

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CLASIFICACIÓN MINERALÓGICA DEL CERRO BOLÍVAR Y EL CUADRILÁTERO SAN ISIDRO A TRAVÉS DE ANÁLISIS MULTIESPECTRAL, UTILIZANDO IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT 7 ETM+

Tutor académico: Prof. Juan Infante.

Co-tutor académico: Prof. Ramón Sifontes

Tutor Industrial: Lic. Ramiro Salcedo

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br.
Carrero Durán, Franklin José.**

Caracas, Julio de 2004

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de forjarme como profesional para poder servir a mi patria.

A la Fundación Instituto de Ingeniería y a todos sus integrantes por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo.

Al Profesor Ramiro Salcedo, por haber aceptado ser el Tutor Industrial de este Trabajo Especial de Grado, además de su paciencia, apoyo incondicional, orientación, estímulo, colaboración y aportes de significativa importancia para el desarrollo del mismo.

Al Profesor Juan Infante, Tutor Académico de este proyecto, por su ayuda y apoyo en el desarrollo de esta nueva área como lo es la Percepción Remota en la Escuela de Geología Minas y Geofísica.

Al Profesor Ramón Sifontes de la Facultad de Ciencias, Co-tutor académico por haberme guiado y ayudado en la parte geológica del trabajo.

A mis Padres, por su aliento interminable y estímulo en todo momento.

A mi Novia Olga, por estar siempre presente en los momentos difíciles.

A mis Hermanos por su apoyo moral.

A mis grandes amigos Manuel Rincón, Mauricio Hernández, Freddy Sojo, Rafael Moraos, por haberme tendido siempre su mano durante toda mi carrera universitaria.

Y sobre todo un enorme agradecimiento a Dios todopoderoso que me brindó salud, fuerzas y entusiasmo para poder lograr mi gran meta.

A todos ellos.....

Gracias,

*“Estoy convencido de que en este día somos dueños de nuestro destino,
Que la tarea que se nos ha impuesto no es superior a nuestras fuerzas,
Que sus acometidas no están por encima de lo que soy capaz de soportar.
Mientras tengamos fe en nuestra causa y una indeclinable voluntad de vencer,
La victoria estará a nuestro alcance”*

Winston Churchill

ÍNDICE GENERAL

	pp.
Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Lista de figuras.....	IV
 Capítulo I: Introducción.....	 1
Área de estudio	3
Planteamiento del problema.....	5
Objetivos.....	7
Justificación.....	8
 Capítulo II: Geología	
Geología general.....	9
Geología regional.....	10
Geología local.....	12
Cuadrilátero San Isidro.....	12
Génesis de los yacimientos del Cuadrilátero San Isidro.....	14
Cerro Bolívar.....	19
 Capítulo III: Principios físicos y fundamentos en teledetección	
Espectro electromagnético.....	21
Términos y unidades de medida.....	23
Principios y leyes de la radiación electro-magnética.....	25
El dominio óptico del espectro: Características de la radiación energética en el espectro óptico.....	31

El dominio del infrarrojo térmico: Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico.....	36
Los suelos en el dominio térmico.....	42
Ejemplos de propiedades termales de diversos cuerpos: Thematic Mapper (TM) de Landsat.....	42
Fundamentos de la observación remota.....	46
Fuentes de energía en percepción remota.....	48
Interacción de la energía electromagnética con los elementos de la superficie de la tierra.....	51
Tipos de reflectancia.....	52
Interacción de la energía electromagnética con la atmósfera de la tierra.....	54
Dispersión (difusión).....	54
Absorción atmosférica.....	55
Ventanas atmosféricas.....	56
Firmas espectrales (reflectancia espectral).....	58
Teledetección en las regiones del espectro electromagnético.....	60
Tipos de teledetección.....	50
Sistemas de percepción remota de imágenes de la tierra:	
Sensores barreadores multiespectrales.....	61
Landsat 7.....	62

Capítulo IV: Procesamiento e interpretación digital de imágenes

Introducción.....	68
-------------------	----

La matriz de datos en una imagen digital.....	69
Procesamiento de imágenes digitales.....	72
Correcciones radiométricas.....	74
Correcciones geométricas.....	83
Georeferenciación de imágenes.....	86
Técnicas de realce visual de imágenes digitales.....	99
Filtros espaciales para el realce de detalles.....	115

Capítulo V: Transformaciones especiales de imágenes digitales

Introducción.....	123
Operaciones entre bandas.....	124
Componentes principales.....	127

Capítulo VI: Extracción de información temática

Clasificación de imágenes de sensores remoto.....	131
Clasificación supervisada vs. no supervisada.....	131
Patrones de respuestas espectrales o firmas espectrales.....	132
Clasificadores duros Vs. Suaves.....	134
Clasificación supervisada.....	135
Clasificación no supervisada.....	136
Métodos mixtos.....	140
Métodos para la comparación de firmas espectrales.....	141

Capítulo VII:

Metodología.....	144
-------------------------	------------

Capítulo VIII: Resultados y análisis.....	161
Conclusiones.....	186
Recomendaciones.....	187
Bibliografía.....	188
Anexos.....	191

LISTA DE FIGURAS

	pp.
Fig. Nº 1 Ubicación geográfica del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro.....	4
Fig. Nº 2 Rangos del espectro electromagnético.....	23
Fig. Nº 3 Diagrama de un ángulo sólido.....	25
Fig. Nº 4 Curva de emitancia radiactiva.....	28
Fig. Nº 5 Curva de emitancia radiactiva del Sol.....	32
Fig. Nº 6 Relación entre flujo incidente y reflejado.....	33
Fig. Nº 7 Emisividad espectral de distintos cuerpos.....	38
Fig. Nº 8 Inercia térmica estimada para diversas cubiertas.....	41
Fig. Nº 9 Escena TM del Monte Blanco.....	43
Fig. Nº 10 Escena del Monte Blanco en la banda 6 del termal del Landsat..	43
Fig. Nº 11 Lago Erie y Ontario en la banda seis del TM.....	45
Fig. Nº 12 Las tres forma de teledetección.....	47
Fig. Nº 13 Radiación solar de la Tierra.....	48
Fig. Nº 14 Fuente de energía pasiva.....	50
Fig. Nº 15 Fuente de energía activa.....	50
Fig. Nº 16 Interacción de la energía electromagnética con los elementos de la superficie terrestre.....	51
Fig. Nº 17 Ventanas atmosféricas.....	57
Fig. Nº 18 Firmas (curvas, respuestas) espectrales de campos de pinos, pastizales, arenas rojas de canteras y agua sedimentada.....	58
Fig. Nº 19 Satélite Landsat 7.....	63

Fig. N° 20 Organización de una imagen digital.....	71
Fig. N° 21 Efecto del algoritmo de transferencia del Vecino más cercano en la corrección geométrica de la imagen.....	96
Fig. N° 22 Efecto del algoritmo de transferencia de Interpolación bilineal en la corrección geométrica de la imagen.....	97
Fig. N° 23 Efecto del algoritmo de transferencia de Convolución cúbica en la corrección geométrica de la imagen.....	98
Fig. N° 24 Estiramiento lineal mínimo-máximo.....	102
Fig. N° 25 Comparación de varios estiramientos lineales para el realce de contraste.....	104
Fig. N° 26 Contraste lineal por piezas significativas.....	106
Fig. N° 27 Estiramiento de contraste lineal Vs. Estiramiento del contraste por piezas significativas.....	107
Fig. N° 28 Contraste no-lineal. Igualación (ecualización) de histograma.....	109
Fig. N° 29 Histogramas antes y después de la igualación del histograma...	110
Fig. N° 30 Frecuencias espaciales.....	116
Fig. N° 31 Agrupaciones (cluster) en la clasificación no supervisada.....	137
Fig. N° 32 Diagrama de firmas para el análisis gráfico de firmas espectrales.....	142
Fig. N° 33 Función de Erdas Imagine 8.6 para seleccionar un área de una imagen.....	146
Fig. N° 34 Ventana de Inquire box en donde se definen las coordenadas de la imagen seleccionada.....	146
Fig. N° 35 Menú principal de Erdas Imagine en donde esta la opción de Data Prep.....	147
Fig. N° 36 Menú de Data preparation en donde esta la función Subset Image para crear una subimagen.....	147
Fig. N° 37 Ventana Subset en donde finaliza el procedimiento para generar una sub-imagen.....	148

Fig. N° 38 Proyección seleccionada para realizar la Georeferenciación.....	149
Fig. N° 39 Orden del polinomio seleccionado para la georeferenciación....	150
Fig. N° 40 Imagen Landsat 7 de la zona de estudio con los puntos de control.....	151
Fig. N° 41 Resultados obtenidos en GCP Tool de los puntos de control.....	152
Fig. N° 42 Dialogo en donde se selecciona la operación para la aplicación del algoritmo de remuestreo de la imagen.....	153
Fig. N° 43 Ventana donde se aplican los algoritmos de remuestreo (Resample).....	153
Fig. N° 44 Imagen Landsat 7 Georeferenciada.....	154
Fig. N° 45 Despliegue de imagen con solamente la banda 6 (infrarroja termal).....	155
Fig. N° 46 Menú Image Interpreter para seleccionar la función de Spatial Enhancement.....	156
Fig. N° 47 Menú Spatial Enhancement donde está la función Resolution Merge para fusionar imágenes	157
Fig. N° 48 Fase final para la fusión de imágenes con la función Resolution Merge.....	157
Fig. N° 49: Resultado Combinación de las bandas 5-4-2.....	162
Fig. N° 49-a: Imagen multiespectral Cerro Bolívar bandas 5-4-2.....	162
Fig. N° 49-b: Imagen multiespectral Cuadrilátero San Isidro bandas 5-4-2.....	163
Fig. N° .50 Resultado de la fusión entre la imagen multiespectral pancromática combinación de bandas 5-4-2.....	164

Fig. N° 50a Imagen del Cerro Bolívar combinación de bandas 5-4-2, resultado de la fusión de la imagen multiespectral con la Pancromática.....	165
Figura No 50-b Cuadrilátero San Isidro. Fusión de la imagen multiespectral – pancromática, combinación de bandas 5-4-2.	165
Fig. N° 51 Perfil espectral imagen no fusionada Cerro Bolívar.....	167
Fig. N° 52 Perfil espectral Cerro Bolívar imagen fusionada.....	169
Fig. N° 53. Imagen fusión multiespectral- pancromática combinación de bandas 6-5-3.....	171
Fig. N° 53a Cerro Bolívar. Fusión de imagen multiespectral – pancromática bandas 6-5-3.....	172
Fig. 53b Cuadrilátero San Isidro.Fusión de imagen multiespectral – pancromática bandas 6-5-3.	173
Fig. N° 54 Banda 6 del infrarrojo termal Landsat 7 ETM+.....	174
Fig. N° 54a Imagen del Cerro Bolívar banda 6 del infrarrojo termal.....	174
Fig. No. 54b Imagen del Cuadrilátero San Isidro banda 6 del infrarrojo termal.....	175
Fig. N° 55 Cocientes de bandas para resaltar óxidos de hierro.....	176
Fig. N° 55a Cociente de banda para resaltar óxidos de hierro del cerro Bolívar.....	177.
Fig. N° 55b Cociente de banda para resaltar óxidos de hierro Cuadrilátero San Isidro.....	177
Fig. N° 56 Cocientes de bandas para resaltar minerales ferrosos.....	178
Fig. N° 56a Cociente de bandas para resaltar minerales ferrosos del Cerro Bolívar.....	179
Fig. N° 56b Cociente de bandas para resaltar minerales ferrosos del Cuadrilátero San Isidro.	179
Fig. N° 57 Cociente de bandas para realce de minerales arcillosos.....	180

Fig. N° 57b Cociente de bandas para realce de minerales arcillosos del cuadrilátero San Isidro.....	181
Fig. N° 58 Índice composición mineral.....	183
Fig. N° 58a Índice composición mineral del cerro Bolívar.....	184
Fig. N° 58b Índice composición mineral del cuadrilátero San Isidro.....	184
Fig. N° 59 Modelo digital de elevaciones del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro.....	185

CAPITULO I

INTRODUCCION

El sensor Enhancement Thematic Mapper (ETM+) del satélite Landsat 7 fue puesto en funcionamiento por la NASA en abril de 1999. Respecto a su precursor, el sensor TM del Landsat 5, tiene algunas mejoras, tanto espaciales como radiométricas. El sensor ETM+ tiene una mayor resolución espacial en los canales térmicos, ya que pasa de los 120 m en el TM a los 60 m; además este sensor aunque mantiene los 30 m de resolución en las bandas del visible e infrarrojo próximo y medio, incluye una banda pancromática con 15 m de resolución. Las bandas térmicas se desdoblan en dos canales, el 6a y 6 b, con una longitud de onda de 11,5 a 12,5 y de 10,5 a 11,5 micrómetros respectivamente. Por estas razones supone una mejora para los estudios del medio físico.

El objetivo de este trabajo es tratar de identificar minerales ricos en hierro en el Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro, ubicadas en el Edo. Bolívar, corroborando dichos estudios con la cartografía geológica levantada por métodos tradicionales.

Se ha escogido estos lugares debido a que son las minas más representativas de dicha región, suficientemente extensa y fácilmente observable desde el espacio debido a la poca nubosidad de esta zona y al escaso recubrimiento vegetal. Además, están perfectamente delimitados en mapas geológicos realizados por Ferrominera del Orinoco filial de la CVG, en escalas 1:5000 compilado por G. Ascanio (Marzo 1976) y diversos autores.

Los suelos de esta zona han sido estudiados en el pasado mediante exploración geológica-geofísica tradicional, donde se requería de una gran logística y tiempo considerable para estudiar una extensión de tal magnitud, entre ellos podemos destacar los estudios realizados por Ascanio y Araujo (1977); J.C Ruckmick y S.E Luchsinger (1959)

En cuanto a la aplicación de la teledetección en la cartografía de suelos ricos en hierro, no se han hecho aun algún estudio con el sensor remoto ETM+ en Venezuela, pero sí se han conseguido resultados favorables en otros países.

El objetivo del presente trabajo es comprobar, en un área bien conocida, si el sensor ETM+ tiene una ventaja respecto a la exploración geológica- geofísica tradicional y además, si sirve de complemento a la cartografía tradicional, con el fin de extrapolar estos resultados a otras áreas donde aún no estén suficientemente bien cartografiadas estas unidades de suelos.

ÁREA DE ESTUDIO

Localización geográfica

Los yacimientos de hierro del Distrito Ferrífero Piar se encuentran ubicados entre $63^{\circ} 10'$ de Longitud Oeste y $7^{\circ} 25'$ de Latitud Norte. Éste abarca una extensión aproximada de 11 Km. de largo por 5 Km. de ancho, representando una extensión aproximada de 5.500 ha.

El cuadrilátero se encuentra a 12 Km. aproximadamente de Ciudad Piar y se conecta a través de una carretera asfaltada.

En cuanto al Cerro Bolívar este se encuentra a 120 Km. al sur-oeste de Ciudad Guayana y a 100 Km. aproximadamente de Ciudad Bolívar, teniendo una longitud de 8 Km. por 1.6 Km. de ancho (ver Figura No. 1)

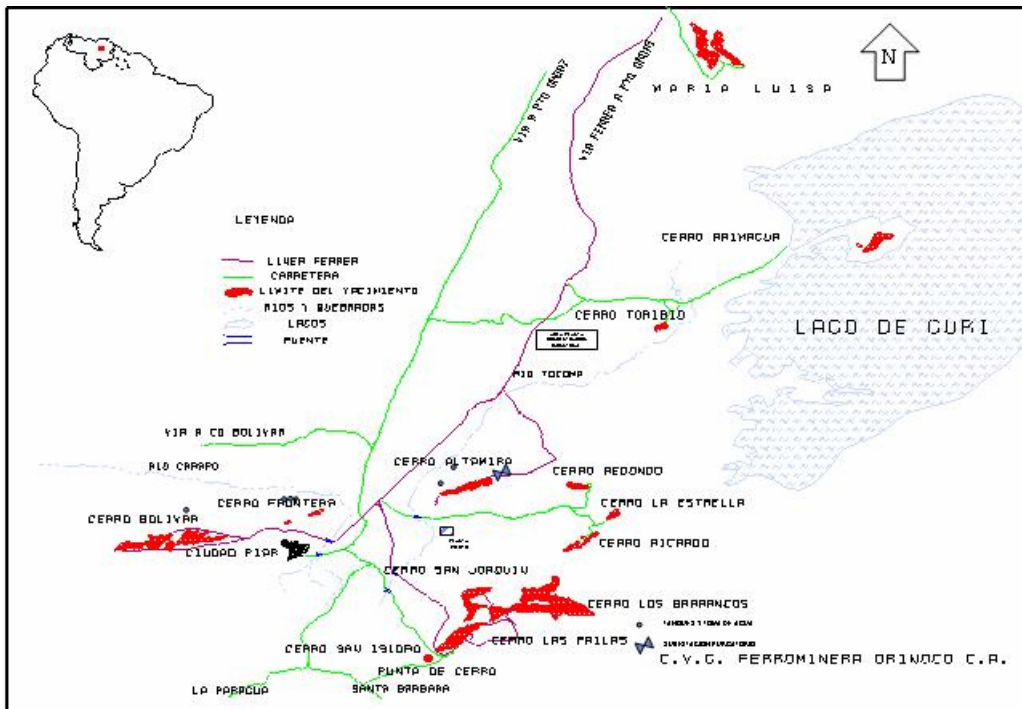


Fig. No 1 Ubicación geográfica del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro
(Fuente CVG-FERROMINERA ORINOCO)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para comenzar a estudiar un área con interés de explotación minera es necesario realizar previamente una serie de estudios, como por ejemplo un estudio geológico a través de salidas de campo, levantamientos aeromagnéticos, estudios gravimétricos, etc., siendo estos estudios necesarios pero de un alto costo económico. El levantamiento de información de campo requiere de un equipo de personas (geólogos) con una logística preparada previamente en donde el trabajo es duro y prolongado. En contraste, los sensores remotos transportados en satélites pueden obtener imágenes de una gran área en corto tiempo y a un costo menor, estando estas imágenes disponibles a todo público.

La utilización de sensores remotos no solamente aporta información visible de la superficie terrestre, sino también aporta información infrarroja/ infrarroja térmica del espectro electromagnético el cual es invisible al ojo humano.

El presente trabajo especial de grado desea aplicar las técnicas de percepción remota y análisis multiespectral como una herramienta alternativa en la exploración geofísica - minera, ya que dicha herramienta es poco utilizada en el campo de las geociencias de nuestro país teniendo grandes ventajas en su utilización.

Se tomo como zona de estudio el cerro Bolívar y el Cuadrilátero de San Isidro, ya que las mencionadas zonas poseen información cartográfica necesaria para corroborar los análisis a realizar y poseen las características requeridas para la utilización de la percepción remota.

OBJETIVOS

Objetivo General

Comprobar las ventajas de los sensores remotos como herramienta alternativa para la prospección geofísica en la zona del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro.

Objetivos Específicos

- 1) Conocer los fundamentos teóricos – prácticos de la percepción remota aplicados a la prospección geofísica.
- 2) Comprobar la efectividad del análisis multiespectral en la caracterización de mineralogía de superficie.
- 3) Clasificar las zonas con alto contenido de minerales ferrosos, zonas con alto contenido de óxidos de hierro, minerales ferrosos y de minerales arcillosos.
- 4) Cartografiar la zona de estudio con las respuestas espectrales obtenidas y correlacionarlas con los mapas geológicos existentes de dicha zona.

JUSTIFICACIÓN

Desde mediados de los años ochenta, la ingeniería aeroespacial ha concentrado grandes esfuerzos en desarrollar sensores remotos con suficiente sensibilidad espectral para la identificación de minerales en la superficie terrestre,

como un paso de avance en relación a los sensores multiespectrales. Este notable desarrollo ha originado numerosas y novedosas técnicas de análisis e interpretación para un volumen creciente de información. Muchas de estas nuevas técnicas se basan en conocimientos bien fundamentados de espectroscopia, como herramienta fundamental para la identificación mineral.

Con la técnica de percepción remota aplicada en este trabajo para las zonas de Cerro Bolívar y el Cuadrilátero de San Isidro en el estado Bolívar, se busca delimitar con mayor exactitud las concentraciones de minerales metálicos y no metálicos que existen en esta región. Ello permitirá optimizar los costos inherentes a la exploración y extracción de minerales, basados en métodos tradicionales utilizados hasta ahora.

El uso de sensores remotos en la exploración geofísica-minera constituye un aporte para obtener mayor información en zonas en explotación minera, e identificar áreas con minerales susceptibles de ser explotados comercialmente.

