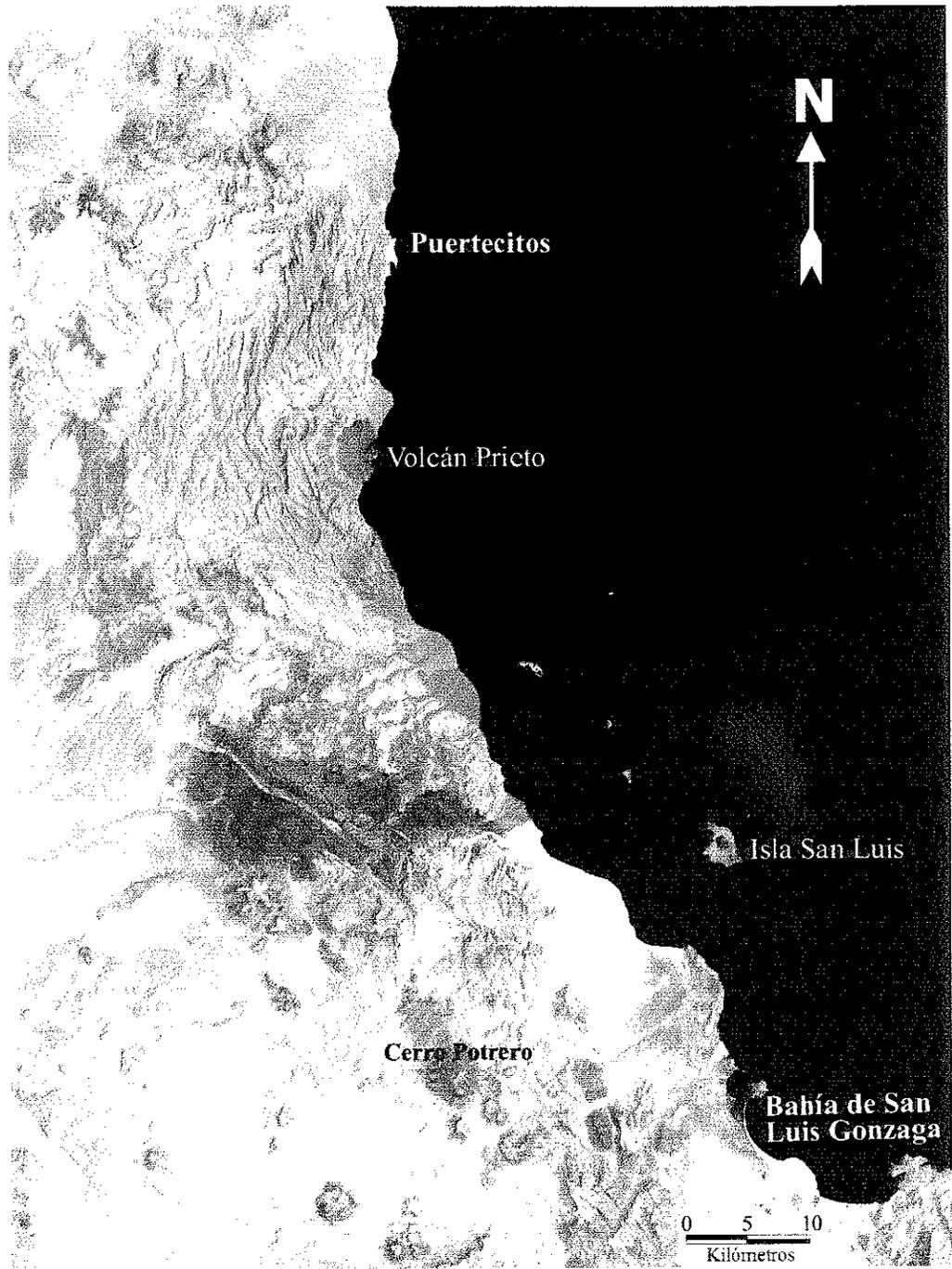


Figura 23. Combinación Tm574 en rojo, verde y azul. Esta imagen muestra contrastes similares a los de la figura 22. Tanto en la figura 22 como en esta imagen se observa una fuerte influencia de la banda 4 que en esta combinación controla el canal azul.

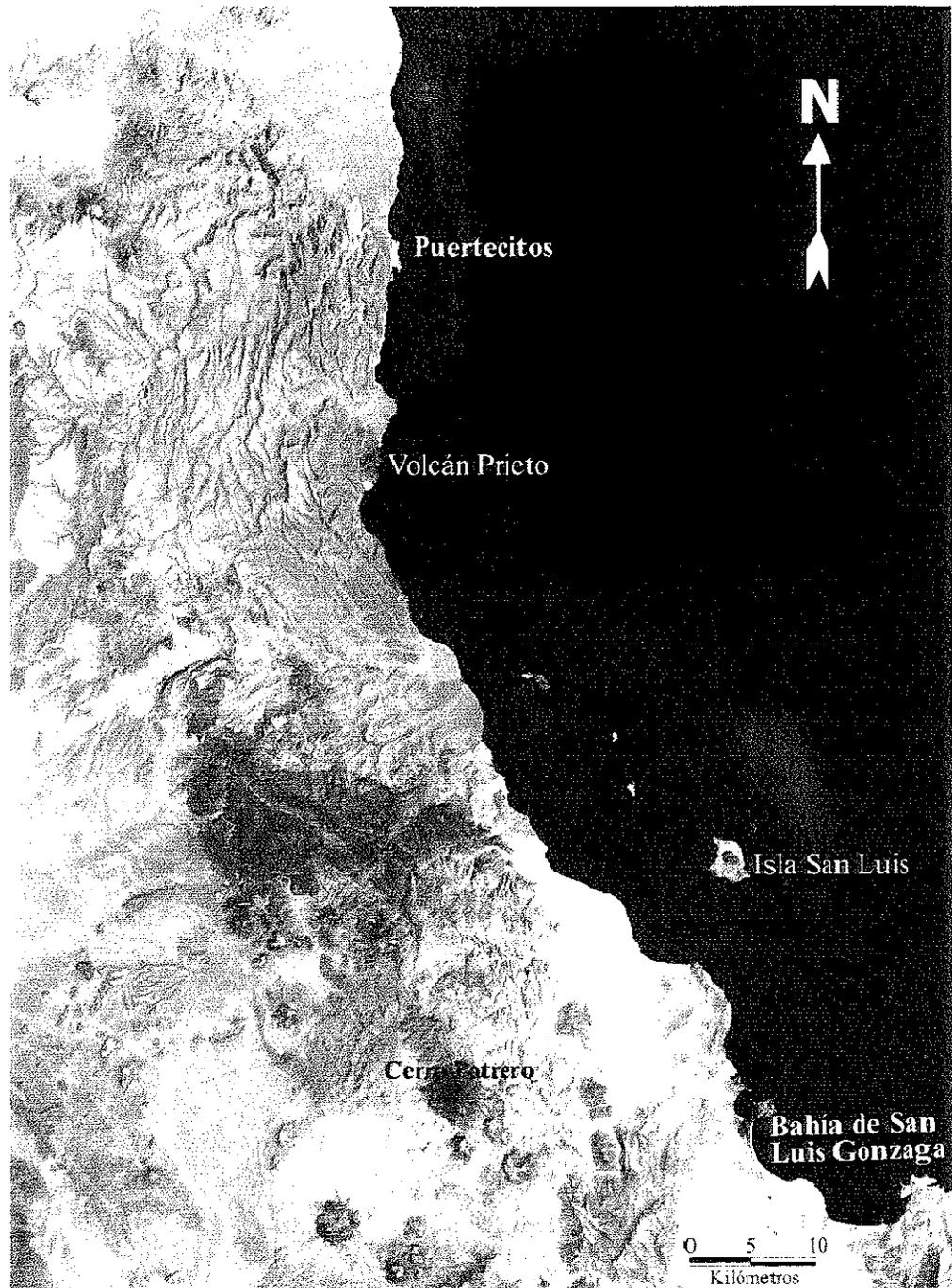


Figura 24. Combinación Tm321 en rojo, verde y azul. Esta imagen despliega colores sintéticos muy cercanos a los tonos reales (naturales). Estas tonalidades son semejantes a los colores de las fotografías aéreas de color.

parte inferior izquierda de la imagen se observan los afloramientos de roca granítica que en este trabajo han sido nombrados como Kg1 y Kg2 (para mayor detalle ver capítulo III). En esta combinación Kg1 se presentan en color rosa y es proporcionalmente más abundante que Kg2 que se observa en color beige. Otro contraste se observa entre las unidades de toba que se presentan en casi toda la mitad superior de la imagen. Se puede notar que la unidad de tobas El Canelo (Tmc) se presenta en color naranja rosáceo y texturalmente suave, mientras que la unidad de ignimbrita (Tpr) presenta diferentes contrastes tanto en color como en textura, mostrando zonas de color verde con texturas suaves en la parte central de la imagen y zonas de colores morado y amarillo con texturas rugosas que se presentan más cercanas a la línea de costa. El rasgo que define al volcán Prieto sobre la línea de costa en la parte central de la imagen se presenta de color verde oscuro que contrasta fuertemente con la unidad Tpr que lo rodea. La andesita del Cerro Potrero (Tb) se aprecia en la parte inferior de la imagen en color verde olivo con algunas tonalidades rojizas y se contrastan con las unidades de dacita (Td) que se presentan con colores rojo y azul y con las unidades de roca granítica mencionadas arriba. Con esta combinación también se observan diferencias entre los aluviones (ver capítulo III para descripciones). El aluvión denominado Qal1 en la imagen presenta un color liláceo. Qal2 muestra colores gris a gris verdoso, Qal3 exhibe un color gris oscuro. Qal4 revela colores de rosa a blanco y el aluvión con barniz del desierto despliega tonos pardos. Estos contrastes se observan en la zona de costa y en los arroyos a lo largo de la parte central de la imagen.

La combinación TM574 en rojo, verde y azul (figura 23) está limitada espectralmente pues sólo se trabaja con el rango infrarrojo (cercano y medio), sin embargo, se pueden apreciar contrastes muy similares a los presentados con la combinación mencionada anteriormente; solo que en esta combinación predominan los colores azules mientras que en la combinación anterior predominan los colores verdes.

La combinación TM321 en rojo, verde y azul respectivamente es una combinación limitada espectralmente puesto que sólo se está trabajando con el rango visible (figura 24). A partir de esta combinación se obtuvo una imagen con despliegue de colores más cercanos a la realidad (similares a fotografías aéreas de color). En esta imagen se observa con claridad los arroyos y algunos contrastes entre aluviones, pero existen pocas diferencias de contraste entre los diversos tipos de roca por lo que esta combinación provee poca información en comparación con las combinaciones mencionadas en los párrafos anteriores.

Los resultados arrojados en el procedimiento estadístico es mostrado en la tabla VII, en donde se presentan las diferentes combinaciones posibles entre las 6 bandas de la imagen TM seguidas por su factor de índice óptimo (FIO) y el rango que define el grado de discriminación (capacidad de diferenciación) que tienen las diferentes combinaciones.

Como se aprecia en la tabla VII hay 20 posibilidades de combinar las 6 bandas TM y por medio de la técnica estadística la mejor combinación de bandas es la TM751; aunque las combinaciones TM357 y TM135 también deberían presentar buena información. Siguiendo este criterio se realizaron las 3 mejores combinaciones (tabla VII), observándose que la combinación 1 (TM751) resalta bien las diferencias litológicas si se relacionan las bandas de la siguiente manera, TM751 en rojo, verde y azul respectivamente (figura 25).

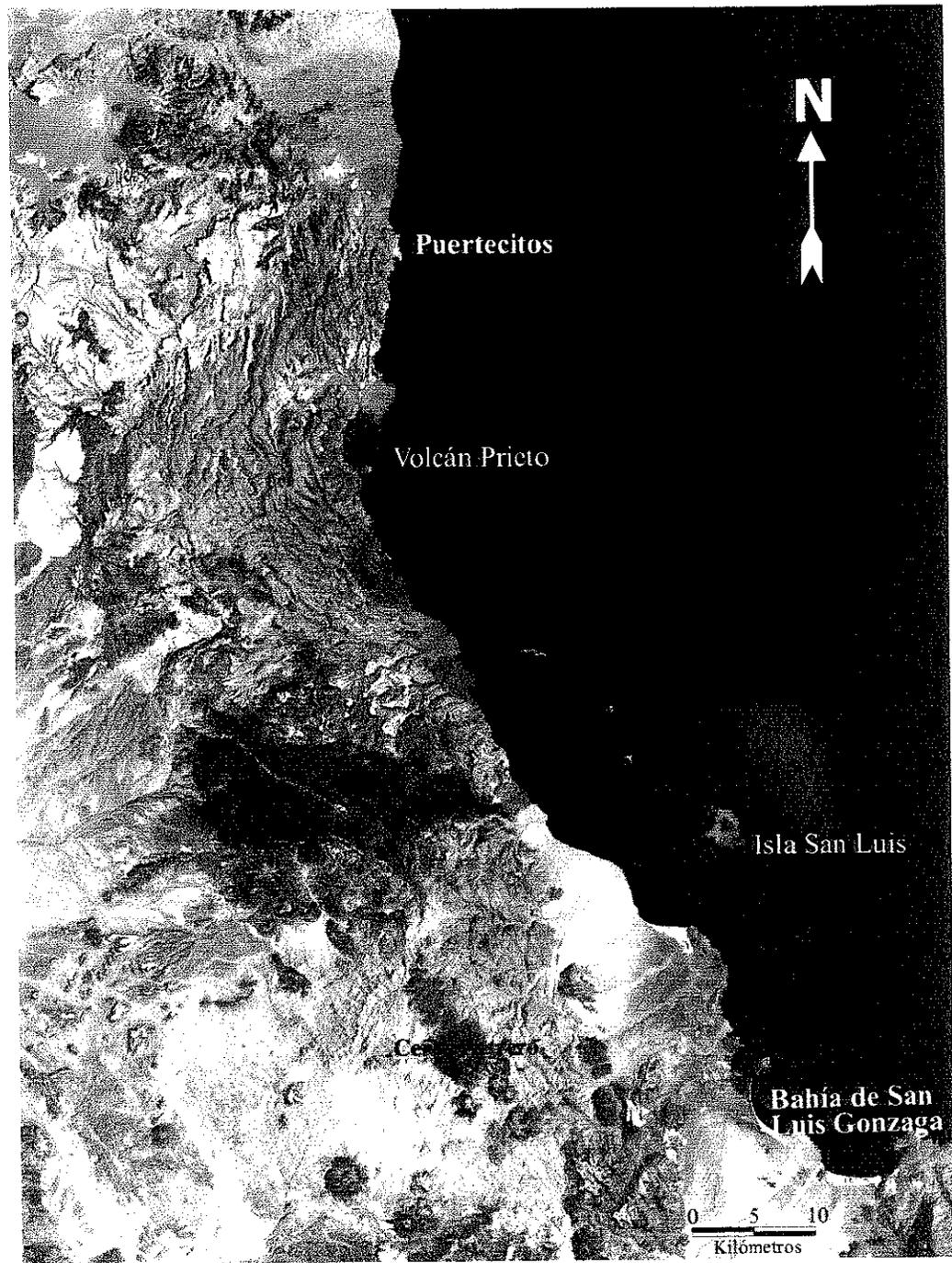


Figura 25. Combinación Tm751 en rojo, verde y azul. Esta combinación fue obtenida por el método estadístico. En esta imagen se observan algunos contrastes como el que se aprecia entre las distintas unidades de tobas (parte superior de la imagen) en colores amarillo y color violeta. En las unidades de metasedimentos no se aprecian diferencias tan claras como en la combinación TM742 (figura 22).

Tabla VII. Todas las posibles combinaciones entre las 6 bandas TM. En la segunda columna se presenta el Factor de índice óptimo (FIO) seguido por la columna que muestra cuál es la mejor combinación de bandas para realizar la fotointerpretación. Las tres mejores combinaciones están remarcadas con letras más oscuras.

Combinación de bandas	Factor de Índice Óptimo (FIO)	Rango
1,2,3	37.18576	18
1,2,4	35.18998	20
1,2,5	46.92981	9
1,2,7	41.22415	15
1,3,4	42.43792	14
1,3,5	54.33868	3
1,3,7	48.58144	8
1,4,5	52.06292	5
1,4,7	46.33595	11
1,5,7	57.91973	1
2,3,4	35.33345	19
2,3,5	46.57555	10
2,3,7	41.04837	16
2,4,5	44.21478	13
2,4,7	38.72612	17
2,5,7	49.65367	7
3,4,5	50.32421	6
3,4,7	44.90943	12
3,5,7	55.64068	2
4,5,7	52.97506	4

Con esta combinación (TM751) se aprecian las diferentes litologías de manera muy similar que en las primeras dos combinaciones mencionadas al inicio de este apartado. En esta combinación destacan las unidades Tmc (amarillo), Pzm1 (azul marino casi negro), Tpr (café con tintes rosáceos), Km2 (verde claro), Km3 (café), Kg1 (café verdoso), Kg2 (gris claro) y el volcán Prieto que exhibe una coloración muy similar al de la unidad Pzm1. Las siguientes dos combinaciones importantes (TM357 y TM135) se relacionaron de diferentes maneras con los tres colores primarios (rojo, azul y verde), sin embargo con ninguna

relación presentaron buenas discriminaciones litológicas por lo que estas combinaciones se descartaron para este estudio.

IV.2. Clasificación no supervisada.

Como primer paso se realizó una clasificación no supervisada con 40 clases desplegando la imagen que se muestra en la figura 26a. En esta imagen se puede apreciar que la unidad Pzml en la parte central izquierda de la imagen está bien agrupada (en color verde seco), sin embargo, su respuesta espectral se confunde con la respuesta de la roca andesítica del volcán Prieto (parte superior central) y de cerro Potrero (parte inferior). Además las diferencias entre la toba y riolita de las unidades Tmc, Tmru, Tmrl y Tpr no son muy claras (casi toda la mitad superior); Tmc logra distinguirse un poco, mostrándose en color blanco hacia las partes superior e izquierda de la imagen, pero el resto de las unidades se confunden (colores verde naranja y rosa en orden de abundancia). En la parte inferior se observa una diferencia entre las distintas unidades de roca granítica Kg1 (naranja) y Kg2 (blanco) pero la respuesta de Kg1 se confunde con Tpr y la respuesta de Kg2 se confunde con Tmc y con el aluvión Qal1. Los aluviones se distinguen bien entre sí, pero como se menciona anteriormente algunos aluviones se llegan a confundir con clases pertenecientes a unidades de roca.

Después de esta primera inspección se reclasificó la imagen agrupando clases a través de mapeos o esquemas de correspondencia apoyados de una segmentación espacial de la imagen con 19 polígonos con características conocidas, como por ejemplo el cuerpo de agua (figura 26a) que se compone de 3 clases diferentes y que finalmente se unieron en

una sola clase. También hubo la necesidad de separar clases por medio de segmentación espacial debido a las confusiones que se mencionaron arriba. El mapa resultante mediante este procedimiento se muestra en la figura 26b. En este mapeo se obtuvieron finalmente un total de 21 clases de las cuales 7 corresponden a distintos tipos de aluvión. A pesar de la reclasificación persistieron algunas confusiones de clases y las fronteras entre los distintos tipos de litología son burdas.

Como el mapa obtenido con 40 clases presenta una amplia incertidumbre por la gran confusión de clases que se presentó se decidió realizar una clasificación no supervisada con 80 clases con la finalidad de ver si se podían perfilar mejor las diferencias entre las distintas clases. El despliegue de esta clasificación se muestra en la figura 27a. En esta imagen nuevamente se agrupa perfectamente en color verde brillante al grupo Pzml, sin embargo, la confusión de respuesta espectral con la andesita del volcán Prieto persiste, pero se observa una diferencia de estas dos unidades con la respuesta de la andesita del cerro Potrero (morado, verde y rosa). Igualmente sigue existiendo confusión entre las distintas unidades de toba y riolita (colores rosa y naranja) y la unidad de Tmc se sigue distinguiendo (respuesta en color blanco). Las diferencias entre los diversos aluviones son similares a las observadas en la clasificación con 40 clases.

En general, se afina un poco el detalle entre las fronteras de las distintas clases pero las confusiones espectrales mayores no muestran gran cambio. Al igual que en la clasificación anterior, en esta imagen se usaron polígonos (24 en total) para separar o unir diferentes clases. El mapa temático de la clasificación con 80 clases es mostrado en la figura 27b, en donde se reagruparon nuevamente en 21 clases, pero ahora se observa mayor detalle entre las fronteras de las diferentes unidades litológicas.

IV.3 *Análisis de componentes principales.*

Para este análisis se utilizaron dos procedimientos: a) estandar y b) selectivo. Por medio del método estandar se obtuvieron 6 componentes principales (CP) que son mostrados en las figuras 28, 29 y 30; los eigenvectores del análisis de componentes principales se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. Eigenvectores obtenidos del análisis de componentes principales de los datos de la imagen TM del 20 de julio de 1987. El renglón inferior contiene los porcentajes de varianza de cada componente.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Banda 1	0.389	-0.695	-0.343	0.431	0.235	-0.086
Banda 2	0.412	-0.339	0.173	-0.353	-0.740	0.117
Banda 3	0.419	-0.045	0.235	-0.522	0.568	-0.240
Banda 4	0.413	0.214	0.585	0.515	0.080	0.205
Banda 5	0.406	0.472	-0.289	0.155	-0.242	-0.555
Banda 7	0.410	0.353	-0.494	-0.101	0.099	0.550
% de info.	94.15	4.82	0.63	0.22	0.13	0.05

La primer componente (CP1) tiene la contribución de todas las bandas TM y se presenta el mayor porcentaje de información (94.15 %), esta imagen se puede apreciar muy semejante a la banda TM5 de la imagen original, en la segunda componente (CP2) se presentan las diferencias entre las bandas visibles y las bandas del infrarrojo; la banda 1 es la que tiene la mayor contribución en CP2 y el porcentaje de información para esta componente es de 4.82%. En esta componente se marca con color negro los cauces de algunos arroyos en particular el cauce del arroyo Matomí (parte superior de la imagen) y los cauces de los arroyos Zamora y Miramar cerca del Huerfanito en la parte central de la imagen. CP2 también resalta en negro los aluviones formados a partir de rocas intrusivas y

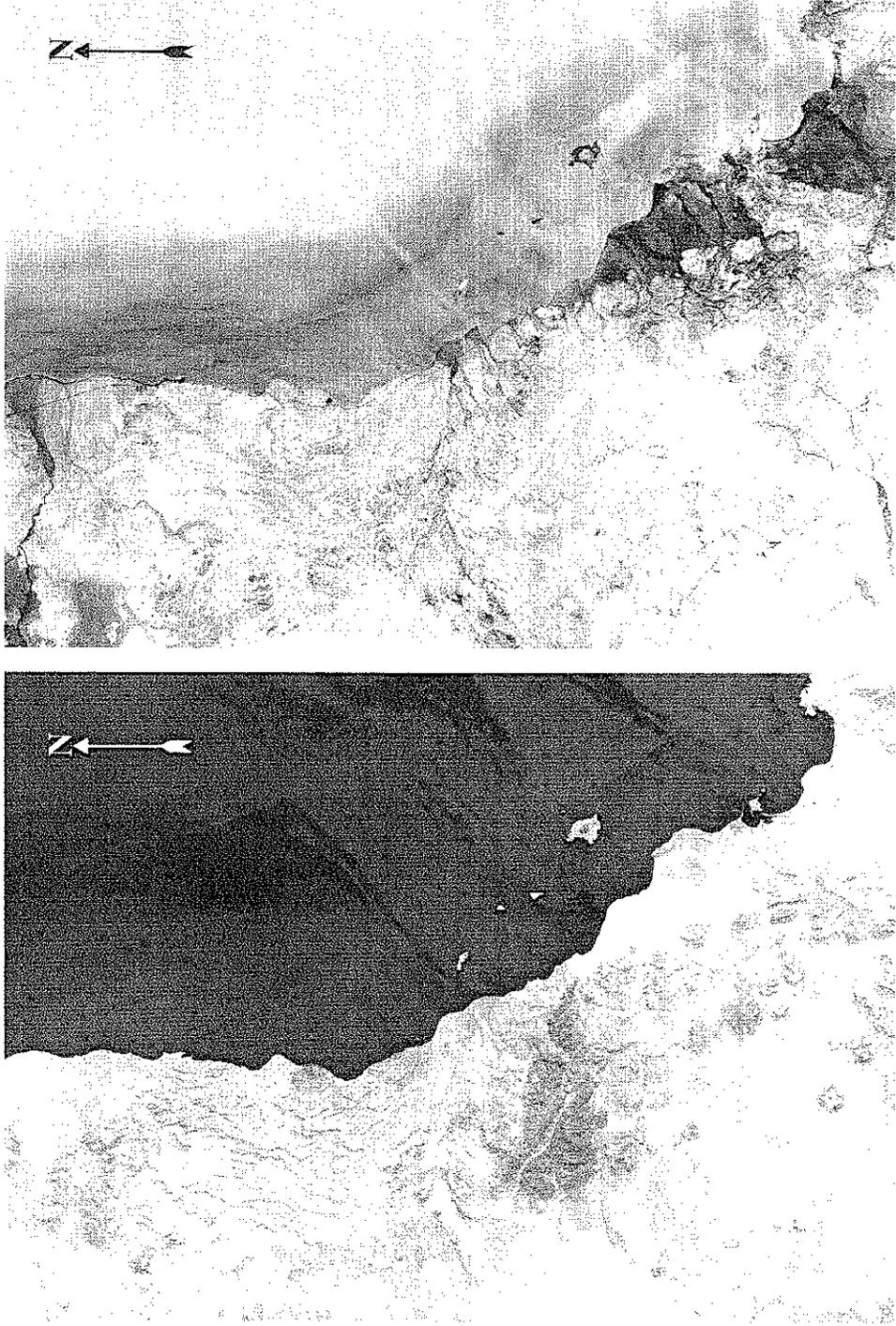
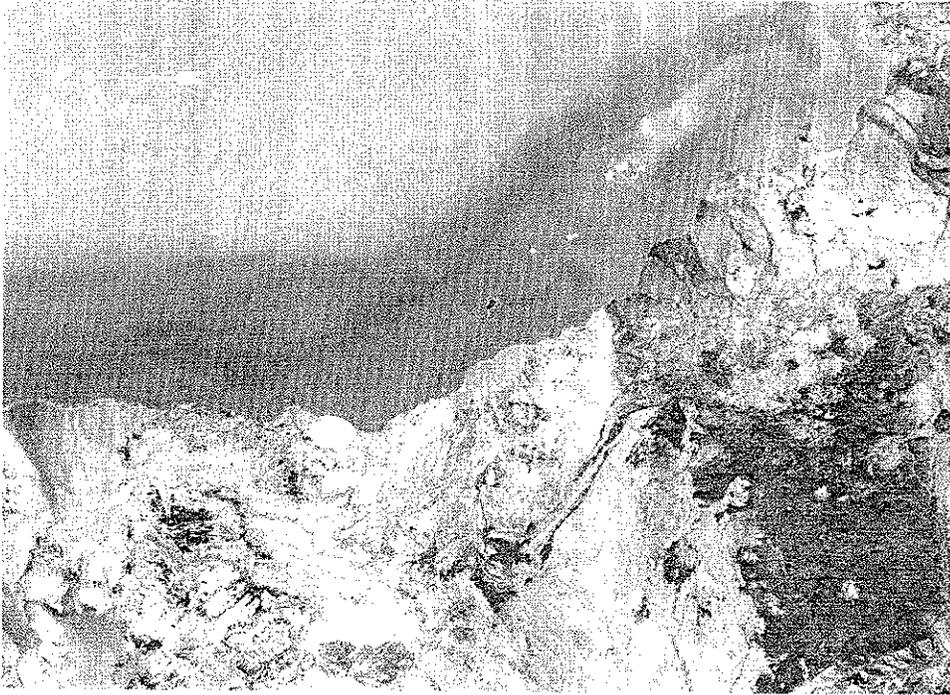


Figura 28. a) imagen de la primera componente principal, en donde se observa la mayor información espectral ya que se tiene la contribución espectral de todas las imágenes. Esta imagen presenta valores bajos (gris oscuro) para la unidad metamórfica Pzm1 en el centro de la imagen y valores altos (blanco) en zona de aluviones (parte inferior). b) imagen de la segunda componente que muestra con valores altos zonas ricas en carbonatos (Km2, centro de la imagen) y con valores bajos arroyos y aluviones formados a partir de roca intrusiva.



a) CP3



b) CP4

Figura 29. a) imagen de la tercera componente principal mostrando contrastes entre rocas ricas en carbonatos y plagioclasas (parte inferior de la imagen en color negro) y rocas con altos contenidos de piroxenos (parte superior de la imagen en color blanco brillante). b) imagen de la cuarta componente en la cual se observa una diferencia entre tonalitas y granodioritas (parte inferior de la imagen en color gris obscuro y blanco); en la parte superior de la imagen se observa una diferencia entre aluviones con barniz del desierto y aluviones sin barniz (diferencias en grises).