CAPITULO II

GEOLOGIA

Geología General

En el continente Sudamericano las rocas de edad precámbrica se encuentran principalmente en los Escudos de Guayana y Brasileiro, los cuales están separados por la cuenca del río Amazonas, expresión de una gran

geofractura profunda que se proyecta a más de 70 Km en la corteza. El Escudo de Guayana tiene forma oval y su parte septentrional se encuentra en Venezuela al sur del Orinoco, mientras que en su parte meridional se adentra en Colombia, Brasil, Guayana, Surinam y Guayana Francesa. Se originó durante movimientos tectónicos en el Precámbrico; durante el Cámbrico fue cubierto por el mar y las dos extensas regiones del Brasil y Guayana permanecieron como islas divididas por la Faja del Amazonas. En la parte venezolana comprende rocas arqueozoicas y proterozoicas de muy diversas litologías alteradas en mayor o menor escala durante una serie de eventos tectónicos mayores, cuyos períodos orogénicos tienen edades de 800 millones de años (M.A) hasta 3.600 millones de años.

Con base en caracteres petrológicos y tectónicos, el escudo de Guayana ha sido dividido en Venezuela en cuatro provincias conocidas como: Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima. Éstas se diferencian en sus direcciones estructurales, estilo de deformación tectónica asociaciones litológicas metalogénicas y edades. Petrológicamente, la provincia de Imataca pertenece al denominado Cinturón Granulítico. Por su parte, la provincia de Pastora pertenece a los Cinturones Verdes y Cuchivero se caracteriza por grandes extensiones de granitos (1.800 a 2000 M.A.) y granitos post-tectónicos (1.500 M.A). La provincia de Roraima es una cobertura de sedimentos discordantes sobre rocas pertenecientes a la provincia de Pastora o Cuchivero.

Geología regional.

. La columna estratigráfica del Escudo de Guayana (Fig. N° 2) comienza con el granito gnéisico del Arqueano (Precámbrico Inferior) cubierto discordantemente por metasedimentos de la Era Algonkiana (Precámbrico Superior). Las rocas Precámbricas más antiguas son metamórficas, de alto grado, parcialmente magmáticas, representadas por paragneises, esquistos anfibólicos y anfibolitas, intrusionadas por granodioritas y rocas magmáticas básicas completamente deformadas.

Las zonas comprendidas en el estudio (Cerro Bolívar y Cuadrilátero San Isidro) están localizadas en la Provincia Imataca, y las rocas incluidas dentro de ella han sido denominadas Complejo Imataca. Las rocas que componen el Complejo Imataca afloran en la parte norte del estado Bolívar,

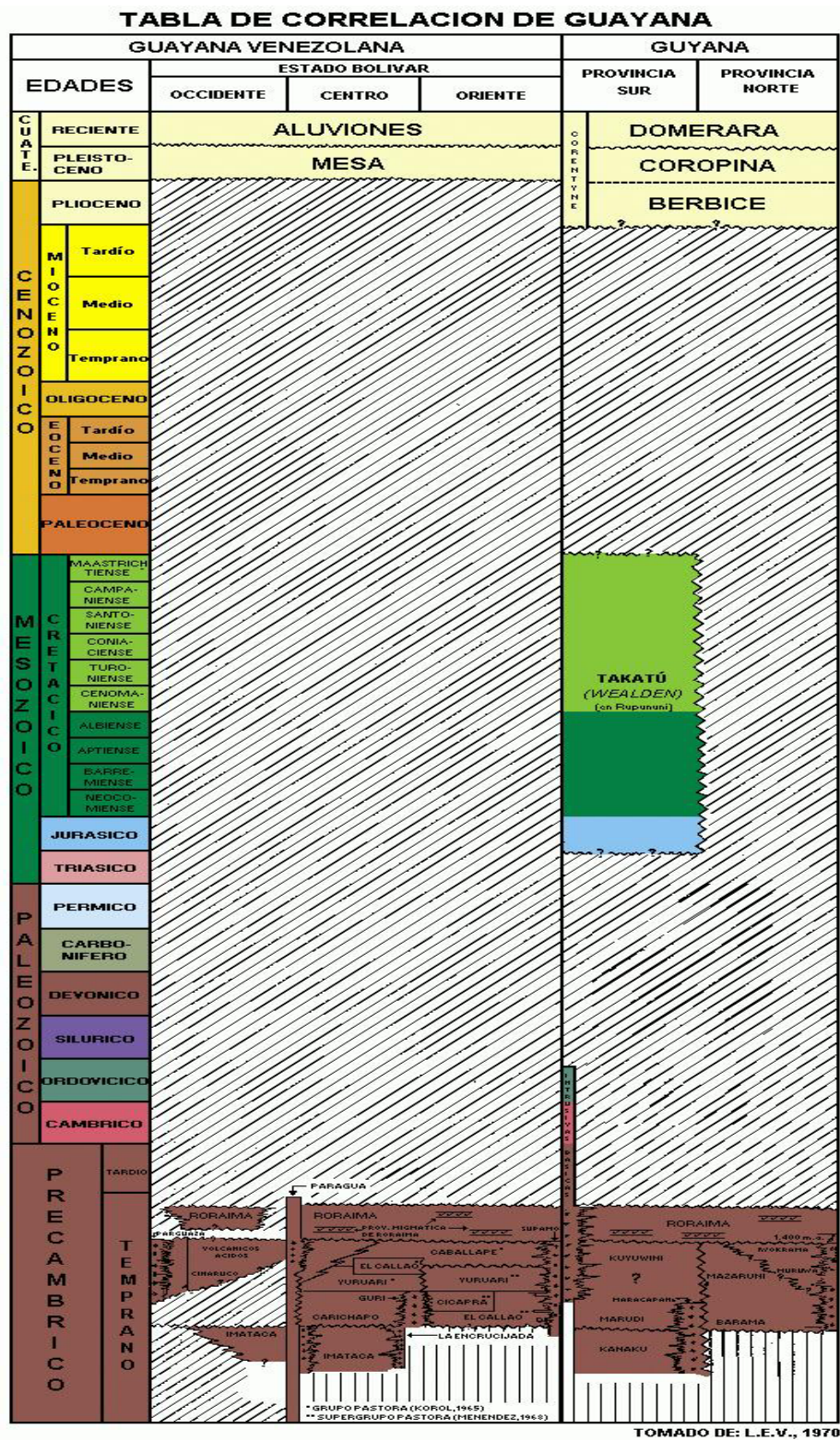


Fig. N° 2. Tabla de correlación de Guayana (fuente L.E.V. ,1996)

al Este del Río Caura y paralelamente al río Orinoco hasta penetrar en el Estado Delta Amacuro y representan, hasta la fecha las rocas más antiguas del país; con una roca de edad comprendida entre 3.500 - 3.600 M.A.

La litología característica del Complejo Imataca son gneises félsicos y máficos intercalados con capas de cuarcitas y cuarcitas ferruginosas, granulitos, esquistos anfibólicos, anfibolitas, mármoles dolomíticos y areniscas cuarzosas; existen además intrusiones de rocas granitoides, básicas, diques, sills de diabasa, vetas de pegmatita, aplita y cuarzo. El conjunto está extensa e intensamente plegado y fallado, los ejes de los grandes pliegues alargados se orientan en dirección N70° – 90° E y en su gran mayoría son isoclinales.

Geología local

Cuadrilátero Ferrífero San Isidro

Se podría considerar la totalidad del Cuadrilátero como un yacimiento, pero por razones de sistematización de los datos y debido al hecho que los cuerpos están separados, se ha dividido en los siguientes yacimientos: San Isidro, Las Pailas, San Joaquín y Los Barrancos. Debido al gran tamaño de este último, el mismo ha sido dividido en dos yacimientos: Los Barrancos I y Los Barrancos II. Los cuerpos de mena afloran en la parte superior de las colinas entre 430 y 800 m sobre el nivel medio del mar, en cuya superficie afloran casi exclusivamente los tipos de menas de corteza (costra) y a mayor profundidad se presentan diferentes

tipos de menas friables (finos) con intercalaciones de costras; estos finos pasan transicionalmente a cuarcitas ferruginosas friables, cuarcitas ferruginosas duras, hasta alcanzar las zonas de estéril (laterita).

Estructuralmente el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro concuerda con los patrones estructurales del Complejo de Imataca. Las principales fallas de carácter regional tienen una orientación NE-SO con desviaciones locales. Generalmente el plegamiento es isoclinal con planos axiales buzando hacia el sur. La estructura general del yacimiento San Isidro es la de un sinclinorio asimétrico, con plegamiento isoclinal formando un patrón ondulado tipo Echelon que hace que el depósito esté formado por una serie de bolsadas de mena con intrusiones de cuarcitas ferruginosas.

Los yacimientos Los Barrancos y San Joaquín forman parte de un anticlinal cuya parte central está destruida por cizallamiento transversal, el anticlinal forma un pliegue casi acostado con buzamiento hacia el sur. Las Pailas enlaza a todos los yacimientos del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, su ramal este se enlaza con Los Barrancos.

De acuerdo con la estructura los cuerpos de mena residual se desarrollaron a partir de la formación de hierro (cuarcitas ferruginosas) en flancos de estructuras, por lo que la lixiviación de la sílice estuvo influenciada por la

permeabilidad, produciéndose cuerpos enriquecidos irregulares a diferentes niveles que provocó una variación irregular de la misma.

Génesis de los yacimientos del Cuadrilátero San Isidro

Las menas de hierro del Distrito Ferrífero de Piar se originaron a partir de las cuarcitas ferruginosas de Imataca por enriquecimiento supergénico. El proceso que genera las menas es la remoción por meteorización de la sílice y los silicatos de las cuarcitas ferruginosas con la consiguiente concentración residual de óxidos e hidróxidos de hierro.

El proceso de enriquecimiento supergénico de las cuarcitas ferruginosas ha dado origen a distintos tipos de mena según sea la intensidad y naturaleza del proceso, los cambios principales son: la magnetita se oxida a hematina y martita, los minerales de ganga como piroxenos y anfíboles son reemplazados por goetita, dando como resultado menas esencialmente hematíticas-goetíticas-martíticas.

Tipos de menas presentes.

La clasificación de los tipos litológicos de menas se basa en dos grupos principales, las menas de alto tenor y las de bajo tenor. El primer grupo es conformado por menas duras, denominadas finos, estas a su vez se subdividen en cuarcita friable y cuarcita dura, con un porcentaje de hierro menor a 55 %. Un tercer grupo, de menor importancia es el del estéril constituido por materiales no ferrosos.

➤ Menas blandas.

Se agrupan bajo el término de finos, tienen aspecto de arena suelta, frecuentemente se presentan finamente laminados denominándose finos laminados. Suelen ocurrir en grandes masas debajo de las menas duras o interestratificadas con ellas formando bolsadas que se estrechan en profundidad. Los subtipos presentes son:

Finos negros: Mineralógicamente están constituidos por hematita y magnetita (como producto de alteración de la magnetita); en una proporción muy pequeña en el orden de 2 a 3% se presenta goetita, pequeñas cantidades de cuarzo, así como pequeños gránulos arcillosos. Presentan un color gris acerado o negro y pueden alcanzar tenores de hasta 69% de hierro seco.

Finos marrones: Presentan una pequeña variación química con respecto a los finos negros, traducido en un aumento en el contenido de alúmina y de pérdida por ignición que se debe a un incremento en el contenido de goetita y minerales

alumínicos. Tienen un color marrón claro a un marrón oscuro. Suelen encontrarse en el yacimiento por encima de los finos negros e infrayacentes a las costras superficiales.

A su vez los finos negros como los finos marrones se subdividen de acuerdo al contenido de sílice en finos silíceos (Bs. y Fs) y finos muy silíceos (Bv y Fv). Estos son semejantes a los finos simples, pero con mayor proporción de sílice remanente, que en los finos silíceos va de 2 a 6% y en los finos muy silíceos es mayor a 6%, limitados a un contenido de Fe (seco) igual o mayor a 55%, en el yacimiento suelen ocurrir en contacto directo con la cuarcita ferruginosa.

Limonita: Constituida en su mayoría por limonita térrea, blanda, porosa, de color ocre amarillo, y en menor proporción por minerales de arcilla. Mineralógicamente están constituidas por goetita cripto-cristalina y agua capilar o de absorción. Se considera como el producto de meteorización de formaciones ferríferas muy ricas en ferrosilicatos. Se caracteriza por alto contenido de agua de cristalización (mayor al 8%) y con un tenor entre 56 a 62% de Fe seco.

➤ Menas duras.

Costra Hematítica: Compuesta principalmente por hematita especular. Su composición química es muy parecida a la de los finos negros, diferenciándose de estos por presentar un mayor contenido de sílice, alúmina y pérdidas por ignición.

Las costras hematíticas van desde homogéneas y con cristales desarrollados, los cuales pudieran ser agregados de hematita primaria, hasta finamente laminados y bandeadas. Ocurren a diferentes niveles del yacimiento, pueden encontrarse tanto en superficie como interestratificadas con las menas friables en profundidad.

Costra limonítica: Está constituida por proporciones variables de hematita, goetita y limonita como constituyentes mayoritarios. En proporciones muy pequeñas de un orden menor al 5% se encuentran minerales como cuarzo, caolinita, gibsita y otros. Químicamente presentan un aumento en el contenido de alúmina, pérdida por ignición y fósforo. Característicamente se desarrollan encima de los finos marrones muy hidratados.

Costra goetítica: Goetita microcristalina o amorfa, masiva, dura y frágil, de color pardo de brillo mate o negro de brillo adamantino. Mineralógicamente estas goetitas son bastantes puras, en pequeñas cantidades, se presenta limonita cementada, cristales de goetita y cuarzo. Presentan alto contenido de fósforo y el contenido de alúmina se eleva en éstas, posiblemente por la presencia de hidróxidos de aluminio (Gibsita).

Los minerales distintos a los óxidos e hidróxidos de hierro están en un porcentaje inferior al 5% aproximadamente. Se les considera como depósitos de

suspensiones coloidales de hidróxidos de hierro, en fracturas abiertas o cavidades. Su tenor es de aproximadamente un 63% de Fe seco.

Costra masiva: Compuesta por proporciones variables de goetita, limonita y hematita. Por lo general, muestra textura porosa, contiene fragmentos de otras menas y no presentan laminación remanente. Corresponde a un proceso avanzado de meteorización superficial con precipitación coloidal y relleno parcial del espacio poroso. Suelen recubrir bolsones de finos con alta proporción de bandas de limonita amarilla. El tenor de Fe seco oscila alrededor de 64%.

Costra silícea: Presenta microscópicamente granos de cuarzo remanente de las cuarcitas ferruginosas. Su contenido de sílice oscila entre 2 a 6%

Cerro Bolívar

El mineral de hierro del Cerro Bolívar es de tipo secundario, desarrollado a partir de cuarcitas ferruginosas precambrianas de la serie Imataca. Las cuarcitas ferruginosas se componen principalmente de cuarzo, hematita, magnetita y silicatos en menor proporción. En Cerro Bolívar, la sección estratigráfica de cuarcitas aumenta considerablemente de espesor y se repite varias veces como

consecuencia de pliegues muy cerrados entre fallas inversas en estructura imbricada.

Existen dos tipos fundamentales de mena, “costra” y “finos”; ambos a su vez se subdividen químicamente y geológicamente en categorías menores. El mineral de costra, duro y poroso, cubre los yacimientos a manera de manto de quince metros de espesor promedio y se compone de granos de hematita primaria (residuales de cuarcitas) cementados por una matriz de goetita, sueltos o ligeramente cementados por goetita intergranular.

La mena debe su origen a la concentración residual de óxidos de hierro, resultante de la remoción selectiva de la sílice de las cuarcitas ferruginosas por meteorización directa e infiltración de aguas meteóricas bajo condiciones de clima tropical. La matriz de goetita que cementa la costra se explica por:

1) Solución parcial de los óxidos férricos bajo la acción de compuestos orgánicos generados en la superficie; 2) circulación cíclica de aguas cerca de la superficie, resultante de la sucesión intermitente de períodos de lluvia fuerte y de evaporación rápida.

Cálculos sencillos, basados en las condiciones climáticas presentes indican que las menas se han formado por lo menos desde el Oligoceno, aunque es probable que tal proceso se remonte hasta el Cretáceo.

CAPITULO III

PRINCIPIOS FISICOS Y FUNDAMENTOS EN TELEDETECCIÓN

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La energía electromagnética es el medio por el cual la información es transmitida desde un objetivo a un sensor. Mientras que para muchos de nosotros es familiar la forma visible de la energía electromagnética, ésta existe en muchas formas además de la luz visible como: Ondas de radio, microondas, Calor, rayos ultravioleta, rayos x, rayos gamma.

Cada uno de ellos describe la energía en una región específica del espectro electromagnético.

El espectro electromagnético representa la continuidad de la energía electromagnética desde longitudes de onda extremadamente cortas (rayos cósmicos y rayos gamma) a longitudes de onda extremadamente largas (radio y televisión). (Ver Figura. No 2). Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales utilizadas con frecuencia.

- Espectro visible (0.4 – 0.7 μm): Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que puede recibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales: Azul (0.4 a 0.5 μm), Verde (0.5 a 0.6 μm) y Rojo (0.6 a 0.7 μm), en razón de los colores primarios que el ojo humano percibe a esas longitudes de onda.
- Infrarrojo próximo (0.7 – 1.3 μm): A veces se denomina también infrarrojo reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de filtros especiales. Resulta de especial importancia por

su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- Infrarrojo medio (1.3 – 8 μm), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 - 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- Micro- ondas (a partir de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

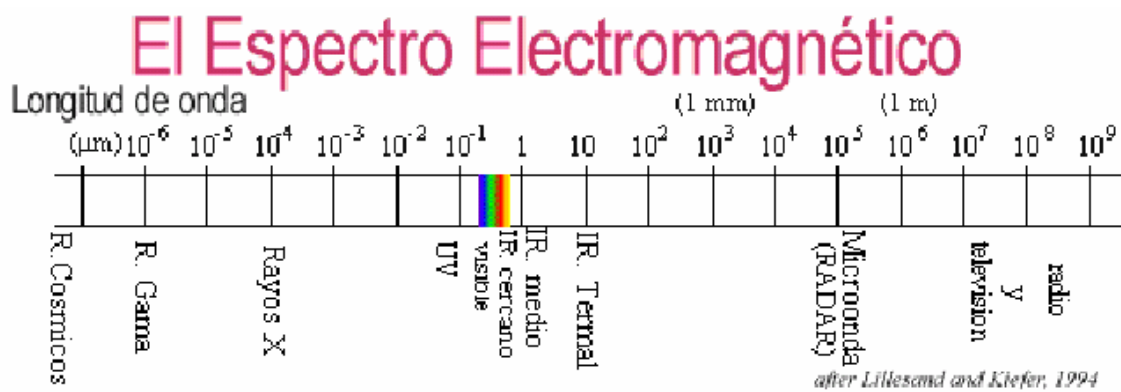


Fig. No. 2 Rangos del espectro electromagnético

TÉRMINOS Y UNIDADES DE MEDIDA

Para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de ésta. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de o dirigida a una superficie y con una dirección concreta. Convendrá, por tanto, explicitar las

unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección, con objeto de ser más rigurosos a la hora de abordar posteriormente los procesos de adquisición.

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones.

Se mide en julios (J).

- Densidad radiante (W). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cúbico (J / m^3).

- Flujo radiante (ϕ). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).

- Emitancia o excitancia radiante (M). Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W / m^2).

- Irradiancia radiante (E): total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien ésta indica la energía emitida, mientras la irradiancia refiere a la incidente (W / m^2).

- Intensidad radiante (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata éste de un ángulo tridimensional, que refiere a la sección completa de la energía transmitida, y se mide en estereo – radianes (Fig.3). Por tanto la intensidad radiante se mide en vatios por estereo – radian (W / sr).

- Radiancia (L): Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección, por que, de hecho, describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estereo – radian ($W / m^2 sr$).

- Radiancia espectral (L_λ). Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por un ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia también puede completarse con el calificativo de espectral (añadiéndole el subíndice λ), para referir a una determinada longitud de onda.

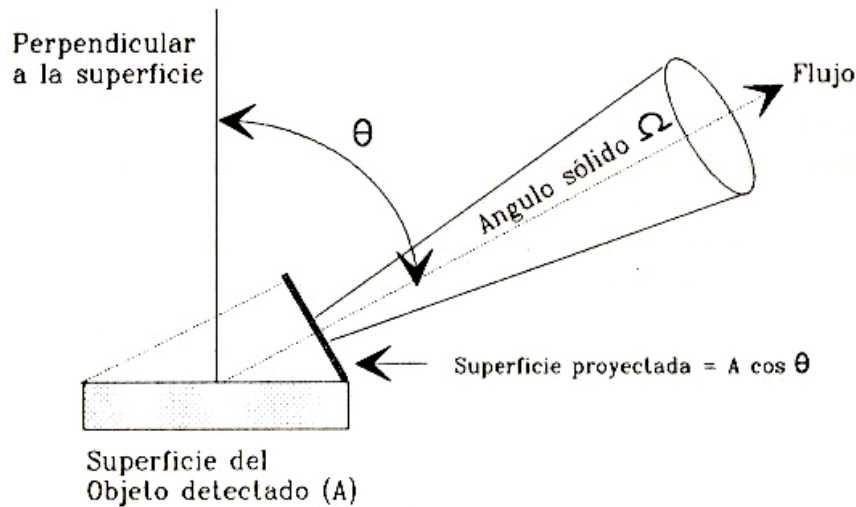


Fig. No. 3 Diagrama de un ángulo sólido

PRINCIPIOS Y LEYES DE LA RADIACIÓN ELECTRO-MAGNÉTICA

El objeto de esta sección es caracterizar espectralmente las distintas cubiertas de interés medio ambiental. Para ello, resulta obligado comentar los procesos más importantes que permiten explicar ese comportamiento, así como los factores que intervienen en su variación. Esta base permitirá abordar una

interpretación más rigurosa de la imagen finalmente obtenida por el sensor. De acuerdo a la fórmula de la cantidad de energía transportada por un fotón:

$$Q = h (c / \lambda) \text{ (ecuación No 1)}$$

En donde h es la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J s), c la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y λ expresa la longitud de onda.

La cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda. Esta relación entre flujo de energía y longitud de onda, puede establecerse con mayor rigor gracias a la ley de Planck:

$$M_{n,\lambda} = 2 \pi h c^2 / \lambda^5 (\exp. (hc / \lambda kT) - 1) \text{ (ecuación No 2)}$$

Donde $M_{n,\lambda}$ indica la emitancia radiactiva espectral de un *cuerpo negro* a una determinada longitud de onda (λ); h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ W s² / K); c es la velocidad de la luz; λ la longitud de onda y T la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin, K). Esta fórmula se puede simplificar sustituyendo algunos términos por constantes:

$$M_{n,\lambda} = c_1 / \lambda^5 (\exp. (c_2 / \lambda kT) - 1) \text{ (ecuación No 3)}$$

Donde c_1 puede sustituirse por $3,74 \times 10^{-16}$ Wm², y c_2 por $1,44 \times 10^{-2}$ mK.

En pocas palabras, la fórmula de Planck nos señala que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273 °C) radia energía, y que ésta incrementa con la temperatura. A la vez, a mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. De esta fórmula podemos reconstruir la curva de emitancia de un cuerpo negro a distintas temperaturas (Figura No 4). El gráfico es muy interesante para conocer el comportamiento espectral de un objeto, siempre que conozcamos su temperatura y emisividad; esto es, su grado de similitud con un cuerpo negro.

A partir de la fórmula de Planck puede calcularse la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura (T) en Kelvin. Esta es la llamada ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = 2998 \mu\text{m K} / T \text{ (ecuación No 4)}$$

Que tiene una gran importancia para seleccionar la banda más conveniente para detectar un determinado fenómeno, siempre que se conozca su temperatura. Por ejemplo, en el caso de los incendios forestales, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre 275 y 420° C. la ley de Wien nos permite situar entre 5,28 y 4,30 μm (infrarrojo medio) la banda espectral más adecuada para su detección. Por su parte, el sol, con una temperatura radiante próxima a los 5700°C presenta su máxima emitancia en la región del espectro visible (0,4 a 0,7

μm). En definitiva, cuanto más caliente esté el objeto emisor radiará longitudes de ondas más cortas.

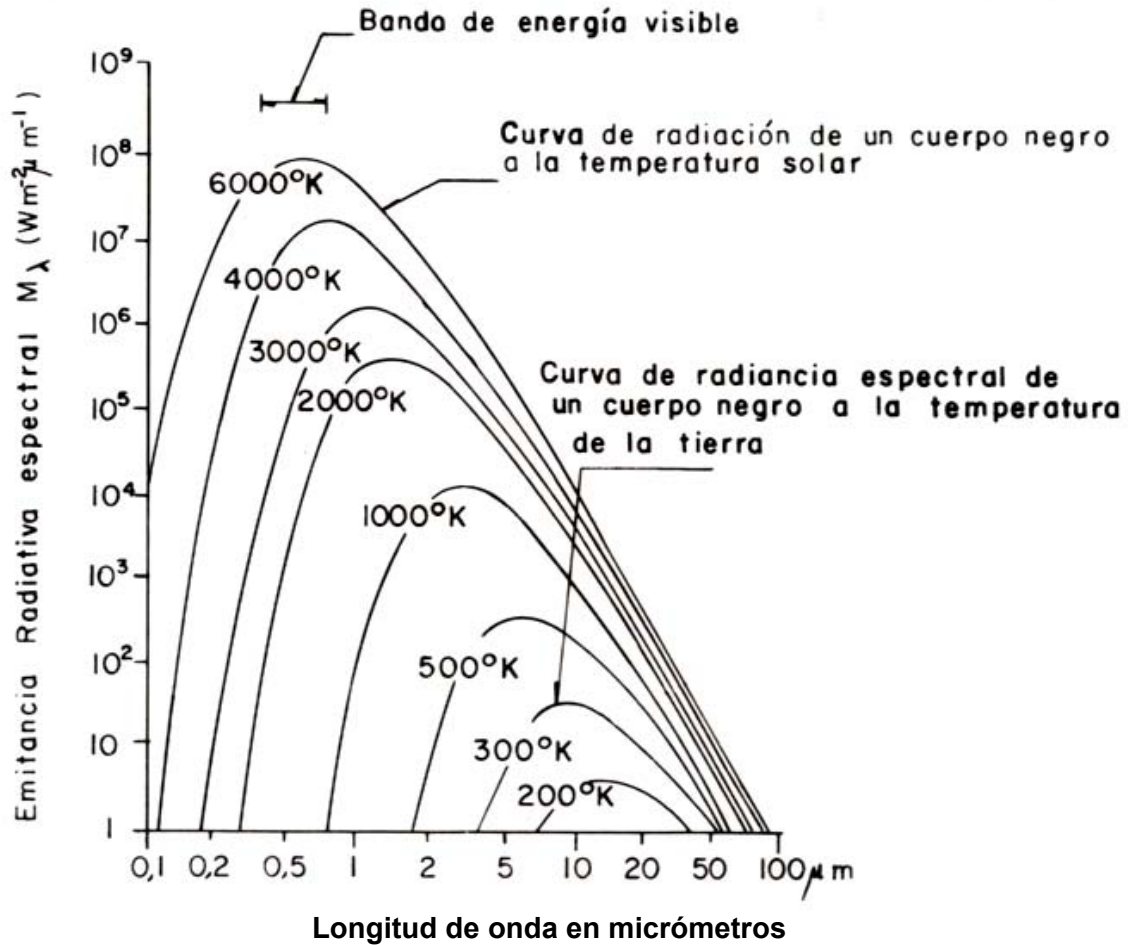


Fig. No. 4 Curva de emitancia radiativa

Acumulando la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de ondas, podemos calcular el total de energía que radia por unidad de superficie, gracias a la ley de Stefan – Boltzmann:

$$M_n = \sigma T^4 \quad (\text{ecuación No 5})$$

Donde σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), y T la temperatura en Kelvin. Gracias a esta fórmula, resulta evidente que la emitancia global de un objeto es una función de su temperatura, y que pequeños cambios en ésta suponen notables modificaciones en la emitancia radiante. Por otra parte, conociendo la temperatura de un objeto emisor, podemos también estimar la irradiancia incidente sobre el sensor, por cuanto emitancia e irradiancia son funcionalmente equivalentes.

Hasta aquí, hemos supuesto que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, lo cual es una exagerada simplificación. Por ello, se han de corregir las fórmulas anteriores añadiendo un nuevo parámetro, la emisividad, de acuerdo a la Ley de Kirchhoff.

$$M = \epsilon M_n \quad (\text{ecuación No 6})$$

La emisividad se define como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto y la que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura. Con este nombre se indica un emisor perfecto; esto es, un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe. También se habla de cuerpos blancos o reflectores perfectos, cuando no absorben nada de la energía incidente, sino que reflejan por completo (emisividad = 0). Asimismo, se denominan cuerpos grises a aquellos objetos que absorben y emiten de forma constante en distintas longitudes

de onda (emisividad constante). Cuando la emisividad varía con la longitud de onda, se habla de radiadores selectivos. Son los más frecuentes en la naturaleza. Gracias a ese comportamiento particular, pueden discriminarse de otro tipo de superficies en el infrarrojo térmico.

A partir de las ecuaciones [2 a 6] se puede estimar la emitancia total y espectral de un objeto conociendo su temperatura absoluta, siendo aquella tanta mayor cuanto más alta sea ésta. En definitiva, la energía emitida desde un objeto es primariamente una función de su temperatura. Pequeños cambios en ésta suponen una modificación sensible de la emitancia total, de acuerdo a la ecuación No 5. Además, conociendo la temperatura de un objeto o cubierta de interés, y dado que pueda estimarse su emisividad, puede determinarse la banda del espectro que resulte más idónea para su discriminación.

Con estas nociones se puede abordar al análisis más detallado de las tres bandas del espectro en donde se realizan procesos de teledetección: longitudes de ondas cortas (desde el visible al infrarrojo medio), medias (térmicos) y largas (micro- ondas).

EL DOMINIO ÓPTICO DEL ESPECTRO

Características de la radiación energética en el espectro óptico

Se denomina dominio óptico del espectro a aquel grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar. También se han incluido en este epígrafe las correspondientes al infrarrojo medio, puesto que mantienen una importante relación con esta fuente de energía, si bien se encuentran a medio camino entre ésta y la derivada de la emisión de calor que realizan los objetos.

En cualquier caso, conviene analizar con más detenimiento en éste apartado las características espectrales del sol, fuente primordial de energía radiante en nuestro planeta. Más adelante nos detendremos en analizar el comportamiento de las principales coberturas terrestres frente a este tipo de radiación.

El sol se encuentra a una temperatura radiante próxima a los 6000°K . Esto implica, según la ley de Wien, que su máxima emitancia espectral se produce en torno a las $0,48\text{ }\mu\text{m}$, coincidente con el color verde apreciado por nuestros ojos. La curva espectral de la radiación solar se asemeja bastante a la de un cuerpo negro a esa temperatura, tal y como aparece en la figura No. 5 en este gráfico se observa como el sol presenta una banda de elevada emitancia entre $0,3$ y $2\mu\text{m}$, reduciéndose en valores más altos y más bajos de este sector por efecto de la atmósfera. A esa banda se le denomina dominio óptico del espectro, y constituye la región de mayor interés para observación remota de la superficie terrestre

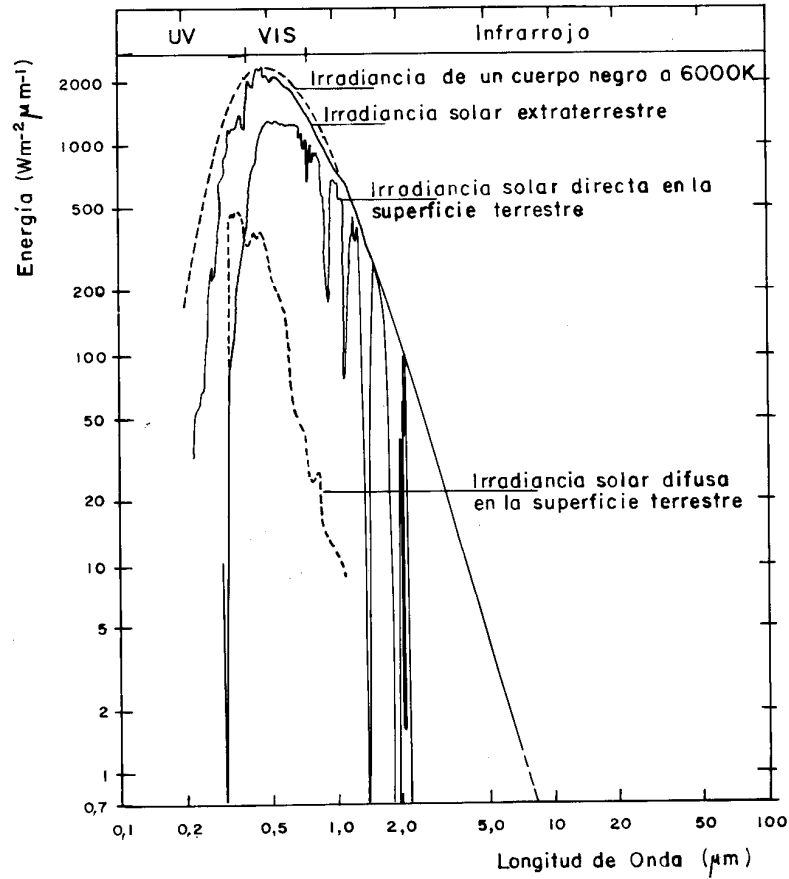


Fig. No. 5 Curva de emitancia radiactiva del Sol

Hasta aquí se ha considerado el origen de la radiación. Más importante aún es entender cómo este flujo interacciona con la superficie terrestre. La radiación que ésta recibe puede descomponerse en tres términos (Fig. 6):

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (\text{ecuación No.7})$$

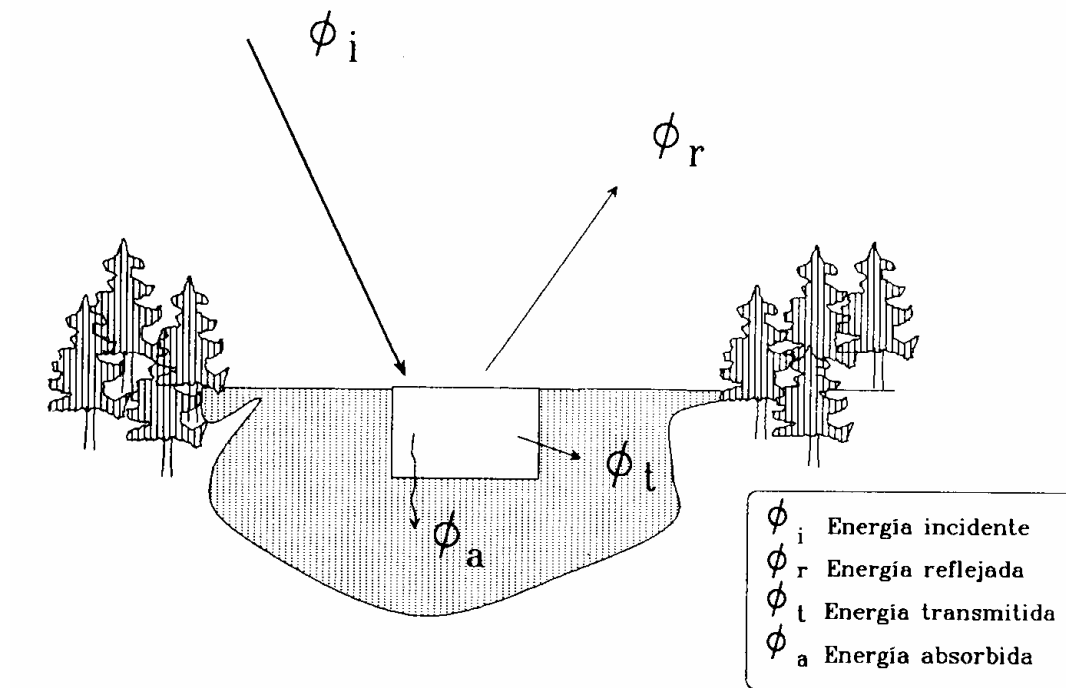


Fig. No. 6 Relación entre flujo incidente y reflejado

Esto es, el flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido. Resulta conveniente expresar esta fórmula en unidades relativas. Para ello, basta dividir cada término de la expresión anterior por ϕ_i

$$\phi_i / \phi_i = \phi_r / \phi_i + \phi_a / \phi_i + \phi_t / \phi_i \text{ (ecuación No 8)}$$

O, lo que es lo mismo:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad \text{(ecuación No 9)}$$

En definitiva, la suma de la reflectividad, absorptividad y transmisividad ha de ser igual a uno. La relación entre las tres magnitudes no es constante con la longitud de onda, por tanto, en términos más rigurosos, debería expresarse como:

$$1 = \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (\text{ecuación No 10})$$

La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa. Por cuanto esa proporción varía en distintas bandas del espectro, conociendo el comportamiento de dicha cubierta en diversas longitudes de onda, de cara a realizar una más atinada discriminación, puesto que sólo cuando existan divergencias espectrales entre dos superficies podrán éstas separarse adecuadamente.

En el caso del espectro visible, ese comportamiento disimilar de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que llamamos color: un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto (dicho de otro modo, si absorbe o transmite poca energía incidente en esa banda), mientras será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en otras.

A partir de medidas de laboratorio, se han obtenido unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres (Fig. 7). Como puede observarse, algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo. La nieve presenta una reflectividad alta y constante, pues refleja la

mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, tanto más según nos situamos en longitudes de onda mayores. Por su parte, la vegetación presenta un comportamiento muy cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible y más elevado en el infrarrojo cercano.

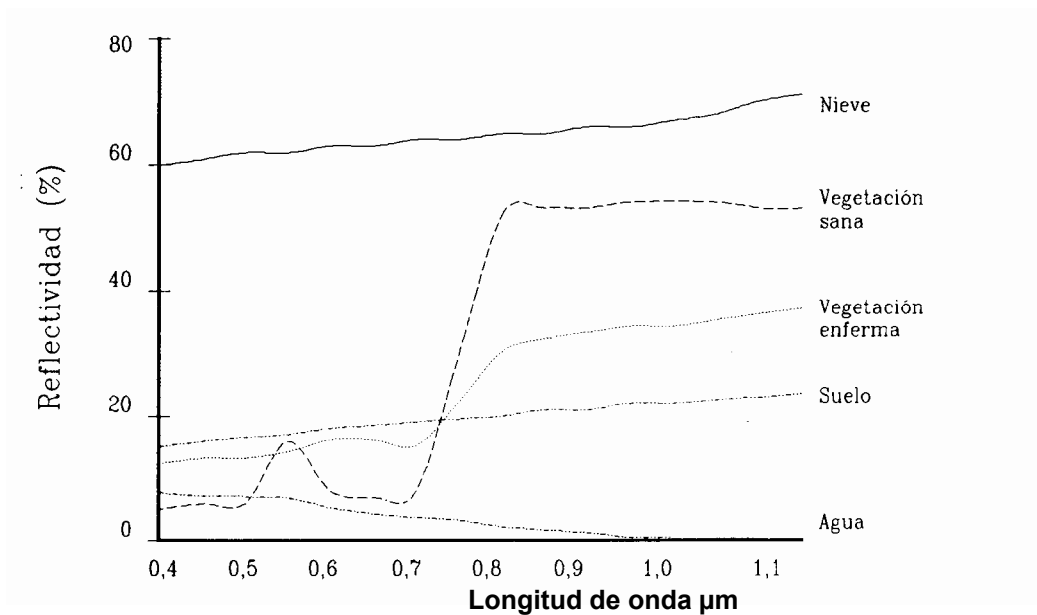


Fig. No.7 Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas

EL DOMINIO DEL INFRARROJO TÉRMICO

Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico.

De acuerdo con las leyes de Planck [ecuación No.2] y Wien [ecuación No.4], se puede fijar entre 8 y 14 μm la banda espectral en donde se manifiesta con mayor claridad la emitancia espectral de la superficie terrestre, de acuerdo a su temperatura (300° K). A esta parte del espectro se le denomina infrarrojo térmico, puesto que nos permite detectar el calor que procede de las distintas cubiertas. En definitiva, la radiancia espectral que recibe el sensor no es el resultado de la reflexión de la energía solar sobre la superficie terrestre, sino de la propia emitancia de ésta en función de su temperatura.

Como ya se vio anteriormente [ec. N° 5] la emitancia espectral de un objeto está directamente relacionada con su temperatura absoluta. A la vez, ésta se relaciona con su capacidad para absorber la radiación solar incidente. De la ecuación No 9 se deduce que ésta puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Considerando que la transmisividad es prácticamente nula en el infrarrojo térmico, la expresión puede simplificarse indicando que, a esas longitudes de onda, la energía incidente o bien se refleja o bien se absorbe. Junto a ello, es preciso tener en cuenta que la emisividad espectral de un objeto es equivalente a su absorptividad (ley de Kirchoff). En otras palabras, a mayor absorción, mayor emisión, por lo que podemos expresar la ecuación No.9 indicando:

$$1 = \rho + \varepsilon$$

Lo que en resumen, significa que las superficies con alta reflectividad (caso de la nieve) son poco emisivas, mientras las pocas reflectivas son altamente emisivas (como el agua).

Como se mencionó anteriormente, la emisividad de un tipo de cubierta es una medida relativa, que pone en relación su emitancia con la de un cuerpo negro (Fig.7). Una alta emisividad (cercana a 1) indica que un objeto absorbe y radia una pequeña proporción de la energía incidente, mientras una baja emisividad considerablemente inferior a 1, refiere a un objeto que absorbe y radia una pequeña proporción de la energía incidente. En el caso de las cubiertas de interés medio ambiental, la mayor emisividad, se presenta en la vegetación densa (0,99) y el agua (0,98), mientras los valores más bajos corresponden a los suelos arenosos (0,90), nieve (0,80) y metales (0,16). El contenido de humedad modifica notablemente estos valores. Así en suelos arenosos se han medido incrementos de emisividad de 0,90 a 0,94 al aumentar un 8 % el contenido de humedad (Mulders, 1987). Los valores de emisividad se calculan para una temperatura media, en este caso en torno a 20° C (Curran, 1985)

A partir de la medida de emisividad puede estimarse la emitancia de un objeto, conociendo su temperatura. En este sentido puede corregirse la ley de Stefan – Boltzmann, introduciendo el parámetro de emisividad:

$$M_n = \epsilon \sigma T^4$$

Esto implica que dos objetos situados a la misma temperatura pueden presentar emitancias radiantes distintas. De esta forma, parece evidente la necesidad de corregir los valores adquiridos por el sensor en esta banda con el factor de emisividad. Ésta puede estimarse siempre y cuando la cubierta detectada sea homogénea. En caso de un área con cubiertas muy distintas,

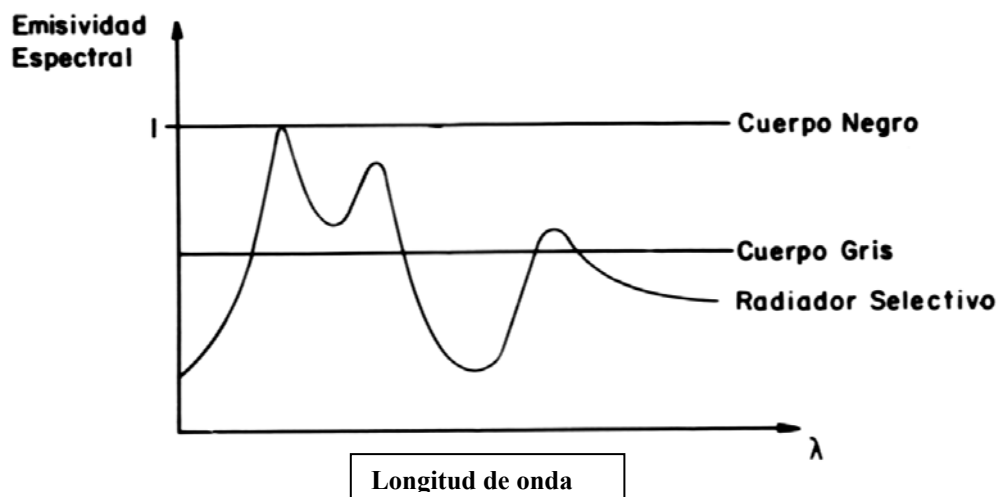


Fig. N° 7 Emisividad espectral de distintos cuerpos (adaptado de Elachi, 1987)

cada una de ellas con su propia emisividad, el problema sería mucho más complejo. Habría de hacerse una corrección en función de las coberturas presentes en esa zona, conociendo la emisividad propia de cada una de ellas. En ocasiones se ha utilizado un mapa de ocupación del suelo previo para facilitar la corrección de emisividades (Caselles et al, 1984), aunque también puede basarse en una correlación de radiancias – temperaturas con medidas tomadas en el terreno o en estaciones meteorológicas (Caselles et al, 1983).

Gracias a esta corrección puede estimarse la temperatura de un objeto a partir de las medidas obtenidas por el sensor. Ahora bien, es preciso tener en cuenta que estas medidas hacen referencia a la temperatura radiante de dicha cubierta, y no a la temperatura termométrica. La diferencia está motivada por dos factores: el efecto atmosférico y la propia emisividad de la cubierta. La relación puede expresarse como:

$$T_{rad} = \epsilon^{1/4} T_{ter}$$

Donde T_{rad} , indica la temperatura radiante de la cubierta; ϵ , la emisividad, y T_{ter} , la temperatura termométrica de esa misma cubierta. Es interesante puntualizar que sólo se trata de una estimación de la temperatura termométrica, puesto que la temperatura radiante está en relación con la temperatura de la superficie y no con la del interior de la cubierta.

Además de la emisividad, el comportamiento térmico de un objeto está relacionado con otros parámetros. Los más importantes son: capacidad térmica, conductividad, difusividad, inercia térmica e índices de calentamiento.

La capacidad térmica (C) indica la capacidad de la cubierta para almacenar calor. La capacidad térmica por unidad de masa se denomina calor específico (c): Las masas de agua poseen la mayor capacidad térmica, por lo que pueden almacenar más calor que la vegetación o, los suelos.

La conductividad térmica (k), mide el ritmo al que se transmite el calor en esa cubierta. Las áreas urbanas son buenas conductoras de calor, mientras la vegetación o suelos resisten más esta transferencia. Por ello, la temperatura diurna en zonas de cubierta vegetal es fundamentalmente una función de la temperatura de la capa superior, y no de capa inferiores.

La difusividad térmica (K) es una medida del cambio de temperatura que se produce en el interior de la cubierta. En general, las superficies secas difunden los cambios de temperatura hacia abajo a una velocidad menor que las superficies húmedas.

Por último, la inercia térmica (P) hace referencia a la resistencia de un material a cambiar de temperatura. Este parámetro está directamente relacionado con la conductividad (k), el calor específico (c) y la densidad del material (D), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{DcK}$$

Los suelos secos y arenosos con baja inercia térmica ofrecen severos contrastes entre las temperaturas diurnas y nocturnas. En contraste, los suelos húmedos y arcillosos son mucho más resistentes al cambio y presentarán temperaturas diurnas inferiores y nocturnas superiores a los suelos secos. (Fig. 8). La inercia térmica es más fácilmente detectable en los momentos de máxima y mínima insolación, aproximadamente a las 12 AM y PM, respectivamente.

En cuanto al índice de calentamiento, es función de la intensidad de la radiación y de la absorptividad del objeto. La intensidad es menor en aquellas zonas arboladas, con nubes o con edificios que impidan la radiación directa. También está afectado directamente por la pendiente o exposición de las laderas.

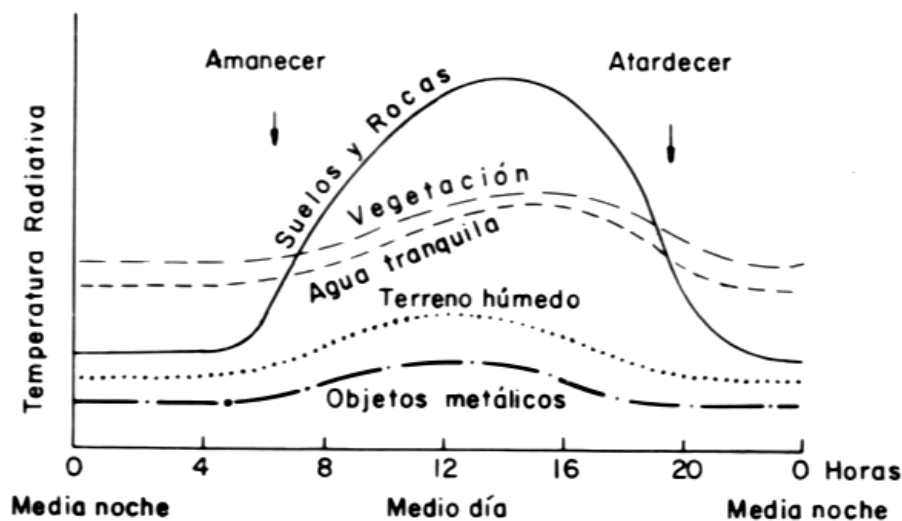


Fig. N° 8 Inercia térmica estimada para diversas cubiertas (adaptado de Short, 1982)

Los suelos en el dominio térmico.

Respecto a los suelos, el factor más destacado es su contenido de humedad. A mayor humedad, el suelo presentará una mayor inercia térmica, puesto que aumenta su calor específico y conductividad. Esto le lleva a presentarse más frío durante el día y más cálido durante la noche que los suelos secos.

Otros parámetros a considerar serían la densidad, calor específico y conductividad. Diversos estudios de laboratorio han mostrado como el cuarzo

presenta una densidad y calor específico similar a la arcilla, pero ofrece valores de conductividad mucho más elevados. Por ello, su inercia térmica es mayor, a la vez que cuenta con bajos valores de emisividad (0,90). Los suelos con alto contenido de materia orgánica ofrecen los valores más bajos de conductividad, por lo que tienden a mostrar más nítidamente las diferencias de temperatura entre el día y la noche.

EJEMPLOS DE PROPIEDADES TERMALES DE DIVERSOS CUERPOS.

Thematic Mapper (TM) de Landsat

En la imagen de la Figura No.9 pueden ser observadas tres categorías geológicas que dominan la escena:

Rocas volcánicas oscuras, productos de alteración, derivados de éstas, y montañas de calizas.

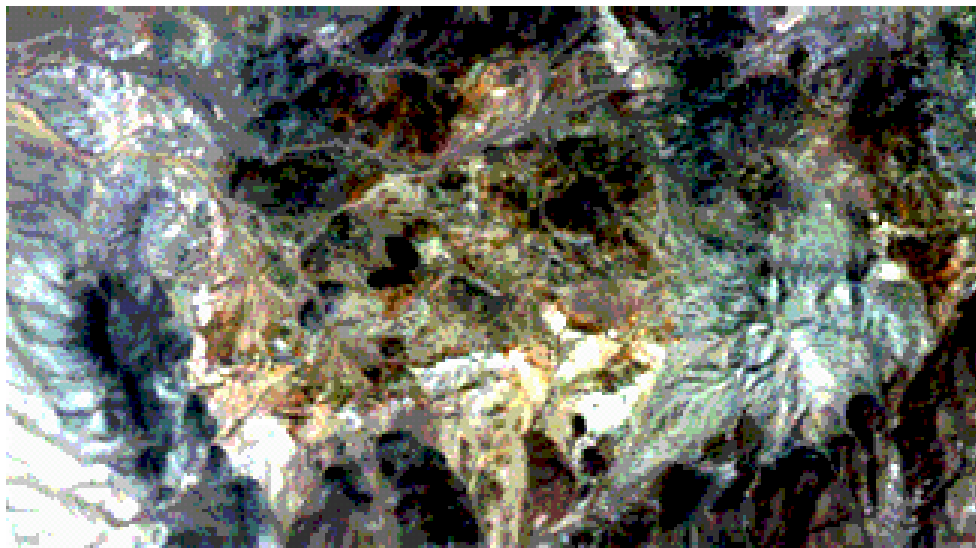


Fig. N° 9 Escena TM del Monte Blanco

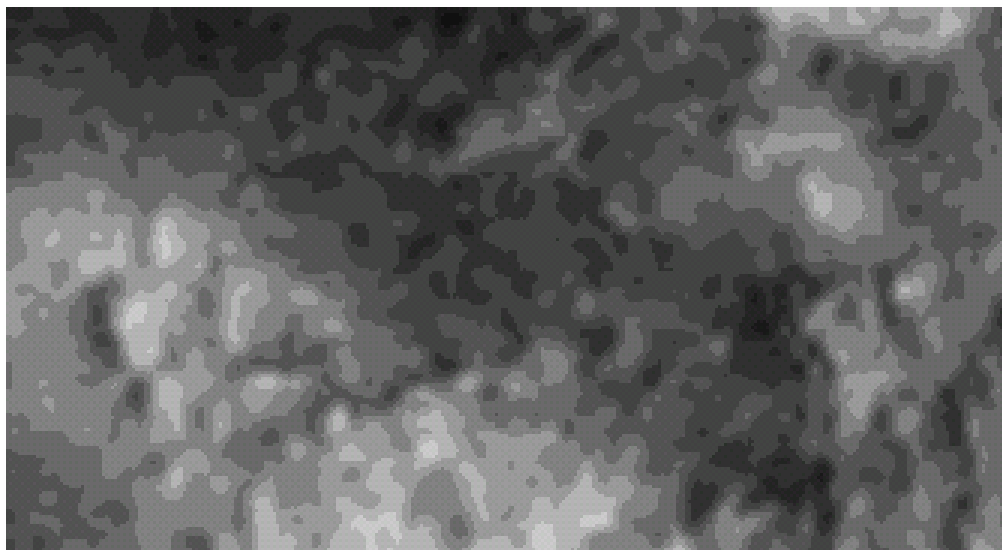


Fig. N° 10 Escena del Monte Blanco en la banda 6 del termal del Landsat

En la banda seis del termal Landsat – TM (Fig. No. 10) el contenido de la escena es simplificado enormemente. Las áreas más cálidas (mostradas en tonos más claros) están asociadas principalmente con las rocas volcánicas, la mayoría

de las cuales son basaltos oscuros. Estos últimos son cuerpos negros imperfectos que absorben mucho la radiación solar y la reemiten como radiadores fuertes. Las zonas alteradas son mostradas en tonos oscuros, lo cual implica que menor energía solar es absorbida por ellas y por lo tanto presentan menor temperatura de radiación. Las calizas con alteración superficial café – rojiza, presentan tonos claros moderados, difíciles de distinguir de las expresiones volcánicas.

Por razones experimentales, la banda seis del TM es ocasionalmente puesta en funcionamiento en las noches para obtener imágenes termales. A continuación se presenta un ejemplo de una imagen tomada a las 9:32 PM en la parte este del lago Erie y la Oeste del lago Ontario (Ver Fig. No. 11)



Fig. No 11 Lago Erie y Ontario en la banda seis del TM

El suelo aparece moderadamente fresco (tonos oscuros) con poco detalle, las ciudades de búfalo (punta este del lago Erie), Toronto (cima del centro), Hamilton, Ontario (occidente del lago Ontario), aparecen grises por los miles de fluentes todavía a esta hora. Estas pueden ser discernidas de los patrones de calles y de los tonos ligeramente claros (más cálidos). Un patrón moteado de tonos más claros caracteriza el lago Ontario. Este es relacionado con los efectos de declinación de la temperatura a esta profundidad (237 m). El lago Erie es caliente en forma uniforme debido a que no es tan profundo (67 m). Los ríos cálidos como el Niagara conectan los dos lagos y su tono contrasta con el del suelo.

FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA

Existen tres elementos principales en cualquier sistema de teledetección:

- 1) El sensor.
- 2) El objeto observado.
- 3) El flujo energético, medio de interacción entre los dos primeros.

El sensor es cualquier instrumento que detecte dicho flujo energético de forma tal que pueda ser aprovechado para su estudio. En nuestro caso particular, dichos sensores formarán parte de las plataformas espaciales diseñadas para la observación de la Tierra (objeto) y el flujo será la energía electromagnética proveniente del Sol.

Hay tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto (Figura No12):

- 1) Por reflexión.
- 2) Por emisión.
- 3) Por emisión-reflexión.

En la primera, el Sol (principal fuente energía de la Tierra) ilumina la superficie terrestre y la energía reflejada, en función del tipo de cobertura, es captada por el sensor. Entre la superficie y el sensor se interpone la atmósfera que dispersa y absorbe parte de la señal original.

En la segunda forma, la percepción remota se basa en la energía emitida por la cobertura, siendo sus propiedades térmicas dominantes. Por último, un sensor que genere su propio flujo energético (emisión) y a la vez pueda recoger su reflexión después de ésta haber interactuado con la superficie.

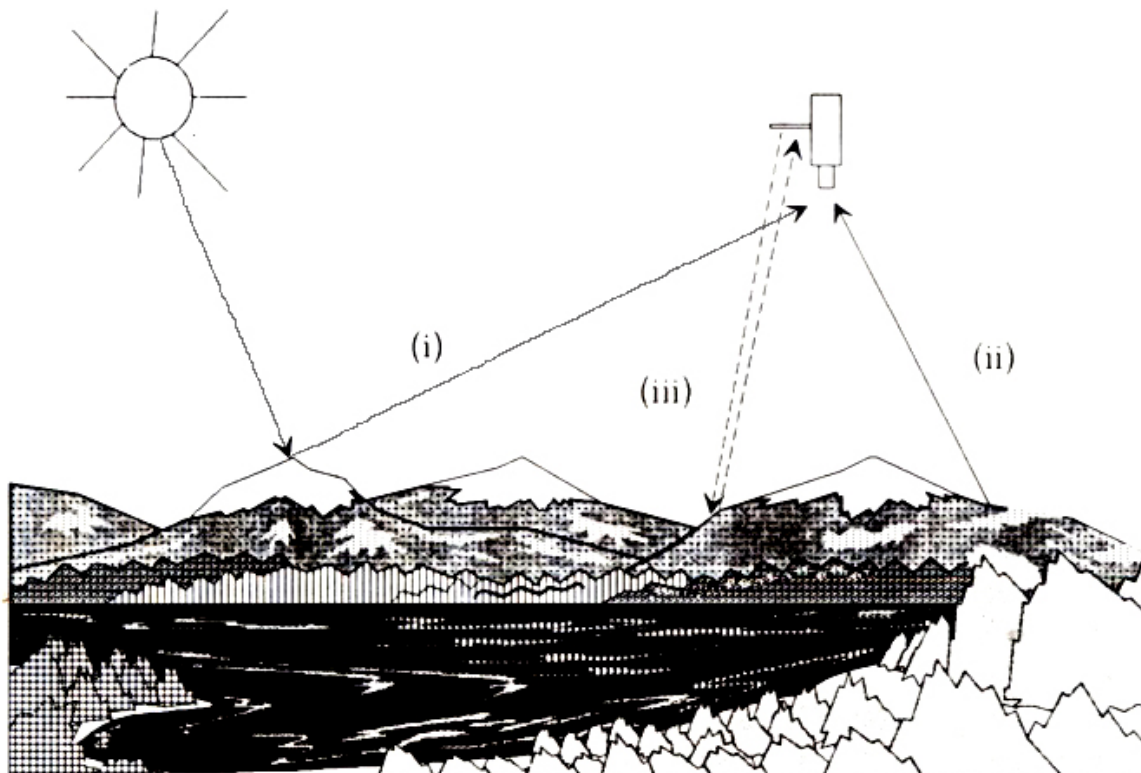


Fig. No. 12 Las tres formas de teledetección: (i) por reflexión, (ii) por emisión (iii) por emisión y reflexión (Adaptado de Chuvieco 1995)

FUENTES DE ENERGÍA EN PERCEPCIÓN REMOTA

La fuente de una vasta mayoría de esta radiación reflejada es el sol. La fuente de energía más a menudo usada para iluminar los objetivos naturales es la irradiación solar (también llamada insolación).

El espectro de la luz del sol es determinado por la temperatura fotosférica del sol (pico cerca de los 5600 °C). La irradiación solar entrante es principalmente confinada al intervalo del espectro entre 200 y 3400 nanómetros (0,2 y 3,4

micrómetros), con el máximo poder de entrada cerca de los 480 nanómetros (0,48 micrómetros) en el verde del visible (Ver Figura No. 13)

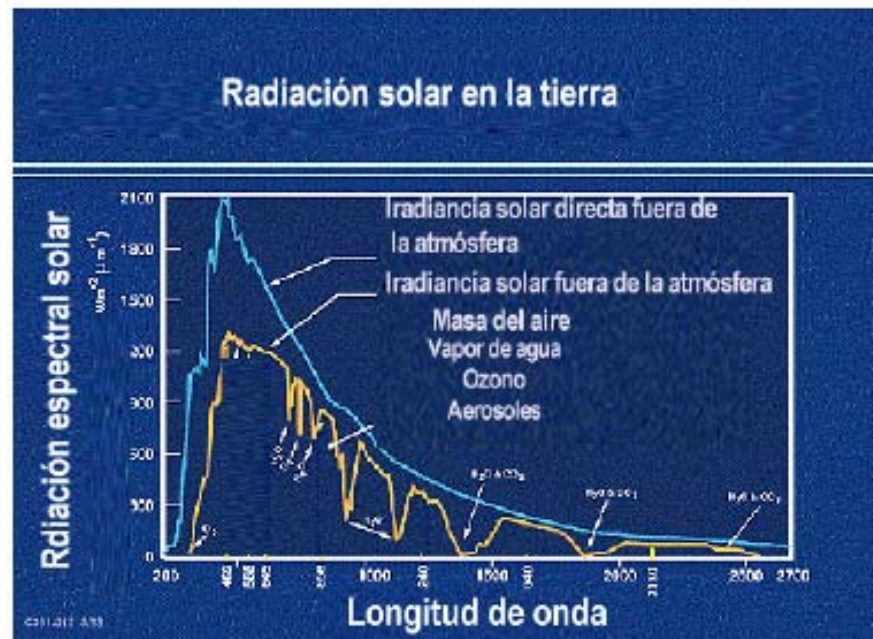


Fig. No.13 Radiación solar de la Tierra.

A pesar de que el sol es la fuente de energía electromagnética más común, que se mide en teledetección terrestre, no es la única fuente de energía que se puede encontrar. Toda la materia a temperatura mayor que el cero absoluto (0° kelvin) continuamente emite radiación electromagnética. Generalmente, entre más caliente sea un objeto, más irradia energía, pero todos los objetos, incluso con movimiento sub-molecular débil irradian alguna energía.

La teledetección usa energía electromagnética de fuentes naturales y hechas por el hombre. Esas fuentes de energía naturales son denominadas fuentes de energía pasivas (Figura N° 14) Las fuentes de energía humanas son denominadas fuentes de energías activas (Figura N° 15).