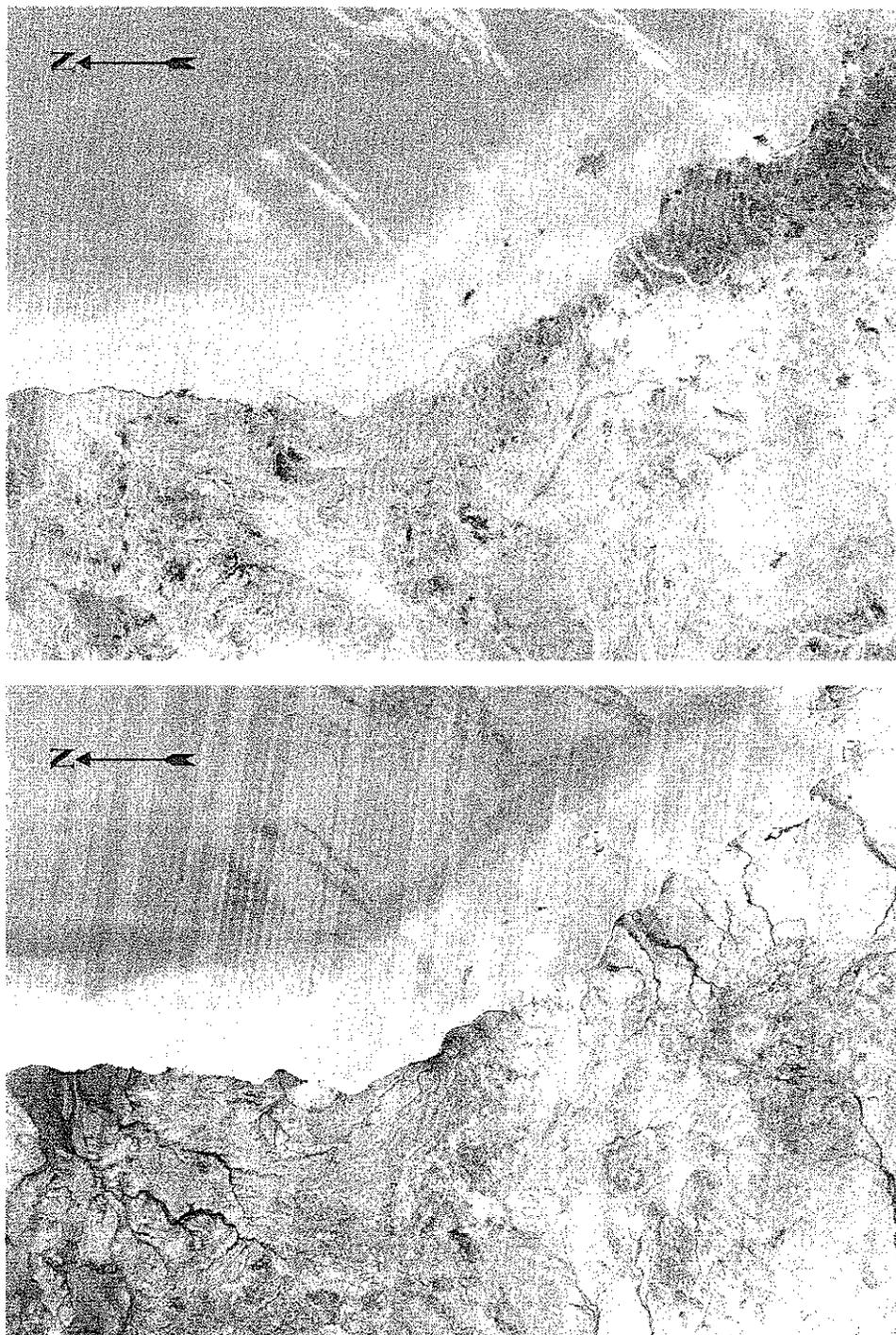


Figura 30. Imágenes mostrando la quinta y sexta componente, en las cuales se observa ruido en forma de bandeamiento y se observan contrastes tenues entre aluviones y roca. En la CP5 se logra observar una diferencia entre los aluviones de la parte norte originados a partir de rocas volcánicas e intrusivas (colores gris obscuro) y los aluviones de la parte sur originados a partir de roca intrusiva (gris claro).

los depósitos de sal (a ambos lados del volcán Prieto). Se destacan en color blanco el cinturón de roca metamórfica Km2 en la parte central de la imagen y Tmc en la parte superior. CP3 presenta un porcentaje de información pequeño (0.63 %) y la principal contribución es de la banda TM4. En esta imagen se observa ruido en forma de bandeamiento, las unidades de Tmc, Km2, Kg1 y Kg2 se observan en color negro mientras que las unidades de Tb, Tpr y Tpa se presentan en color blanco. En la componente CP4 el porcentaje de información es de 0.22 % y la principal contribución es de la banda TM3; en esta imagen se observa ruido en forma de bandeamiento más fino que el observado en la componente CP3. En CP4 se aprecian en color negro los aluviones con barniz del desierto ubicados en la parte superior de la imagen, las unidades Km3, Td, Tmc y algunas partes de Tpr. Las unidades Kg1 y Kg2 se separan en color gris y blanco respectivamente: los depósitos de sal (ambos lados del Volcán Prieto), la zona de playa con vegetación (parte inferior de la imagen) y la unidad Tps (parte superior de la imagen) se presentan de color blanco brillante. Entre CP5 y CP6 sólo alcanzan 0.18 % del total de la información y su principal contribución son las bandas TM3 y TM7 respectivamente. En CP5 se delinean en colores oscuros los cauces de los arroyos acentuándose aguas arriba y zonas de playa con presencia de vegetación (parte inferior de la imagen). En general estas dos últimas componentes dan muy poca información pues no hay grandes contrastes de grises y las diferencias de litología son difusas. En ambos componentes se observa ruido en forma de bandeamiento.

En el método selectivo de componentes principales se utilizaron cinco pares de bandas y se obtuvieron 5 pares de componentes principales. La tabla IX presenta el grado de correlación entre los diferentes pares de bandas, el porcentaje de variación mapeado en

cada componente y los eigenvectores de cada par de bandas. En la tabla IX se observa que los coeficientes de correlación más bajos presentan los mayores porcentajes de variación en la CP2; por ejemplo, las bandas TM 2 y 7 tienen un coeficiente de correlación de 0.917 y 4.15 % del total de la variación está mapeado en la segunda componente, mientras que las bandas TM 5 y 7 tienen un coeficiente de correlación de 0.993 y sólo el 0.35 % de la variación total está mapeada en la CP2.

Tabla IX. Coeficiente de correlación, porcentajes de variación mapeadas en CP1 y CP2 y los eigenvectores resultantes para cada par de bandas.

Par de bandas TM	Coeficiente de correlación	% de variación (CP1)	% de variación (CP2)	Eigenvectores (CP1)	Eigenvectores (CP2)
TM 2 y 4	0.943	97.15	2.85	(0.817, 0.576)	(0.576, -0.817)
TM 2 y 7	0.917	95.85	4.15	(0.837, 0.547)	(0.547, -0.837)
TM 4 y 7	0.967	98.35	1.63	(0.643, 0.766)	(-0.766, 0.643)
TM 1 y 2	0.967	98.35	1.63	(0.858, 0.514)	(0.514, -0.858)
TM 5 y 7	0.993	99.65	0.35	(0.475, 0.880)	(-0.880, 0.475)

En el método selectivo, la información que es común en ambas bandas está mapeada en la CP1 con la que se produce una imagen semejante al CP1 del método estándar. En la segunda componente se observa las diferencias que existen entre el par de bandas que se está utilizando (figuras 31 y 32). La primer imagen (figura 31a) representa a la segunda componente obtenida del par de bandas TM2 y 4 de las regiones visible (verde) e infrarrojo cercano. En esta imagen hay poco contraste entre las diferentes unidades litológicas. Las unidades como Tps, los depósitos de sal y las zonas de playa se presentan en color negro y en color blanco brillante se observan las zonas de playa con cubierta

vegetal (salicornia) en la parte inferior de la imagen. Otros rasgos que son fáciles de identificar es la carretera y algunos arroyos que también se presentan en color negro.

La segunda imagen de contraste espectral (figura 31b) es obtenida de las bandas TM2 y 7 visible (verde) e infrarrojo medio respectivamente. En esta imagen se resaltan en color blanco la unidad Td (dacitas) que se presenta en la parte inferior derecha y en la parte superior izquierda, también se resalta la unidad Km2 y Km3 que conforman el cinturón de metasedimento que se presenta encima de la unidad Pzml y otro rasgo que resalta son las puntas oxidadas de los volcanes Cerro Potrero en la parte inferior y Volcán Prieto en el centro superior de la imagen y la unidad Tmc. En color negro se presenta el arroyo Matomí (superior izquierda), las playas de arena (Qal4), los depósitos de sal, los depósitos de travertino, la unidad Tps como pequeños puntos negros, además de la carretera y los arroyos.

En la segunda componente obtenida de las bandas TM 4 y 7 se observa el contraste entre el infrarrojo cercano y el infrarrojo intermedio (figura 31c). En esta imagen se diferencian las unidades Kgl y Kg2 en colores blanco y gris respectivamente en la parte inferior de la imagen. Otro contraste es la unidad Tmc en color blanco con la unidad de Tpr en color negro en la parte centro superior de la imagen. El volcán Prieto, la unidad Qal4 y algunos arroyos también se presentan en color negro.

La segunda componente obtenida de las bandas TM 1 y 2 muestran el contraste entre dos bandas que están contiguas entre sí (figura 32a). Esta imagen está contrastando en color blanco brillante las unidades Qal1 y Qal4 (parte superior e inferior de la imagen) que son aluviones en cuya composición se tiene en común el aporte de material de roca intrusiva. En color negro se presenta la unidad de metasedimentaria Km2 y la unidad Tb.

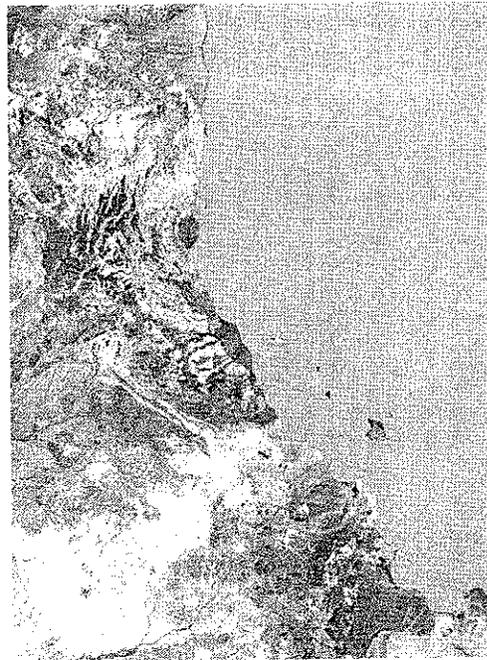
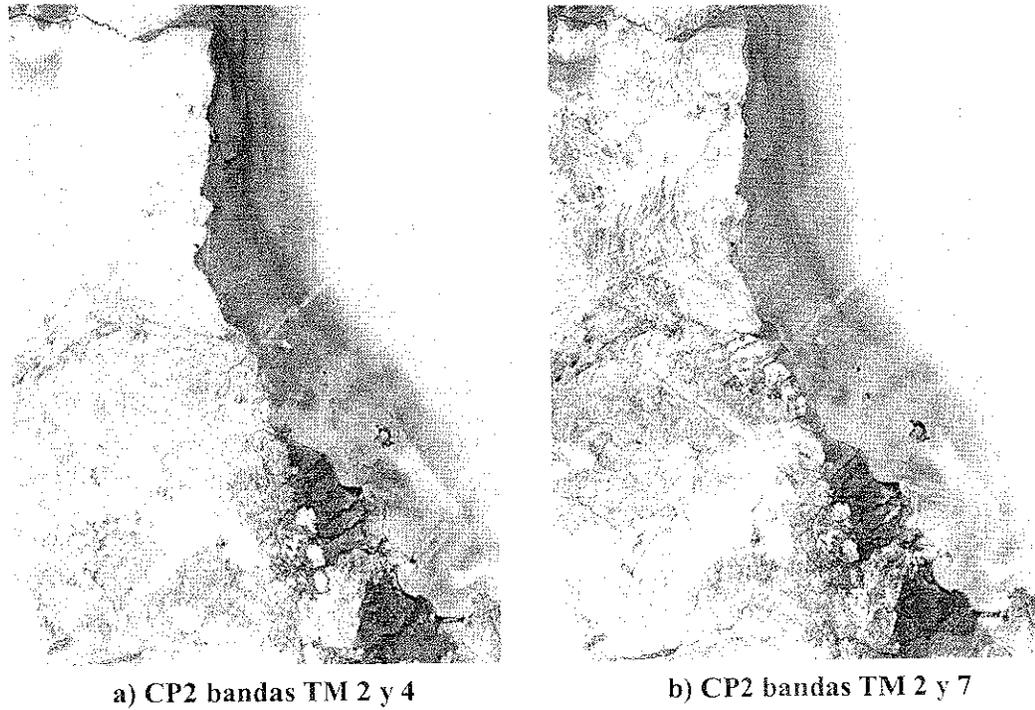
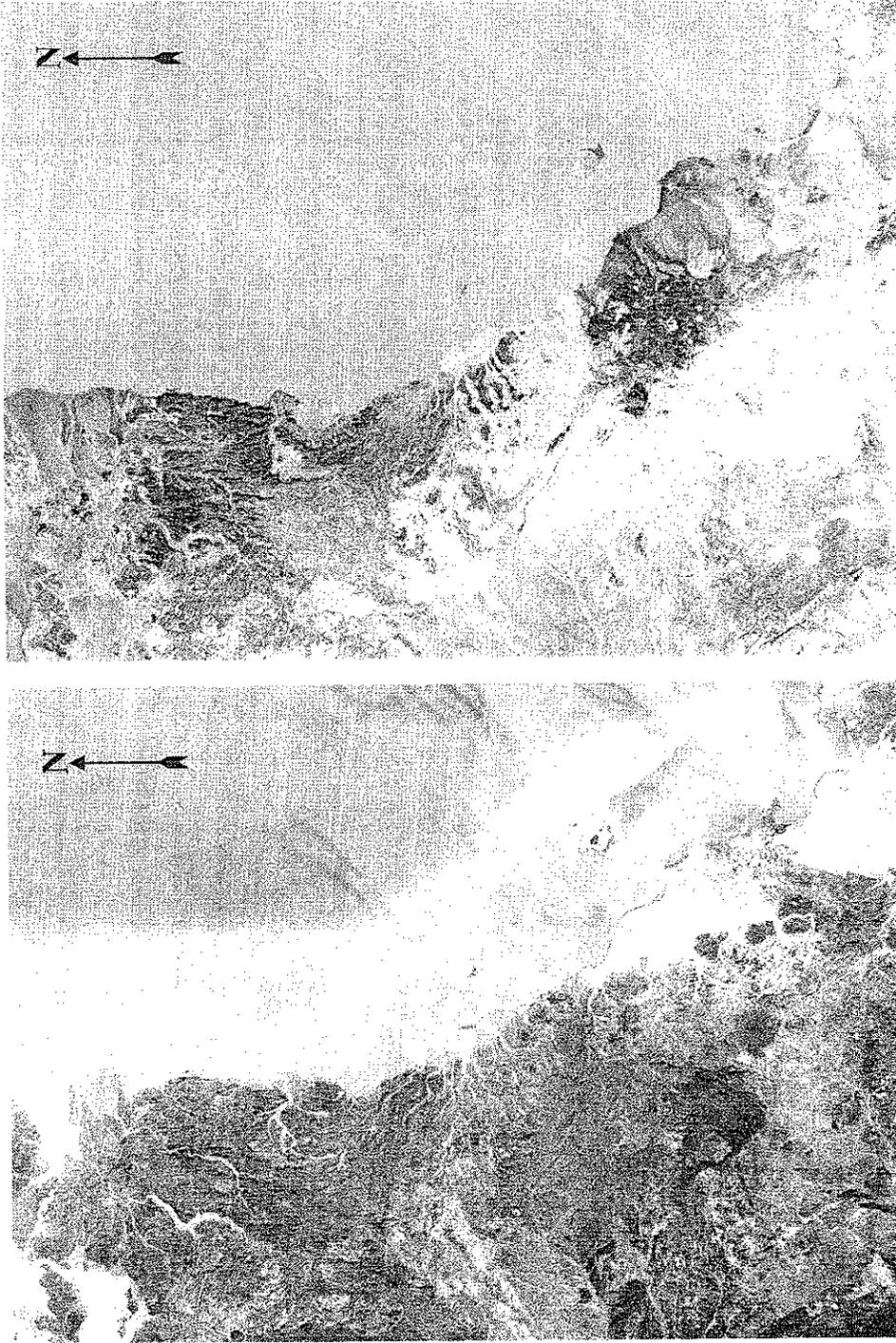


Figura 31. A) imagen mostrando el contraste entre la región visible e infrarrojo cercano, observando valores altos en la región de tobas (parte superior) y valores bajos para aluviones originados de rocas intrusivas; b) imagen mostrando contrastes entre la región visible e infrarrojo medio mostrando con valores altos zonas ricas en carbonatos (parte inferior) y en piroxenos (parte superior); c) imagen mostrando contrastes entre las regiones infrarrojo cercano y medio. Esta imagen muestra mayores contrastes que las imágenes (a) y (b).



a) CP2 bandas TM 1 y 2

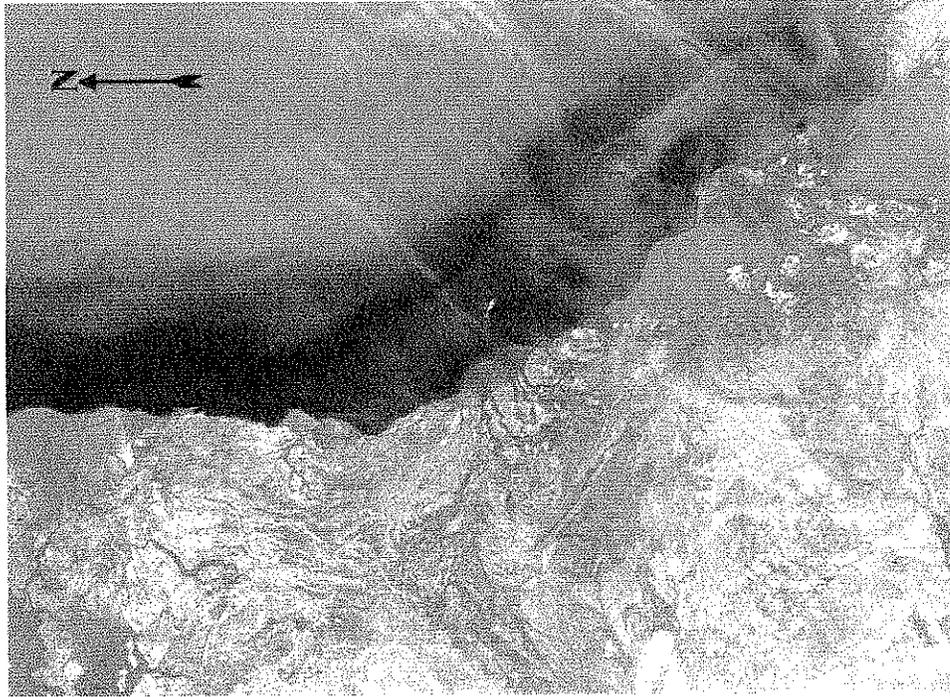
b) CP2 bandas TM 5 y 7

Figura 32. a) imagen mostrando el contraste entre dos bandas del rango visible. Se presenta con valores altos (blanco brillante) los aluviones originados a partir de roca intrusiva, además se contrastan las zonas de aluviones (gris claro) con roca (gris oscuro). b) imagen mostrando el contraste espectral entre dos bandas del rango infrarrojo medio. Se observan contrastes entre las unidades de roca intrusiva (parte inferior), también marca diferencias entre aluviones del norte y aluviones del sur.

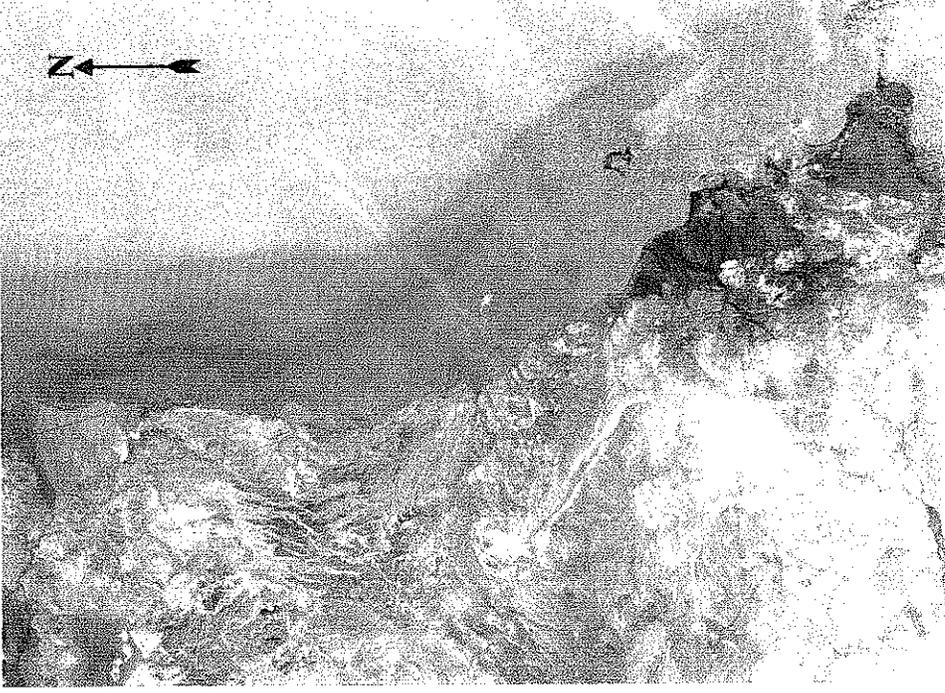
La última imagen muestra la segunda componente obtenida a partir de las bandas TM 5 y 7 que presentan el contraste entre dos bandas altamente correlacionadas pero que no están contiguas (figura 32b). El contraste mostrado en esta figura es mayor que el contraste observado en la figura 32a. En esta imagen se observa la separación entre las unidades de roca granítica Kg1 en color gris y Kg2 en color blanco. La unidad de tobaTmc y la unidad de metasedimentos Km3 se presentan en color negro y en blanco brillante se observan la unidad Tps y playa con vegetación (parte inferior de la imagen).

En la figura 33 se presentan imágenes con falso color obtenidas de los dos métodos de componentes principales. La figura 33a presenta el falso color de las tres primeras componentes del método estándar (CP123 en rojo, verde y azul respectivamente). En esta imagen se observa en color amarillo la unidad de Tmc, en color verde las unidades Km2 y Km3, en color naranja la unidad de Kg2 y en color naranja verdoso la unidad de Kg1. La unidad de Tpr se presenta en color morado y se observan contrastes entre los diferentes aluviones, mostrándose Qal1 en color rojo, Qal2 en colores grisáceos, Qal3 en color guinda y Qal4 también presenta colores rojizos. La andesita de las unidades Tpa y Tb se observan en color azul, la unidad PQcs se observa de color gris rosáceo, mientras que la unidad Tsv se presenta de color gris verdoso. En general, se presentan buenos contrastes que permiten realizar más fácilmente una fotointerpretación de la zona.

En la figura 33b se presenta una imagen en falso color combinando las segundas componentes de los pares de bandas TM 5 y 7, 4 y 7, 2 y 7 en rojo, verde y azul respectivamente. En general esta imagen muestra muy buenos contrastes entre las diferentes unidades litológicas como se puede notar entre la unidad Tmc en color azul turquesa con respecto a la unidad Tpr que se presenta en color verde olivo. Otro



a) CP123 en rojo, verde y azul



b) CP2 TM 5 y 7, 4 y 7, 2 y 7 en rojo, verde y azul.

Figura 33. a) combinación de las tres primeras componentes obtenidas por el método estándar Cp123 en rojo, verde y azul; b) imagen en falso color con las CP2 de los pares de bandas TM 5 y 7, 4 y 7, 2 y 7 en rojo, verde y azul. En la figura (b) se aprecian mejores contrastes que en la imagen (a) como se presenta en la parte inferior de ambas imágenes donde el contraste de roca intrusiva se presenta en colores azul y rosa en la imagen (b) y no se observa muy claro en la imagen (a).

contraste se presenta entre las unidades Kg1 en azul y Kg2 en color rosa. Los depósitos de sal, la unidad Tps y el Qal4 se presentan en color rojo. Con esta combinación también son notorias las diferencias entre aluviones y se marca la diferencia entre las unidades Km2 en color rosa claro casi blanco y Km3 en color azul claro, las cuales constituyen a la franja metasedimentaria que sobreyace a la unidad Pzml que en esta imagen se presenta de color café verdoso.

IV.4. Cociente de bandas.

Para el desarrollo de esta técnica se utilizaron criterios preestablecidos por otros autores (Vincent, 1997; Sabins, 1997; Chávez y Kwarteng, 1989; Sultan et al., 1987). Por medio de este procedimiento se obtuvieron 4 imágenes (figura 34), tres de estas imágenes son los cocientes $5/7$ (para zonas con piroxenos, carbonatos ó arcillas), $3/1$ (zonas con óxidos de fierro) y $5/4 \times 3/4$ (diferencia entre rocas máficas y félsicas) y la cuarta imagen es la combinación de los tres cocientes anteriores para obtener una imagen en falso color.

La figura 34a es una imagen del cociente $5/7$. Las zonas que exhiben los valores más altos en este cocientes es la zona de metasedimentos Km2 y las zonas de dacitas en la parte inferior de la imagen. Los valores intermedios se presentan en la zona de roca intrusiva (unidades Kg1 y Kg2) y los valores menores estan relacionados a lagunas efímeras (parte inferior de la imagen) y a los depósitos de sal (volcán Prieto).

En la figura 34b se presenta la imagen del cociente $3/1$. Como se aprecia en la figura 34b los valores altos de la relación $3/1$ son escasos y más bien predominan los valores intermedios y bajos. Los mayores valores se concentran en la parte inferior

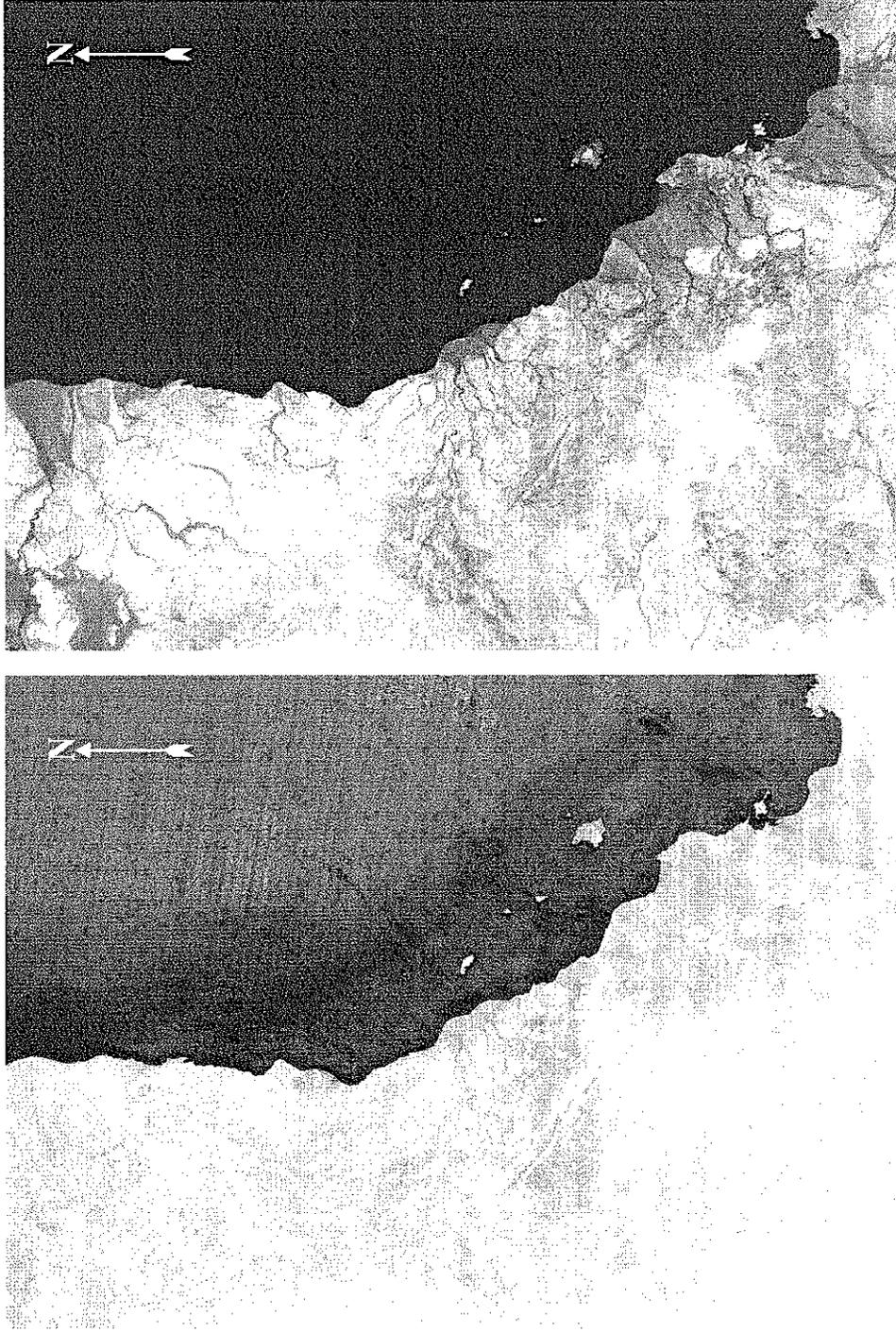
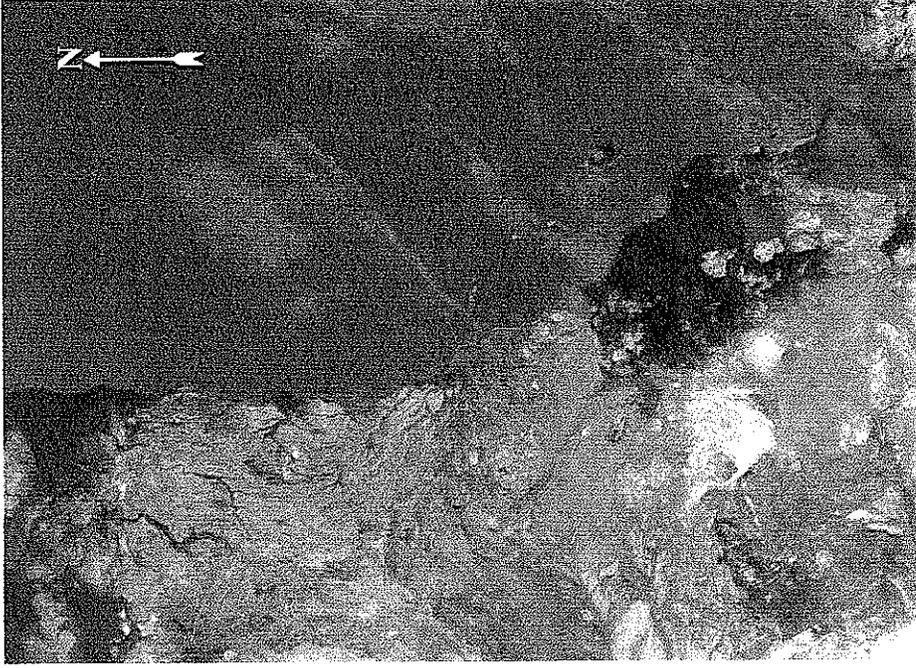


Figura 34. a) imagen mostrando la relación 5/7 que resalta con valores altos las zonas de carbonatos (parte inferior) y zonas ricas en piroxenos y arcillas (parte norte). b) imagen que presenta la relación 3/1 que resalta en color blanco brillante las zonas que presentan mayores concentraciones de óxidos de hierro (producto de intemperismo).



a) Cociente 5/4 x 3/4



b) Cociente 5/7, 3/1, 5/4 x 3/4 en rojo, verde y azul

Figura 35. a) cociente 5/4 x 3/4 mostrando con valores altos (blanco brillante) zonas ricas en sílice (cuarcita, en la parte media de la imagen) y plagioclasa (intrusivos, parte inferior de la imagen) distinguiendo a las rocas félsicas con las rocas máficas; b) imagen en falso color mostrando con colores verdes las zonas con mayor contenido de óxidos de hierro (producto de intemperismo), además se aprecian diferencias entre las unidades litológicas que ocupan las mayores extensiones de área.

izquierda de la imagen señalando algunas zonas de las unidades Km2, Tsv y en la unidad Tpr se observan incrementos en los valores de la relación 3/1 cerca de la línea de costa y en los márgenes de los arroyos, así como también se observan valores altos en la unidad Tb y en la andesita que constituye al Volcán Prieto.

La figura 35a muestra la relación $5/4 \times 3/4$ con la que se espera discriminar rocas máficas, intermedias y félsicas. En esta imagen se aprecia que la mayoría de los valores son intermedios y bajos. Los valores altos corresponden principalmente a la unidad Km2, los valores intermedios corresponden principalmente a las unidades de roca granítica (Kg1 y Kg2), a la unidad Tmc y a los aluviones Qal1 y Qal4 y los valores bajos señalan al resto de la imagen.

En la figura 35b se presenta una imagen en falso color realizada a partir de los cocientes mencionados anteriormente de la siguiente manera: $5/7$, $3/1$ y $5/4 \times 3/4$ en rojo, verde y azul respectivamente. En esta imagen se logra distinguir claramente las unidades Pzm1 en color naranja rojizo, Km2 en blanco, Km3 en magenta y azul, Kg1 en color azul y Kg2 en color rosa en la parte inferior de la imagen, en la mitad superior se logra discriminar la unidad Tmc en color azul claro de la unidad Tpr en color verde claro, pero el volcán Prieto no es tan fácil de distinguir con respecto a Tpr. Otra zona fácil de distinguir es la playa con presencia de vegetación que se presenta en color rojo en la parte inferior derecha de la imagen. Los aluviones se logran distinguir de la siguiente manera, Qal1 en color azul violáceo, Qal2 en color vino y la zonas con barniz del desierto en color verde se observan en la mitad superior de la imagen; Qal3 en color rojo y Qal4 en color guinda presentes en la mitad inferior de la imagen.

En la tabla X se resume el comportamiento que tiene cada material de la franja costera, es decir, como se observan en cada imagen de cociente y el color que adquiere cuando se combinan los tres cocientes con los colores primarios azul, verde y rojo. Cuando un material presenta valores altos en los tres cocientes el color que adquiere en la imagen de falso color es blanco o colores muy cercanos al blanco como por ejemplo la unidad Km2. Contrario a lo anterior se presentan materiales con valores bajos o intermedios en los tres cocientes y como consiguiente se obtienen colores intermedios a oscuros como por ejemplo la zona de playa en la parte inferior de la imagen en donde se aprecia un color azul oscuro.

IV.5 Clasificación supervisada mejorada.

Para realizar la clasificación supervisada mejorada se utilizaron las 6 bandas TM y las áreas de entrenamiento fueron obtenidas de la combinación de bandas 742 en rojo, verde y azul respectivamente y de la combinación de las segundas componentes del par de bandas TM 5 y 7, 4 y 7, 2 y 7 en rojo, verde y azul respectivamente. Las imágenes de cociente no fueron utilizadas para obtener las áreas de entrenamiento porque hay algunas unidades (Tmrl y Tmru) que no se identifican fácilmente como se logró hacerlo con la combinación de bandas y de componentes principales. La salida de la clasificación supervisada mejorada se presenta en la figura 36. En esta imagen se observa una buena definición de las distintas clases litológicas. Las unidades de metasedimento (Pzm1, Km2 y Km3), de roca granítica (Kg1 y Kg2), toba el Canelo (Tmc), depósitos marinos y fluviales (Tps y PQcs), andesita volcán Prieto (Tpa), depósito de tefra y sal (Qvt y

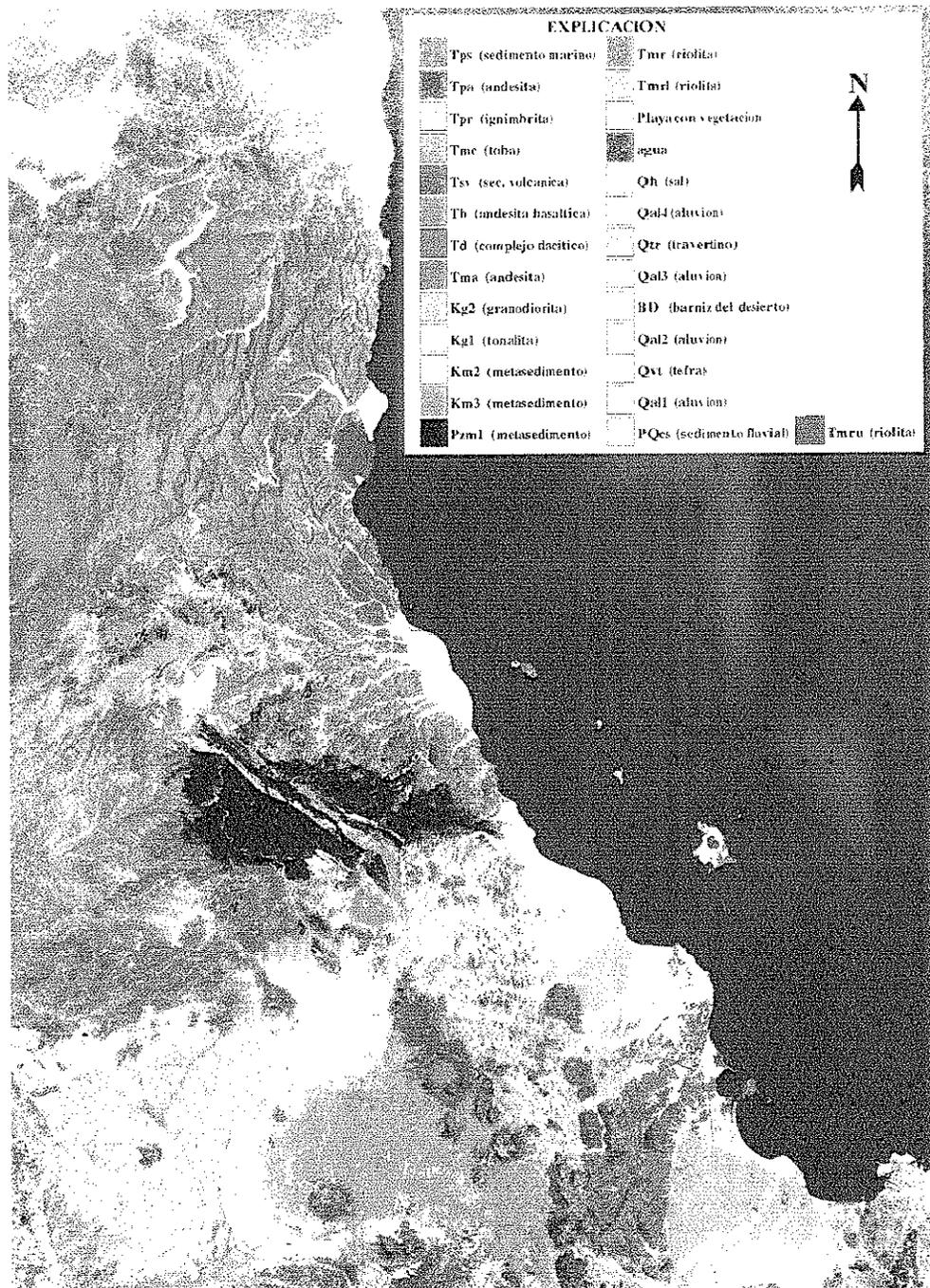


Figura 36. Salida de la clasificación supervisada mejorada. En esta imagen se presentan 26 clases (13 de roca ígnea, 10 de sedimentos y 3 de roca metamórfica). Los intrusivos se muestran en dos rosas diferentes (parte inferior de la imagen), los tres tipos de roca metamórfica se muestran en color azul (esquistos), verde (cuarcita) y blanco (mármol). También se observan 4 colores para diferenciar las unidades de toba (parte superior de la imagen).

Tabla XI. Colores y valores medios relacionados a las diferentes unidades litológicas. Estas variables fueron obtenidas mediante la técnica de clasificación supervisada mejorada.

Unidad	Color	B1	B2	B3	B4	B5	B7
Pzm1	Azul marino	67.71	36.88	58.64	45.58	71.16	55.69
Km2	Verde fosfores	81.47	48.01	80.34	67.48	147.59	107.28
Km3	Beige	73.09	39.94	63.76	51.88	113.20	92.81
Kg1	Rosa claro	109.35	59.80	96.37	78.05	157.75	123.16
Kg2	Rosa	124.45	66.46	106.87	88.05	171.89	123.84
Tma	Verde olivo	91.94	52.50	92.90	75.09	138.16	105.79
Td	Rojo	106.31	55.58	92.54	69.81	136.71	107.27
Tsv	Gris	85.79	47.74	80.68	66.69	123.21	90.10
Tb	Siena	83.86	46.41	77.69	61.57	114.01	83.45
Tmr	Naranja rojizo	105.33	41.64	73.89	58.93	109.63	87.31
Tmrl	Naranja	110.17	58.69	101.77	82.01	134.23	101.66
Tmc	Magenta	123.44	68.06	119.00	96.93	183.01	142.69
Tmru	Morado	74.43	41.64	73.89	58.93	109.63	87.31
Tps	Azul índigo	130.94	69.49	116.80	89.80	145.94	109.83
Tpr	Color carne	102.70	57.28	103.94	83.15	137.31	111.34
Tpa	Café	83.23	46.30	80.73	62.34	95.38	72.92
PQcs	Azul turquesa	143.80	74.46	121.32	93.133	160.34	122.61
Qal1	Mamey	156.72	77.21	121.13	92.26	166.52	130.51
Qal2	Amarillo claro	116.35	57.23	94.55	75.71	132.09	102.74
Qal3	Amarillo intermed.	111.48	55.24	86.71	67.01	110.07	81.57
Qal4	Blanco grisáceo	179.38	86.66	132.67	100.88	170.26	133.53
BD	Verde claro	100.95	51.83	88.20	70.12	117.44	95.11
Traver-tino	Azul índigo	150.83	79.38	134.27	106.30	191.24	138.56
Sal	Blanco	216.44	110.65	168.84	126.51	156.21	85.54
Tefra	Amarillo fuerte	127.26	62.06	95.44	69.84	118.47	94.65
Playa con veg.	Violeta claro	133.90	67.29	101.99	88.08	130.05	92.49

Qh) y los distintos Aluviones se clasificaron correctamente. Sin embargo ocurrieron algunas confusiones de clases, como por ejemplo, la unidad Tsv se confundió con las unidades Tb y PQcs; la unidad Tpr se confunde con las unidades Tmc, Tmrl y Tmru debido a que su composición química es semejante (riolítica) y la unidad Tma también se confunde con Td. Sin embargo, con una reclasificación fueron separadas las clases que se confundían. Para la reclasificación se utilizaron 14 polígonos. El mapa obtenido de esta reclasificación es mostrado en el anexo 7. En este mapa se logró distinguir 26 clases diferentes de las cuales 6 son distintas clases de aluviones y las restantes 20 clases son diversos tipos de litología (metamórfico, sedimentario e ígneo).

En la tabla XI se presenta la unidad litológica y el color asignado en la clasificación supervisada mejorada, además se incluyen los valores medios de cada clase. Estos valores marcan las diferencias en brillo que posee cada clase temática y se utilizaron para obtener la firma espectral de cada clase. Los resultados de las firmas espectrales se verán con más detalle en el apartado siguiente.

IV.6 Firma espectral.

Para graficar las firmas espectrales, los valores promedio de cada clase fueron integrados en tres grandes grupos que son: roca metamórfica (figura 37), sedimento (figura 38) y roca ígnea (figura 39). Los datos utilizados para obtener estas firmas se muestran en la tabla XI. En la figura 37 se observa que las tres firmas espectrales son similares en forma pero los valores de brillo varían entre sí. Los valores de brillo más bajos corresponden a la unidad Pzm1 que consta de esquistos y argilitas (rocas oscuras). Los

Figura 37. Firmas espectrales del grupo de roca metamórfica.

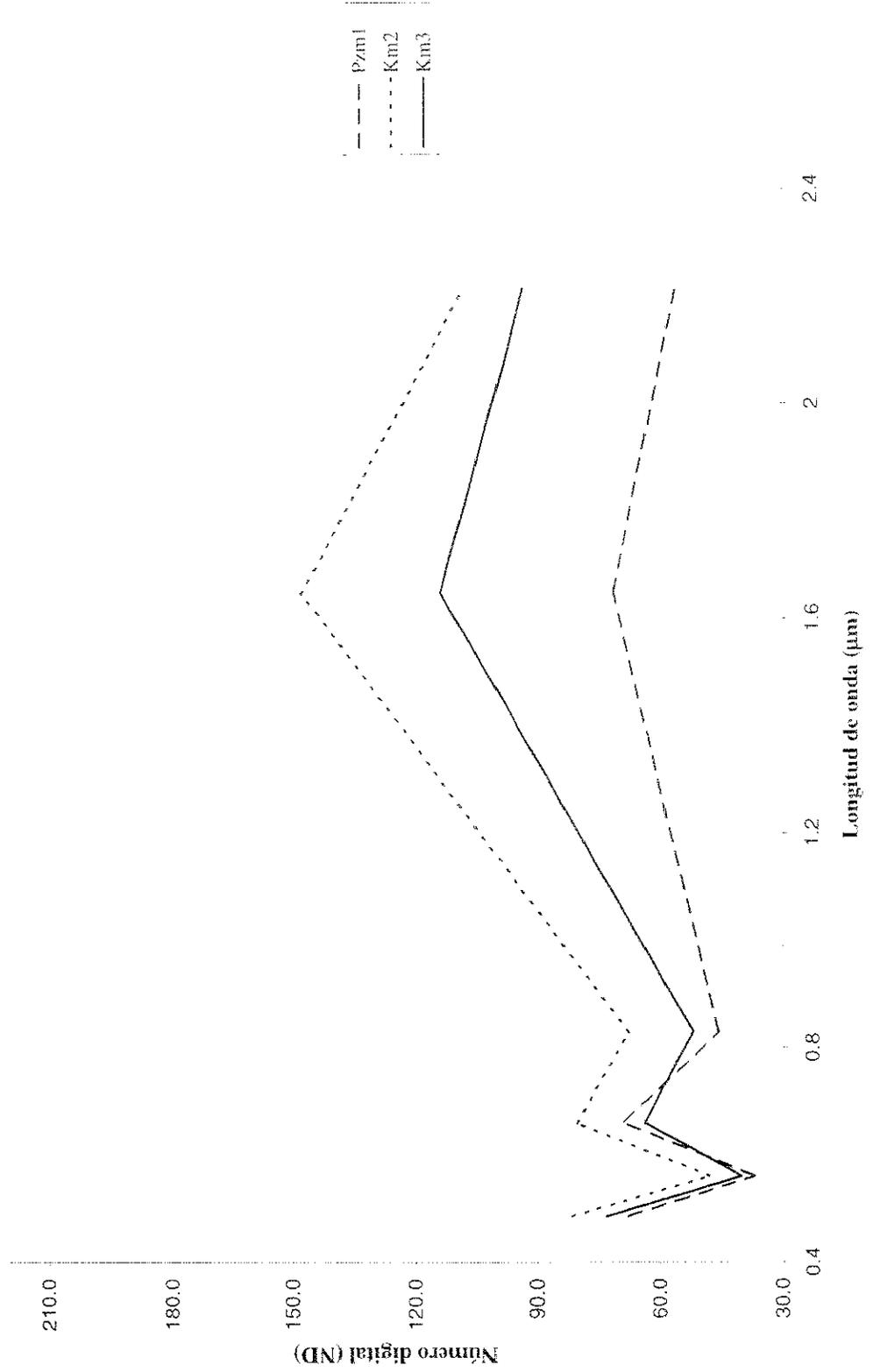
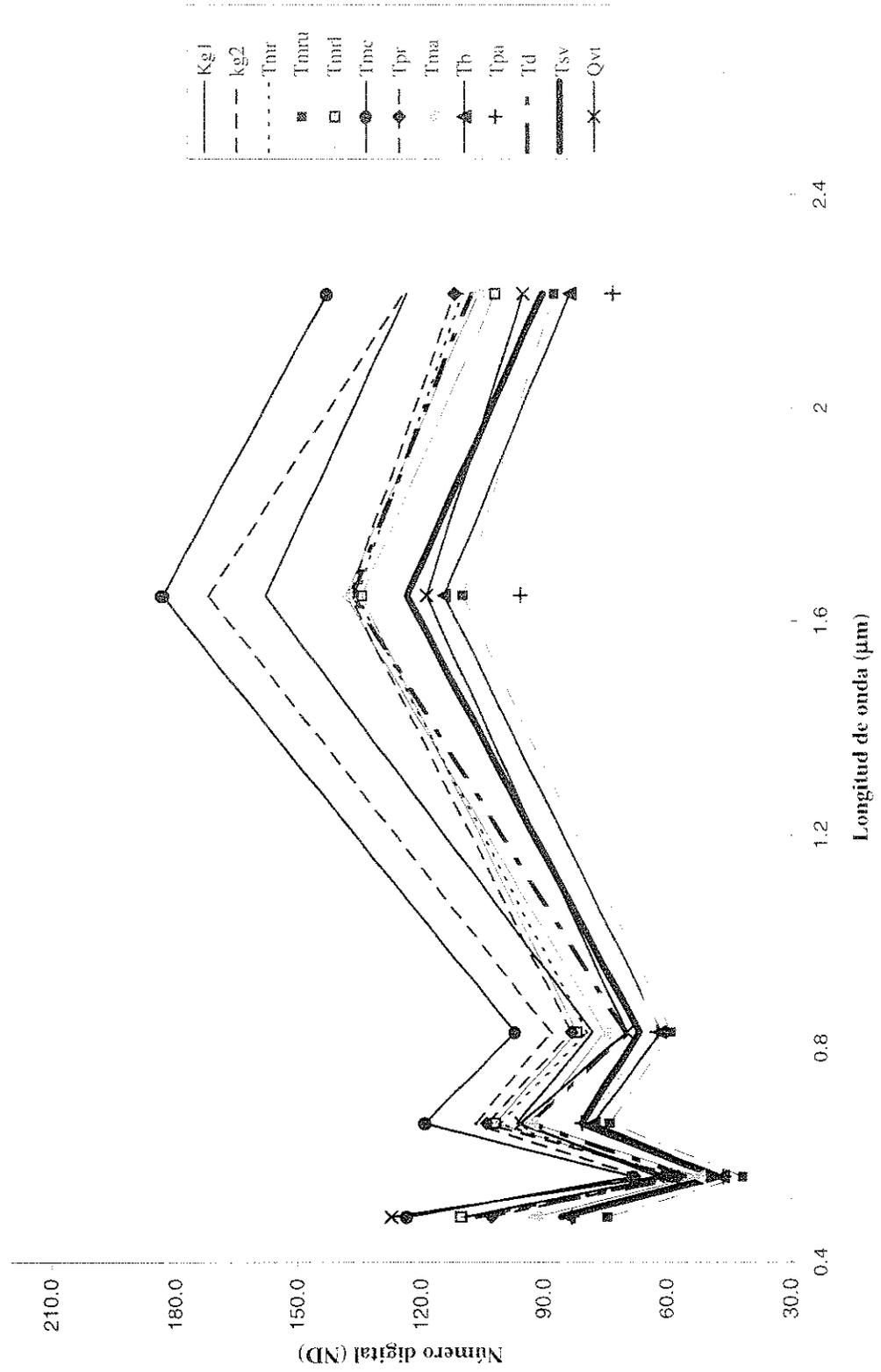


Figura 39. Firmas espectrales representando a las diferentes unidades del grupo de roca ígnea.



valores más altos del grupo de roca metamórfica son los de la unidad Km2 que consiste de mármol; estas diferencias se han venido observando en las distintas técnicas empleadas en este trabajo. Para el caso de el grupo de sedimentos (figura 38) la clase denominada Qh (sal) tiene los valores más altos en las bandas 1 a 4 pero en las bandas 5 y 7 tiene un comportamiento diferente al resto de las unidades del grupo sedimento. En este grupo también se observa que el aluvión con barniz del desierto (terraza aluvial de Qal2 con BD) muestra valores más bajos en comparación con el aluvión (Qal2) que no tiene esta cubierta. La unidad que presenta los valores más bajos de este segundo grupo es la correspondiente al aluvión Qal3 que es generado a partir de roca metamórfica cuyo valor menor está en la banda 2 (55.3) y el máximo valor está en la banda en la banda 1 (111.5), aunque en la banda 5 también se tiene un pico sobresaliente. Para el grupo de roca ígnea los valores de brillo más altos se presentan en la toba El Canelo (Tmc) cuyo máximo pico de reflectancia se ubica en la banda 5 y su máxima absorción es en la banda 2; así mismo, los valores menores se asocian a la unidad de andesita del volcán Prieto (Tpa) con un comportamiento similar al de la unidad Tmc. Se observan traslapes de las firmas asociadas a las unidades Tpr, Tmr, Td y Tma, esta confusión se ha venido observando tanto en las técnicas de combinación (falso color) como en las clasificaciones (no supervisada y supervisada), por lo que en esta gráfica se muestra que dichas confusiones (Tmr con Tpr y Tma con Td) se deben a que sus valores de brillo son muy similares.