La energía solar (incluidos: infrarrojo, visible, luz, ultravioleta, rayos x y gamma) y el calor radiante (detectable como el infrarrojo lejano) son ejemplos de fuente de energía pasiva. El radar es ejemplo de fuentes de energía activa.

El radar usa su propia energía y por ello tienen la capacidad de enviar una señal fuerte, garantizando un retorno fuerte desde el cuerpo. La ventaja de usar la energía de las microondas es que pasa a través de las nubes y que la luz solar no es necesaria, por lo tanto las imágenes pueden ser tomadas de noche y bajo condiciones malas de tiempo.

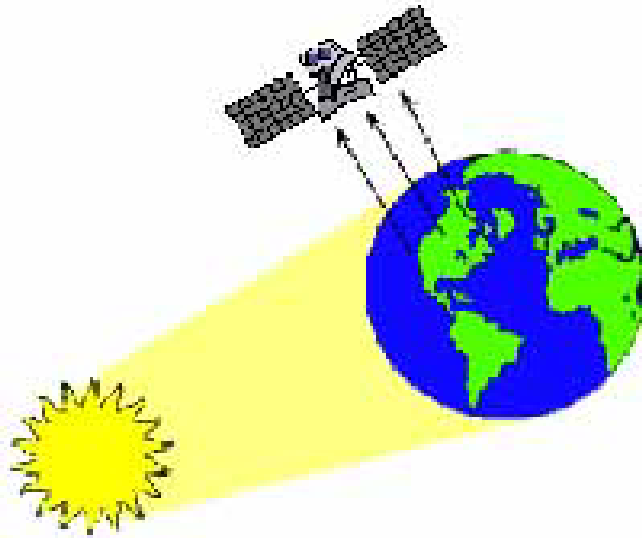


Fig. N° 14 Fuente de energía pasiva



Fig. N° 15 Fuente de energía activa

INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA CON LOS ELEMENTOS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA.

Las ondas electromagnéticas son irradiadas a través del espacio, desde alguna fuente. Cuando la energía encuentra un objeto, incluso si éste es muy pequeño, como una molécula de aire, una de tres reacciones ocurre

- 1) La radiación será reflejada fuera del objeto.
- 2) La radiación será absorbida por el objeto.
- 3) La radiación será transmitida a través del objeto (ver Figura N° 16)

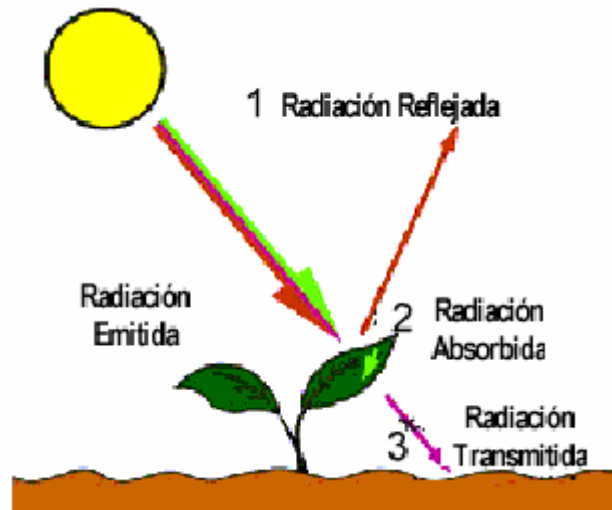


Fig. N° 16 Interacción de la energía electromagnética con los elementos de la superficie terrestre

La cantidad total de radiación que golpea un objeto es llamada radiación incidente y es igual a:

$$\text{Radiación Incidente} = \text{Radiación reflejada} + \text{Radiación absorbida} + \text{Radiación transmitida}$$

La teledetección espacial se involucra en buena parte con la *radiación reflejada*. Ésta es la radiación por la cual nuestros ojos ven colores, los filmes infrarrojos registran la vegetación y las imágenes de radar de la tierra son creadas. Las proporciones contabilizadas para cada proceso dependen de la naturaleza de la superficie, de la longitud de onda, de la energía y del ángulo de iluminación. (Campbell, 1985)

Tipos de reflectancia

Hay dos tipos de reflectancia, dependiendo del tamaño de las irregularidades de la superficie y en relación con la longitud de onda incidente.

Reflectancia especular: Es la reflexión de las superficies lisas, en relación con la longitud de onda incidente. Las partículas de la superficie son pequeñas en relación con la longitud de onda incidente. Las partículas de la superficie son pequeñas en relación con la longitud de onda. La luz es reflejada en una dirección única. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. Es llamada también reflexión de espejo.

A los instrumentos de radar se les dificulta identificar los cuerpos de agua porque la longitud de onda es mucho más grande que el carácter general de la rugosidad de la superficie.

La reflectancia especular ayuda y dificulta la teledetección dependiendo de dónde el sensor es situado en relación con la radiación saliente.

Reflectancia difusa: La superficie es rugosa en relación con la longitud de onda incidente. También es llamada reflectancia isotrópica o lambertiana. La energía es reflejada (dispersa) en todas las direcciones.

Muchas superficies naturales actúan como reflectores difusos en alguna extensión. Un reflector difuso perfecto es referido a una superficie lambertiana y su brillo reflexivo es el mismo cuando se observa desde cualquier ángulo.

INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA CON LA ATMÓSFERA DE LA TIERRA

La modificación atmosférica de la radiación electromagnética entrante y saliente incluye dispersión, refracción y absorción. Esos tres procesos modifican físicamente la dirección y penetración de la radiación electromagnética, en el momento en que pasa a través de la atmósfera.

DISPERSIÓN (DIFUSIÓN)

Es el redireccionamiento de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera (contaminación, polvo) o por moléculas grandes de gases atmosféricos (dióxido de carbono, ozono, gas, nitrógeno). Este redireccionamiento de la luz puede ser en cualquier dirección.

Existen tres tipos básicos de dispersión:

Dispersión de Rayleigh: Se da en la atmósfera superior. Algunas veces es llamada dispersión clara de la atmósfera. Consiste en la dispersión por los gases atmosféricos. Depende de la longitud de onda. La dispersión aumenta a medida que la longitud de onda llega a ser más corta. Esta dispersión se da predominantemente 9 a 10 Km. sobre la superficie de la Tierra. Es inversamente proporcional a cuatro veces la longitud de onda. La luz azul es dispersada cuatro veces más que la roja y la UV cerca de 16 veces más que la roja. Esta dispersión causa el color azul del cielo y los colorees rojos brillantes durante la puesta del sol.

Dispersión de Mie: Es una dispersión en la parte inferior de la atmósfera. (0-5 Km.), es causada por el polvo el polen, la contaminación y las gotas de agua. Los efectos dependen de la longitud de onda y afecta a la radiación electromagnética sobre todo en la porción del visible.

Dispersión no – selectiva: Sucede también en la atmósfera inferior. Las partículas son mucho más grandes que la radiación incidente, por lo tanto la dispersión no depende de la longitud de la onda. Es la causa primaria de la niebla.

Efectos generales de la dispersión:

La dispersión de la radiación electromagnética en la atmósfera hace que nosotros veamos sombras, pues fuerza a la imagen a grabar el brillo de la atmósfera junto con el objetivo. La dispersión normalmente disecciona la luz reflejada fuera del campo de visión del sensor, disminuyendo el detalle espacial

(imagen borrosa). Esta tiende a hacer los objetos oscuros más claros (reduce el contraste).

Absorción atmosférica:

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas bandas del espectro elimina prácticamente cualquier posibilidad de observación remota. Los principales causantes de estas absorciones son:

- *Ozono (O_3)*: Responsable de la eliminación de la energía ultravioleta. Inferior a 0.3 μm
- *Dióxido de carbono*: En la atmósfera inferior absorbe energía en la región de los 13 – 17.5 micrómetros.
- *Vapor de agua*: También en la atmósfera inferior, principalmente en áreas húmedas es efectivo absorbiendo en las porciones del espectro entre 5.5 y 7 micrómetros y por encima de los 27.

Ventanas atmosféricas

Son porciones del espectro electromagnético que pueden pasar a través de la atmósfera con poca o ninguna atenuación (donde es alta la transmitancia). La Figura N° 17 muestra las áreas del espectro que pueden pasar a través de la atmósfera sin atenuación (picos) y son conocidas como “ventanas atmosféricas” y las áreas que son atenuadas (valles) ”.

Las zonas azules señalan los pasos mínimos de la radiación entrante o saliente, mientras que las áreas blancas denotan las “ventanas atmosféricas” en las cuales la radiación experimenta interacciones muy reducidas con las especies moleculares y desde aquí puede penetrar la luz, con poca o ninguna pérdida de absorción.

La mayoría de sensores remotos fueron seleccionados para operar en una ó más de esas ventanas y hacen sus mediciones usando detectores calibrados para ciertas frecuencias específicas (longitudes de onda), que pasan a través de la atmósfera. Sin embargo existen otros sensores, especialmente los satélites meteorológicos que miden directamente el fenómeno de absorción, como aquellos asociados con el CO₂ y otros gases.

La atmósfera actúa como un opaco para la radiación electromagnética en parte del IR medio y en todo IR lejano. En la región de las microondas, en contraste, la mayoría de esta radiación se mueve sin impedimentos, de tal forma que las señales de radar en todas las bandas, comúnmente usadas, alcanzarán la superficie (aunque las gotas de lluvia producen dispersión que permite que la precipitación sea detectada).

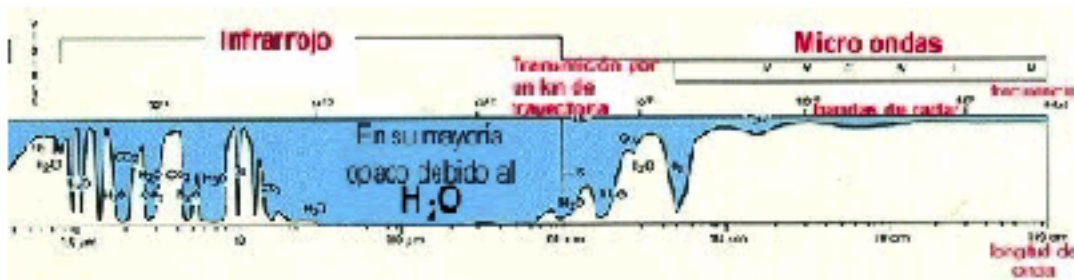


Fig. N° 17 Ventanas atmosféricas

FIRMAS ESPECTRALES (REFLECTANCIA ESPECTRAL)

Todos los elementos en la naturaleza tienen una firma espectral. Si nosotros detectamos esta firma espectral, podemos separar los elementos y obtener una visión del tamaño general y forma de ellos. Estas firmas espectrales cambian en el tiempo y el espacio. En la percepción remota es necesario caracterizar los objetivos de la superficie, basados en perfiles espectrales que disminuyen el error en la identificación.

Como se mencionó anteriormente, cualquier material dado la cantidad de radiación que es reflejada (absorbida ó transmitida) variará con la longitud de onda. Esta importante propiedad de la materia permite que diferentes sustancias ó clases puedan ser identificadas y separadas por su firma espectral (curvas espectrales) como se muestra en la Figura N° 18

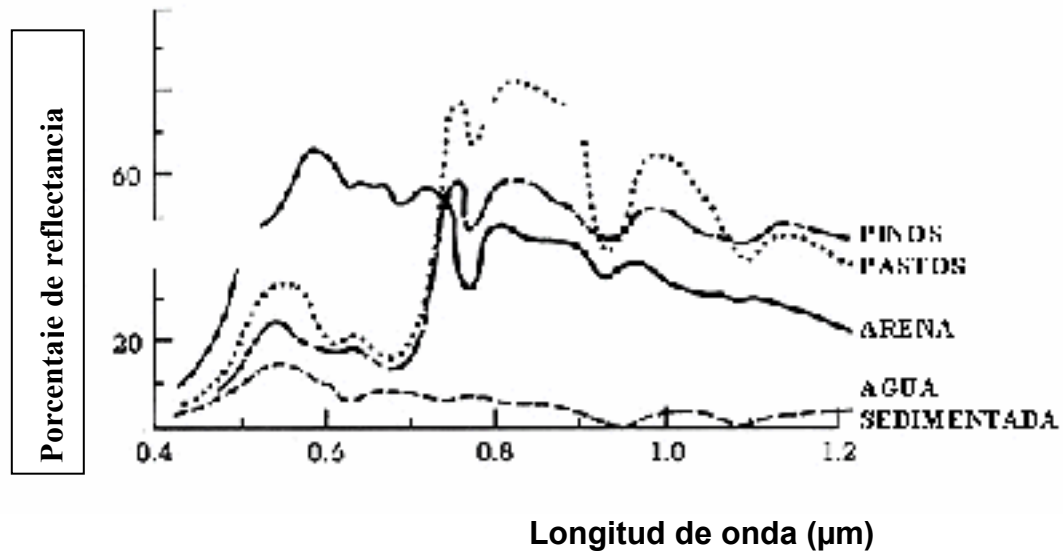


Fig. N° 18 Firmas (curvas, respuestas) espectrales de campos de pinos, pastizales, arenas rojas de canteras y agua sedimentada

Debido a esto, en algunas longitudes de onda las areniscas pueden reflejar más luz que la vegetación verde, pero en otras absorbe más luz (reduce la reflexión) que la vegetación, la cual la refleja. Existen algunos métodos para medir esas diferencias de reflectancia relativa, como función de la longitud de onda y la radiación retornada (como una fracción del porcentaje de la cantidad de radiación irradiada). Todos los elementos tienen propiedades de reflexión y absorción en distintas bandas del espectro electromagnético. Estos elementos también emiten ondas de acuerdo con una proporción característica de la longitud de onda y con las propiedades térmicas.

TELEDETECCION EN LAS REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Tipos de teledetección

La teledetección es clasificada dentro de tres tipos, con respecto a las longitudes de onda del espectro electromagnético:

1. Teledetección del visible y del infrarrojo reflexivo.
2. Teledetección del infrarrojo termal.
3. Teledetección de las microondas.

La fuente de energía usada en la teledetección del visible e infrarrojo reflexivo es el sol. Los datos obtenidos en esta región dependen principalmente de la reflectancia de los objetos sobre la superficie de la tierra. Por lo tanto la información acerca de los objetos puede ser obtenida a partir de la reflectancia

espectral. No obstante el radar es excepcional por que él no usa energía solar, sino la energía láser del sensor.

La fuente de la energía radiante usada en teledetección termal es el objeto en sí mismo, ya que cualquier objeto a temperatura normal emitirá radiación electromagnética, con un pico cerca de $10\text{ }\mu\text{m}$. Puede ser comparada la diferencia de la radiación espectral entre la fuente del sol y un objeto con temperatura normal (cerca de 300° K). Sin embargo, no debe olvidarse que se omite la absorción atmosférica para simplificación y que las curvas espectrales varían con respecto a la reflectancia, la emitancia y la temperatura del objeto.

En la región de las microondas hay dos tipos de teledetección, activa y pasiva. En la teledetección de las microondas pasivas, la radiación de la microondas emitida desde un objeto es detectada, mientras en la teledetección de las microondas activa es detectado el coeficiente de dispersión de vuelta (backscattering).

SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA DE IMÁGENES DE LA TIERRA.

Sensores barredores multiespectrales:

La energía que viene de la superficie de la Tierra o de la atmósfera se dirige hacia los detectores que son sensibles a las longitudes de onda particulares del espectro electromagnético. De la misma manera que un rocío fino de gotas de agua descompone la luz visible en diferentes colores para crear un arco iris, los barredores descomponen la energía entrante en bandas de longitud de onda

diferentes. Los sensores multiespectrales en los satélites pueden detectar muchas longitudes de onda, incluyendo visible, infrarrojo cercano, el de ondas cortas y a veces infrarrojo termal.

Las longitudes de onda exactas, en las cuales la energía es descompuesta, depende del diseño del barrido usado. Este diseño varía según el propósito del sensor. Muchos de los sensores remotos electrónicos (opuesto a las fotografías) adquieren datos usando sistemas de barrido los cuales emplean un sensor con un campo instantáneo de vista (IFOV) que hace un barrido sobre la tierra para construir una imagen bidimensional de la superficie.

Los sistemas de barrido pueden usarse en avión y plataformas satelitales, teniendo los mismos principios de operación. Un sistema de barrido que recolecta datos en una variedad de rangos de longitud de onda diferentes se llama *barrido multiespectral* (por ejemplo el MSS y ETM+), y es el sistema de barrido usado más comúnmente en percepción remota.

Landsat 7

El Landsat 7 (Figura N° 19) juega un papel único y esencial en el dominio de los satélites de observación de la tierra, en órbita en la actualidad. Landsat 7 combina coberturas sinópticas de la tierra, con una alta resolución espacial, rango espectral y calibración radiométrica. Este programa esta encargado de proporcionar datos digitales Landsat a la comunidad de usuarios, en grandes

cantidades, más rápido y a un costo menor que en cualquier otro tiempo de la historia del programa (600 \$ por imagen).

El instrumento de observación de la tierra del Landsat 7, el Enhancement Thematic Mapper (ETM+), replica las capacidades de los instrumentos de mayor éxito de los mapeadores temáticos en Landsat 4 y Landsat 5. El ETM+ incluye nuevas características que lo hacen más versátil y eficiente para estudios de cambio global, monitoreo, evaluación del suelo y mapeos de grandes áreas. Las nuevas características principales, en Landsat 7 son:

- Una banda pancromática con resolución espacial de 15 m.
- Una mejor calibración radiométrica.
- Un canal IR termal con 60 m de resolución espacial.

En la tabla No 1 se presentan las características del ETM+ del Landsat 7.

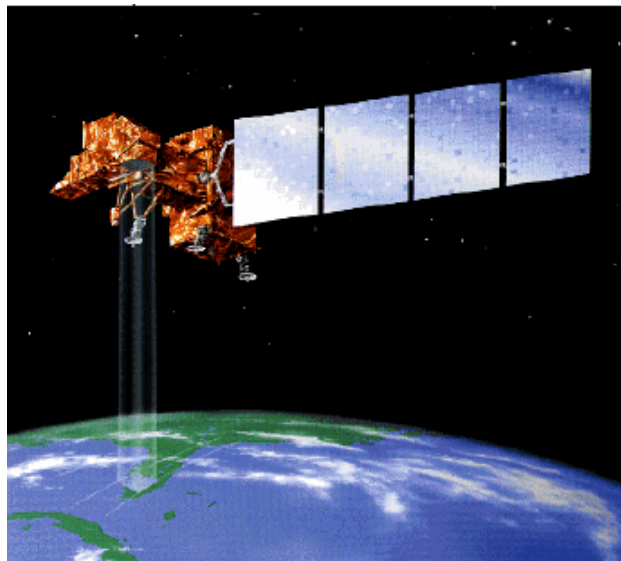


Figura N° 19 Satélite Landsat 7

Tabla No. 1 Características del ETM+ del Landsat 7

NUMERO DE BANDA	RANGO ESPECTRAL (MICRÓMETROS)	RESOLUCIÓN ESPACIAL
1	.45 a .515	30
2	.525 a .605	30
3	.63 a .690	30
4	.75 a .90	30
5	1.55 a 1.75	30
6 (a-b)	10.40 a 12.5	60
7	2.09 a 2.35	30
8 Pancromática	.52 a .90	15

Las siete bandas de reflectancia obtienen su resolución efectiva a una altitud nominal de 705 Km.

La banda 1 es superior al MSS 4 en que detecta algunos rasgos en el agua (debido a que abarca el azul). También permite composiciones a color casi – naturales (Tabla No.2).

La banda 5 es sensitiva a las variaciones en el contenido del agua, en vegetación frondosa y en la humedad del suelo. También permite distinguir entre las nubes (que aparecen oscuras) y nieve (que aparece clara). Esta banda también responde a las variaciones en el contenido del hierro férrico (Fe_2O_3) en las rocas y suelos, ya que los materiales que contiene esta sustancia muestran una reflectancia más alta.

La banda 7, asimismo, reacciona al contenido de humedad y es especialmente ajustada para detectar minerales como las arcillas o ciertos productos de su alteración en ambientes geológicos.

La banda 6 puede distinguir una diferencia de temperatura radiante de 0.6 °C y es muy útil para la discriminación de tipos de rocas, cuyas propiedades termales permiten la extensión del calor y las consecuentes diferencias en las temperaturas cercanas a la superficie. A menudo puede detectar cambios en las temperaturas de la tierra debido a la variación de la humedad y puede diferenciar la vegetación debido a su efecto refrescante de evaporación.

Todos los Landsat siguen una órbita cercana al polo (inclinados 9 grados al occidente de las líneas longitudinales, pasando dentro de los 8 grados de los polos), estas órbitas son sincronizadas con el sol, lo que significa que el satélite cruza el Ecuador cada vez entre las 9:30 y las 10:00 AM (tiempo local).

La estación receptora primaria estará en el US Geological Survey's (USGS) – centro de datos EROS (EDC), donde son recibidas las imágenes en tiempo real.

Las capacidades del satélite, el instrumento y el sistema terrestre son suficientes para permitir una adquisición continua de escenas, substancialmente libres de nubes en la estación de recepción primaria. Una red mundial de estaciones estará disponible para recibir imágenes en tiempo real.