En las figuras 40, 41 y 42 se presentan las firmas espectrales de los diferentes tipos de aluviones (Qal1, Qal2, Qal3 y Qal4) que se comparan con las firmas espectrales de las rocas que dieron origen a estos aluviones. Qal1 y Qal4 se muestran en una sola gráfica debido a que ambos aluviones presentan una componente de roca intrusiva. Como se

Figura 40. Firmas espectrales de Qal1 y Qal4 y de las rocas que originaron a estos aluviones

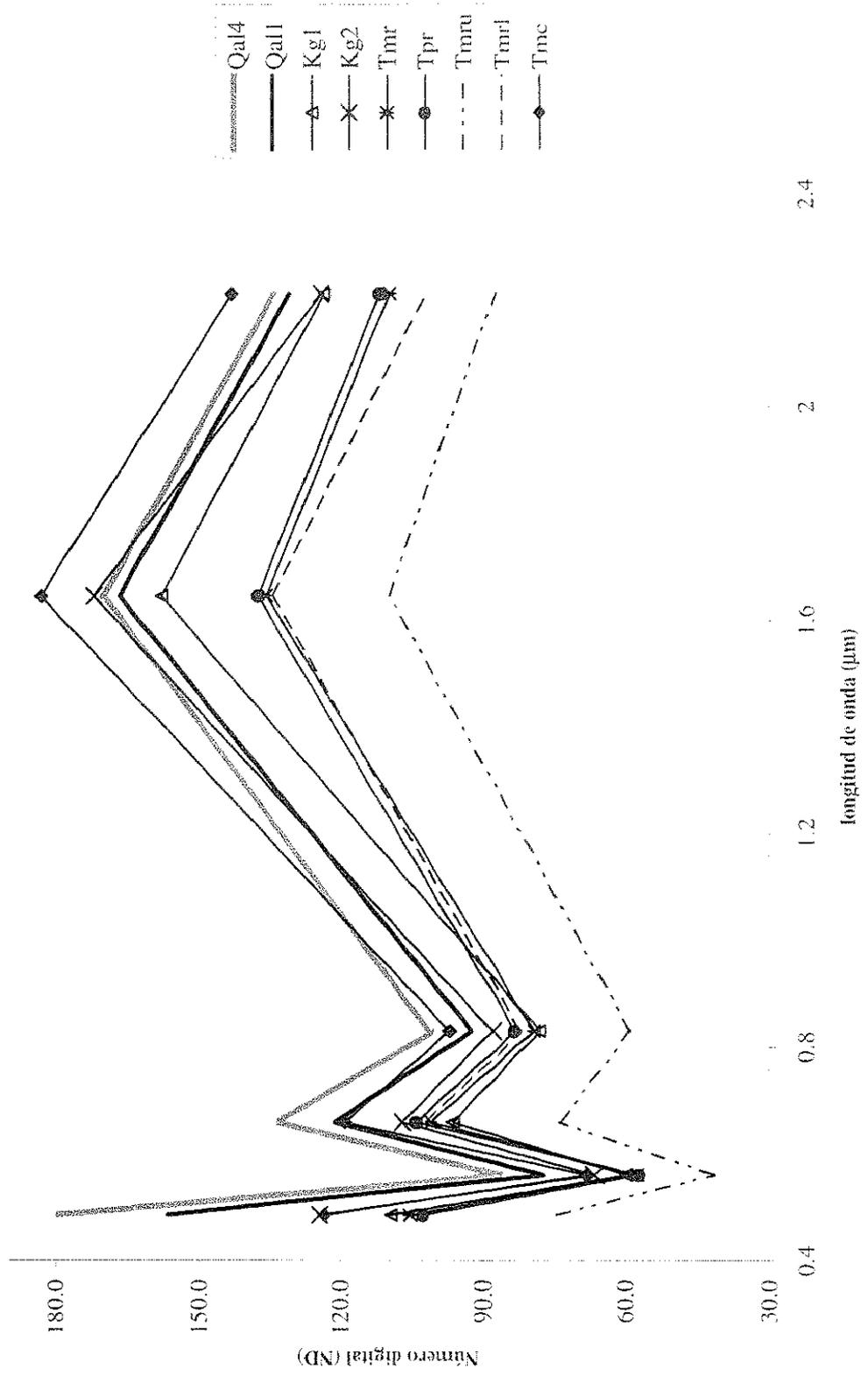


Figura 41. Firma espectral de Qal2 y de las rocas que le dan origen.

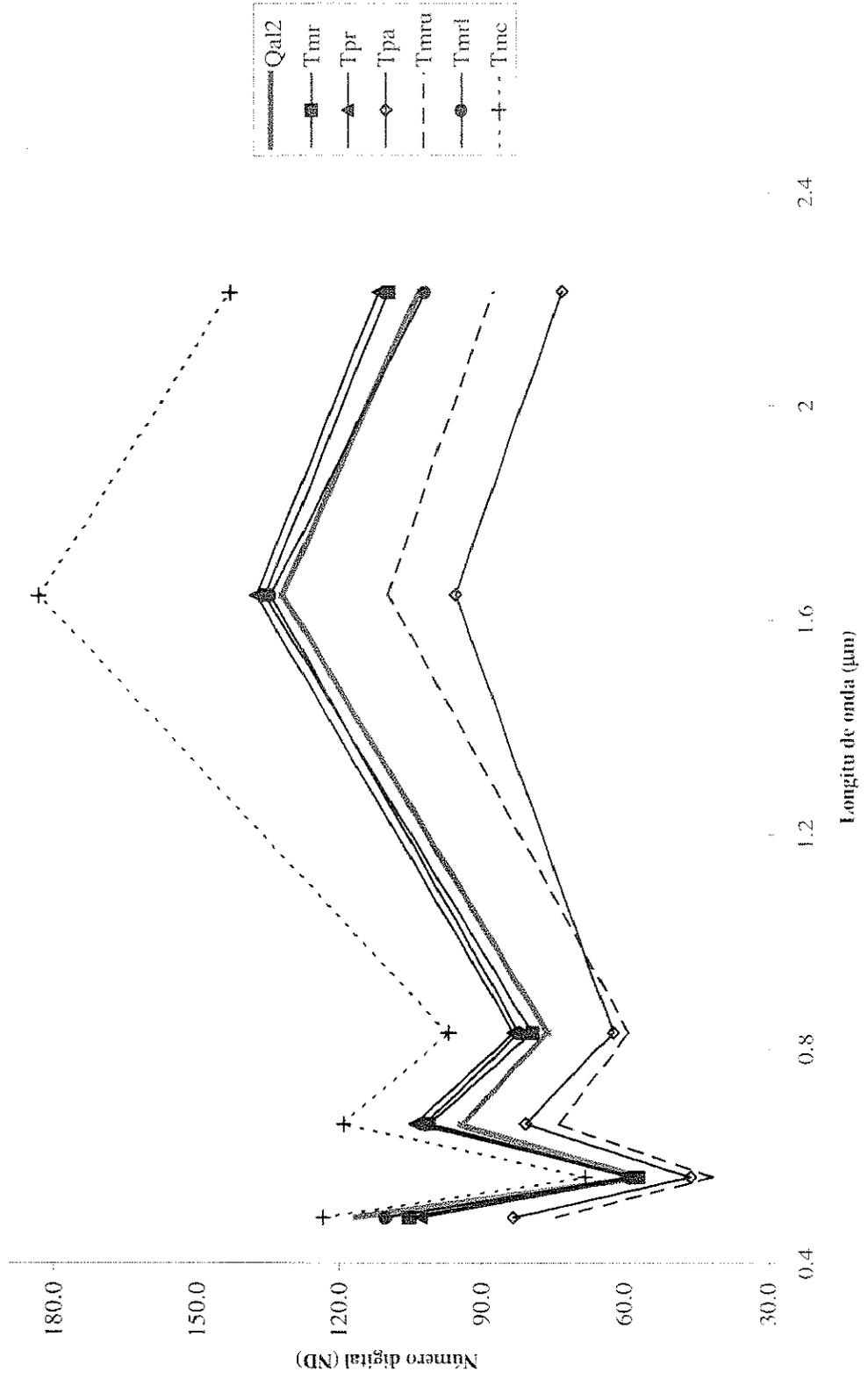
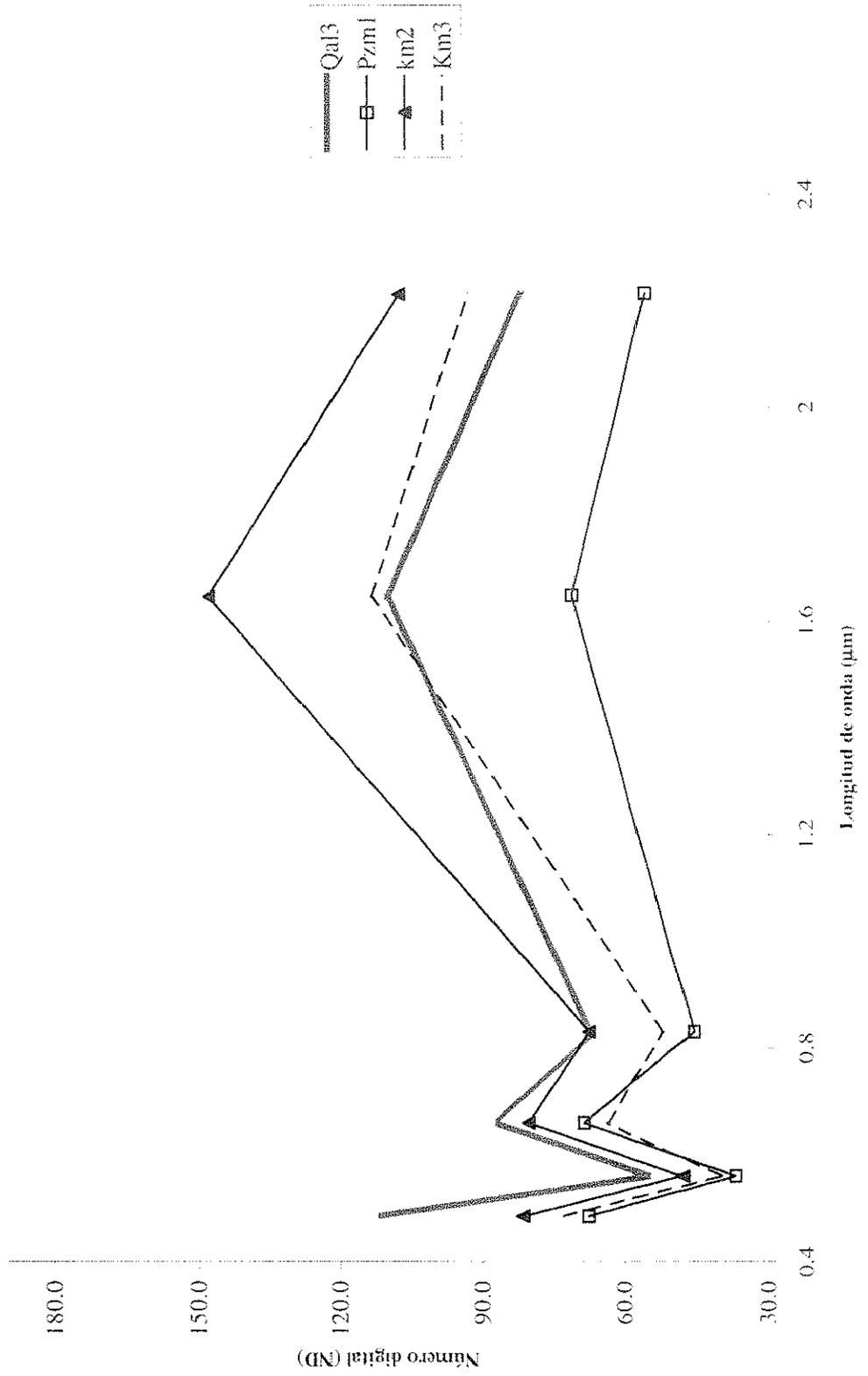


Figura 42. Firma espectral de Qal3 y de las rocas que dan origen a este aluvión



observa en la gráfica 40 los valores de brillo de ambos aluviones (Qal1 y Qal4) están muy cercanos a los valores de brillo de las unidades Kg1 y Kg2, además se observa que Qal1 presenta valores de brillo ligeramente menores a los de Qal4. Comparando la firma espectral de Qal2 (figura 41) con respecto a las firmas de las rocas que dan origen a este aluvión, se observa que la firma de Qal2 muestra valores de brillo muy cercanos a los presentados por las unidades Tmr, Tpr y Tmrl. En la figura 42 se presenta la gráfica del grupo de rocas metamórficas y el aluvión (Qal3) que se origina a partir de ellas, en donde se puede observar que los valores de brillo de Qal3 son muy similares a los presentados por la unidad Km3.

IV.7 Evaluación del método.

Antes de realizar una evaluación numérica se hizo una evaluación visual con la finalidad de elegir el mapa que estuviera más cercano a la realidad. Para realizar ambas evaluaciones se utilizaron mapas preexistentes de la zona de estudio (Cetenal, 1977; 1979; 1981; Martín-Barajas et al., 1995; Nagy, 1997; Fletcher et al., 1997). Después de la evaluación visual se decidió optar por el mapa obtenido por medio de la clasificación supervisada mejorada ya que fue el mapa cuyas fronteras entre clases estaban mejor definidas y más parecidas a los contactos establecidos en los trabajos previos.

Para la evaluación numérica se utilizó la técnica de la matriz de error ó confusión que se presenta en la tabla XII. Para esta matriz no se tomó en consideración la clase agua debido a que lo que se quiere evaluar es la exactitud de la clasificación para las clases relacionadas a litología. En la parte inferior de la tabla XII se presentan los resultados

obtenidos de porcentaje correcto (Po) e índice kappa (κ) que fueron de 79.01% y 0.773 respectivamente. Las clases en las que hubo más error fueron la clase Tmr1 que se confundió con la clase Tmc; la clase Qal3 que fue confundida con las clases PQcs, Pzml (se infiere que esta confusión es debido a que Qal3 es generado a partir de Pzml), Kg2, Td y Qvt y la clase BD (barniz del desierto) que tomó el lugar que correspondía a las clases Tmr y Qal2. Las clases que mejor fueron clasificadas son la clase Qtr, Playa con vegetación y Tpa pues los errores fueron mínimos. A pesar de haber tenido problemas de confusión con algunas clases los resultados mostrados en la tabla XII demuestran que el mapa obtenido de la clasificación supervisada es de buena calidad.

En la tabla XIII se presenta una matriz de error en la que se incluye la clase agua. Los resultados obtenidos incluyendo esta clase es de 85.15 % de clasificación correcta y el índice kappa es de 0.831. En la clase agua no hubo ningún problema de confusión, es decir, todos los puntos que cayeron en la clase agua fueron clasificados correctamente. Por esta razón los porcentajes de clasificación correcta y el índice kappa aumentaron considerablemente.

Tabla XIII. Matriz de error con datos de clasificación supervisada con respecto a todas las fuentes de información disponibles. Imagen para ser evaluada

	Fzm1	Km2	Km3	Kg1	Kg2	Tma	Td	Tb	Tv	Tuc	Tun	Tun3	Tjr	Tjs	Tpa	PQs	Qb	Qd1	Qd2	Qd3	Qr	BD	Qtr	Qtr	Qtr	Agua	TOTAL	Ev
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0585
m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0245
á	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0079
g	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0245
d	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
r	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
e	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
Qar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
BD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
Qtr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
Qtr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0586
TOTAL	109	40	14	100	127	19	51	84	101	40	116	30	12	232	4	41	114	1	19	66	28	13	10	5	42	2	588	0.2925
Ev	0.0545	0.02	0.007	0.05	0.0635	0.0095	0.0555	0.042	0.0595	0.02	0.085	0.015	0.006	0.116	0.002	0.0265	0.057	0.0005	0.0095	0.033	0.0325	0.0065	0.0065	0.0015	0.024	0.021	0.0215	0.0215

Total = 2000 puntos
 Total diagonal = 1703 $P_0 = 0.852$
 $P_e = 0.124$
 $K = P_0 - P_e/P_e = 0.831$

IV.8 Discusión.

En este trabajo se emplearon cinco técnicas de procesamiento de imagen (combinación de banda, componentes principales, cociente de bandas, clasificación supervisada y no supervisada) para extraer rasgos relacionados con la litología de la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga a partir de percepción remota. Estas técnicas ya han sido utilizadas por diversos autores (Sultan et al., 1987; Cendrero et al., 1990; Stock y Commenetz, 1992; Knick et al., 1997) estableciendo diferencias litológicas por el contenido mineralógico y además distinguiendo roca alterada de roca sin alteración. Los resultados obtenidos en cada uno de estos trabajos se han integrado para obtener mapas temáticos como una base cartográfica confiable.

La técnica de la combinación de bandas fue utilizada bajo sus dos modalidades: estadístico y empírico. Chávez et al. (1982) desarrolló el método estadístico para encontrar la combinación de bandas óptima (aquella que muestre la mayor información) y Yésou et al. (1993) compara el método empírico con el método estadístico y concluye que el método empírico es la modalidad más adecuada. Con los resultados obtenidos en este trabajo se observó que el método empírico fue más eficiente que el estadístico ya que las combinaciones TM742 y TM574 (figura 22 y 23) obtenidas por el método empírico permitieron obtener una buena percepción de las diferentes unidades litológicas, en cambio con el método estadístico sólo una de las tres primeras combinaciones sugeridas TM751 (figura 25) funcionó pero las otras dos (TM357 y TM135) no permitieron visualizar claramente diferencias litológicas en la zona de estudio. Además con el método estadístico las combinaciones TM742 y TM574 que visualmente discriminan bien las diferencias

litológicas ocupan los rangos 17 y 4, por lo que se correría el riesgo de ignorar estas combinaciones. Por las razones antes expuestas se deduce que el método estadístico debe ser tomado con cautela y se confirman las conclusiones de Yésou et al. (1993).

Como se presentó en los resultados las combinaciones TM742 y TM574 (figuras 22 y 23) presentan resultados similares, la diferencia es el color que predomina en las dos imagenes (verde y rojo respectivamente) por lo que se infiere que en ambas combinaciones la banda 4 ejerce una gran influencia desplegando estas coloraciones. En la literatura se ha descrito a la banda 4 como una banda indicadora de vegetación y humedad del suelo (Campbell, 1996; Sabins, 1997). En la zona de estudio las coloraciones más intensa de azul o verde (figuras 22 y 23) se presenta en las zonas con mayor predominio de vegetación como es el caso del estero de Bahía de San Luis Gonzaga en donde se observan zonas de vegetación halófila como salicornia. En estas imagenes también se puede apreciar que hay diferentes coloraciones para una misma unidad de roca como es el caso de las unidades Tpr y Tb. En las etapas de campo se observó que algunas zonas de las unidad Tpr muestran intemperismo más intenso provocando cambios texturales y de coloración en la roca (lajeamiento y predominancia de colores rojizos ó blanquesinos) o bien erosionando completamente las unidades superiores (soldadas) y dejando al descubierto las unidades menos soldadas. Estos cambios debidos al intemperismo en la imagen presentan coloraciones que van desde el verde oscuro (toba color rojo oscuro y brechada) con algunos tintes amarillos (toba poco soldada y de color crema) y morados (toba soldada con poco intemperismo) en la combinación TM742 y coloraciones que varían desde el azul marino (toba rojiza y brechada) hasta colores amarillos y crema (toba poco soldada y toba con poco intemperismo respectivamente) en la combinación TM574 por lo que se deduce

que el cambio de coloraciones en estas combinaciones está en función de los diferentes grados de intemperismo o del grado de soldamiento de la unidad Tpr. La unidad Tb presenta un comportamiento similar al expuesto anteriormente; en este caso los cambios de tonalidad se pueden relacionar a cambios de coloración en la roca debido al intemperismo y otro factor importante puede ser la variación en composición química ya que en unas zonas están aflorando flujos de lava andesítica y en otras afloran flujos de lava dacítica.

En la técnica de componentes principales se utilizaron dos métodos (estándar y selectivo) ya que Drury (1987), Vincent (1997) y Sabins (1997) señalan que la técnica estándar de componentes principales es de gran utilidad para resaltar pequeños rasgos que no son visibles fácilmente en una combinación de bandas. Sin embargo Chávez y Kwarteng (1989) proponen que el método selectivo de componentes principales es mejor que el método estándar ya que en éste último método se corre el riesgo de que haya información de utilidad que quede relegada a las últimas componentes (CP5 y CP6) y que por esta razón al momento de realizar una combinación de color se podría dificultar la interpretación. Los resultados obtenidos en este trabajo con ambos métodos presenta información útil analizando los componentes por separado (figuras 28, 29, 30, 31 y 32). Por otra parte, en los dos métodos se generaron algunas imágenes en las cuales es difícil extraer información porque no presentan contrastes como por ejemplo en las componentes CP5 y CP6 (figura 30) del método estándar y del método selectivo CP2 del par de bandas TM2 y 4 (figura 31).

En el método estándar CP2 resalta en color blanco a Km2, algunas partes de Tmc y los cuellos volcánicos de Cerro Potrero y Volcán Prieto por lo que parece estar indicando presencia de arcillas en las unidades Tps, en la base de Tpr (toba no soldada) y en los

conductos de algunos edificios volcánicos y carbonatos en la unidad Km2: éstos componentes han sido reportados en la literatura (Gastil et al., 1975; Phillis, 1993; Martín-Barajas et al., 1997; Aparicio-Ceja, 1999). Los mayores contrastes en el método estándar se presentan en CP3 y CP4 (figura 29). Con base a la mineralogía reportada en el área (tabla VI), al parecer CP3 está distinguiendo con valores altos (color blanco) las rocas en cuya composición hay presencia de olivino o piroxenos (Tb, Tpr y Tpa) y CP4 parece resaltar (color blanco) zonas con mayor humedad ya que en el trabajo de campo se pudo observar que las zonas de playa con vegetación y los depósitos de sal tienen en común el factor humedad, otra zona en la que se puede observar la influencia de humedad es en una laguna efímera ubicada en Punta Bufeo.

En el método selectivo la primera componente obtenida de cada par de bandas utilizado es muy similar a la primera componente del método estándar y en ella se está mapeando las similitudes entre ambas bandas. CP2 es de gran interés porque además de marcar las diferencias entre el par de bandas utilizado resaltan cosas diferentes en función del par de bandas empleado. CP2 del par TM 1 y 2 (figura 32) está marcando diferencias de coloración en la roca y estas diferencias también son notorias en la técnica de combinación de bandas (figura 22, 23 y 25). Las diferencias de coloración son debidas a la desigualdad en la cantidad de óxidos de hierro y minerales opacos entre las diferentes unidades litológicas; este resultado se puede comparar con la imagen cociente de bandas 3/1 (figura 34) donde las zonas con más altos valores (blanco brillante) son equivalentes a las zonas más oscuras de CP2 marcando con ello zonas con un aumento en el contenido de óxidos de hierro. Las segundas componentes obtenidas de los pares TM 2 y 7, TM 4 y 7 y TM 5 y 7 (figuras 31 y 32) presentan mayor contraste que el CP2 mencionado

anteriormente. Prácticamente CP2 de los pares TM4 y 7 y TM2 y 7 son iguales, la diferencia entre ambas es que CP2 del par TM2 y 7 tiene un contraste más ténue. En estos dos pares la banda 7 es la que está contribuyendo a la discriminación litológica pues es la que se encuentra en el rango de mayor absorción de los iones hidróxidos (Rowan et al., 1974; 1977; Sabins, 1997; Vincent, 1997) mientras que las bandas 2 y 4 no son usadas como índices para diferenciar litología. En ambas CP2 se logra establecer una diferenciación entre las unidades Tmc, Tmr y Tpr en la parte superior de la imagen; en la parte inferior de la imagen también es posible establecer diferencias entre los dos tipos de roca granítica (Kg1 color claro y Kg2 color más oscuro). También se señala claramente el cinturón de metasedimento Km2 (mármol). En CP2 del par TM 5 y 7 (figura 32) las diferencias que se contrastan se observan entre las unidades Kg1 y Kg2 (parte inferior) y otro contraste importante es el de aluvión con barniz del desierto (color más oscuro) con respecto al aluvión circundante (parte superior de la imagen), esta diferencia la está marcando la banda 5 ya que en las componentes mencionadas anteriormente no fue observado este cambio a pesar de tener como factor común la banda 7.

Al realizar imágenes en falso color con los componentes obtenidos en ambos métodos (CP123 en rojo, verde y azul; CP2 de los pares TM 5 y 7, TM4 y 7 y TM 2 y 7 en rojo, verde y azul) se observa que la imagen generada con el método selectivo proporciona mayor información que la imagen obtenida con el método estándar (figura 33). Ambos métodos (estándar y selectivo) funcionan si el análisis es realizado sobre componentes individuales pero en el momento de combinar los componentes en falso color, el método selectivo resulta ser más eficaz (*c.f.* Chávez y Kwarteng, 1989).

La técnica de cociente de bandas ha sido utilizada con la finalidad de diferenciar rocas alteradas de rocas sin alteración y como método de discriminación litológica (Drury, 1987 ; Sultan et al., 1987 ; Hernández-Alvarez, 1995 ; Vincent, 1997 ; Sabins, 1997).

Adams (1975) y Hunt (1977) sugieren trabajar con el cociente 5/7 ya que en la banda 7 se presenta la mayor absorción de los iones hidroxidos y de otras fases minerales como los piroxenos y carbonatos, mientras que la banda 5 está fuera del rango de absorción de estos minerales. Con base a los resultados expuestos con el cociente 5/7 (figura 34) y apoyandose en las características mineralógicas de las rocas, la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga puede dividirse en dos partes: a) zonas con altos valores en la relación 5/7 que refleja altos contenidos de arcillas y/o carbonatos como en los conductos volcánicos y en Km2 respectivamente hacia la parte central de la imagen b) zonas con valores intermedios y bajos en la relación 5/7 que indican ausencia de arcillas y/o carbonatos en el resto de la imagen.

La relación de las bandas 3 y 1 da un amplio rango de valores de reflectancia porque la banda 1 (0.42 a 0.55 μm) está localizada en la región del espectro donde existe una intensa absorción de los materiales que presentan fierro (Hunt, 1977). La hematita, goetita y otros minerales opacos son absorbidos en la banda 1 pero no en la banda 3 y por esta razón en las zonas donde se presenten estos materiales la relación 3/1 tendrá valores altos (Sultan et al., 1987). Con base a la relación 3/1 (figura 34) la zona de estudio puede ser dividida en dos grandes grupos: a) zonas con valores altos en la relación 3/1 y con cantidades de opacos que varían de moderada a alta como son el caso de las unidades Tsv, Td y en los cuellos volcánicos de Cerro Potrero y Volcán Prieto con una distribución

restringida en toda la imagen; b) zonas con bajos valores en la relación $3/1$ y con escaso o nulo contenido de minerales opacos como en las unidades Tmc y todos los aluviones. En la parte superior de la imagen con aluviones con barniz del desierto no se aprecian valores altos en la relación $3/1$ debido a que la capa de barniz del desierto está constituida por óxidos de manganeso y esta relación sólo resalta óxidos de fierro. Sin embargo, se logra observar diferencias entre el aluvión con barniz del desierto y el aluvión circundante.

Guinness et al. (1987) y Sultan et al. (1987) han sugerido que la relación $5/4 \times 3/4$ es útil para discriminar rocas félsicas, intermedias y máficas debido al contenido de aluminosilicatos con fierro (piroxeno, hornblenda) que se presentan en las rocas y a que estos contenidos ferrosos son absorbidos en la región $1\mu\text{m}$ (banda4). Sin embargo, en este trabajo se observó que la relación $5/4 \times 3/4$ (figura 35) permite una discriminación en base al contenido de sílice por lo que es posible dividir a las rocas de la zona de estudio en dos grandes grupos: a) valores altos en la relación $5/4 \times 3/4$ asociados con valores altos a intermedios en sílice como en la unidad Km3, Tmc, Kg1 y Kg2 y un poco en el conducto volcánico de Cerro Potrero, principalmente al sur de la zona de estudio; b) valores intermedios y bajos en la relación $5/4 \times 3/4$ asociados con unidades que presentan poco o nulo contenido en minerales de la familia del cuarzo, como Tpr, Tpa y Tb, principalmente en la mitad superior de la imagen.