Este programa es manejado en forma coordinada por la Aeronáutica espacial y administración del espacio (NASA), por la administración atmosférica y oceánica nacional (NOAA) y el Departamento de Geología de los Estados Unidos (USGS)

Tabla No.2 Características de discriminación de elementos para el Landsat ETM+

Banda	Longitud de Onda	Tópico a Discriminar
1	0.45-0.52 (azul)	Discriminación de suelo/vegetación, mapas de batimetría, identificación de elementos culturales/urbanos, calidad del agua.
2	0.52-0.60 (verde)	Mapas de vegetación verde (medidas del pico de reflectancia), identificación de aspectos urbanos/culturales, calidad del agua.
3	0.63-0.69 (roja)	Áreas vegetadas Vs. No – vegetadas, discriminación de especies vegetales por absorción de la clorofila, elementos culturales/urbanos.
4	0.76-0.90(IR cercano)	Estimación del vigor de la vegetación y biomasa, identificación de tipos de plantíos y vegetación, delimitación de cuerpos de agua y humedad del suelo.
5	1.55-1.75 (IR medio)	Indicativa de la cantidad de humedad en las plantas y el suelo. Se distingue entre nieve y nubes.
6	10.4-12.5 (IR termal)	Discriminación de stress en las plantas, humedad del suelo por radiación termal, mapas termales(urbano, agua)
7	2.08- 2.35 (IR medio)	Discriminación de minerales y tipos de rocas, mapeo hidrotérmico, contenido de humedad en la vegetación

CAPITULO IV

PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DIGITAL DE IMÁGENES

INTRODUCCIÓN

En la percepción remota el procesamiento digital de imágenes dio sus pasos iniciales durante el programa satelital de los años 60 que transmitió imágenes a estaciones ubicadas en la tierra. La baja calidad de dichas imágenes requirió el desarrollo de técnicas de procesamiento para hacer imágenes más útiles. Actualmente, la gran mayoría de éstas son grabadas en formato digital y después procesadas en computador para producir imágenes que servirán de fuente de datos y como información en los diversos campos de interpretación para los cuales su empleo es fundamental.

Hace una década el procesamiento digital de imágenes alcanzaba costos muy elevados y la infraestructura para realizarlos era sofisticada y los conocimientos técnicos también tenían que ser elevados. Hoy las imágenes pueden ser procesadas con computadores y programas de escritorio, que no son tan costosos y con usuarios de perfil no tan estricto.

El principal objetivo del procesamiento digital de imágenes es permitir manipular y analizar los datos de imágenes producidas por sensores remotos, de tal forma que sea “revelada” información que no pueda ser reconocida inmediatamente en la forma original.

La matriz de datos en una imagen digital

El proceso de adquisición de una imagen digital difiere, sustancialmente, del empleado en la fotografía aérea. Como es sabido, en cualquier sistema fotográfico, la energía procedente de los objetos se registra sobre una superficie sensible a la luz. Esta puede componerse de una o varias capas, formando, respectivamente, una película pancromática o en color.

En el caso de los equipos óptico - electrónicos, no existe esta superficie sólida de grabación. El sensor explora secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados. La cadencia con la que el sensor realiza ese muestreo de la superficie terrestre define precisamente la resolución espacial del mismo. Dicho en otras palabras, el sensor detecta la radiancia media de una parcela del terreno equivalente al tamaño del píxel, unidad visual más pequeña que aparece en la imagen. Este valor medio se traduce por el sensor a un valor numérico, a partir del cual se realiza el tratamiento digital de imágenes. En consecuencia, cada píxel de la imagen viene definido por un número entero, traducción de la radiancia recibida por el sensor para una determinada parcela de la superficie terrestre y en una determinada banda del espectro. Este valor numérico se denominará, a partir de aquí, **Nivel Digital (ND)**. El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que puede fácilmente traducirse a una intensidad visual o si se prefiere, a un nivel de gris, mediante cualquier convertidor digital – analógico (un

monitor de computadora por ejemplo). En resumen, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina píxel, definido por un número entero, ND, que puede convertirse en una intensidad luminosa o nivel de gris.

Teniendo presente estas ideas, la organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse en la figura N° 20. Como vemos se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. La orientación aproximada Norte-Sur se expresa a través de la fila de la matriz, que normalmente reciben el nombre de líneas (*line*), mientras las columnas indican la disposición este Oeste- Este. En esta matriz, el origen de coordenadas se sitúa en la esquina superior – izquierda (línea 1, columna 1), en lugar del borde inferior – izquierdo, como ocurre en cualquier eje cartesiano. Esto es debido a la secuencia de adquisición de imágenes, de Norte a Sur, de acuerdo a la traza del satélite. La tercera dimensión corresponde a la resolución espectral del sensor. En consecuencia, habrá tantos planos en la imagen como bandas originalmente detectadas: como lo son 7 para el TM.

Teniendo presente ese carácter matricial de cualquier imagen numérica, son más fácilmente comprensibles las posteriores transformaciones aplicadas sobre ella. Estas son, en muchos casos, operaciones estadísticas comunes a otras matrices numéricas. Por ejemplo, en una imagen digital podemos calcular medidas de tendencia central y dispersión (media y desviación típica en cada una

de las bandas), cambiar su orientación geométrica (rotación de la matriz), realizar combinaciones aritméticas entre bandas (cocientes), sintetizar varias bandas reduciendo la información redundante (componentes principales), o discriminar grupos de ND homogéneos dentro de la matriz (clasificación).

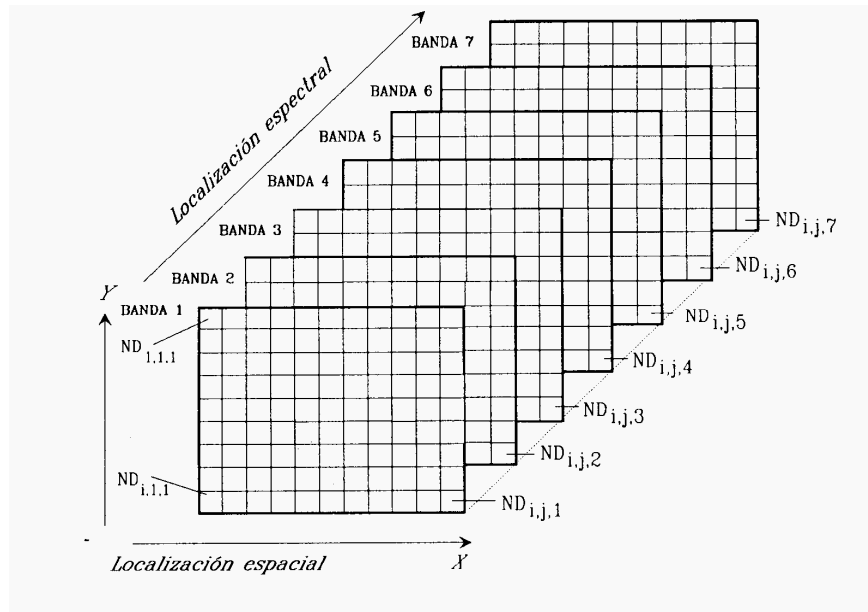


Fig. No. 20 Organización de una imagen digital

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

En el procesamiento de imágenes digitales se requiere realizar una serie de pasos, que pueden variar de una imagen a otra. Las razones de esta variación incluyen el formato, las condiciones iniciales de la imagen, la información de interés a ser extraída, la composición de los elementos de la escena y otros.

Existen tres pasos generales en el procesamiento de imágenes digitales: preprocesamiento, despliegue y realce y extracción de información.

Preprocesamiento

Antes de ser usadas, las imágenes requieren correcciones radiométricas, las cuales tienden a remover los efectos de los errores del sensor y de los factores ambientales (atmosféricos). Las correcciones geométricas también son comunes antes del análisis de la imagen. Es un proceso mediante el cual los puntos en la imagen son registrados de acuerdo con los puntos correspondientes sobre un mapa u otra imagen que ha sido rectificada. El objetivo de la corrección geométrica es poner los elementos de la imagen en su posición planimétrica apropiada (posiciones X, Y)

Realce de la información

Los numerosos procesos que existen para realzar una imagen han sido clasificados dentro de dos grandes categorías: operaciones puntuales y operaciones locales. Las operaciones puntuales cambian el valor de píxeles individuales, en el contexto de los valores de sus píxeles vecinos.

Los realces comunes incluyen: ajuste del contraste (linear y no-linear), coeficientes de bandas, filtros espaciales, transformaciones de Fourier, componentes principales y transformación de textura.

Extracción de información

El procesamiento de imágenes digitales se basa enteramente en los elementos primarios de tono y color del píxel de la imagen para la extracción de información. Ha habido algún éxito probando los sistemas expertos y las redes neurales los cuales tienden a facultar al computador para que imite las formas en las cuales los humanos interpretan las imágenes.

CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS

Se refiere a la remoción o disminución de las distorsiones en el grado de energía electromagnética registrada por cada detector. Una variedad de agentes puede causar distorsión en los valores registrados por cada celda en la imagen. Algunas de las distorsiones más comunes para las cuales existen procedimientos de corrección son:

1. Valores elevados uniformemente: debido a la neblina atmosférica, la cual dispersa las longitudes de onda corta (particularmente las longitudes del azul).
2. Bandeamiento debido a los detectores que se encuentren sin calibración.
3. Ruido al azar: Debido al desempeño no sistemático e impredecible del sensor o de la transmisión de datos.

Los efectos de cambio en el tiempo

Para estudiar patrones de reflectancia en diferentes tiempos o a través de mosaicos de imágenes es necesario calibrar los valores de radiancia para que los niveles de reflectancia absolutas de los objetos medidos por diferentes sensores correspondan entre imágenes separadas. Este procedimiento puede ser requerido también para normalizar los ángulos solares y las distancias tierra-sol.

Calibración de la radiancia

Los valores de los píxeles en imágenes comerciales representan la radiancia de la superficie en forma de números digitales (DN), los cuales son calibrados para ajustarlos en un cierto rango de valores. La conversión del DN a una radiancia absoluta es un procedimiento necesario para comparar

imágenes tomadas por diferentes sensores (por ejemplo Landsat-2 y Landsat-5). Cada sensor tiene sus parámetros de calibración usados para gravar los valores DN. El mismo valor DN de dos imágenes tomadas por diferentes sensores puede representar dos valores de radiancia diferentes.

Usualmente los detectores son calibrados para que haya una relación lineal entre el DN y la radiancia espectral. Esta función lineal es descrita por tres parámetros: El rango del valor del DN en la imagen, la mínima ($L_{\min}$) y la máxima ($L_{\max}$) radiancia medida por un detector sobre la banda espectral del canal. $L_{\min}$ es la radiancia espectral correspondiente al valor DN mínimo (usualmente 0). $L_{\max}$ es la radiancia correspondiente al máximo DN (usualmente 255). No solamente cada sensor, sino cada banda dentro del mismo sensor tienen su propio $L_{\max}$ y $L_{\min}$. La información acerca de los parámetros de calibración del sensor ($L_{\min}$ y $L_{\max}$) es usualmente suplida con la imagen. La ecuación lineal es:

$$L = ((L_{\max} - L_{\min}) / 255) \text{ DN} + L_{\min}$$

Donde L es la radiancia expresada en $\text{Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$.

También puede encontrarse expresada así:

$$L = \text{Offset} + (\text{Gain} * \text{DN})$$

Donde:

$$\text{Offset} = L_{\min}$$

$$\text{Gain} = ((L_{\max} - L_{\min}) / 255)$$

Angulo solar y distancias tierra-sol

Para estudiar patrones de reflectancia en diferentes épocas es necesario aplicar una corrección de distancia tierra- sol. Las imágenes que son adquiridas bajo diferentes ángulos de iluminación solar pueden ser ajustadas la una a la otra multiplicando cada píxel por el coseno de la elevación del sol desde el zenit (90°):

$$E = (E_0 \cos \theta_0) / d^2$$

E = Irradiancia solar en la mitad de la distancia tierra-sol

θ_0 = Angulo solar desde el zenith

d = distancia tierra – sol en unidades astronómicas (1 unidad = 149.6×10^6 Km.)

Esta fórmula es aplicada para corregir cambios de estaciones, en relación con la distancia sol-tierra.

El ángulo solar y la distancia tierra-sol deben ser particulares para el tiempo y localización en los que la imagen fue adquirida. Deben buscarse en la documentación que acompaña la imagen. Un cálculo puede realizarse en un programa específico, remplazando a E_0 por las bandas individuales.

Efectos atmosféricos

Las partículas atmosféricas y las moléculas causan efectos de dispersión en la transmisión de la energía, sobretodo en las longitudes de onda cortas. El efecto de la niebla es usualmente una elevación uniforme de los valores espectrales, en las bandas del visible del espectro electromagnético.

Una de las formas de reducir la niebla en la imagen es ver los valores en las zonas donde se sabe que debe haber reflectancia de cero, como en el agua profunda. Cualquier valor sobre cero en esas áreas probablemente representa un incremento de los valores de la imagen y puede ser sustraído fácilmente de todos los píxeles en las bandas individuales.

Otra forma de reducir la niebla es a través del análisis de componentes principales. Mediante este análisis se detecta una de las componentes que contiene los efectos atmosféricos. Esta componente se desecha y se realiza una transformación de reversa para obtener nuevas bandas. Esta transformación de reversa ya contiene corregidos los efectos atmosféricos.

Efectos de ruido

Los ruidos en las imágenes suceden debido a interferencias mecánicas en el sistema que conduce a errores de transmisión. El ruido puede o degradar la señal registrada o virtualmente eliminar toda la información radiométrica. El ruido puede ser sistemático como el mal funcionamiento periódico de un detector, el cual resulta en el Bandeamiento de la imagen. Puede ser más al

azar cuando causa variaciones radiométricas descritas como “sal y pimienta” debido a la apariencia que dan. En radar existe un efecto similar a este último, que se denomina “spekle” (moteado/ con puntitos)

Bandeamiento de la imagen

Es un ruido sistemático que resulta de la variación en la respuesta de los detectores individuales usados por una banda particular. Ocurre cuando un detector se desajusta y produce lecturas que son más altas o más bajas que las de los otros detectores para la misma banda.

Por ejemplo para el MSS, que tiene 6 detectores por banda y barre en dirección horizontal. Si uno de los detectores es desajustado, entonces un Bandeamiento horizontal ocurrirá cada seis líneas. Igualmente en el TM, que tiene 16 detectores, se producirá el Bandeamiento cada 16 líneas.

En el caso de los sistemas como el SPOT que tiene barredores que no son óptico – mecánicos con 3000 detectores por cada banda, ósea un detector por cada píxel en una fila, debido a que los detectores tienen un arreglo perpendicular a la órbita del satélite, el desajuste produce Bandeamiento vertical. Como se tiene un detector por cada columna de datos, no hay patrón repetitivo de Bandeamiento en la imagen.

Dependiendo del algoritmo empleado por el software el siguiente ajuste puede ser también realizado:

- Se calcula la matriz de varianza- covarianza con el fin de establecer cuál es la banda más correlacionada con aquella que presenta problemas. A la línea sin valores se le asignan los ND de esta banda altamente correlacionada.
- Si la imagen hubiese sido obtenida de un distribuidor ya georeferenciada, entonces no sería posible aplicar este método. En este caso habría que realizar un análisis de componentes principales de las bandas originales.
- Habitualmente los últimos componentes representan menos de 1% del total de información disponible y tienden a tener información relevante para el Bandeamiento. Si esos componentes son removidos completamente y el resto de componentes reagrupados, el mejoramiento de la imagen se produce.

La corrección de este efecto puede consistir en el cálculo de los ND de la fila que no muestra valores, bien sea empleando los ND de la línea anterior o posterior o con el promedio de estas dos líneas.

Existe un procedimiento para evitar este problema de falta de ND en una línea. Primero se clasifica la banda afectada para crear una máscara booleana en la cual los píxeles donde hay líneas sin datos se usan un filtro 3x3 a lo largo de la banda original, con los siguientes valores:

0	0.5	0
0	0	0
0	0.5	0

Este filtro tendrá el efecto de asignar a cada píxel el promedio de los valores en las líneas de barrido de arriba y abajo. Si la línea de barrido fuera vertical es necesario rotar el filtro 90 grados. Después se multiplica la máscara producida anteriormente y la imagen filtrada, entonces aparecerán los valores filtrados solamente en aquellos sitios donde no existían. Con otra superposición se le agregan a la imagen original los valores en las líneas que no tenían, obteniendo así una imagen corregida.

Ruido de “sal y pimienta”

El ruido a veces produce valores que son anormalmente altos o bajos en relación con los píxeles vecinos. Haciendo la suposición de que los valores de la reflectancia de los píxeles con ruido muestran cambios abruptos de un píxel a otro, es posible usar operaciones con filtros para remplazar esos valores, con otros generados de la interpretación de sus vecinos. Los filtros más comunes que se aplican en estos casos son los de mediana. Entonces los píxeles con ruido, son reemplazados por el valor de la mediana seleccionada de los píxeles vecinos de la ventana específica.

Este proceso es efectivo para la remoción de píxeles con ruido, pero puede ocasionar pérdida de detalle y desenfaticación de los bordes. Lo cual es más fuerte en imágenes de radar, debido a la cantidad de “Spekle” (ruido) que puede ocurrir.

Algunos filtros (como el de adaptive box en IDRISI) determinan localmente dentro de la ventana definida (3x3, 5x5, 7x7) el promedio, mínimo y máximo basado en la desviación estándar definida por el usuario. Si el valor del centro está fuera del rango especificado por el usuario, entonces se asume como ruido y el valor se reemplaza por el promedio de todos los píxeles de la ventana.

CORRECCIONES GEOMÉTRICAS

En las imágenes comerciales como Landsat y SPOT la mayoría de elementos de restauración geométrica asociados con la captura de la imagen son corregidos por los distribuidores de las imágenes. Esas correcciones incluyen:

1. Corrección de la oblicuidad: Considera el aspecto de que la tierra se mueve mientras que una imagen es capturada.
2. Corrección de la distorsión del scanner: Toma en cuenta el hecho de que el campo instantáneo de vista (IFOV) cubre más territorio al final de la línea de barrido (donde el ángulo de visión es muy oblicuo) que en la mitad.

Algunos distribuidores también venden las imágenes georeferenciadas. La georeferenciación no es solamente una técnica de restauración, sino un método de reorientación de los datos para satisfacer deseos específicos y requerimientos del proyecto del usuario. Es particularmente importante que las imágenes georeferenciadas alcancen los estándares de los datos de los usuarios y que se registre bien con los otros datos en la misma proyección y sistema de referencia.

La mayoría de veces es preferible que el mismo usuario georeferencie la imagen. Esto debido a razones como: ciertas correcciones son muy difíciles o imposibles de realizar en imágenes ya georeferenciadas. Entre otras podría mencionarse los efectos de bandeamiento, baja en la línea de barrido, efectos topográficos y de iluminación. Si la orientación geométrica de los efectos es alterada, entonces las técnicas de restauración estándar serían inútiles. Dado que la severidad de esos efectos no es conocida antes de recibir la imagen, si uno mismo georeferencia la imagen puede garantizar que se tenga el control sobre el proceso de corrección o restauración.

Si el mismo usuario georeferencia una imagen se garantiza el control acerca de las incertidumbres espaciales producidas por el proceso de georeferenciación. Solo así se podría saber cuántos puntos de control fueron usados, dónde están localizados, como es la calidad de cada uno y cuál es la mejor combinación de puntos de control a escoger. También es importante que el propio usuario sea quien escoja el sistema de referencia que se acomode a la cartografía existente.

TIPOS DE ERRORES GEOMÉTRICOS

Los errores geométricos que poseen las imágenes se dividen en errores geométricos sistemáticos y no sistemáticos.

- **Errores geométricos sistemáticos.**

Pueden ser corregidos usando los efémeris (una efémeris es por ejemplo la posición exacta del sol a una hora determinada del día o del año) de la plataforma y conociendo las características de distorsión internas del sensor.

Comprenden la rotación de la tierra: cuyo efecto se refleja en la deformación del píxel debido a la rotación de la tierra en el momento de toma de los datos. Por ejemplo para el Landsat MSS la toma se realiza en 28 segundos, durante los cuales la tierra se ha desplazado 8 Km.

Panorámica y efecto de la curvatura terrestre: consiste en que el tamaño del píxel aumenta a medida que se aleja de la línea del nadir. Efecto menor entre más pequeño sea el tamaño del píxel.

- **Errores geométricos no sistemáticos.**

Son aquellos producidos por las distorsiones de la plataforma: variaciones según la velocidad, altitud y orientación de dicha plataforma (aleteo, cabeceo y giro lateral).

Producen errores de posicionamiento, los cuales pueden ser corregidos comparando las coordenadas geográficas de los mismos elementos coleccionados desde un mapa o un sistema de posicionamiento global (GPS).

Los errores que se corrigen con el uso de puntos de control de la tierra (GCP) incluyen el giro, el movimiento de la plataforma y la varianza en la altitud (Berstein, 1983).