En algunos trabajos en donde intervienen la técnica de cociente de bandas (Sultan et al., 1987; Chávez y Kwarteng, 1989; Vincent, 1997; Sabins, 1997; Harris et al., 1998) se ha utilizado la combinación de cocientes para diferenciar las rocas con mayor alteración, normalmente relacionados a proyectos mineros, más que como un discriminador litológico.

En la zona de estudio no han sido reportadas zonas de alteración grandes (Fletcher et al., 1997; Aparicio-Ceja, 1999), sin embargo, con los cocientes se obtuvo algo de información relacionada con la mineralogía de la zona y el intemperismo además se generó una imagen en falso color (figura 35) que al parecer está señalando en color verde las unidades litológicas que contienen mayor contenido de óxidos de fierro (Tsv, Tb, Tpr y Tpa) debido al intemperismo de la zona. Esta coloración es resaltada por el cociente 3/1 que está actuando en el canal verde. Otra observación sobre esta imagen es que destacan en color rojo brillante los depósitos de sal, la laguna costera en la barra de Alfonsinas con vegetación halófila y algunas lagunas efímeras (parte inferior de la imagen); estas diferentes clases tienen como común denominador el aumento de humedad por lo que con el color rojo brillante se están destacando zonas con mayor vegetación y humedad del suelo. Es posible notar que con esta combinación se marcan buenos contrastes entre algunas unidades litológicas como en el caso de las unidades Kg1 y Kg2 (tonalita y granodiorita) en donde se presentan casi los mismos minerales pero varían en cantidad, además en la tonalita hay presencia de biotita mientras que en la granodiorita no se presenta este mineral. Esta división entre las dos unidades mencionadas anteriormente ya había sido señalada por Gastil et al. (1975).

La clasificación supervisada mejorada presenta una buena separación de las diversas clases litológicas que han sido propuestas por la literatura (Gastil, 1975; Martín-Barajas et al., 1995; 1997; Nagy, 1997; Fletcher, 1997) y la observación de campo (separación de aluviones), es decir, en la salida de la clasificación supervisada se perfilaron mejor las clases a diferencia de la clasificación no supervisada en donde hubo mucha mezcla de clases (para comparar ver figura 26a, 27a y 36). Por esta razón hubo la

necesidad de utilizar un mayor número de polígonos en la clasificación no supervisada a diferencia de la supervisada (25 y 19 para la no supervisada con 80 y 40 clases respectivamente y 14 para la supervisada) para realizar la reclasificación de la imagen auxiliado de una segmentación espacial. Las fronteras entre clases presentan mayor detalle en la clasificación supervisada que en la no supervisada (aún en comparación con la clasificación no supervisada con 80 clases). Otra comparación a favor de la clasificación supervisada es que en ésta se logró diferenciar 26 clases de litología mientras que en la no supervisada se perfilaron 20 clases litológicas. Existen diversos autores que mencionan la ventaja de utilizar la clasificación no supervisada (Campbell, 1996; Vincent, 1997; Sabins, 1997) ya que en ella no se requiere el conocimiento de la zona de estudio. Sin embargo en este trabajo hubo problemas con esta técnica derivados quizá por el número de clases (diversos tipos litológicos) que se estuvo manejando. En algunos trabajos donde se ha utilizado la clasificación no supervisada con éxito (Torres-Rodríguez, 1994; Ribeiro-de-Almeida et al., 1995; Vincent, 1997; Sabins, 1997) el número de clases utilizado es relativamente pequeño (15 clases ó menos) en comparación con las clases que se han manejado en este estudio. Por la razón antes expuesta se concluye que cuando el número de clases es superior a 15 y se pueda tener acceso al conocimiento de la zona, es mejor utilizar la clasificación supervisada, que si bien también presenta problemas derivados del uso de un gran número de clases, es más fácil poder controlar la situación debido al conocimiento que se tiene de la zona de estudio.

En cuanto a las firmas espectrales generadas en este trabajo se observa que en general todas las clases (figura 37, 38 y 39) presentan valores altos en la banda 5 y la banda 2 maneja los valores menores. Ahora bien, se observa que las firmas espectrales de

todas las rocas presentan una forma similar con excepción de la clase perteneciente a depósitos de sal. La limitación en la forma de la firma espectral es debido a las características intrínsecas del sensor TM que no presenta un continuo de respuesta en el espectro (Hinojosa-Corona, comunicación personal). Las firmas obtenidas en este trabajo no pudieron ser comparadas con ninguna librería espectral, ya que en este trabajo se manejaron números digitales (sin unidades) y en las librerías espectrales se utilizan valores de reflectancia (en porcentaje). Sin embargo a pesar de la similitud en la forma de la firma espectral para todas las clases, existen diferencias de brillo entre todas ellas y esto es lo que permitió hacer la discriminación litológica en la zona de estudio.

Sin embargo, con las firmas espectrales se estableció una comparación entre los valores de brillo de los diferentes aluviones (Qal1, Qal2, Qal3 y Qal4) con respecto a los valores de brillo que presentan las rocas de origen de estos aluviones (figuras 40, 41 y 42). Para los casos de Qal1 y Qal4 (figura 40) se observa como sus valores de brillo son muy similares a los presentados por las unidades Kg1 y Kg2 por lo que se infiere que la componente que predomina en estos aluviones es la roca intrusiva (tonalita, granodiorita). Para el caso de Qal2 (figura 41) los valores de brillo que presenta son muy similares a los de las unidades Tmr, Tpr y Tmrl lo que sugiere que los componentes predominantes en este aluvión son de estas rocas volcánicas, lo cual es bastante probable ya que la mitad superior de la zona de estudio está dominada por estas unidades volcánicas. En Qal3 (figura 42) los valores de brillo están muy cercanos a los mostrados por la unidad Km3 (cuarcita) lo que sugiere que el principal constituyente de Qal3 es la unidad Km3. Sin embargo, la unidad Km3 es pequeña en comparación con la unidad Pzm1 que se esperaría que fuera el principal constituyente de Qal3, por lo que se infiere que los valores de brillo de Qal3

están controlados por la cantidad de cuarzo que se presenta en este aluvión que como se observa en la tabla 6 es abundante en Qal3. La relación entre los aluviones y sus rocas de origen también pueden ser visualizados con facilidad interpretando los compuestos de falso color presentados en la figuras 22, 23 y 25; en particular el aluvión Qal3 con Pzml y Km3 en coloraciones oscuras, contrastando con el aluvión Qal1 con una coloración más clara, haciendo evidente el contacto entre aluviones en las cercanías de la localidad San Judas enfrente a la isla El Huerfanito.

Para la evaluación del mapa se utilizaron puntos aleatorios de revisión debido a que la base cartográfica previa de la zona de estudio (Gastil et al., 1975; Martín-Barajas et al., 1995; Nagy, 1997; Fletcher et al., 1997) no estaba digitalizada completamente, únicamente se tenían digitalizados los mapas geológicos de Cetenal en escala 1:50.000 (H11B77 "Puertecitos", H11B87 "Cerro el Huerfanito", H11B88 "El Huerfanito", H11D18 "San Luis Gonzaga") además todos los mapas previos están a escalas diferentes por lo que se decidió realizar la evaluación de manera puntual para resolver este problema y también para poder incluir las observaciones realizadas en campo (puntuales). La técnica de revisión aleatoria ha sido discutida por Stehman (1992) en donde plantea que los diseños sistemáticos de evaluación son mejores que los diseños aleatorios, siempre y cuando se cumplan con ciertos requerimientos como el manejar la misma área de trabajo en ambos mapas (evaluado y de referencia), la misma escala y el etiquetado deber ser equivalente. Estas características no podían ser cumplidas en este trabajo ya que todos los trabajos previos estudian sólo una parte de toda la zona que se abarcó en este estudio, además el etiquetado de las distintas clases varían en todos los mapas. En la tabla XIV se muestra el etiquetado final que se obtuvo en este trabajo y los etiquetados utilizados

Tabla XIV. Comparación del etiquetado de clases utilizado en este trabajo con respecto a la nomenclatura utilizada en otros trabajos realizados sobre la zona de estudio.

Cetenal, 1977; 1979; 1981	Phillips, 1993	Martín-Barajas et al., 1995	Fletcher et al., 1997	Noyola-Medrano, 1999
Eo (eólico)	-	-	Qal (aluvión)	Playa con vegetación
-	-	-	-	Qh (depósito de sal)
-	-	-	Qtr (travertino)	Qtr (travertino)
Cg (conglomerado)	-	-	Qvt (tefra)	Qvt (tefra)
Aluvial	-	Qal (aluvión)	Qal (aluvión)	Qal1 (aluvión1)
Aluvial	-	Qal (aluvión)	Qal (aluvión)	Qal2 (aluvión2)
Aluvial	-	-	-	Qal3 (aluvión 3)
Eo (eólico)	-	Qal (aluvión)	Qal (aluvión)	Qal4 (aluvión 4)
Cg (conglomerado)	-	Qal (aluvión)	-	BD (aluvión con barniz del desierto)
Cg (conglomerado)	-	PQcs (sedimento no marino)	PQcs (sedimento no marino)	PQcs (sedimento no marino)
B (basalto)	-	Tpa (andesita volcán Prieto)	-	Tpa (andesita volcán Prieto)
Igca (ígneas extrusiva ácida)	-	Tpr (ignimbrita)	-	Tpr (ignimbrita)
Cg (conglomerado)	-	Tms (sedimento marino)	-	Tps (sedimento marino)
R (riolita)	-	Tmru (lava riolítica)	-	Tmru (lava riolítica)
Tr (toba riolítica)	-	Tmc (toba el Canelo)	-	Tmc (toba el Canelo)
R (riolita)	-	Tmrl (lava riolítica)	-	Tmrl (lava riolítica)
Tr (toba riolítica)	-	Tmr (domos riolíticas e ignimbritas)	-	Tmr (domos riolíticas e ignimbritas)
A (andesita)	-	-	Td (complejo dacítico)	Td (complejo dacítico)
B (basalto)	-	-	Tb (andesita Potrero)	Tb (andesita Potrero)
-	-	-	Tsv (secuencia volcánico-clástica)	Tsv (secuencia volcánico-clástica)
B (basalto)	-	Tma (andesita y dacita)	-	Tma (andesita y dacita)
Igia (ígneas intrusiva ácida)	Intrusivo granítico	-	Kg (basamento granítico)	Kg2 (granodiorita)
Igia (ígneas intrusiva ácida)	Intrusivo granítico	-	Kg (basamento granítico)	Kg1 (tonalita)
Esq-Gn (esquistos - gneis)	Subunidad 3 La Olvidada	-	-	Km3 (metasedimento 3)
Esq-Gn (esquistos - gneis)	Subunidad 1 La Olvidada	-	-	Km2 (metasedimento 2)
Cmet (complejo metamórfico)	Formaciones: Zamora, El Mármol, El Indio, El Volcán y Subunidad 2 de La Olvidada	-	-	Pzml (metasedimento 1)

por otros autores para la zona de estudio. Como se puede apreciar en esta tabla todas las clases manejadas en este trabajo no son empleadas en su totalidad por otros autores (Cetenal, 1977; 1979; 1981; Martín-Barajas et al., 1995; Fletcher et al., 1997). A pesar de

que Cetenal (1977; 1979; 1981) tiene el cubrimiento (mapeo) total de la zona de estudio, existen diferencias en el detalle del mapeo que se pueden vislumbrar en la tabla XIV ya que Cetenal maneja 20 clases (sin incluir el agua) y en este trabajo se están presentando 26 clases sin incluir el agua. Como se vio en los resultados de la matriz de error hubo problemas con algunas clases que presentaron errores grandes pero estas clases tienen en común que son relativamente pequeñas y por esta razón no afectaron demasiado al resultado final de la evaluación. Los resultados arrojados durante la evaluación (79.01 % de confiabilidad y un índice kappa de 0.773) son comparados con los resultados obtenidos por otros trabajos similares (Card, 1982; Cendrero, 1990; Fisher, 1994; Campbell 1996) cuyas variaciones en el porcentaje de confiabilidad van de 70% a 89% lo que permite considerar que los resultados obtenidos en este trabajo son buenos.

Con base a los resultados y discusiones expuestos anteriormente se concluye que si se tiene un buen conocimiento de la zona y el material cartográfico de referencia es suficiente, lo recomendable es utilizar la técnica de clasificación supervisada ya que se logra diferenciar más convenientemente las distintas clases temáticas. Ahora bien, para obtener una mayor discriminación litológica la técnica selectiva de componentes principales es la más adecuada y/o en su defecto una combinación de bandas mediante el método empírico. Finalmente el resultado obtenido con la matriz de error (porcentaje correcto = 79.1 % y $\kappa = 0.773$) permite utilizar el mapa realizado en este trabajo como una base cartográfica bastante confiable para futuros trabajos sobre la franja costera entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga.

V.- CONCLUSIONES.

La franja costera comprendida entre Puertecitos y Bahía de San Luis Gonzaga es una vasta extensión (~3000 km²) que presenta una gran diversidad de rocas. El nivel de clasificación litológica obtenida en este trabajo incorporó a la mayoría de las unidades de roca descritas por otros autores y las observaciones generadas en las etapas de campo. Se identificaron de manera efectiva las principales unidades litológicas, particularmente aquellas que cubren áreas extensas, comprobándose de esta manera la factibilidad en la aplicación de las técnicas de la percepción remota para la discriminación litológica a nivel regional. El análisis fotointerpretativo de las imágenes obtenidas mediante las técnicas de procesamiento digital permitieron el reconocimiento de unidades litológicas relativamente pequeñas [Tmrl (unidad inferior de toba riolítica), Tma (andesita), Qtr (depósito de travertino), BD (aluvión con barniz del desierto)] con relación al área total de la zona de estudio. Los resultados obtenidos en este estudio aportan un mapeo litológico más detallado en comparación con trabajos realizados anteriormente. En resumen se alcanzaron las siguientes metas:

- a) Con la técnica de combinación de bandas se logró establecer que las diferencias de coloración dentro de una misma unidad de roca se deben a cambios mineralógicos, diferencias en el grado de intemperismo y/o distintos grados de soldamiento en la roca.
- b) Con el análisis de componentes principales se establecieron diferencias entre las unidades litológicas con base a constituyentes índices (carbonatos, arcillas,

piroxenos) y/o condiciones de humedad. Además se logró hacer discriminaciones mineralógicas sutiles, por ejemplo, entre las diferentes unidades de toba (Tmr, Tmr1, Tmru y Tpr) logrando separar eficientemente estas unidades de roca. Los mejores resultados de esta técnica son obtenidos con el método selectivo.

- c) La técnica de cociente de bandas logra discriminar las unidades litológicas que cubren las áreas más extensas. Además se obtuvo información relacionada a la mineralogía y el intemperismo de las distintas unidades de roca.
- d) Con la clasificación no supervisada se logró una buena diferenciación de algunas unidades litológicas como Pzm1, Tmc, Td, y distintos tipos de aluviones, pero hubo una gran confusión de clases. Con la reclasificación de las imágenes (40 y 80 clases) obtenidas con la técnica no supervisada se obtuvieron 21 clases. El detalle de los contactos litológicos (fronteras entre clases) obtenido en la clasificación con 80 clases es mejor que el obtenido con 40 clases. Esta técnica es buena para tener una primera aproximación en la diferenciación de clases.
- e) Con la clasificación supervisada mejorada se establecieron 26 clases de roca para la zona de estudio, lográndose con ésto aumentar 7 clases que no se habían considerado en los mapas de Cetenal (1977; 1979; 1981). Las clases obtenidas se repartieron en tres grupos: 1) roca ígnea, constituida por trece clases que incluyen tanto roca intrusiva como volcánica y abarca la mayor proporción en toda la zona de estudio; 2) sedimento, incluye diez clases de las cuales seis están relacionadas a diferentes tipos de aluviones y 3) roca metamórfica, incluye tres clases y es el grupo más restringido en el área de estudio.

- f) Con la clasificación supervisada mejorada se obtuvieron mejores resultados que con el método no supervisado y es en base a esta clasificación que se logró una aproximación más precisa de la distribución espacial de las diferentes unidades litológicas de la franja costera (mapas Anexo 7). Observando una mejora considerable en el nivel de conocimiento de la región en relación al proporcionado por el material cartográfico de Cetenal (1977; 1979; 1981) y Gastil et al. (1975) ya que se cubrieron zonas en las cuales el acceso es limitado y por esta razón no hay estudios detallados.
- f) El análisis de las firmas espectrales permitió establecer que las zonas con barniz del desierto presentan valores de brillo más bajos en comparación con las zonas que no presentan barniz del desierto. La firma de la clase "sal" es diferente con respecto al resto de las firmas debido a que se trata de un mineral y que está saturado en agua. Las firmas espectrales de los diferentes tipos de aluvión (Qa11, Qa12, Qa13 y Qa14) ayudaron a establecer las principales diferencias entre ellos.
- g) La evaluación del mapa obtenido mediante las técnicas de la percepción remota cumple con los esquemas de evaluación aplicados en otros trabajos y permite recomendar el uso de los mapas generados (escalas 1:100,000 y 1:250,000) en estudios posteriores relacionados a la zona de estudio.

LITERATURA CITADA.

- Abrams, M.J. 1980. "Lithologic Mapping". En: Siegal, B.S., and Gillespie, A.R. (eds). Remote Sensing in Geology. John Wiley & Sons. New York. 381-418 p.
- Adams, J.B. 1975. "Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of piroxenes and other rock-forming minerals". En: Karr, D., Jr., ed. Infrared and raman spectroscopy of lunar and terrestrial mineral : Nueva York, Academic Press. 91-116 p.
- Aparicio-Ceja, E. 1999. "Caracterización mineralógica y química de la alteración de baja temperatura de rocas volcánicas del Neógeno en la Provincia Volcánica de Puertecitos, NE de Baja California".. Tesis de maestría. Ensenada, B.C. CICESE. 129 pp.
- Aronoff, S. 1982. "Classification accuracy : A user approach". Photogrammetric Engineering & Remote sensing. 48(8) : 1299-1307 p.
- Ball, G., and Hall, D., 1967. "A clustering technique for summarizing multivariate data". Behavioral Science. 12: 153-155 p.
- Bowers, T. L., and Rowan, L.C. 1996. "Remote mineralogic and lithologic mapping of the Ice River Alkaline Complex, British Columbia, Canada, using AVIRIS data." Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62(12): 1379-1385 p.

- Buch, I.P. 1984. "Upper Permian (?) and Lower Triassic metasedimentary rocks, northeastern Baja California, Mexico". En: Frizell, V.A.Jr. (ed). Geology of the Baja California Peninsula. Pacific Section S.E.P.M. 39 : 31-36 p.
- Buch, I.P., and Delattre, M.P. 1993. "Permian and Lower Triassic stratigraphy along the 30th parallel, eastern Baja California Norte, Mexico". En: Gastil, R.G., and Miller, R.H., (eds). The prebatholithic stratigraphy of Peninsular California. Geological Society of America. Special Paper 279 : 77-90 p.
- Campbell, J.B. 1996. "Introduction to remote sensing". Guilford Press. New York. 622 pp.
- Card, D. H. 1982. "Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy." Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 48(3): 431-439 p.
- Cendrero, A., Sánchez, J., Antolín, C., Arnal, S., Díaz de Terán, J.R., Francés, E., Martínez, V., Moñino, M., Nieto, M., Nogales, I., Pérez, E., Rios, C., Robles, F., Romero A., and Suárez C. 1990. "Geoscientific maps for planning in semi-arid regions: Valencia and Gran Canaria, Spain." Engineering Geology 29: 291-319 p.
- CETENAL. 1977. "H11B87 Cerro El Huerfanito". México.
- CETENAL. 1977. "H11B88 El Huerfanito". México.
- CETENAL. 1977. "H11B67 Bahía Santa María". México.
- CETENAL. 1977. "H11B87 Cerro El Huerfanito". México.
- CETENAL. 1977. "H11D28 Jaraguay". México.
- CETENAL. 1977. "H11D29 Punta Final". México.
- CETENAL. 1977. "H11B77 Puertecitos". México.

- CETENAL. 1979. "H11B67 Bahía San María". México.
- CETENAL. 1979. "H11B87 Cerro El Huerfanito". México.
- CETENAL. 1979. "H11B77 Puertecitos". México.
- CETENAL. 1981. "H11B88 El "Huerfanito". México.
- Chavez, P.S.J., Berlin, G.L., and Bowell, J.A. 1982. "Statistical method for selecting Landsat MSS ratios". *J. Appl. Photogramm. Eng.* 8(1) : 23-30 p.
- Chávez, P. S. J., and Kwarteng, A.Y. 1989. "Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 55(3): 339-348 p.
- Clark, S. P. J. 1957. "Absorption spectra of some silicates in the visible and near infrared." *American Mineralogist* 42: 732-742 p.
- Congalton, R. G. 1988. "Using spatial autocorrelation analysis to explore the errors in maps generated from remotely sensed data." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54(5): 587-592 p.
- Coppin, P. R., and Baur, M.E. 1994. "Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features." *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(4): 918-927 p.
- Davis, J. C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. New York, John Wiley & Sons. 646 pp.
- Delattre, M. 1984. "Permian miogeoclinal strata at El Volcan, Baja California, Mexico". En: Frizzell, V.A.Jr. (ed). *Geology of the Baja California Peninsula*. Los Angeles, The Pacific Section S.E.P.M. 39: 23-29 p.

- Dokka, R. K., and Merriam, R.H. 1982. "Late Cenozoic extension of northeastern Baja California, Mexico." *Geological Society of America Bulletin* 93: 371-378 p.
- Dorn, R. I. 1991. "Rock Varnish." *American Scientist* 79: 542-553 p.
- Drury, S.A. 1987. "Image interpretation in geology". Allen Q. Unwin. London. 243 pp.
- Duda, R.O., and Hart, P.E., 1973. "Pattern classification and scene analysis". Wiley, New York, 482 pp.
- Ekstrand, S. 1996. "Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62(2): 151-161 p.
- Faneros, G., and Hausback, B. 1998. "Explosive eruptions and recent tephra from de San Luis Island in the northern Gulf of California, Mexico". *Cordilleran Section Geological Society of America*. 30(5) : 138 p.
- Fisher, P. F. 1994. "Visualization for the reliability in classified remotely sensed images". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60(7): 905-910 p.
- Fletcher, J., Martín-Barajas, A., y Skerl, L. 1997. "Estudio geológico estructural de la zona San Luis Gonzaga, Baja California. Informe ejecutivo. Residencia general de Cerro Prieto. Comisión Federal de Electricidad. 24 p.
- Foody, G. M. 1992. "On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58(10): 1459-1460 p.

- Gastil, G.R., Phillips, R.P., and Allison, E.C. 1975. "Reconnaissance geology of the state of Baja California". Geological Society of America. Boulder, Colorado. 170 pp.
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J.E., and Rock, B.N. 1985. "Imaging spectrometry for earth remote sensing." *Science* 228(4704): 1147-1153 p.
- Guinness, E.A., Arvidson, R.E., Dale-Bannister, M.A., Singer, R.B. and Bruckenthal, E.A. 1987. "On the spectral reflectance properties of materials exposed at the Viking landing sites". *Journal of Geophysical Research*. 92 : E575 – E587 p.
- Gupta, R.P. 1991. "Remote sensing geology". Springer-Verlag. Berlin. 356 pp.
- Harris, J. R., Rencz, A.N., Ballantyne, B., and Sheridan, C. 1998. "Mapping altered rocks using Landsat TM and lithochemical data: Sulphurets-Brucejack Lake district, British Columbia, Canada." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64(4): 309-322 p.
- Hernández-Alvarez, F. 1995. "Estudio litológico de la zona de el volcán de Colima". VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Vallarta. 402-413 p.
- Hudson, W. D. 1987. "Correct formulation of the Kappa Coefficient of Agreement." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 53(4): 421-422 p.
- Hunt, G. R. 1977. "Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared." *Geophysics* 42(3): 501-513 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI). 1984. "Síntesis Geográfica de Baja California". 113 pp.

- Jansma, P. E., and Lang, H.R. 1996. "Applications of spectral stratigraphy to Upper Cretaceous and Tertiary rocks in southern Mexico: Tertiary graben control on volcanism." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62(12): 1371-1378 p.
- Klein, A.G., and Isacks, B.L. 1998. "Alpine glacial geomorphological studies in the Central Andes using Landsat thematic mapper images". *Glacial Geology and Geomorphology*, 1998, rp01/1998. <http://ggg.qub.ac.uk/ggg/papers/full/1998/rp011998.htm>
- Knick, S. T., Rotenberry, J.T., and Zarriello, T.J. 1997. "Supervised classification of Landsat Thematic Mapper imagery in a semi-arid Rangeland by nonparametric discriminant analysis". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63(1): 79-86 p.
- Lang, H. R., Adams, S.L., Conel, J.E., McGuffie, B.A., Paylor, E.D., and Walker, R.E. 1987. "Multispectral remote sensing as stratigraphic and structural tool, Wind River Basin and Big Horn Basin areas, Wyoming." *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 71(4): 389-402 p.
- Lunneta, R. S. Congalton, R.G., Fenstermaker, L.K., Jense, J.R., McGwire, K.C. and Tinney, L.R. 1991. "Remote sensing and geographic information system data integration : Error sources and research issues". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57(6) : 677-687 p.
- Markham, B.L., and Baker, J. 1985. "Spectral characterization of the Landsat Thematic Mapper sensors". *Int. J. Remote Sensing*. 6(5) : 697-716 p.

- Martín-Barajas, A., Téllez-Duarte, M., y Rendón-Márquez, G. 1993. "Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia marina de Puertecitos, NE de Baja California. Implicaciones sobre la evolución de la margen occidental de la depresión del golfo". En: Delgado-Argote, L.A., y Martín-Barajas, A. (eds). *Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México*. Ensenada, B.C. CICESE. Monografía 1: 90-114 p.
- Martín-Barajas, A., y Stock, J.M. 1993. "Estratigrafía y petrología de la secuencia volcánica de Puertecitos, noreste de Baja California. Transición de un arco volcánico a rift". En: Delgado-Argote, L.A., y Martín-Barajas, A. (eds). *Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México*. Ensenada, B.C. CICESE. Monografía 1: 66-89 p.
- Martín-Barajas, A., Stock, J.M., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., and López-Martínez, M. 1995. "Arc-rift transition volcanism in the Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, Mexico." *Geological Society of America Bulletin* 107(4): 407-424 p.
- Martín-Barajas, A., Téllez-Duarte, M., and Stock, J.M. 1997. "Pliocene volcanogenic sedimentation along an accommodation zone in northeastern Baja California: The Puertecitos Formation." *Geological Society of America. Special Paper* 318: 1-24 p.
- Martín-Barajas, A., Fletcher, J., López-Martínez, M., Mendoza-Borunda, R. 1999. "Waning Miocene subduction and arc volcanism in Baja California: The San Luis Gonzaga volcanic field." *Geophysics*. En prensa.