Un *GCP* es un píxel en la imagen o una localización en un mapa cuyas coordenadas son conocidas. Se usan para corregir las distorsiones geométricas en una imagen comparando las coordenadas de la imagen con las coordenadas del mapa. Las coordenadas de la imagen y del mapa son usadas para computar la matriz de transformación que se usa para rectificar la imagen.

GEOREFERENCIACIÓN DE IMÁGENES

Consiste en una corrección geométrica por posicionamiento. Dentro del proceso se usan una serie de términos que a continuación se definen y explican detalladamente:

Establecimiento de puntos de control:

Es el procedimiento en donde se ubican puntos visibles en la imagen a corregir y en la imagen o mapa de referencia, en donde se debe tomar en cuenta que en ambos sistemas deben existir elementos comunes para la ubicación las coordenadas de los puntos de control.

Para calcular cualquier función entre dos o más variables, es necesario contar previamente con una serie de observaciones comunes a todas ellas. De la

misma forma, las funciones que permiten transformar coordenadas de la imagen al mapa precisan localizar una serie de puntos de control entre la imagen y el mapa. A partir de las coordenadas de esos puntos, puede estimarse una función que relacione ambos documentos. Por cuanto las funciones se estiman a partir de esa muestra de coordenadas, la calidad de ajuste dependerá de la precisión con que se localicen esos puntos. De lo contrario, la estimación resultará sesgada. En definitiva, el establecimiento de puntos de control resulta la fase más crucial del proceso de corrección, y la que demanda mayor dedicación humana.

Para que el ajuste entre imagen y mapa sea correcto, se requiere atender a tres aspectos en la selección de los puntos de control: (i) número, (ii) localización, y (iii) distribución.

El número idóneo de puntos de control depende del tamaño y la complejidad geométrica de la imagen. Si las deformaciones que presenta son importantes, conviene aplicar funciones de transformación complejas, con polinomios de segundo o tercer grado. Cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, se precisa también un mayor número de puntos de control. Matemáticamente sólo son necesarios 3 puntos para una función de 1^{er} grado, 6 para una de 2^a grado y 10 para una de 3^{er} grado. Ahora bien, conviene superar con creces ese listón mínimo para garantizar una buena conformidad entre imagen y mapa. Bernstein (1978) aconseja seleccionar entre 14 y 20 puntos para corregir una imagen MSS, mientras el *National Remote Sensing Center* inglés utiliza de

100 a 120 puntos para hacer lo propio con una imagen TM (Davison, 1984). Para una zona pequeña (512 x 512 píxeles, por ejemplo), 10 ò 12 puntos y una corrección de primer grado serán normalmente suficientes. En caso de que el contraste topográfico sea importante, convendrá seleccionar un mayor número de puntos, y acudir a polinomios de transformación más complejos.

En cuanto a la localización se recomienda que sean puntos claramente identificables en la imagen y en el mapa, preferiblemente rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismos temporales: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. No conviene señalar puntos en la línea de costa, pues el efecto de la marea puede modificar la localización exacta de un accidente geográfico. La misma idea puede aplicarse a los cursos de agua o embalses, que sufren alteraciones estacionales, en ocasiones de gran importancia. Algún elemento destacado de la vegetación podría utilizarse como punto de control, siempre que se disponga de la cartografía temática apropiada y no se hayan producido cambios entre la fecha de la imagen y la del mapa. Los programas más modernos de corrección geométrica facilitan la localización interactiva de estos puntos de control, con ayuda del digitalizador. Conviene seleccionar sólo aquellos puntos claramente identificables sobre el mapa y la imagen. En caso que se pretenda el registro el registro de dos imágenes, alguno de estos programas permite visualizar ambas simultáneamente, facilitando mucho los procesos de selección.

Respecto a la distribución, conviene que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre todo el territorio abarcado en la imagen. Esto evitará errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio. La norma es especialmente importante cuando la zona presente contrastes topográficos. Aunque el efecto de desplazamiento del relieve es menor que en el caso de la fotografía aérea (debido a la altura de la órbita), también en las imágenes de satélite existe un efecto de desplazamiento que puede causar serios problemas en su ajuste cartográfico. Para intentar paliarlos, resulta recomendable introducir puntos de control sobre áreas de distinta altitud, e incluso sobre cotas, siempre que éstas resulten identificables en la imagen.

Transformación lineal y cálculo de las funciones de transformación:

Es la transformación de coordenadas de un sistema a otro (imagen a mapa ó imagen a imagen) usando una fórmula algebraica lineal (polinomial de primer orden).

Como se menciona anteriormente, la corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo una función matemática, que pone en relación

las coordenadas de la imagen con las del mapa. De esta forma, a partir, a partir de las coordenadas columna y línea de cada píxel, pueden estimarse las coordenadas **x, y** de la imagen de salida. Esquemáticamente esta transformación puede expresarse como (Mather,

$$\hat{S} = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk} c^j l^k$$

Donde **S** indica la coordenada de la imagen corregida, que se estima a partir de las coordenadas de la imagen de entrada **c** y **l**. El superíndice **m** indica el grado del polinomio de ajuste. El caso más simple sería el de una ecuación lineal, en donde:

$$\hat{S} = a_0 + a_1 c_i + a_2 l_i$$

O, si se prefiere, para las dos coordenadas del mapa:

$$\hat{X}_i = a_0 + a_1 c_i + a_2 l_i$$

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 c_i + b_2 l_i$$

Como puede comprobarse, se trata de una regresión lineal múltiple, donde a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 son los coeficientes de regresión; c_i y l_i , las variables independientes, y X_i e Y_i indican las variables dependientes. En este caso, las variables independientes son las coordenadas columna y línea de la imagen, y las dependientes, o estimadas, las coordenadas **x, y** del mapa. De igual forma también podría establecerse otras dos ecuaciones:

$$\begin{aligned}\hat{C} &= f_0 + f_1 X + f_2 Y \\ \hat{I} &= g_0 + g_1 X + g_2 Y\end{aligned}$$

Esto es, pueden así mismo estimarse las coordenadas de columna (c) y línea (l) de la imagen corregida a partir de las coordenadas UTM del mapa de referencia. En definitiva, la conversión puede realizarse en un doble sentido: desde las coordenadas de la imagen mapa y viceversa.

Al igual que en la regresión convencional, estas funciones pueden definirse gráficamente por un plano, que expresa la relación entre las coordenadas de las variables independientes (eje x e y), y la variable dependiente (eje z). Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que una función lineal basta para aplicar unas transformaciones elementales de la imagen, como cambiar su escala y origen, inclinarla, modificar la relación entre sus ejes y rotarla

. Estas alteraciones serán, de modo habitual, suficientes para corregir imágenes pequeñas, siempre que no se presenten contrastes altimétricos importantes. En caso de precisar una modificación más rigurosa, puede acudir a funciones de segundo o tercer grado, en donde se abordan alteraciones geométricas no lineales.

Los coeficientes de las funciones de transformación (a_0 , a_1 , a_2 , etc.), se calculan a partir de las coordenadas de los puntos de control seleccionados

previamente. El método más habitual para obtenerlos es aplicar un ajuste por mínimos cuadrados, con operaciones de cálculo idénticas a las que se requiere una regresión múltiple convencional (Jensen, 1986, p.p 102-115).

La bondad del grado de ajuste conseguido se mide por la importancia de los residuales. Como es bien sabido, el residual de la regresión es la diferencia entre el valor estimado y el real, para cada una de las observaciones empleadas en el proceso. Cuanto mayor sea ese valor, el ajuste entre las variables independiente y dependiente es menor. En nuestro caso, la calidad de la corrección geométrica puede valorarse comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales. El indicador más utilizado, con este objetivo, es el error medio cuadrático (RMS)

$$RMS_i = \sqrt{(\hat{c}_i - c_i)^2 + (\hat{l}_i - l_i)^2}$$

Para cada uno de los puntos de control. Un alto RMS indica que ese punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen/mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una elevación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, puede optarse por eliminar aquellos puntos con un alto RMS, ya que se asume que no se localizaron correctamente. Al eliminarse algún punto de control, se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto. El proceso se interrumpe cuando todos los puntos seleccionados presentan un RMS por debajo de un cierto umbral, previamente fijado. El error medio debe estar, en ese momento, dentro de unos márgenes

tolerables, de acuerdo a la escala y a la precisión con que se pretenda obtener los resultados.

Transferencia de los ND originales a la posición corregida (Métodos de remuestreo de imagen)

Las funciones antes analizadas permiten traducir coordenadas del mapa a la imagen. Ahora bien, si pretende crearse una imagen que se corresponda adecuadamente con esas coordenadas, resulta necesario trasvasar, de alguna forma, los ND de la imagen original a esa nueva posición. Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada píxel, pero no originan de suyo una nueva imagen, puesto que suponen sólo un traslado de coordenadas y no de ND. Dicho de otro modo, con estas funciones de transformación puede crearse una nueva matriz, correctamente posicionada, pero vacía. El 'llenado' de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la corrección geométrica.

El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada píxel de la imagen corregida debería de corresponderse a un solo píxel en la original. Lo normal es que no sea así, sino que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original, ya que este proceso supone una alteración considerable de la geometría original de la escena. Por otra parte, puede variarse también el tamaño del píxel en la imagen corregida, haciendo aún

más complejo encontrar el ND que mejor exprese el valor radiométrico originalmente detectado por el sensor.

El trasvase de ND a la imagen corregida se ha abordado por tres métodos: (i) vecino más próximo, (ii) interpolación bilineal, y (iii) Convolución cúbica.

Vecino más próximo (“Nearest Neighbour”)

El primer método se denomina del vecino más próximo (*nearest neighbour*), usa el valor de entrada de celda más cercano para el valor de píxel de salida. Para determinar el vecino más próximo el algoritmo usa la inversa de la matriz de transformación para calcular las coordenadas del archivo de la imagen.

El valor del píxel que ocupa la más cercana coordenada del archivo de la imagen, en relación con la coordenada estimada será usado para el valor del píxel de salida en la imagen georeferenciada.

Ventajas:

Los valores de salida son los valores originales de entrada. Los otros métodos tienden a promediar los valores del rededor. Debido a que los datos originales se retienen, este método es el más recomendado antes de la clasificación de la imagen. Es más fácil de computar y más rápido de usar.

Desventajas:

Produce un efecto que hace ver a la imagen con una apariencia rugosa en relación con la original. Presenta discontinuidad geométrica e incoherencia de rasgos. Algunos valores pueden perderse mientras que otros pueden duplicarse.

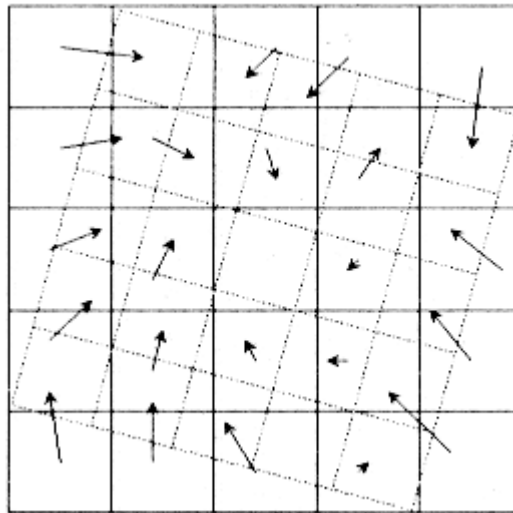


Fig. N° 21 Efecto del algoritmo de transferencia del Vecino más cercano en la corrección geométrica de la imagen

Interpolación bilineal

La interpolación bilineal (*bilinear interpolation*), supone promediar el ND de los cuatro píxeles más cercanos en el original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido, teniendo una mayor influencia aquellos píxeles más cercanos en la imagen inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

Ventajas:

Se reduce el efecto de rugosidad causado en el método anterior. Se reducen las discontinuidades geométricas y la imagen es más refinada

Desventajas:

Se alteran los datos originales y se reduce el contraste promediando los valores vecinos. Toma más tiempo que el anterior para el procesamiento.

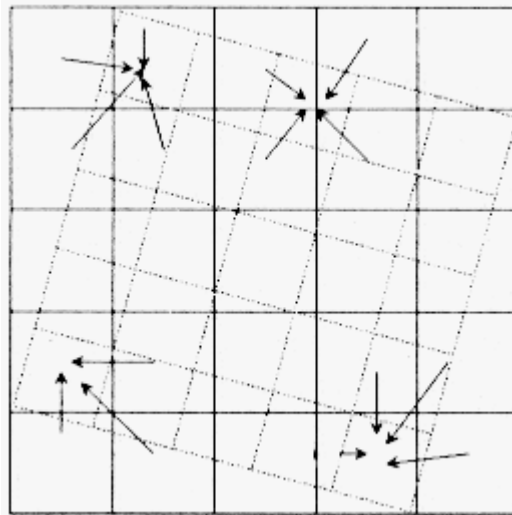


Fig. N° 22 Efecto del algoritmo de transferencia de Interpolación bilineal en la corrección geométrica de la imagen

Convolución cúbica:

Calcula el valor de salida de una celda con el promedio ponderado de las 16 celdas de entrada más cercanas (arreglo de 4 x 4) basado en la distancia.

La salida es similar a la de la interpolación bilineal, pero el efecto de suavización es más intenso.

Ventajas:

El efecto de rugosidad se reduce. La imagen se ve más suavizada.

Desventajas: Altera los datos originales y reduce el contraste sacando el promedio de los valores vecinos. Computacional mente tiene más desventajas que las dos anteriores.

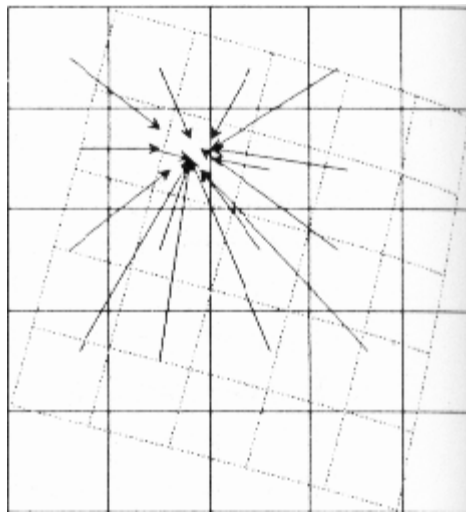


**Fig. Nº 23 Efecto del algoritmo de transferencia de
Convolución cúbica
en la corrección geométrica de la imagen**

La elección entre uno de los tres métodos depende de la finalidad del proceso y de los recursos informáticos disponibles. Si pretende corregirse una imagen para clasificar, el método del vecino más cercano es la elección obligada, pues es el único que preserva los valores originales al no introducir promedios (que, por otra parte, no tendrían sentido en una clasificación temática). Si, por el contrario, se pretende facilitar el análisis visual, habrá de optarse por algoritmos de

interpolación más sofisticados, concretamente por el de Convolución cúbica si se cuenta con recursos informáticos apropiados.

TÉCNICAS DE REALCE VISUAL DE IMÁGENES DIGITALES

Realce y Despliegue de imágenes Digitales

Los algoritmos de realce de imágenes son aplicados a imágenes de teledetección para mejorar su apariencia, con el fin de realizar el análisis visual humano o la subsiguiente aplicación de técnicas digitales que se llevan a cabo con ayuda del computador. Los materiales en la superficie de la tierra reflejan y emiten diversas cantidades de energía. Un sensor puede registrar la cantidad de energía que sale de un material en cierta longitud de onda, mientras otros materiales son registrados con mucha menor energía en la misma longitud. Las técnicas de realce de la imagen hacen más fácil el análisis e interpretación de estos últimos y, por consiguiente, permiten detectar los cambios que en una imagen se reflejan por esas variaciones de energía.

El rango de valores radiométricos presentes en una imagen se refiere al contraste. El realce del contraste es un proceso que hace a los elementos de la imagen sobresalir más claramente usando óptimamente los colores disponibles en el despliegue o dispositivo de salida.

La manipulación del contraste, incluye el cambio del rango de valores de despliegue en una imagen, con el fin de incrementar su contraste. El contraste de una imagen puede mejorarse utilizando este rango de despliegue completo. Los métodos digitales, normalmente producen un realce de contraste más satisfactorio debido a la precisión y al amplio rango de procesamientos que se le puede aplicar a la imagen.

Las técnicas lineales y no-lineales son dos métodos para incrementar el contraste de una imagen. Los procesos de ajuste del contraste tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen (o los ND de la imagen) a la capacidad del monitor en el que se visualizan los datos o niveles visuales (NV).

CONTRASTE LINEAL

También llamado un contraste de expansión lineal (estiramiento lineal). Extiende los valores digitales originales de los datos dentro de una nueva distribución, con la cual, el rango total de la sensibilidad del dispositivo del despliegue puede utilizarse. El realce del contraste lineal hace las variaciones sutiles más obvias, dentro de los datos, con lo cual la imagen aparecerá más nítida y contrastada; la distribución del histograma será más equilibrada y los valores intermedios serán repartidos en toda la escala de posibles tonos.

El proceso consiste en generar una tabla de colores en la que el N_{min} y el N_{max} de la imagen, tengan asociados un NV de 0 a 255, respectivamente, distribuyendo linealmente los valores intermedios. Este tipo de contraste se aplica

mejor a las imágenes que cuentan con histogramas de distribución Gaussiana o cercana a la Gaussiana, donde todos los valores radiométricos caen dentro de un rango estrecho del histograma y único.

Hay tres métodos de contraste lineal:

- Estiramiento lineal mínimo- máximo:
- El estiramiento del contraste lineal por porcentaje.
- El estiramiento del contraste lineal por piezas significativas.

Estiramiento lineal mínimo – máximo

Al usar este estiramiento del contraste lineal, el mínimo y el máximo valor de los datos originales, se asignan a un rango específico de valores que utilizan todos los tonos de grises disponibles. Considerando una imagen con un valor digital mínimo de 12 y un valor máximo de 43 y tomando en cuenta que el dispositivo de despliegue está dando la posibilidad de desplegar 256 diferentes tonalidades (de 0 a 255). Cuando esta imagen se ve sin el estiramiento, no se despliegan los valores de 0 a 11 y de 44 a 255. Las diferencias espectrales importantes pueden ser detectadas expandiendo el valor mínimo de 12 a 0 y el valor del máximo de 43 a 255 (ver Fig. No.24)

Un algoritmo puede usarse para que el anterior valor mínimo y máximo, adopten un nuevo valor de despliegue. Todos los valores anteriores del intermedio se escalarán proporcionalmente entre el nuevo mínimo y valores del máximo.

Muchos sistemas que procesan imágenes digitales están diseñados con funciones que automáticamente extienden el mínimo y el máximo valor para abarcar todo el rango de valores de tonos disponibles.

En este tipo de estiramiento no varían las frecuencias de los píxeles, estas son simplemente redistribuidas en toda la gama de grises de 0 a 255.

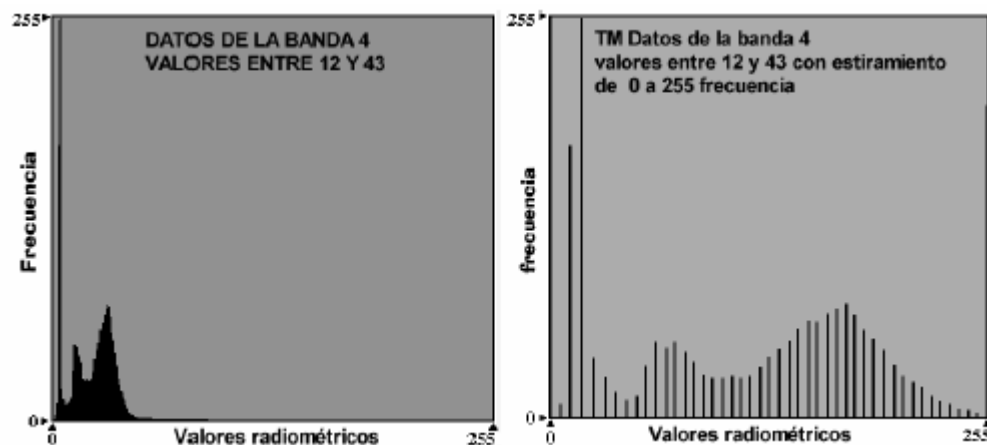


Fig. N° 24 Estiramiento lineal mínimo-máximo

El estiramiento del contraste lineal por porcentaje.

Es similar al anterior, excepto que este método usa unos valores mínimos y máximos especificados después de liberar o acumular en los extremos del histograma, un cierto porcentaje de píxeles. Una desviación estándar puede ser usada también para seleccionar las “colas” del histograma que se acumularán.

La Fig. No. 26 contiene imágenes Thematic Mapper y sus histogramas asociados. La primera imagen (a) despliega los datos con contrastes bajos. El valor de ND mínimo es de 12 y el máximo 43. El histograma muestra cómo los datos son densamente replegados entre estos valores. En la segunda imagen (b), todos los valores entre 12 y 43 son linealmente estirados usando un estiramiento lineal mínimo – máximo para que los valores se distribuyan dentro del rango de 0 a 255. El valor 12 mínimo se vuelve 0 y el máximo valor 43 se extiende hasta 255. El histograma asociado con esta imagen demuestra una distribución más amplia que el primer histograma. Esto resulta en un contraste de valores de píxel que perfecciona el despliegue.