- Nagy, E.A. 1997. "Extensional deformation and volcanism within the northern Puertecitos Volcanic Province, Sierra Santa Isabel, Baja California, Mexico". PhD. Thesis. Pasadena, California. 363 p.
- Phillips, J.R. 1984. "Middle Cretaceous metasedimentary rocks of La Olvidada northeastern Baja California, Mexico". En: Frizell, V.A. Jr. (ed). Geology of the Baja California Peninsula. Pacific Section S.E.P.M. 39 : 37-41 p.
- Phillips, J.R. 1993. "Stratigraphy and structural setting of the mid-Cretaceous Olvidada Formation, Baja California Norte, Mexico". En: Gastil, R.G., and Miller, R.H., (eds). The prebatholithic stratigraphy of Peninsular California. Geological Society of America. Special Paper 279 : 97-106 p.
- Potter, R. M., and Rossman, G.R. 1977. "Desert varnish: The importance of clay minerals." Science 196: 1446-1448 p.
- Ribeiro-de Almeida, T. I., Ferreira da Silvo-Filho, W., Siqueira-Sayeg, H., Luis-Fambrini, G., Machado, R., Fragoso-Cesar, A.R.S. 1995. Procesamiento digital y interpretación geológica de imágenes TM-Landsat del área al Este de la mina de Camaquã (límite proterozoico/fanerozoico), estado do Rio Grande do Sul-Brasil. VII Simposio Latinoamericano de Percepcion Remota, Puerto Vallarta. 457-469 p.
- Richards, J.A., Landgrebe, D.A., and Swain, P.H. 1982. "A means for utilizing ancillary information in multispectral classification". Remote Sensing of Environment. 12 : 463-477 p.
- Richards, J. A. 1993. "Remote Sensing Digital Image Analysis". Berlin, Springer Verlag. 281 pp.

- Rivard, B., Petroy, S., and Miller, J. 1991. "The effect of desert varnish on the thermal infrared spectra of weathered rocks." EOS Trans. American Geophys. Union 72(1): 176 p.
- Rivard, B., and Arvidson, R.E. 1992. "Utility of imaging spectrometry for lithologic mapping in Greenland." Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 58(7): 945-949 p.
- Rivard, B., Petroy, S.B., and Miller, J.R. 1993. "Measured effects of desert varnish on the mid-infrared spectra of weathered rocks as an aid to TIMS imagery interpretation." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 31(1): 284-291 p.
- Rowan, L. C., Wetlaufer, P.H., Goetz, A.F.H., Billingsley, F.C., and Stewart, J.H. 1974. "Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images." USGS, Prof. paper. 883: 25 p.
- Rowan, L. C., Goetz, A.F.H., and Ashley, R.P. 1977. "Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images." Geophysics 42(3): 522-535 p.
- Sabins, F. F. 1997. "Remote Sensing: Principles and Applications". New York, W.H. Freeman and Co. 494 pp.
- Secretaría de Desarrollo y Presupuesto. 1980. "H11D18 San Luis Gonzaga". México.
- Sharma, K. M. S. and Sarkar, A. 1998. "A modified contextual classification technique for remote sensing data". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 64(4): 273-380 p.

- Short, N.M., and Blair, R.W. 1986. "Geomorphology from space : A global overview of regional landforms". Washington, D.C., NASA S.P. 717 pp.
- Stehman, S. V. 1992. "Comparison of systematic and random sampling for estimating the accuracy of maps generated from remotely sensed data." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58(9): 1343-1350 p.
- Stock, J. M. 1989. "Sequence and geochronology of Miocene rocks adjacent to the main gulf escarpment: Southern Valle Chico, Baja California Norte, Mexico." *Geofísica Internacional* 28(5): 851-896 p.
- Stock, J. M., Martín-Barajas, A., Suárez-Vidal, F., y Miller, M.M. 1991. "Miocene to Holocene extensional tectonics and volcanic stratigraphy of NE Baja California, Mexico". *Geological excursions in southern California and Mexico*. M. J. Walawender, and Hanan, B.B. San Diego, Ca., Geological Society of America. Guide book for the Annual Meeting: 44-67 p.
- Stock, J. M., and Commenetz, J. 1992. "Use of Landsat-TM data to distinguish among volcanic rock types, Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico." *EOS Trans. American. Geophys. Union* 73(43): 613 p.
- Sultan, M., Arvidson, R.E., Sturchio, N.C., and Guinness, E.A. 1987. "Lithologic mapping in arid regions with Landsat thematic mapper data: Meatiq dome, Egypt." *Geological Society of America Bulletin* 99: 748-762 p.

- Torres-Rodriguez, J. 1994. "Aplicación de sensores remotos (Landsat MSS) para el reconocimiento de unidades geomórficas en la región deltaica del Río Colorado". Posgrado en Oceanografía Costera. Ensenada, B.C., Universidad Autónoma de Baja California: 117 pp.
- Vincent, R. K. 1997. "Fundamentals of geological and environmental remote sensing". New Jersey, Prentice Hall. 370 pp.
- Watson, K., Rowan, L.C., Bowers, T.L., Anton-Pacheco, C., Gumieal, P. and Miller, S.H. 1996. "Lithologic analysis from multispectral thermal infrared data of the alkalic rock complex at Iron Hill, Colorado." *Geophysics* 61(3): 706-721 p.
- Webster, G.D., and Delattre, M.P. 1993. "Permian crinoid columnals from the Zamora Formation near El Volcan, Baja California Norte, Mexico". En: Gastil, R.G., and Miller, R.H., (eds). *The prebatholithic stratigraphy of Peninsular California*. Geological Society of America. Special Paper 279 : 91-95 p.
- Yésou, H., Besnus, Y., and Rolet, J. 1993. "Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery – a contribution to the study of geological structures". *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48(5) : 23-36 p.

Anexo 1.

Factores que causan distorsiones geométricas en las imágenes de satélite.

a) Rotación de la tierra.

Los sensores que utilizan barredores de líneas como el Landsat MSS y TM y el NOAA AVHRR adquieren cuadros de una imagen en tiempos finitos. Durante el tiempo de adquisición del cuadro la tierra gira de oeste a este de modo que algunos puntos ubicados en los bordes de estos cuadros pueden haber sido recorridos hacia el oeste al momento de registrarlos. En consecuencia, si las líneas de la imagen registrada fueran organizadas para desplegarse como se muestra en la figura A1.1, las líneas posteriores podrían estar erróneamente desplazadas hacia el este con relación al terreno que representen.

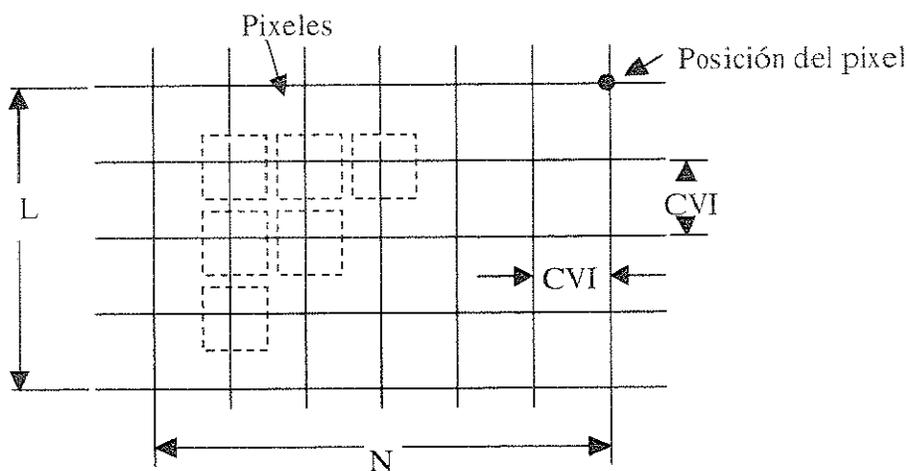


Figura A1.1. Despliegue del arreglo que generalmente se utiliza para almacenar una imagen a partir de datos digitales constituido de píxeles generados por un sensor. También se esquematiza el Campo de Vista Instantáneo (CVI). Tomada y modificada de Richards (1986).

Para dar a los píxeles sus posiciones correctas en comparación con el terreno es necesario recorrer la base de la imagen hacia el oeste con la misma cantidad del

desplazamiento del terreno ocurrido durante la adquisición de la imagen. En esta corrección deben intervenir todas las líneas desplazadas proporcionalmente como se demuestra en la figura A1.2. La cantidad por la cual la imagen ha sido sesgada hacia el oeste en los bordes de los cuadros, depende de las velocidades relativas del satélite y de la tierra y de la longitud de los cuadros que componen a la imagen registrada.

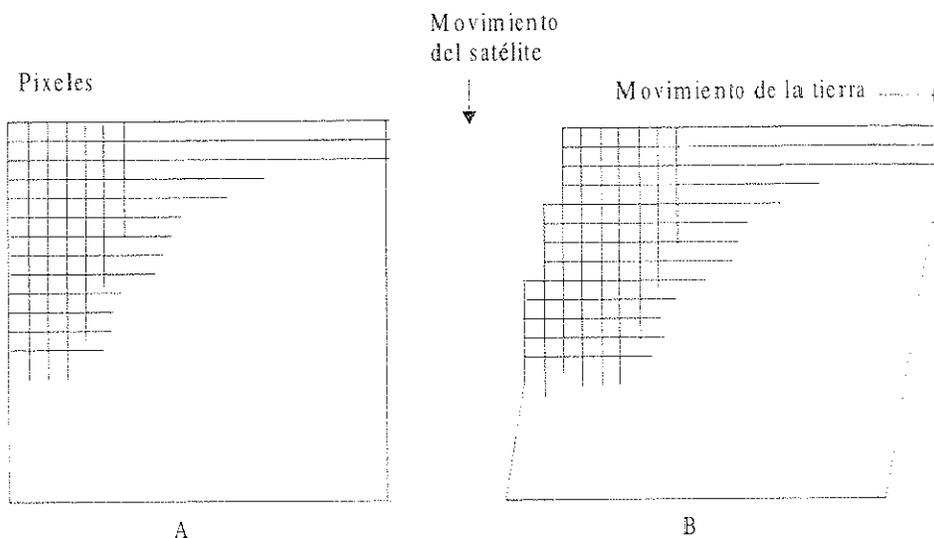


Figura A1.2. Los efectos de rotación de la tierra sobre una imagen; A) Imagen formada de acuerdo a la figura A1.1 en la cual las líneas están arregladas sobre un arreglo de cuadros; B) corrimiento de las líneas hacia el oeste para corregir el efecto de rotación de la tierra que afectó a algunos cuadros al tiempo de su adquisición. Tomada y modificada de Richards (1986).

b) Distorción panorámica.

Los barreadores utilizados sobre plataformas espaciales y aéreas tienen un campo de vista angular instantáneo constante. Como resultado el tamaño efectivo del pixel con respecto al terreno es más grande en los bordes que en el nadir, como se muestra en la figura A1.3. Característicamente, si el campo de vista instantáneo (CVI) es β y la dimensión en el nadir es p entonces su dimensión en la dirección del barrido con un ángulo de barrido θ es:

$$p_{\theta} = \beta h \sec^2 \theta = p \sec^2 \theta \quad (\text{A1.1})$$

donde h es la altura. Para valores pequeños de θ estos efectos son insignificantes. Por ejemplo, para los Landsat 4 y 5 los valores más grandes de θ son de aproximadamente 7.5° tanto que $p_{\theta} = 1.02p$. Sin embargo, para sistemas con campos de vista más grandes como el NOAA AVHRR y los barredores de plataforma aérea, los efectos pueden ser bastante severos.

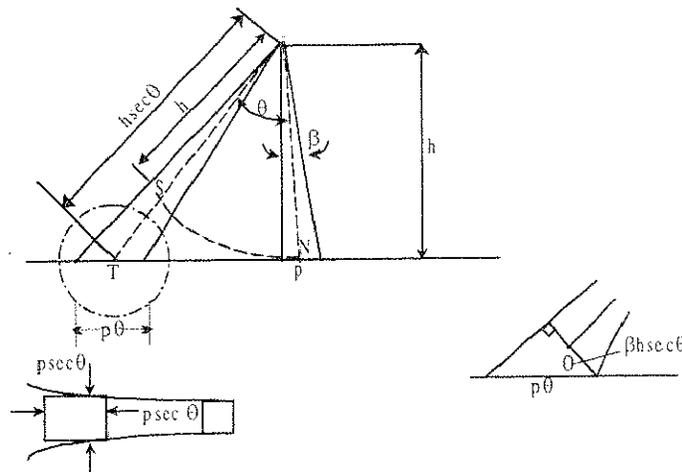


Figura A1.3. Efecto del ángulo de barrido sobre el tamaño del píxel en un campo de vista angular instantáneo. Tomada y modificada de Richards (1986).

Hay una segunda distorsión introducida sobre los sistemas con campos de vista amplios y que se relaciona a las posiciones de los píxeles a través de una línea de barrido. El barredor registra píxeles en incrementos angulares constantes y estos son desplegados sobre una malla de centros uniformes (figura A1.1). Sin embargo, el espaciamiento efectivo de los píxeles sobre el terreno aumenta con el ángulo de barrido; de tal forma que al colocar los píxeles sobre una malla uniforme la imagen sufrirá una compresión a través de su trayectoria. A este tipo de distorsión se le conoce como distorsión de plegado S y es fácil descubrirlo en rasgos lineales como las carreteras que aparecen

distorcionadas debido al efecto de la compresión de la línea de barrido como se observa en la figura A1.4.

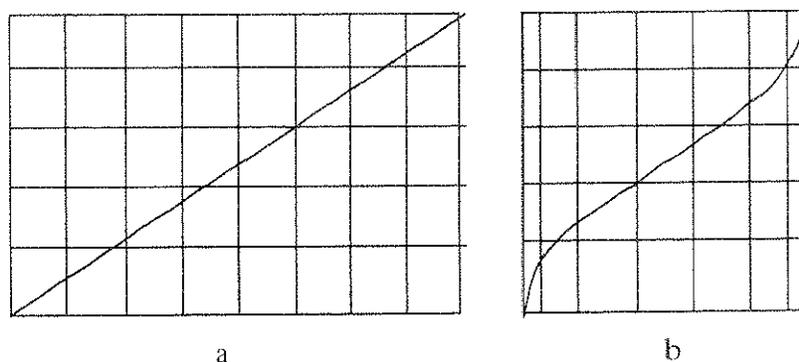


Figura A1.4. Ilustración del efecto de compresión sobre la línea de barrido evidente en sensores con CVI constantes y barridos angulares constantes. Este efecto produce sobre una imagen (a) la distorsión de plegado S como se observa en el recuadro (b). Tomada y modificada de Richards (1986).

c) Curvatura de la tierra.

En los sistemas de plataforma aérea este aspecto no los afecta debido a que sus registros se realizan a bajas alturas (por lo tanto producen imágenes con cubrimientos estrechos). Tampoco afecta a los sistemas como el Landsat y SPOT por lo angosto de su cubrimiento. Sin embargo en imágenes con cubrimientos amplios la curvatura de la tierra es una causa importante de distorsión. Por ejemplo, el sistema NOAA con un ancho de cubrimiento de 2700 km y una altura de adquisición de 833 km puede mostrar sobre un plano una desviación de la superficie terrestre de aproximadamente 2.3 % sobre el área cubierta, lo cual parece insignificante. No obstante es la inclinación de la superficie terrestre la que causa los efectos más grandes sobre el área cubierta por el sensor. Este tipo de efecto puede producir una distorsión compresiva adicional sobre las imágenes

con cubrimientos de áreas grandes. El efecto de la curvatura de la tierra es esquematizado en la figura A1.5.

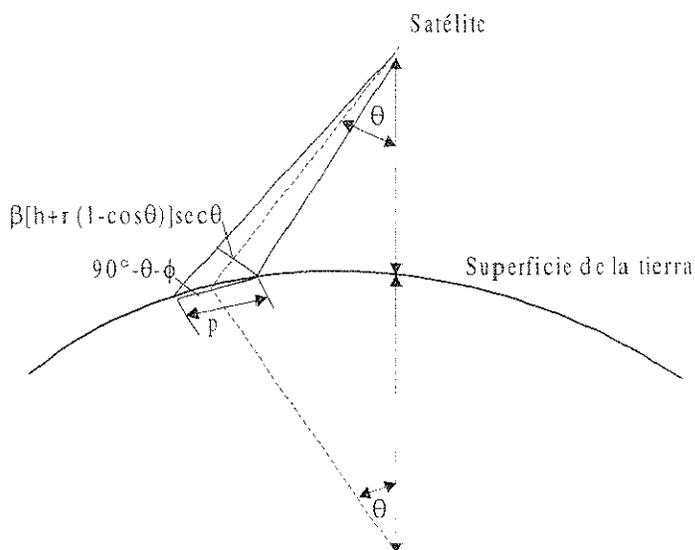


Figura A1.5. Efecto de la curvatura de la tierra sobre el tamaño del píxel en la dirección del barrido (ancho de la trayectoria). A lo largo de la trayectoria este efecto es insignificante. Tomada y modificada de Campbell (1996).

c) Sesgo en el tiempo de barrido.

Los barredores de línea mecánicos tales como el Landsat MSS y TM requieren un tiempo finito para registrar una imagen a lo largo y a lo ancho. Durante este tiempo el satélite esta moviéndose produciendo un sesgo a lo largo de la dirección de trayectoria. Con el objeto de ilustrar la magnitud de este efecto, consideremos que el tiempo requerido por un barredor MSS para registrar una línea es de 33 milisegundos. Durante este tiempo el satélite viaja a través de un área de 213 m (su equivalente sobre el terreno) a una velocidad de 6.450 km/s. Como consecuencia, la línea final está más desplazada (adelantada) que la línea inicial.

d) Variaciones en la altura, velocidad y posición de la plataforma.

Las variaciones en la elevación de la plataforma produce un cambio de escala en el CVI angular constante, el efecto es mostrando en la figura A1.6a para un incremento en la altura provocando una tasa de tiempo de viaje más lento en comparación con el tiempo de adquisición de un cuadro. Similarmente, si hay variaciones en la velocidad de la plataforma provocarían cambios en la escala a lo largo de la dirección de la trayectoria, este efecto es mostrado en la figura A1.6b.

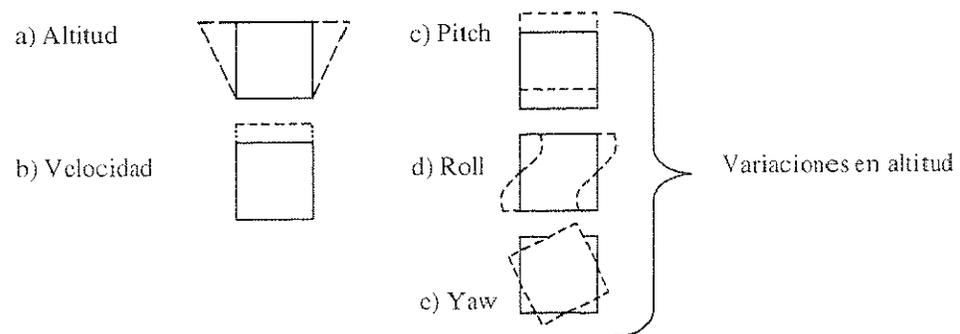


Figura A1.6. Errores provocados por la posición de la plataforma. Estos errores son producidos por diferencias entre el tiempo de viaje y el tiempo de adquisición del cuadro. Tomada y modificada de Richards (1986).

Los cambios en la posición de la plataforma pueden ocasionar los efectos de yaw, pitch y roll durante el viaje. Estos efectos provocan la rotación de la imagen a través y a lo largo de la línea de trayectoria como se muestra en la figura A1.6c-e.

Las variaciones en la altitud en los sistemas de plataforma aérea pueden ser bastante significativas debido a los efectos de turbulencia atmosférica. Estas variaciones puede ocurrir sobre un periodo de tiempo corto, ocasionando distorsiones puntuales en las imágenes producidas mediante los sistemas mencionados anteriormente.

Anexo 2.

Tabla mostrando los puntos de control seleccionados para georreferir la imagen Landsat TM, con sus respectivos errores individuales. En este reporte se muestran los datos originales de la imagen TM y las coordenadas en UTM de los puntos de control reconocidos en la imagen y en los mapas de referencia [CETENAL, H11B87, H11B67(1977); H11B77, H11D18 (1979); H11B88 (1980)]. El cálculo del error es reportado como la raíz del cuadrado de la media (RMS por sus siglas en inglés).

Reporte de error para los datos del archivo:

Total de puntos de control:

Cantidad de puntos prendidos:

Detalle de proyección de los puntos de control al mapa:

Proyección del mapa:

Datum:

Rotación :

/usr/people/datos/tm3839/Tm3839.ers

37

36

NUTM11

NAD27

0

Punto	Antes de la corrección				Después de la corrección				RMS
	Imágen		Mapa		ACTUAL		POLINOMIO		
	Celda X	Celda Y	Coordenada Este (UTM)	Coordenada Norte (UTM)	Celda X	Celda Y	Celda X	Celda Y	
1	1371.06	5955.32	645330	3276900	1371.06	5955.32	1371.33	5954.35	1.0109
2	4227.87	4630.63	731440	3302300	4227.87	4630.63	4227.81	4630.02	0.6164
3	4829.64	5342.32	745400	3279750	4829.64	5342.32	4828.14	5340.82	2.1211
4	4966.81	4558.03	752580	3301220	4966.81	4558.03	4966.72	4558.78	0.7625
5	4740.14	4230.6	747580	3311430	4740.14	4230.6	4740.72	4230.16	0.7311
6	4350.59	4065.27	737300	3317680	4350.59	4065.27	4351.94	4066.12	1.5895
7	5062.81	5357.35	751960	3278280	5062.81	5357.35	5063.28	5358.1	0.8849
8	4440.3	5593.68	733400	3274280	4440.3	5593.68	4440.01	5592.36	1.3503
9	1892.03	5717.23	661000	3281450	1892.03	5717.23	1891.52	5715.85	1.4725

Punto	Antes de la corrección				Después de la corrección			
	Imágen		Mapa		ACTUAL		POLINOMIO	
	Celda X	Celda Y	Coordenada Este (UTM)	Coordenada Norte (UTM)	Celda X	Celda Y	Celda X	Celda Y
10	3775.88	2647.51	727000	3360060	3775.88	2647.51	3776.51	2648.3
11	3126.52	2740.7	708260	3360180	3126.52	2740.7	3125.79	2740.51
12	2987.79	1885.75	708000	3384800	2987.79	1885.75	2990.06	1887.41
13	2434.78	1905.62	692300	3386620	2434.78	1905.62	2436.05	1904.99
14	2733.29	89.895	708240	3436560	2733.29	89.895	2731.99	89.861
15	2613.74	1476.07	699110	3398000	2613.74	1476.07	2613.73	1475.03
16	1721.28	355.769	678640	3433300	1721.28	355.769	1721.93	355.218
17	2063.76	672.047	686900	3422940	2063.76	672.047	2061.8	672.282
18	1988.54	1013.92	683380	3413650	1988.54	1013.92	1987.5	1012.79
19	1411.01	1085.06	666830	3414040	1411.01	1085.06	1411.36	1084.37
20	1132.22	2346.08	653700	3379640	1132.22	2346.08	1132.92	2345.73
21	117.713	4796.57	614800	3314780	117.713	4796.57	117.276	4796.73
22	618.674	5524.78	625840	3292160	618.674	5524.78	616.677	5524.98
23	582.292	4995.29	627120	3307200	582.292	4995.29	583.675	4996.44
24	5345.05	4731.86	762550	3294730	5345.05	4731.86	5345.99	4732.75
25	6317.37	5251.23	787740	3276060	6317.37	5251.23	6315.93	5251.14
26	4277.46	3625.71	737030	3330400	4277.46	3625.71	4277.1	3626.07
27	266.336	3328.49	625160	3355540	266.336	3328.49	266.891	3328.89
28	3047.49	574.76	715100	3421570	3047.49	574.76	3047.12	574.807
29	260.875	2281.92	629340	3385090	260.875	2281.92	259.813	2281.87
30	2091.81	2269.49	681090	3377750	2091.81	2269.49	2092.82	2270.47
31	2542.38	2880.77	691200	3358680	2542.38	2880.77	2541.69	2880.3
32	956.669	3641.01	643330	3343850	956.669	3641.01	957.382	3641.15

Punto	Antes de la corrección				Después de la corrección			
	Imágen		Mapa		ACTUAL		POLINOMIO	
	Celda X	Celda Y	Coordenada Este (UTM)	Coordenada Norte (UTM)	Celda X	Celda Y	Celda X	Celda Y
34	1942.8	4193.12	668800	3324170	1942.8	4193.12	1942.24	4193.15
35	2383.25	3460.1	684300	3342970	2383.25	3460.1	2383.18	3460.99
36	2856.27	4703.79	692480	3305940	2856.27	4703.79	2857.53	4704.05
								RMS
								0.5642
								0.9014
								1.2827

Reporte final del error (RMS):

Promedio del error (RMS):

1.14

Error total (RMS):

41.052

Anexo 3.
Descripción de los puntos verificados en campo.

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral (Combinación 742 en rojo, verde y azul)
P-1	30° 30' 34.4"	114° 40' 25.5"	Tpr	Domo riolítico	Rosáceo	Rojizo	Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo escasos. Presenta litofisas rellenas de cuarzo, zeolitas y escasos minerales opacos.	Rosa pálido y azul grisáceo
P-2	30° 30' 35.2"	114° 40' 21.8"					Suelo pedregoso constituido de riolitas, tobas y poca andesita. Las fragmentos varían en tamaño desde ~2 cm hasta ~2.5 cm. El bd se presenta como una película delgada (~1 mm) de grano fino.	Café obscuro
P-3	30° 27' 15.5"	114° 39' 16.7"	Qa12 + Barriz del desierto	Aluvión	Negro, rojo, café y verde	Café, negro y rojizo	Depósitos piroclásticos que presentan fragmentos líticos y de ponze que varían de pocos milímetros hasta ~10cm. Encierra de estos depósitos se encuentra una toba soldada de color café rojizo con matriz de grano fino y fenocristales de cuarzo y hornblenda, además de observarse líticos de ~ 5 cm.	Morado (respuesta de la toba sobreyacente)
P-4	30° 22' 38.4"	114° 39' 41.6"	Tpr	Depósitos piroclásticos sobreyacidos por toba lítica soldada.	Rosáceo	Amarillo	Areniscas delcizables con fragmentos líticos de ~ 2 cm y fragmentos de conchas. La estratificación de estos depósitos tiene un rumbo general NW y burza al N.	Azul claro
P-5	30° 22' 25.4"	114° 39' 45.9"	Tps	Sedimentos marinos (coquinas)	Café rosáceo	Amarillo		
P-6	30° 22' 25.4"	114° 39' 45.9"					Presenta matriz de grano fino con ponze apiladas en las longitudes varían de ~2 hasta 10 cm y el espesor es < 5 mm.	Amarillo - rojizo
P-7	30° 15' 35"	114° 40' 10.3"	Tpr	Ignimbrita soldada	Café rosáceo	Rojizo y gris	Fotografía de islas volcánicas	
P-8	30° 14' 36"	114° 40' 08.4"					Matriz de grano fino con líticos no mayores a 5 cm, se observan algunos fenocristales de cuarzo y opacos. Presenta superficie rugosa.	Verde obscuro
P-9	30° 12' 43.4"	114° 39' 57.3"					Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo, feldespatos y pocos opacos. También se observan fragmentos líticos y de ponze < 5 cm. Tiene un aspecto rugoso.	Verde obscuro
P-10	30° 09' 46.2"	114° 39' 31.4"	Tpr	Toba lítica de aspecto escoriáceo	Café rosáceo	Rojizo con manchas negras	Matriz de grano grueso con cuarzo, mica blanca, hornblenda y feldespatos. Se observa laminamiento y algunas veillas de cuarzo	Violeta
P-11	30° 06' 27.1"	114° 37' 42.8"	Tpr	Ignimbrita soldada	Rosáceo	Rojizo	Suelo arenoso constituido de cuarzo > feldespatos y fragmentos líticos de ignimbrita > roca metamórfica que varían de ~ 1cm hasta grandes bloques > 1m.	Rosa claro
P-12	29° 50' 38.9"	114° 26' 02.8"	Pzan1	Esquistos de mica y hornblenda	Gris obscuro	Rojizo y negro	Matriz de grano fino con fenocristales de hornblenda > plagioclasas con tamaño de ~ 0.5 cm	Rojo
P-13	29° 55' 13.1"	114° 30' 03.4"	Qa11	Aluvión	Carena	Carena	Matriz de grano fino con fenocristales de hornblenda > plagioclasas con tamaño de ~ 3 mm de cuarzo > feldespatos-hornblenda.	Azul grisáceo obscuro
P-14	29° 58' 57.6"	114° 33' 39.8"	Tpa	Andesita	Café obscuro a gris obscuro	Rojizo		
P-15	29° 59' 04.6"	114° 33' 52.9"	Pzan1	Esquistos	Gris obscuro	Rojizo y negro		

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-16	29° 03' 36,1"	114° 34' 04,2"	Qa13	Aluvión	Rosáceo	Rosáceo	Brecha cementada con carbonatos. Presenta fragmentos líticos de esquistos y roca granítica. El tamaño promedio de los líticos es de 8 cm aunque varían de 2 cm a 30 cm.	Gris obscuro
P-17	30° 03' 57,8"	114° 36' 18,5"	Tpr	Toba lítica no soldada	Gris claro - blanco	Gris claro - blanco	Matriz de grano fino, delznable, con fenocristales de cuarzo, fragmentos líticos y porzez aplastadas. Los tamaños de porzez y líticos varían entre 2 y 10 cm. Hacina de este depósito se observa una toba soldada de color café rosáceo.	Rosáceo (respuesta de la toba soldada)
P-18	30° 03' 59,7"	114° 36' 29,1"	Tpr	Toba lítica soldada	Café	Rojizo y negro	Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo y hornblenda y fragmentos líticos. Tanto los cristales como los fragmentos líticos presentan tamaño < 1 cm. Esta roca interperiza a lajas y presenta un aspecto medianamente rugoso.	Verde obscuro
P-19	30° 03' 59,6"	114° 36' 46"	Tpr	Toba cristalina soldada	Café	Naranja, rojizo y negro.	Matriz mesocristalina de grano fino con fenocristales de cuarzo > feldespatos > hornblenda. Se observan estertulitas rellenas de cuarzo y arcillas. En la superficie de estas rocas se presenta barniz del desierto. Interperiza a lajas. Presenta un aspecto suave.	Verde obscuro
P-20A	29° 49' 54,2"	114° 26' 38,4"	Td	Domo diaéctico	Rosáceo	Naranja con algunas tonalidades café.	Matriz de grano intermedio constituida por feldespatos y cuarzo. Presenta fenocristales de cuarzo > feldespatos > hornblenda interperizada.	Rojo con manchones azules
P-20B	29° 49' 54,2"	114° 26' 38,4"	Td	Brecha asociada a domo diaéctico	Rosáceo y blanco	Naranja con tonalidades negras.	Constituida por fragmentos del domo diaéctico cementados por cuarzo y arcillas.	Rojo con manchones azules
P-21	29° 55' 37,4"	114° 59' 46"	Tba	Basalto	Gris caféososo	Naranja con manchones negros	Matriz de grano fino con fenocristales de plagioclasa y hornblenda. Foliación bien desarrollada y vertice de cuarzo en la misma dirección de foliación. Respuesta magmética fuerte.	Marrón y verde
P-22	29° 55' 15"	114° 58' 05"	Qa14	Aluvión	Crema y blanco	Crema y blanco	Suelo arcilloso con horizontes A y B bien definidos. Horizonte A de aproximadamente 0.5 m. Material volcánico > rodados de cuarzo > rodados intrusivos. Fragmentos menores a 5 cm y escasos fragmentos de hasta 30 cm.	Blanco
P-23	29° 54' 04"	114° 54' 20"	Tpr	Toba lítica soldada	Rosa	Naranja rojizo	Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo > plagioclasa > hornblenda. Presenta fragmentos líticos que varían de 5cm a 30 cm previniendo - 10 cm.	Gris caféososa
P-24	29° 53' 0"	114° 52' 20"	Tpr	Toba lítica soldada	Rosa	Naranja rojizo	Matriz de grano fino con fenocristales de plagioclasa > hornblenda > biotita > cuarzo. Presenta escasos fragmentos líticos < 2cm.	Gris
P-25	29° 49' 29"	114° 48' 43"	Kg	Tambora de biotita y hornblenda	Rosa claro - beige	Crema y blanco	Matriz de grano grueso constituido por feldespatos > biotita > cuarzo. No se observa foliación clara y se presentan enclaves de color rosa y negro. Algunos fragmentos están altamente interperizados (delzables).	Rosa y azul grisáceo

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-26	29° 47' 17"	114° 46' 37"	Kg	Tonalita de biotita y hornblenda	Rosa claro - beige	Crema y blanco	Las mismas características del punto anterior pero en este punto aumenta la vegetación y el suelo arenoso	Azul grisáceo
P-27A	29° 35' 37"	114° 23' 34"	Kg	Tonalita de biotita y hornblenda	Blanco y rosa respectivamente	Rojiza y gris	Matriz de grano grueso constituido por feldespato >biotita > cuarzo. No se observa foliación clara y se presentan enclaves de color negro.	Blanco - azul grisáceo
P-27B	29° 35' 37"	114° 23' 34"	Kg	Tonalita de biotita	Rosa claro - beige	Crema y rosa	Dique con matriz de grano medio constituida por feldespato > hornblenda > cuarzo. Disminuye considerablemente la cantidad de biotita y hornblenda que se presentan con oxidación.	Blanco - azul grisáceo
P-28A	29° 36' 03"	114° 23' 25"	Kg	Tonalita de biotita	Rosa	Rosa y blanco	Matriz de grano medio constituida por plagioclasa > biotita > feldespato > cuarzo. Presenta enclaves arredondados constituidos por plagioclasa y hornblenda.	Gris - cafésos
P-28B	29° 36' 03"	114° 23' 25"	Qal1	Aluvión	Crema	Crema	Arenas compuestas por plagioclasa >biotita > hornblenda > feldespato > cuarzo. El tamaño de grano es < 5 mm.	Rosa liláceo
P-29	29° 36' 20"	114° 23' 40"	Qal1	Aluvión	Crema - café	Crema - café	Arenas compuestas por cuarzo > plagioclasa > hornblenda > biotita. El tamaño de grano es de ~ 3 mm. Se presentan litos de volcánicas y rocas graníticas	Rosa liláceo
P-30	29° 36' 33"	114° 24' 28"	Tsv	Andesita de hornblenda	Gris obscuro	Rojizo con manchones negros y ocre	Matriz de grano fino con fenocristales de hornblenda alineados, escasos fenocristales de feldespatos alterados (arcillos) rellenando microvesículas. En algunas hornblenda se observa un poco de clorita.	Verde y roja
P-30A	29° 36' 33"	114° 24' 28"	Qal2	Aluvión	Gris obscuro	Gris obscuro	Depósito arenoso constituido por cuarzo > plagioclasa > hornblenda y fragmentos de roca andesítica que varía de ~ 3 mm hasta ~ 20 cm.	Café
P-30B	29° 36' 33"	114° 24' 28"	Qal2	Aluvión	Gris	Gris	Depósito ligado al 30 A pero se observa un aumento de la vegetación.	Violeta
P-31	29° 36' 45"	114° 24' 22"	Tsv	Andesita y travertino	Crema	Blanco y crema	La andesita es de grano fino (color gris) con fenocristales de plagioclasa y hornblenda. El travertino presenta matriz alfanítica color café arenoso y silíceo con el HCl.	Roja y blanca
P-32	29° 38' 37"	114° 24' 31"	PQes	Sedimento	Crema rojizo	Crema rojizo	Depósito arenoso constituido por cuarzo > plagioclasa > feldespatos > biotita. Se logra observar algunos corales del suelo mostrando horizontes arcillosos.	Violeta y en ciertas partes colores cafésos
P-33	29° 40' 19"	114° 24' 20"	PQes	Sedimento	Negro, rojo y verde	Negro, rojo y verde	Depósito arenoso pedregoso constituido por fragmentos de andesitas > rocas graníticas. El tamaño de los fragmentos varía de 1 a 40 cm pero el promedio es de ~ 8 cm.	Gris claro
P-33A	29° 40' 19"	114° 24' 20"	PQes	Sedimento	Café crema	Café crema	Depósito arenoso con presencia de travertino. Aumenta la cantidad de material fino y disminuyen los fragmentos grandes de roca. Se observa reacción con el HCl	Blanco

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-34	29° 40' 57"	114° 23' 54"	Pznl	Esquiso de mica	Gris oscuro	Rojizo con manchas negras	Matriz de grano fino con fenocristales < 3 mm de mica, feldespato y hornblenda. Se presenta en bloques masivos.	Café obscuro
P-34A	29° 40' 56"	114° 23' 53"	Pznl	Cuarcita	Gris claro	Rojizo y blanco	Textura sucavada de grana fino, vetillo de óxidos. Aspecto de la capa superficial como de escoria (achicharrado).	Azul
P-35	29° 41' 27"	114° 23' 40"	Qal1	Aluvión	Cretona	Cretona	Arena constituida por cuarzo > feldespato > plagioclasa > biotita > hornblenda. Se observan pocos fragmentos (fícos que son predominantemente de roca granítica > filito > dacita > metanórfica.	Rosa
P-36	29° 41' 20"	114° 23' 33"	Tsv	Toba pumicefica	Café rosáceo	Rosa-rojizo	Matriz de grano fino con fenocristales de hornblenda > plagioclasa > cuarzo.	Gris
P-37	29° 43' 38"	114° 22' 37"	PQes	Sedimentos	Gris obscuro - café	Gris obscuro - café	Depósito arenoso constituido por cuarzo > feldespato > plagioclasa y fragmentos redondeados de roca volcánica con colores rojizos, negros y verdes.	Gris claro y blanco
P-38	29° 44' 23"	114° 22' 47"	Qte	Tefra	Cretona	Cretona	Depósito arenoso constituido por cuarzo > plagioclasa > mica. Gran cantidad de vegetación y de humedad (posible laguna efimera).	Gris obscuro
P-39	29° 47' 11"	114° 24' 12"	Qte	Tefra	Gris	Gris	Depósito arenoso con una composición de cuarzo > plagioclasa > biotita y material fílico de colores grises y negros.	Gris obscuro
P-40	29° 47' 33"	114° 23' 55"	Qte	Tefra	Café claro	Café claro	La composición de esta arena es similar a la del punto anterior, pero en este punto se observa un aumento de vegetación y la presencia materia orgánica.	Verde brillante
P-41	29° 47' 30"	114° 23' 42"	Qal4	Arena cuarzosa	Cretona	Cretona	Constituida por cuarzo > feldespatos y fragmentos de conchas y fragmentos pequeños de rocas volcánicas de menos de 1 cm.	Blanco
Pozo 1	29° 47' 30"	114° 24' 52.6"					Profundidad de ~20 m con un gasto de ~4 litros / segundo. Agua salobre, no para beber. Perteneciente a Rancho Grande.	
P-42	29° 49' 12"	114° 25' 14"	Qte	Tefra	Gris	Gris	Depósito arenoso compuesto por fragmentos de roca volcánica gris obscuro. Grano grueso que varía de fragmentos de 0.5 cm hasta 1 cm siendo el más común ~ 0.5 cm.	Violeta
P-42A	29° 48' 52"	114° 25' 03"	TU	Dacita	Gris claro - violáceo	Rosa-carne y rojizo	Matriz de grano fino con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y cuarzo. Se presenta como bloques subarredondados que varían de ~ 5cm hasta 60 cm siendo el fragmento más común el de ~20 cm. Se observan minerales de alteración como clorita-epidota.	Rojizo
P-43	29° 49' 33"	114° 27' 28"	TU	Dacita	Rosa grisáceo	Naranja-rojizo	Afloramiento sobre arroyo Alfredo. Matriz de grano fino con microfenocristales de hornblenda y cuarzo.	Rojizo

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral (Combinación 742 en rojo, verde y azul)
P-43A	29° 49' 33"	114° 27' 28"	PQes	Sedimento	Crema y gris claro	Crema y gris claro	Depósito arenoso constituido por granos de cuarzo > plagioclasa > hornblenda > biotita y fragmentos de roca dacítica que varían entre 5 y 10 cm.	Violeta cafésoso
P-44	29° 49' 22"	114° 28' 25"	PQes	Sedimento	Gris, rojo y blanco	Gris, rojo y blanco	Depósito arenoso constituido por cuarzo > plagioclasa > hornblenda > biotita y fragmentos de roca dacítica que varía de menos de 1 cm hasta 40 cm, siendo comunes fragmentos de 1 - 2 cm.	Blanco
P-45	29° 49' 39"	114° 27' 55"	PQes	Sedimento	Blanco	Blanco	Depósito arenoso compuesto por cuarzo > plagioclasa > mica (biotita) y pequeños fragmentos de dacita.	Violeta y blanco
P-46	29° 49' 53"	114° 26' 22.2"	PQes	Sedimento	Café crema	Café crema	Depósito de gravas constituido por fragmentos de rocas graníticas y rocas volcánicas (dacitas - andesitas) cementadas en material arcilloso.	Verde
P-47	29° 50' 12"	114° 24' 41"	Tsv	Andesita	Gris obscuro	Rojizo	Roca con foliación, presentando una matriz fina con fenocristales de plagioclasa, maficos (hornblenda y piroxeno). Se observan bandas de desvirificación y foliación. Se presenta escoria con abundantes óxidos de hierro hacia la cima de la unidad. También se observan fragmentos de bombas.	Gris violáceo
P-48	29° 50' 10"	114° 24' 39"	Tsv	Andesita	Gris obscuro	Café rojizo y gris	Roca masiva con poca foliación, con una matriz de grano fino y fenocristales de plagioclasa y pocos maficos (hornblenda). Se observan veffitas rellenas de óxidos. A diferencia del punto anterior aquí casi no hay escoria.	Verde
P-49	29° 51' 41"	114° 26' 32"	Tsv	Andesita	Gris obscuro	Café rojizo	Se presenta en fragmentos que corona a sedimentos arcillosos. Matriz grano fino con fenocristales de plagioclasa y pocos maficos y microvescúlas rellenas de óxidos.	Verde cenizo
P-50	29° 51' 56"	114° 26' 38"	Qle	Tefra	Gris claro	Gris claro	Arena lírica constituida por cuarzo > feldespatos y pequeños fragmentos líricos de andesita de - 0.5 - 1 cm.	Gris
P-51	29° 52' 12"	114° 26' 44"	Qte	Tefra	Gris obscuro - negro	Gris obscuro - negro	Depósito arenoso constituido por pequeños fragmentos líricos de color negro de andesitas y dacitas.	Gris obscuro
P-52	29° 54' 18.1"	114° 26' 32.4"	Qal4	Arena de playa	Gris claro	Gris claro	Constituida por cuarzo > plagioclasa > feldespatos > fragmentos de andesita > cristales de biotita. Las zonas con vegetación presentan una respuesta verde y la laguna efímera presenta una respuesta negra.	Blanco
P-53A	29° 54' 24.8"	114° 26' 16.7"	Kg	Tundia de biotita y hornblenda	Blanco moteado con puntos negros	Rosa cafésoso y gris. Aunque hay una zona alterada que presenta colores rojo fuerte y negro.	Roca de grano grueso constituida por plagioclasa, feldespatos, cuarzo, biotita y hornblenda. La alteración natua provoca oquoclasas.	Violeta en zona más alterada (rojo fuerte y negro) y Gris en las zonas menos alteradas

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-53B	29° 54' 24.8"	114° 26' 16.7"	Kg	Dique granítico	Blanco	Rosa y rojizo	Roca de grano muy grueso constituida por plagioclasa, feldespatos alcalinos, mica y cuarzo. Los espesores de los diques varían de 2 hasta 25 cm. Estos diques cortan a la tonalita y a la roca metatúrfica.	Violeta en zona más alterada (rojo fuerte y negro) y Gris en las zonas menos alteradas
P-53C	29° 54' 24.8"	114° 26' 16.7"	Pzml	Esquistos de mica	Gris	Gris rojizo	Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo y mica. Se observan veñillas rellenas de óxidos.	Violeta en zona más alterada (rojo fuerte y negro) y Gris en las zonas menos alteradas
P-54	29° 52' 17"	114° 27' 56"	Qte	Tufa	Gris cafésoso	Gris cafésoso	Depósito arenoso de grano fino constituido por roca volcánica, pomez, ceniza, intrusivo y algo de cuarzo	Morado claro
P-54.2	29° 52' 17"	114° 27' 56"					Profundidad de 75 m con un gasto de -0.3 litros/segundo. Agua salobre, no para beber	
P-55	29° 54' 8.2"	114° 28' 34.3"	Qall	Aluvión	Café-amarillento	Café-amarillento	Depósito arenoso de grano fino constituido por fragmentos de cuarzo>feldespatos>fragmentos líticos (basalto - andesita, granítica)>biotita.	Azul grisáceo
P-56	29° 55' 04"	114° 28' 44.9"	Qall	Aluvión	Café-amarillento	Café-amarillento	Depósito arenoso formado a partir de rocas intrusivas. Los principales constituyentes son cuarzo> mica y fragmentos líticos de roca granítica-andesita.	Rosa lila
P-57	29° 55' 29"	114° 30' 28"	PQes	Sedimento	Gris - blanco	Gris - blanco	Conglomerados constituido por feldespatos>arcillas>cuarzo y fragmentos líticos mayores a 5 cm de andesitas y rocas graníticas. En algunos cortes se observa alternancia de horizontes arcillosos y de gravas.	Blanco - grisáceo
P-58	29° 55' 59"	114° 31' 41.6"	Kg	Tonalita de biotita y hornblenda	Blanco	Gris, rojizo y blanco mateado	Grano grueso constituido por plagioclasa, biotita, hornblenda y cuarzo. Se observa foliación de los minerales líticos.	Café-grisáceo
P-58A	29° 55' 59"	114° 31' 41.6"	Qall	Aluvión	Café claro	Café claro	Depósito arenoso de grano fino constituido por cuarzo>plagioclasas> feldespatos>biotita y líticos de roca granítica	Rosa
P-59	29° 55' 44"	114° 32' 17"	Tsv	Andesita	Negro	Rojizo	Matriz de grano fino con escasos fenocristales de plagioclasa y hornblenda. La cima de la unidad está coronada por material piroclástico	Verde
P-59A	29° 55' 44"	114° 32' 17"	Tsv	Fujo piroclástico	Negro y gris	Gris y blanco	Misma observación que en el punto anterior sólo que en este punto se observa una cantidad mayor de arcillas blancas.	Azul verdoso
P-60	29° 55' 52.2"	114° 32' 36.8"	Tsv	Fujo piroclástico	Rosa cafésoso.	Rojizo	Constituido por una matriz de ceniza con clastos subareolados de andesita y roca granítica. Se observan algunas zonas con mayor cantidad de arcillas blancas.	Blanco y verde
P-61	29° 58' 49.8"	114° 33' 59.6"	Pzml	Esquistos de mica	Gris obscuro	Rojizo y amarillo	Matriz con textura sacaroide con fenocristales de mica, feldespatos y hornblenda. Se observa esquistosidad y existen algunos diques de cuarzo que cortan a la roca metatúrfica.	Café obscuro

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-62	29° 58' 53"	114° 33' 56"	Tb	Andesita	Gris	Rojizo	Este flujo de lava parece estar cubriendo a la roca metamórfica. La roca volcánica es de matriz de grano fino, con fenocristales de plagioclasa, esenasa vesicularidad, se observa oxidación y vetillas rellenas de arcillas blancas.	Roja
P-63	29° 59' 37,1"	114° 34' 23,1"	Qtr	Travertino	Blanco y crema	Blanco grisáceo	Alamitica, formado capas delgadas < 5cm, efervesce con HCl. Se observan algunos vetillos de óxidos y carbonatos. Hay presencia de esqueladas producidas por interperisano (disolución).	Blanca
P-64	30° 00' 40"	114° 34' 5,3"	Tpr	Toba cristalina soldada	Rosa cafeoso.	Rojizo	Respuesta roja: Roca de matriz de grano fino con fenocristales de plagioclasa, hornblenda, vetillas rellenas de arcillas blancas y vetillo fino relleno de calcita. Respuesta verde: mismo material pero con mayor oxidación	Roja y verde
P-65	30° 00' 57,9"	114° 33' 57,3"	Qal2	Aluvión	Gris	Gris	Deposito arenoso y pedregoso constituido por fragmentos líticos que varían de 1cm hasta 80 cm siendo los más comunes los de 15 cm. Los fragmentos líticos que se presentan son andesita > roca granítica > metamórfica. Respuesta verde: depósito arcilloso con cubierta vegetal formando laguna efímera	Verde y café rosáceo
P-66	30° 01' 50"	114° 34' 32,9"	Qal2	Aluvión	Gris claro	Gris claro	Deposito arenoso de grano fino con esenasa líticas de volcánicas. Constituido principalmente por cuarzo y feldspato.	Blanca
P-66A	30° 01' 50"	114° 34' 32,9"	Tma	Andesita	Gris cafeoso	Rojizo - negro	Presencia de bandeamiento de flujo. Matriz grano fino con fenocristales de plagioclasa, óxidos y micaes idratisadas.	Café - rosáceo
P-66B	30° 01' 50"	114° 34' 32,9"	Tma	Andesita	Gris obscuro	Rojizo	Mismo tipo de roca que 66A pero con mayor cementado de material arcilloso entre los fragmentos volcánicos.	Verde
P-67	30° 02' 33,3"	114° 34' 47,7"	Qal2	Aluvión	Gris	Gris	Deposito arenoso constituido por cristales de cuarzo > feldspato > plagioclasa y fragmentos líticos de andesitas y tobas que varía de 1cm hasta 80 cm. Se observan dos poblaciones predominantes una de fragmentos menores a 5 cm y otra con fragmentos de ~ 20 cm	Gris azulado
P-68	30° 02' 57,2"	114° 35' 1,5"	Tma	Andesita	Gris	Rojizo - negro	Matriz grano fino con fenocristales de plagioclasa y hornblenda. Constituye una capa con un espesor de ~ 8 - 10 m que contiene además material escoriáceo y bombas.	Verde
P-68A	30° 02' 57,2"	114° 35' 1,5"	Tpr	Iguanubaria soldada	Rosa carne	Violetáceo	Matriz de ceniza con fenocristales de plagioclasa, fragmentos líticos de vidrio, andesita y metamórfica de ~ 1 - 2 cm, cuarzo y hornblenda.	Rosa
P-69	30° 03' 57,6"	114° 35' 54,4"	Qal3	Aluvión	Gris, blanco, rojo y amarillo	Gris, blanco, rojo y amarillo	Deposito arenoso compuesto de cuarzo > plagioclasa y fragmentos metamórfica, andesita y caliza. Los fragmentos varían de ~ 0,5 cm a ~ 30 cm.	Gris obscuro

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-70	30° 04' 15"	114° 36' 5"	Qa13	Aluvión	Gris	Gris	Sedimento de arroyo compuesto por cuarzo>feldespatos y fragmentos de ignimbrita>caliza>andesita>roca granítica.	Gris azulado
P-71	30° 04' 30.7"	114° 36' 16.7"	Qa13	Aluvión	Gris claro	Gris claro	Sedimento de arroyo constituido por cuarzo>feldespatos> mica y pequeños líficos de esquistos > caliza > andesita > roca granítica.	Gris claro
P-72	30° 05' 39.2"	114° 37' 44.7"	Tpr	Ignimbrita soldada	Rosa	Rojo y negro	Matriz grano fino con cristales de cuarzo y sanidino, minerales de alteración (arcillas) y fragmentos líficos y de pomex que varían de 1 a 2 cm. Aspecto rugoso.	Verde
P-72A	30° 05' 39.2"	114° 37' 44.7"	Qa12	Aluvión	Gris claro	Gris claro	Deposito arenoso constituido por cuarzo > plagioclasa > biotita > pequeños fragmentos líficos oscuros. También se presentan grandes fragmentos de roca granítica, tobas y caliza (<50cm).	Gris claro
P-73	30° 06' 43.2"	114° 37' 51.6"	Tpr	Toba lífica soldada	Café rojizo	Rojo y negro	Matriz grano fino con cristales de cuarzo, sanidino y poca horblenda, también pequeños fragmentos líficos de ~ 1 - 2 cm. Intemperizadas a lajas y con apariencia escoriada	Verde
P-73A	30° 06' 43.2"	114° 37' 51.6"	Qa12	Aluvión	Gris	Gris	Deposito arenoso compuesto por cuarzo > plagioclasa > feldespatos > fragmentos líficos de ignimbritas y andesitas que miden en promedio 2 - 3 cm.	Gris
P-74	30° 07' 42.1"	114° 38' 15.5"	Tpr	Ignimbrita vítreo soldada	Rosa cafeeoso	Rojizo	Matriz grano fino con presencia de faranes de vidrio, pequeños cristales de cuarzo y sanidino y mineral acilioso de alteración. El vidrio colapsado muestra cierta orientación (flujo).	Verde claro
P-75	30° 09' 13.7"	114° 39' 1.7"	Tpr	Ignimbrita vítreo soldada	Café rojizo	Rojo y negro	Toba depositada a altas temperaturas con evidencia de flujo después de deposición. Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo, sanidino y pocos líficos. Se observa una gran cantidad de vidrio negro con rasgos de flujo. Hacia la parte superior se observa un aspecto de escoria (vehichurado). La respuesta blanca es debida a presencia de caliche.	Marrujo
P-76	30° 10' 55.3"	114° 40' 5"	Tpr	Ignimbrita pumiceífera	Vidáceo	Rojizo	Matriz grano fino con pomex colapsadas, cristales de cuarzo, plagioclasa y horblenda. Presenta un poco de porosidad. Se observa estratificación.	Café y lila
P-77	30° 11' 31.5"	114° 40' 13.8"	Tpr	Toba lífica medianamente soldada	Rosa pálido	Rosa - rojizo	Matriz grano fino con fenocristales de cuarzo y fragmentos líficos. Presenta minerales de alteración (arcillas). Se observan algunas interestratificaciones de tefra.	Blanco - azul
P-78	30° 12' 13.6"	114° 40' 5.6"	Tpr	Toba lífica con soldamiento atenuado	Café rojizo	Rojo y negro	Matriz grano fino con fenocristales de cuarzo y fragmentos líficos de ~ 1 cm, poca porosidad. Apariencia de cascoteo (escoria). Esta unidad sobreyace a una toba lífica soldada más masiva.	Rojizo
P-79	30° 13' 19.7"	114° 40' 6.9"	Qh	Halita	Cremá	Cremá	Deposito de sal sobresaturado de agua.	Blanco azulado

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-79A	30° 13' 19.7"	114° 40' 6.9"	Tpa	Andesita	Negro	Rojo y negro	Matriz grano fino con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y olivino. Se observan quemaduras rellenas de arcillas. Algo de pelotonización.	Verde azulado
P-80	30° 15' 17.5"	114° 39' 50.7"	Tpr	Toba lílica soldada	Café claro	Rojo, blanco y manchas negras	Interperiza a lajas, apariencia de escoria. Se observan líticos y porozos colapsados.	Roja
P-80A	30° 15' 17.5"	114° 39' 50.7"	Tpa	Brecha andesítica	Negro	Rojo, negro y gris	Matriz de grano fino con cristales de plagioclasa, cuarzo, fragmentos angulosos de roca granítica y volcánica. Presenta quemaduras rellenas de minerales de arcilla. Se observan bandeamientos de vidrio.	Azul
P-81	30° 15' 42"	114° 40' 5"	Tpr	Toba lílica con soldamiento intermedio	Blanco	Rojizo	Matriz de ceniza con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, fragmentos líticos y de porozos. Esta roca es porosa y tiene poco peso.	Naranja-amarillento
P-81A	30° 15' 44"	114° 40' 9"	Tpr	Ignimbrita soldada	Rosa	Rojizo	Matriz grano fino con clastos de porozos colapsados de ~ 2 - 3 cm, cristales de cuarzo, plagioclasa y minerales de oxidación (hematita - limonita).	Naranja-amarillento
P-81B	30° 15' 46"	114° 40' 6"	Tpr	Toba lílica fuertemente soldada	Café obscuro	Negro y blanco	Matriz grano fino con fenocristales de cuarzo, líticos de ~ 5 cm (roca granítica) y también se observa escoria.	Verde obscuro
P-81C	30° 15' 50"	114° 40' 5"	Tpr	Toba cristalina fuertemente soldada	Café	Rojizo	Matriz grano fino con fenocristales de cuarzo, plagioclasa y hornblenda. El tamaño de cristales es < 5 mm.	Naranja-amarillento
Mojonera	30° 15' 36.1"	114° 39' 56.1"					Nombre: La Gavota. No tiene superficie ni No. de expediente.	
P-82	30° 15' 27"	114° 39' 56.7"	Qal2	Aluvién	Gris	Gris	Sedimento de arroyo constituido por material arenoso y fragmentos pequeños de toba y andesita. El tamaño de los fragmentos es de < 0.5 cm hasta 80 cm siendo el más común el de 1 cm. También se observa cuarzo y jícaras (biotita).	Gris
P-83	30° 17' 3.5"	114° 39' 21.5"	Tpr	Toba vítreo soldada	Café rojizo	Rojo y negro	Matriz grano fino con cristales de cuarzo y hornblenda y clastos de vidrio colapsado.	Verde
P-83A	30° 17' 3.5"	114° 39' 21.5"	Tpr	Toba vítreo soldada	Café rojizo	Blanco	Matriz grano fino con cristales de cuarzo y hornblenda y clastos de vidrio colapsado y material blanco de arcilla.	Azul
P-84	30° 17' 17.2"	114° 39' 23.9"	Tpr	Toba lílica soldada	Café rosáceo	Rojo amarillento	Matriz grano fino con fenocristales de cuarzo y hornblenda y líticos de ~ 2cm hasta 10 cm. Lo común es el fragmento de 2 cm.	Naranja-amarillento
P-85	30° 18' 33.3"	114° 38' 53.5"	Tpr	Toba lílica medianamente soldada	Blanco	Blanco	Roca muy alterada por intemperismo fuertemente. Presenta porosidad y minerales arcillosos. Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo, hornblenda y fragmentos líticos de ~ 2cm.	Rosa
P-85A	30° 18' 31.3"	114° 38' 53.5"	Tpr	Toba lílica soldada	Café rosáceo	Rojo y negro	Es la misma roca del punto anterior pero está más compacta y se presenta en forma de lajas.	Verde
P-86	30° 19' 22.6"	114° 38' 43.3"	Qal2	Aluvién	Rojo, amarillo y blanco	Rojo, amarillo y blanco	Depósito arenoso constituido por cuarzo > plagioclasa > biotita > fragmentos de toba lílica (rodado) que varían desde 1 cm hasta 60 cm, el más común en ~ 5 cm. Se observa algo de carbonatos (tepetate).	Ocre

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
P-87	30° 20' 56.2"	114° 38' 26.4"	Qal4	Arena de playa	Grís claro	Grís claro	Playa pedregosa con arena. Se observan fragmentos de toba bien redondeados y fragmentos de conchas. Se presentan pequeñas terrazas marinas compuestas de arcillas con conchas (coquinas). Playa de Puercitos.	Blanco-azuloso
P-88	30° 20' 44.1"	114° 38' 6.4"	Tpr	Brecha hidrotermal	Grís	Rojo, amarillo, blanco y negro	Matriz de grano fino con fenocristales de cuarzo>plagioclasa>biotita>pirita y fragmentos angulosos de toba. Esta unidad se presenta con sulfatización.	Blanco
P-89	30° 21' 31"	114° 38' 28"	Tpr	Toba lítica soldada	Rosáceo	Café claro	Matriz grano fino con cristales de cuarzo, plagioclasa, hematita y limonita, con clastos de ~ 1cm. Fracturamiento NSW \ 55NE, NSW \ 82NE, N34E \ 84NW, N35W \ 25SW	Café grisáceo
P-90	30° 22' 19"	114° 38' 42"	Tpr	Igubrita medianamente soldada	Grís y blanco	Rojo y grís	Matriz de ceniza con fragmentos de pomiz. Es una roca muy alterada (arcillas) con apariencia de escoria.	Morado
P-91	30° 22' 43.6"	114° 39' 12"	Tpr	Toba lítica con soldamiento intermedio	Grís	Rojo con manchones negros	Matriz de grano fino con fragmentos líticos que varían de 1 a 5 cm, fenocristales de cuarzo, plagioclasa y óxidos (hematita). También se observan arcillas.	Rojo
P-92	30° 22' 26.8"	114° 39' 44.6"	Tps	Coquinas	Café amarillento	Café amarillento	Fragmentos de conchas y líticos cementados por calcita en una matriz arenosa de grano grueso. Encima de estos depósitos descansa una toba soldada.	Azul claro
P-93	30° 22' 51.1"	114° 39' 45.1"	Tps	Sedimentos marinos	Café amarillento	Café amarillento	Depósito de lodolitas con fragmentos de yeso, hebita y conchas. Encima de esta unidad descansa una toba lítica soldada.	Azul claro
P-93A	30° 22' 51.1"	114° 39' 45.1"	Tps	Sedimentos marinos	Amarillo	Amarillo y blanco	Misma unidad que la anterior pero en este punto no se encuentra sobreyacida por la toba lítica soldada	Blanco
P-94	30° 23' 25.7"	114° 38' 44.9"	Tps	Sedimentos marinos	Café arena y amarillo	Café arena y amarillo	Lodo arcilloso que contiene fragmentos líticos de toba. No se observan conchas. Sobreyacido a esta unidad se observan fragmentos de toba soldada	Café grisáceo y blanco
P-95	30° 23' 51.7"	114° 38' 33.1"	Qal2	Aluvión	Grís	Grís	Conjunto por arcillas y pequeños fragmentos de toba que miden ~ 0.5 cm aunque hay fragmentos de hasta 30 cm.	Grís obscuro
P-96	30° 26' 56"	114° 39' 9.3"	Qal2 + baruz del desierto	Aluvión	Café, rojizo, negro y blanco	Café, rojizo, negro y blanco	Depósito arenoso con fragmentos de toba y pomiz los cuales presentan una pámina conocida como barniz del desierto (zona de menor energía).	Café obscuro
P-97	30° 28' 15.4"	114° 39' 35.7"	Qal2	Aluvión	Grís	Grís	Depósito arenoso constituido por cuarzo>plagioclasa> mica y fragmentos de roca volcánica (toba) de ~ 0.5 cm, también se observan grandes pedregos de tobas de hasta 1 m.	Grís
P-98	30° 29' 15.7"	114° 39' 56.9"	Qal1	Aluvión	Grís claro	Grís claro	Depósito arenoso constituido por cuarzo>plagioclasa> biotita y pequeños fragmentos líticos (grandes (Arroyo Matonij).	Morado claro
Punto 3	30° 29' 10.1"	114° 40' 3.7"					Noria abandonada	

Punto	Latitud	Longitud	Clave en el mapa	Litología	Color sup. Fresca	Color sup. Alterada	Descripciones	Respuesta espectral Combinación 742 en rojo, verde y azul
Pozo 4	30° 29' 6.4"	114° 40' 3.5"					Noria con 70 m de profundidad; el espejo de agua está a 60 m. Agua dulce. Depósitos de lodolitas con fragmentos líficos de riolitas y encima de esta unidad descansa una loba lílica soldada.	
P-99	30° 30' 40.8"	114° 40' 24.5"	Tps	Sedimentos marinos	Café amarillento	Café amarillento		Rosa y azul

Anexo 4.

Cálculo de la matriz de covarianza y de la matriz de correlación.

Para ejemplificar los cálculos para obtener la matriz de covarianza consideremos un espacio multispectral con un gran número de píxeles graficados como se muestran en la figura A4.1, con cada píxel descrito por su propio vector x .

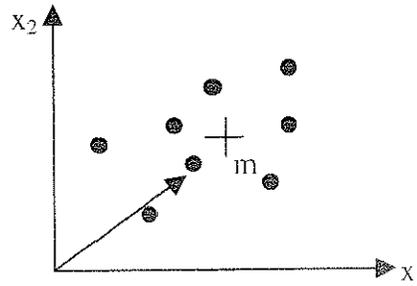


Figura A4.1. Espacio multispectral bidimensional mostrando a los píxeles individuales y sus posiciones medias definidas por el vector medio m . Modificada de Richards (1993).

La posición media de los píxeles en el espacio es definida por el valor del píxel x del píxel esperado, de acuerdo a:

$$m = \varepsilon(x) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K x_j \quad (\text{A4.1})$$

donde m es el vector medio del píxel y las x_j son los vectores de los píxeles individuales de un número total K ; ε es la espectación del operador.

La media del vector es útil para definir el promedio o posición esperada de los píxeles en el espacio multispectral y el valor del vector describe la dispersión existente en dicho espacio. Este es el rol de la matriz de covarianza que es definida como:

$$\sum_x = \varepsilon\{x - m)(x - m)^t\} \quad (\text{A4.2})$$

en donde el superíndice (t) denota el vector transpuesto. Una estimación de la matriz de covarianza está dado por:

$$\sum_x = \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (x_j - m)(x_j - m)' \quad (\text{A4.3})$$

La matriz de covarianza es importante en el análisis de datos de imágenes multiespectrales, pues a partir de este concepto se puede establecer si existe correlación entre un par de bandas espectrales (como se explica en el capítulo II de este trabajo). Este comportamiento puede ser descrito en términos de la matriz de correlación ρ cuyos elementos están relacionados a la matriz de covarianza mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{ij} = v_{ij} / \sqrt{v_{ii}v_{jj}} \quad (\text{A4.4})$$

donde ρ_{ij} es un elemento de la matriz de correlación y v_{ij} son elementos de la matriz de covarianza; v_{ii} y v_{jj} son las variaciones de los datos en las bandas 'i' y 'j'.

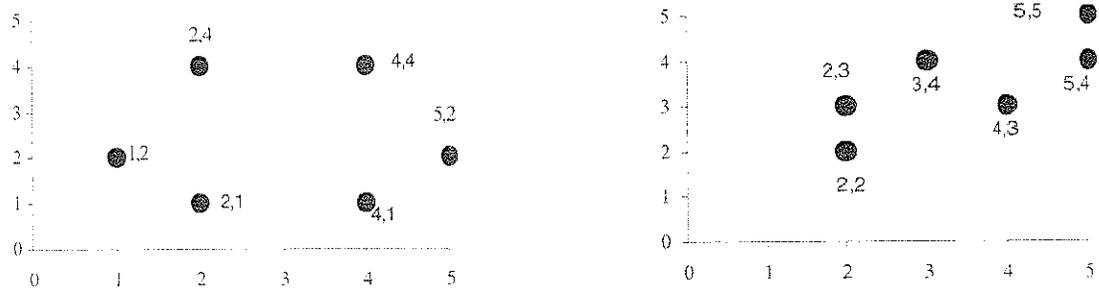


Figura A4.2. Esquema mostrando dos casos bidimensionales; (a) un ejemplo de datos sin correlación y en (b) un ejemplo de componentes altamente correlacionados. Modificada de Richards (1993).

Ahora consideremos dos series de datos bidimensionales (figura A4.2). La figura A4.2a muestra poca correlación entre los dos componentes, es decir, ambos componentes son necesarios para describir la posición del pixel en el espacio. En cambio, los datos mostrados en la figura A4.2b muestran un alto grado de correlación entre sus dos componentes, lo cual es evidente por la dispersión elongada de los datos sobre una misma

dirección con respecto a los ejes. Para este segundo caso basta con tener una dimensión para predecir la posición del pixel dentro del espacio ya que si uno de sus componentes aumenta o disminuye provocará un incremento o una disminución proporcional en los otros componentes.

En la tabla A4.1 se muestran un ejemplo sencillo de los cálculos que se realizan para obtener la matriz de covarianza y la matriz de correlación para el conjunto de datos de la figura A4.2a. Normalmente estos cálculos se realizan en equipos de cómputo debido a la gran cantidad de datos que se utilizan.

Tabla A4.1 Cálculo de la matrices de covarianza y correlación a partir del vector medio

$$m = \begin{bmatrix} 3.00 \\ 2.33 \end{bmatrix}$$

x	x-m	$[x-m][x-m]^t$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.00 \\ -0.33 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.00 & 0.66 \\ 0.66 & 0.11 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.00 \\ -1.33 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 & 1.33 \\ 1.33 & 1.77 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 4 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ -1.33 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 & -1.33 \\ -1.33 & 1.77 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 5 \\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.00 \\ -0.33 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.00 & -0.66 \\ -0.66 & 0.11 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 4 \\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.67 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 & 1.67 \\ 1.67 & 2.79 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.00 \\ 1.67 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 & -1.67 \\ -1.67 & 2.79 \end{bmatrix}$
\sum_x es la matriz de covarianza		$\sum_x = \begin{bmatrix} 2.40 & 0 \\ 0 & 1.87 \end{bmatrix}$
ρ es la matriz de correlación		$\rho = \begin{bmatrix} 1.00 & 0 \\ 0 & 1.00 \end{bmatrix}$

Como se puede observar en la matriz de correlación no existe correlación entre los componentes individuales de los datos, de hecho también es evidente en la matriz de covarianza ya que los términos fuera de la diagonal principal son igual a cero

Para el caso de la figura A4.2b los cálculos se hicieron de manera similar a los presentados anteriormente, dando los siguientes resultados:

$$m = \begin{bmatrix} 3.50 \\ 3.50 \end{bmatrix}$$

$$\sum_x = \begin{bmatrix} 1.900 & 1.100 \\ 1.100 & 1.100 \end{bmatrix}$$

$$\rho = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.761 \\ 0.761 & 1.000 \end{bmatrix}$$

En estos resultados es notorio que tanto en la matriz de covarianza como en la matriz de correlación son simétricas y que los valores fuera de la diagonal son diferentes de cero.

Anexo 5.

Método de máxima similitud.

El método más común en la clasificación supervisada es el de máxima similitud. La estadística que sustenta a este método puede ser derivada de una manera general o de una forma bastante rigurosa. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones en percepción remota se utiliza la siguiente aproximación.

Se considera que las clases espectrales de una imagen pueden ser representadas por :

$$\omega_i, i = 1, \dots, M \quad (\text{A5.1})$$

donde M es el número total de clases. Para determinar las clases o categorías a las que puede pertenecer un pixel en una posición x se utilizan áreas de entrenamiento que están sujetas a estrictas condiciones de probabilidad

$$p\langle \omega_i | x \rangle, i = 1, \dots, M \quad (\text{A5.2})$$

El vector de posición x es un vector columna cuyos valores son los valores de brillo del pixel. Este vector describe al pixel como un punto en el espacio multiespectral con coordenadas definidas por sus valores de brillo, como se muestra en la figura A5.1. La probabilidad $p\langle \omega_i | x \rangle$ proporciona la posibilidad de que la clase correcta un pixel en una posición x sea ω_i . Entonces la clasificación es ejecutada de acuerdo a :

$$x \in \omega_i \text{ si } p\langle \omega_i | x \rangle > p\langle \omega_j | x \rangle \text{ en donde todas las } j \neq i \quad (\text{A5.3})$$

esto es que, el pixel en la posición x pertenece a la clase ω_i si la probabilidad $p\langle \omega_i | x \rangle$ es la más grande.

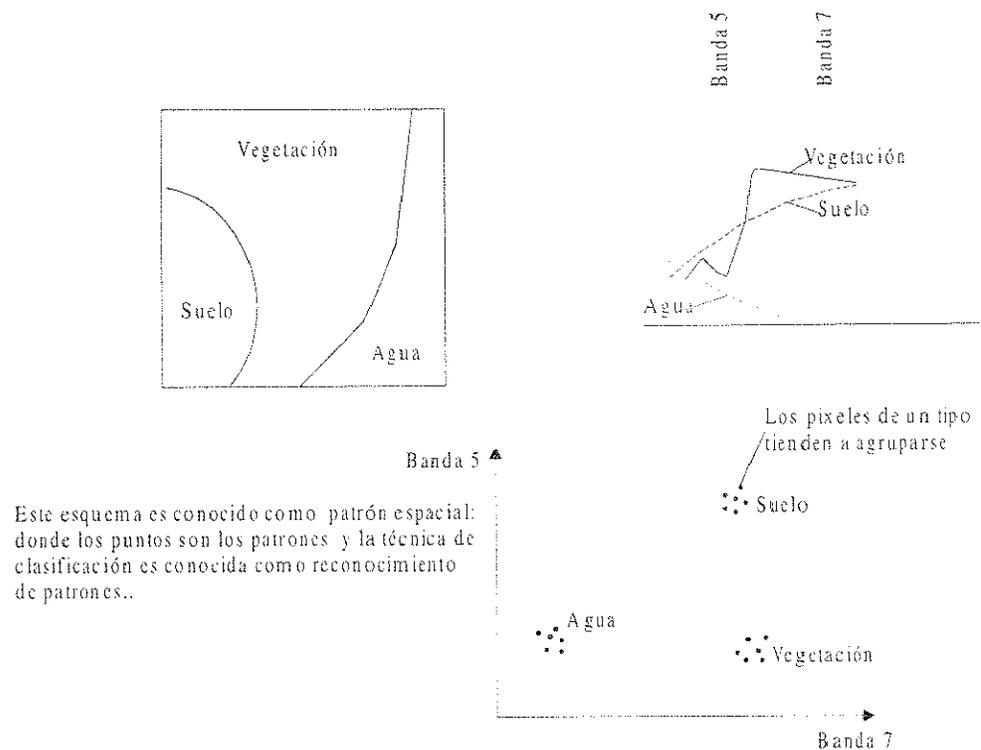


Figura A5.1. Esquema de un espacio multiespectral bidimensional mostrando su relación con las características espectrales de las diferentes cubiertas de terreno. Modificada de Richards (1993).

A pesar de su sencillez, las probabilidades de $p(\omega_i|x)$ en (A5.3) son desconocidas. Sin embargo, suponiendo que hay suficientes datos de entrenamiento para cada tipo de cubierta de terreno; éstos pueden ser utilizados para estimar una probabilidad de distribución para un tipo de cubierta de terreno que esquematice la posibilidad de encontrar un pixel de la clase ω_i en la posición x . En términos generales será representado por el símbolo $p(\omega_i|x)$. Habrá tantas probabilidades $p(\omega_i|x)$ como

clases de terreno haya. En otras palabras, para un píxel en la posición x dentro de un espacio multispectral, se calcularán una serie de probabilidades que darán como resultado las relativas posibilidades de que este píxel pertenezca a cada clase disponible.

La probabilidad deseada $p(\omega_i|x)$ en (A5.3) y la probabilidad disponible $p(x|\omega_i)$ –calculada de los datos de entrenamiento– están relacionadas por medio del teorema de Baye de la siguiente manera :

$$p(\omega_i|x) = p(x|\omega_i)p(\omega_i)/p(x) \quad (\text{A5.4})$$

donde $p(\omega_i)$ es la probabilidad de que la clase ω_i ocurra en la imagen. Si por ejemplo, 15% de los píxeles de una imagen pertenecen a la clase espectral ω_i , entonces, $p(\omega_i)=0.15$; $p(x)$ en (A5.4) es la probabilidad de encontrar un píxel de alguna clase en la posición x . Es importante notar que :

$$p(x) = \sum_{i=1}^M p(x|\omega_i)p(\omega_i) \quad (\text{A5.5})$$

aunque $p(x)$ por si sola no es importante en el seguimiento. La $p(\omega_i)$ es llamada probabilidad a priori, puesto que es la probabilidad con la cual los diferentes grupos de píxeles pueden ser predecidos antes de la clasificación. En comparación $p(\omega_i|x)$ es la probabilidad posterior. Utilizando (A5.4) puede notarse que la regla de clasificación de (A5.3) es :

$$x \in \omega_i \quad \text{si} \quad p(x|\omega_i)p(\omega_i) > p(x|\omega_j)p(\omega_j) \quad \text{en donde todas las } j \neq i \quad (\text{A5.6})$$

donde $p(x)$ ha sido removido como un factor común. La regla de (A5.6) es más aceptable que la de (A5.3) puesto que las probabilidades $p(x|\omega_i)$ son conocidas de los datos de entrenamiento, y es concebible que las probabilidades a priori $p(\omega_i)$ también son

conocidas o pueden ser estimadas a partir del conocimiento que se tiene sobre la imagen. La definición matemática convencional que se utiliza resulta de (A5.6) como se muestra en la siguiente expresión :

$$g_i(x) = \ln\{p(x|\omega_i)p(\omega_i)\} = \ln p(x|\omega_i) + \ln p(\omega_i) \quad (\text{A5.7})$$

donde \ln es el logaritmo natural, de ahí que la expresión A5.6 pueda ser redefinida como :

$$x \in \omega_i \quad \text{si} \quad g_i(x) > g_j(x) \quad \text{en donde todas las } j \neq i \quad (\text{A5.8})$$

Con esta modificación se obtiene la regla de decisión utilizada en el método de máxima similitud para la clasificación supervisada en donde las $g_i(x)$ son referidas como funciones discriminantes.

Anexo 6.

Compilación de la matriz de error (matriz de confusión).

La forma estandar para reportar errores de clasificación es la matriz de error, a veces referida como matriz de confusión, porque ésta identifica no sólo el error total para cada categoría sino también errores debidos a confusiones entre categorías. La matriz de error consiste en un arreglo de $n \times n$, donde n representa el número de categorías.

El lado izquierdo (eje y) es etiquetado con las categorías del mapa de referencia (clases correctas); el borde superior (eje x) es etiquetado con las mismas n categorías. Los valores en la matriz representan el número de pixeles, a veces estos números pueden constituir la imagen entera, pero en otras ocasiones estos números constituyen sólo una parte del total de la imagen.

Para construir la matriz de confusión se comparan dos imágenes (la imagen de referencia y la imagen que será evaluada) sobre una base de analogía de punto por punto para determinar exactamente que proporción de la imagen de referencia está representada en la clasificación. Para que tenga significado esta comparación, las dos imágenes deben registrarse conjuntamente. Los errores en el registro aparecen como errores en la clasificación, por lo que los problemas de registro ocasionarán errores en la precisión de la evaluación.

Existen dos maneras de establecer esta comparación (figura A6.1): a) de manera sistemática en donde se establece una red de celdas uniformes que forman las unidades de comparación o b) de manera aleatoria en donde se eligen puntos aleatorios procurando cubrir toda la imagen lo más homogéneamente posible (Mead, 1982; Stehman, 1992;

Campbell, 1996). La comparación sistemática es más precisa, sin embargo, en la práctica el método más usual es el de puntos aleatorios.

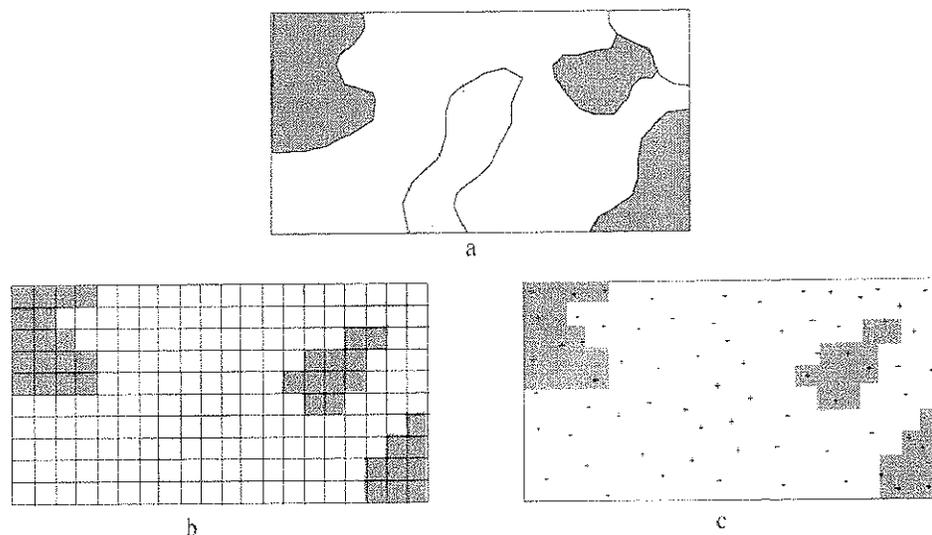


Figura A6.1. Representación de los dos métodos de comparación de imágenes; a) mapa original, b) método de celdas uniformes (sistemático) y c) método de puntos aleatorios.

Cualquiera que sea el método utilizado, la metodología a seguir es la misma y consiste en traslapar la imagen de referencia con la imagen a evaluar para realizar la compilación manual o digitalmente. En la compilación manual, el analista examina las imágenes traslapadas sistemáticamente de punto por punto, tabulando para cada celda la categoría predominante en el mapa de referencia y la categoría correspondiente sobre la imagen evaluada como se muestra en la tabla A6.1. Durante el proceso, se mantiene un conteo del número de categorías referentes que son clasificadas correcta o incorrectamente sobre la imagen evaluada. La sumatoria de esta tabulación forma la base para la construcción de la matriz de error.

Tabla A6.1. Tabulación de datos para la construcción de la matriz de error. Modificada de Campbell (1996).

Hoja de trabajo		
Celda	Mapa de referencia	Clasificación
1	B	B
2	B	U
3	A	A
4	A	A
5	P	P
6	P	B
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Sumatoria		
Bosque clasificado como bosque		350
Bosque clasificado como urbano		23
Bosque clasificado como agua		81
Bosque clasificado como parcela		4
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Parcela clasificada como parcela		730
Parcela clasificada como bosque		115
Parcela clasificada como agua		14
Parcela clasificada como urbano
.	.	.

Si ambas imágenes son digitales la unidad de compilación puede ser el píxel definido con anterioridad en la imagen o puede ser una unidad formada de grupos de píxeles.

Después de la compilación, el siguiente paso es obtener una tabulación compatible para ambas imágenes. Idealmente, las dos imágenes deberían de utilizar el mismo sistema de clasificación. Sin embargo, en la práctica las dos imágenes pueden diferir con respecto a la clasificación. A veces las diferentes clasificaciones pueden ser

compatibles, es decir, las categorías pueden ser igualadas a una sola categoría de manera que permita realizar una comparación válida entre las dos imágenes. En otras ocasiones, las dos imágenes pueden ser fundamentalmente incompatibles, por lo que las dos series de clases no podrán ser igualadas. En otros ejemplos, las dos clasificaciones pueden usar definiciones diferentes pero los nombres son los mismos; por estas razones es importantes examinar cada imagen y tener suficiente información de cada una de ellas antes de realizar cualquier comparación. En la figura A6.2 se esquematiza la matriz de error obtenida de la comparación de dos imágenes.

Imágen de referencia	Imágen a evaluar				Renglones marginales		
	Urbano	Bosque	Arido	Agua	Σ	P_i	
Urbano	317	23	0	0	340	0.516	$P = \frac{317 + 120 + 60 + 8}{659} = 0.7663$ Porcentaje de casos clasificado correctamente = 76.63 %
Bosque	61	120	0	0	181	0.275	
Arido	2	4	60	0	66	0.100	
Agua	35	29	0	8	72	0.109	
Columnas marginales	Σ	415	176	60	8	659	$P = \sum (i)P(i) = 0.4087$ $\kappa = \frac{0.7663 - 0.4087}{1 - 0.4087} = 0.6047$
	P_j	0.630	0.267	0.091	0.012		

 Entradas en la diagonal. Pixeles clasificados correctamente
 Suma de la diagonal. Total de pixeles clasificados correctamente.

Figura A6.2. Representación esquemática de una matriz de error, mostrando todos los elementos constituyen a dicha matriz y los cálculos que se realizan a partir de ella. Modificada de Campbell (1996) y Foody (1992).