La tercera imagen (c) continúa estirando los datos aplicando un estiramiento de contraste lineal, usando una desviación estándar. Los píxeles de las “colas” saturan los valores de 0 y 255, por ello la imagen empieza a mostrar tonos claros y más oscuros.

El análisis detallado de ciertos aspectos de la imagen puede realizarse para una mejor interpretación. La cuarta imagen (d) muestra cómo se expandiría una imagen si sólo interesara delinear los humedales alrededor del Puerto que aparece allí. Cuando se estiran los valores entre 13 y 27 linealmente a 0 y 255, todos los valores debajo de 13 se vuelven 0 (negro) y todos los valores arriba de 27 se vuelven 255 (blanco). Este realce produce información adicional sobre los humedales a expensas del resto de coberturas de agua y de tierras más altas.

Puede requerirse aumentar el contraste de una imagen en unas porciones específicas del espectro electromagnético.

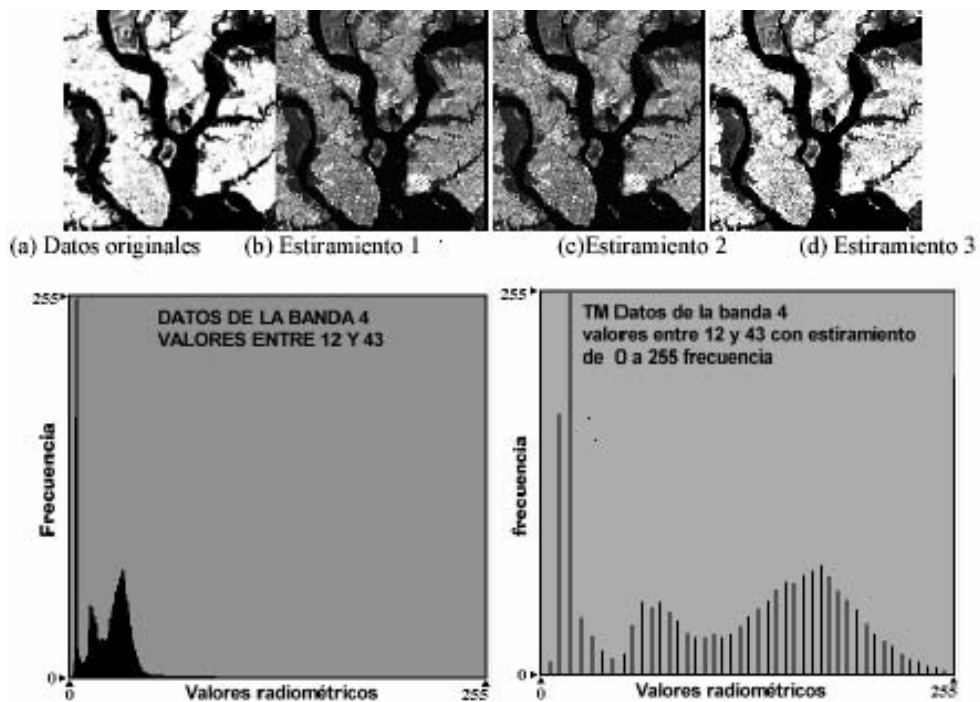


Fig. N° 25 Comparación de varios estiramientos lineales para el realce de contraste

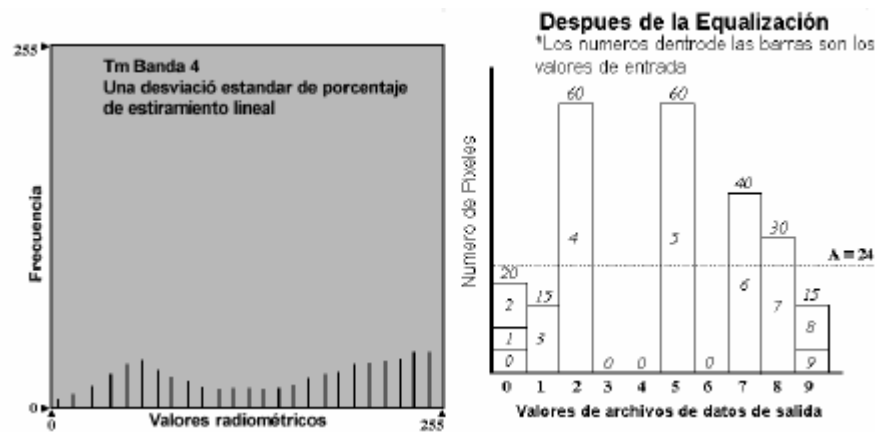


Fig. N° 25.1 Comparación de varios estiramientos lineales para el realce de contraste

Estiramiento del Contraste Lineal por piezas significativas

Cuando la distribución de un histograma en una imagen es bimodal o trimodal, se pueden estirar ciertos valores del histograma para el realce de áreas seleccionadas. Este método de realce del contraste se llama estiramiento lineal por piezas significativas. Este involucra varios pasos de realces lineales que extienden los valores de píxel, de acuerdo con el histograma (Figura No. 26). Una serie de estiramientos pequeños de mínimo-máximo son realizados a un único histograma. Aquí se requiere que el analista conozca bien la forma del histograma y la interprete de la mejor manera, en relación con los rasgos del mundo real.

En el contraste lineal por piezas significativas, muchos puntos de quiebre son definidos, lo cual incrementa o decrece el contraste de la imagen para un rango dado de valores. Entre más alta sea la pendiente, más estrecho es el rango de valores a ser entrados desde el eje X. Esto resulta en una salida más amplia de esos mismos valores, incrementando el contraste para ese rango. Una línea de menor pendiente va a tener un menor contraste para el mismo rango de valores.

En la Figura No. 27 se despliegan los histogramas correspondientes a un estiramiento de contraste lineal normal, comparado con un estiramiento del contraste lineal por piezas significativas. En blanco se muestran los datos originales y en rojo, verde y azul se presentan los histogramas, una vez aplicado el

estiramiento. En el contraste lineal normal, los valores mínimo y máximo son estirados a los valores 0 y 255, respectivamente, en un nivel constante de intensidad (definido por la línea negra).

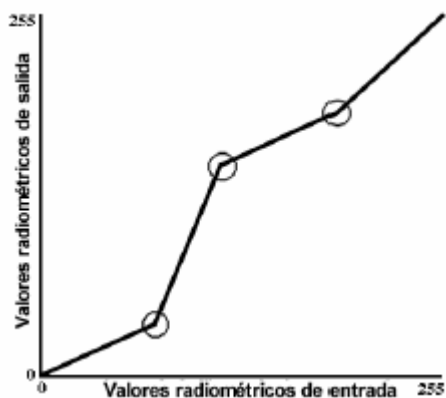


Fig. N° 26 Contraste lineal por piezas significativas

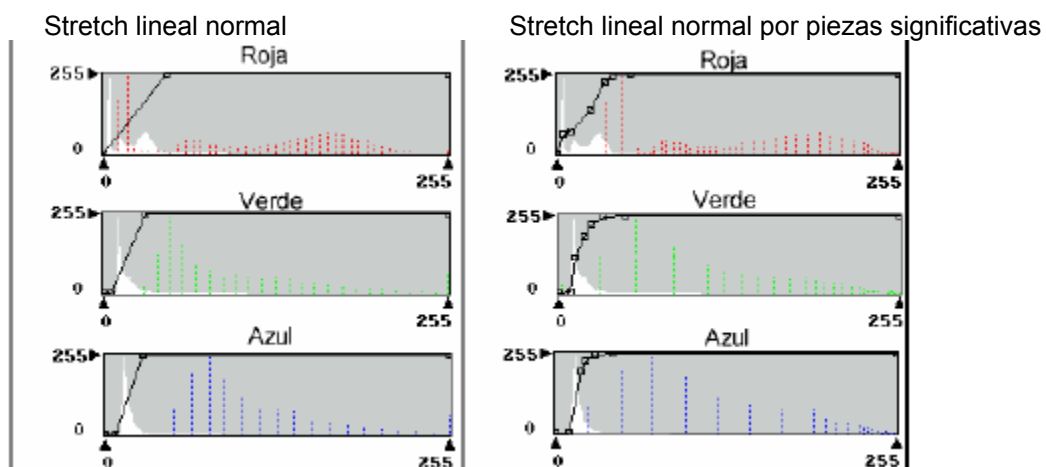


Fig. N° 27 Estiramiento de contraste lineal Vs. Estiramiento del contraste por piezas significativas

Contraste No-Lineal

El contraste no-lineal a menudo involucra igualaciones del histograma a través del uso de un algoritmo. Tiene implícita la variación de las frecuencias de los NDs dentro de la imagen. Es decir además de que los NDs originales adoptan nuevos valores NV de salida, también varía la frecuencia de píxeles para este nuevo valor.

Igualación del histograma (ecualización).

La igualación del histograma es una de las formas más útiles de realce de contraste no-lineal. Cuando el histograma de una imagen se iguala, todos los valores de píxel de la imagen se redistribuyen. Hay aproximadamente un número igual de píxeles en cada uno de los tonos de gris especificados por el usuario.

El contraste se aumenta en el rango más poblado de valores digitales del histograma (o “crestas”). A su vez se reduce automáticamente en las partes oscuras de la imagen asociadas con las colas de un histograma distribuido normalmente (Jensen 1996). La igualación del histograma también puede separar píxeles dentro de distintos grupos, si hay pocos valores de salida sobre un rango amplio.

La Figura N° 28 muestra dos histogramas. El primer histograma muestra valores antes de que la igualación realice. Cuando este histograma se compara al histograma ecualizado, se puede ver que la imagen realzada gana contraste en las áreas más pobladas del histograma original. En este ejemplo, el rango de la entrada de 3 a 7 se extiende al rango de 1 a 8 y los datos de las colas del histograma original se agrupan. Los datos de entrada de 0 a 2 tienen un valor de salida de 0. Esto normalmente produce la pérdida de la característica oscura y luminosa asociada con los píxeles de la cola.

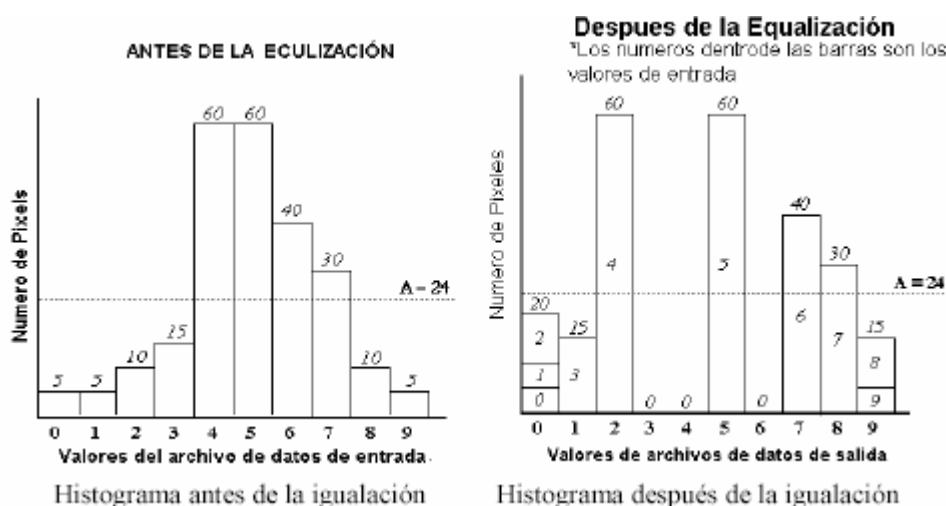


Fig. N° 28 Contraste no-lineal. Igualación (ecualización) de histograma

Los analistas de imágenes deben ser conscientes que, mientras la igualación del histograma proporciona a menudo una imagen con un contraste que ninguna otra técnica de realce puede propiciar, esta al mismo tiempo “esconde” mucha información requerida. Dicha técnica agrupa píxeles que son muy oscuros o muy luminosos en muy poco niveles de grises.

Si se está intentado sacar información sobre las sombras del terreno o de las nubes, la igualación del histograma no es apropiada. Una imagen TM 4 se muestra en la Figura N° 29, antes y después de aplicada la técnica de ecualización. Note en el histograma, que los ND que presentan alta frecuencia son más contrastados y que al contrario, los de menor frecuencia son más contrastados y que al contrario, los de menor frecuencia son agrupados.

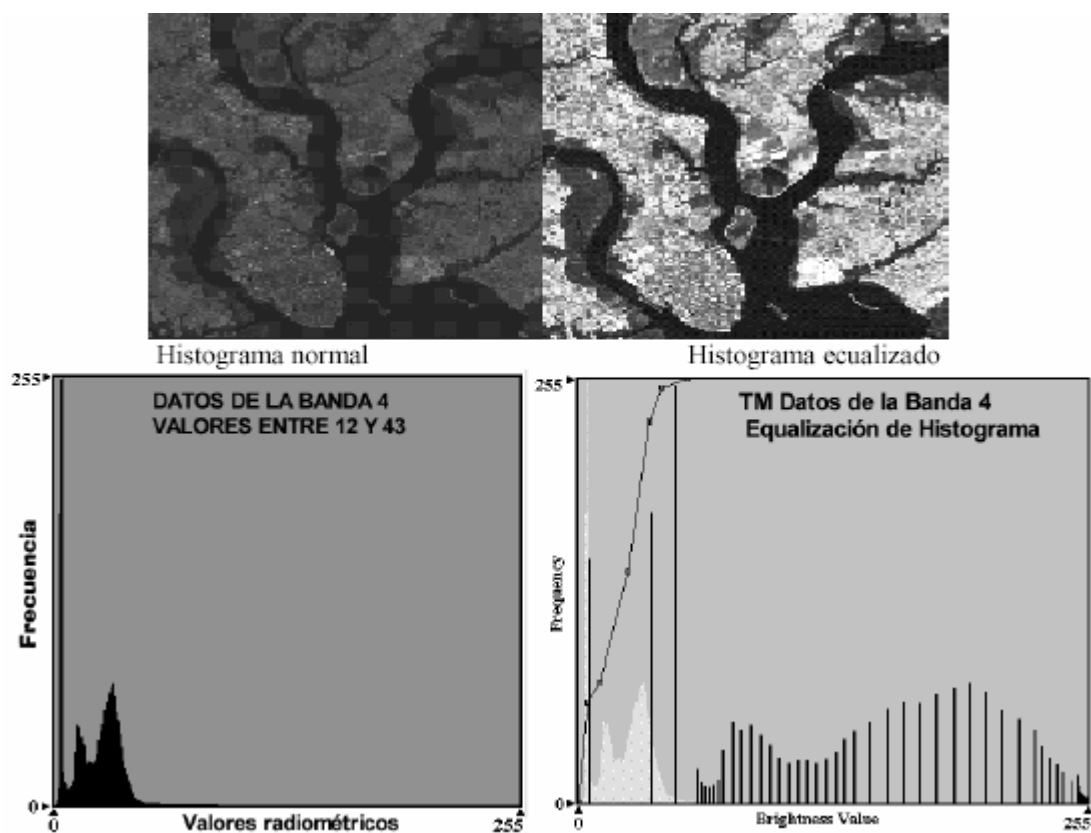


Fig. N° 29 Histogramas antes y después de la igualación del histograma

Despliegue a Color de una imagen

El despliegue a color de los datos de percepción remota es de importancia para una interpretación visual efectiva. Existen dos métodos del despliegue de color:

1. Las composiciones a color para generar color con datos multi-banda.
2. Despliegue de pseudo color para asignar diferentes colores a la escala de grises de una imagen.

Composición a Color:

Una imagen a color puede ser generada componiendo tres bandas seleccionadas con el uso de tres colores primarios. Imágenes de diferente color pueden ser obtenidas dependiendo de la selección de las tres bandas y de la asignación de los tres colores primarios a cada una de ellas.

Cuando tres colores primarios: azul, verde y rojo, casi los mismos colores de la escala natural pueden ser reproducidos y esta se denomina una *composición a color natural*. Sin embargo en percepción remota las imágenes multibanda no están siempre divididas dentro de las mismas regiones espectrales de los filtros de los tres colores primarios. En adición las regiones invisibles como las del infrarrojo son usadas muy a menudo y requieren ser desplegadas en color. Como una composición a color con una banda del infrarrojo no es de color natural, es llamada una *composición en falso color*.

En particular la composición a color con la asignación del azul a la banda verde, del verde a la banda roja y del rojo a la banda infrarrojo cercano es muy popular y es llamada *composición a color infrarroja*, que es la misma que se encuentra en los filmes a color infrarrojos. Este proceso permite visualizar, en forma simultánea, imágenes de distintas regiones del espectro electromagnético, facilitando la delimitación y discriminación visual de algunas coberturas. Por ejemplo, en una composición del TM 4, 5,3 (Rojo, Verde. Azul), la banda 4 del IR cercano, es asignada al color rojo, la banda 5 del IR medio al color verde y la banda 3, del rojo del visible, al azul. Para este caso las diversas tonalidades de rojo representarán:

- Rojo – magenta: vegetación vigorosa (cultivos, prados, bosques de caducifolias) si es época de verano. Si es época de primavera, representará tierras sin riego.
- Rosa: Áreas con vegetación menos densas o vegetación en temprano estado de crecimiento. También podrían ser áreas suburbanas con vegetación.
- Empleando una composición a color es más fácil diferenciar estas coberturas, que hacerlo en forma de bandas individuales, pues el color es de una gran ayuda visual.

Composición a color digital.

En el caso de los datos digitales, tres valores correspondientes al rojo, verde y azul se combinarán de diversas formas para producir un nuevo color. Cada

combinación de píxeles de las tres bandas es representado en la combinación con un valor (por ende color) diferente. A su vez cada una de esas combinaciones tiene diferentes patrones de respuesta espectral, por lo tanto correspondería a un diferente tipo de cobertura.

Criterios en la selección de bandas para una composición a color,

Para la selección de bandas es necesario conocer las estadísticas de las imágenes originales. El criterio establece que para realizar la composición a color deberán seleccionarse aquellas que tengan la mayor varianza original; para ello, se emplea el Factor de Índice Óptimo (OIF). Este índice se calcula con la sumatoria de la desviación estándar de las tres bandas posibles, dividido entre la suma de la correlación entre cada par de esas bandas.

El mayor OIF que se obtenga de entre las posibles combinaciones, será el que tiene más información, con menor cantidad de duplicidad. Generalmente las mejores combinaciones incluyen: una banda del visible, una del IR medio y una del IR cercano.

Despliegue de pseudo color

Diferentes colores pueden ser asignados a la escala de gris, subdividida de una banda de una imagen. Esta asignación es llamada pseudo-color. Por ejemplo

una imagen pseudo-color de una banda del infrarrojo termal podrá dar un mapa de temperatura, si a diversos intervalos de NDs, se les asigna un color diferente. Esta técnica de procesamiento es también conocida como intervalos de densidad ("density slicing").

La diferencia fundamental entre estas dos últimas técnicas, es que mientras la primera se aplica a tres bandas, entonces es un tratamiento multiespectral, la segunda es aplicada únicamente a una banda, donde los ND se clasifican, de acuerdo con la cobertura que representan, asignando un color distinto a cada una de estas coberturas; produciéndose así una clasificación unibanda. Por ejemplo, para una imagen de la banda 4 de un TM, los valores ND de 10 a 18 podrían representar el agua y a esta se le asignaría un pseudo-color de azul. El intervalo entre 30 y 45, podría corresponder y a este se le asignaría un color café. La vegetación podría abarcar el intervalo de ND de 70 a 90 y se le asignaría el pseudo-color de verde. El resultado sería una imagen clasificada de acuerdo con los diversos tipos de coberturas que se pueden diferenciar en ella. Por supuesto, los valores de ND van a variar, dependiendo de la banda que se esté utilizando.

El principal inconveniente de esta técnica es que van a quedar valores ND sin clasificar, pues no se van a saber a que tipo de cobertura corresponden. Igualmente pueden existir dudas en la clasificación de algunos valores, los cuales podrían corresponder a una u otra cobertura.

FILTROS ESPACIALES PARA EL REALCE DE DETALLES

GENERALIDADES

El realce espectral consiste en cambiar la representación de la escala de grises de los píxeles, con el fin de producir una imagen con más contraste para la interpretación. Este aplica la misma transformación espectral a todos los píxeles con una escala de gris dada en una imagen. Sin embargo, esta técnica no aprovecha las capacidades humanas de reconocimiento, aunque puede permitir una interpretación mejor de una imagen por un usuario. La interpretación de una imagen incluye el uso de información radiométrica y la identificación de rasgos en la imagen.

El realce espacial es el procesamiento matemático de los datos de los píxeles de una imagen para dar énfasis a relaciones espaciales. Este proceso define regiones homogéneas basadas en bordes lineales. Las técnicas de realce espacial usan el concepto de frecuencia espacial dentro de una imagen. Si hay una variación lenta en el cambio de la escala de grises en una imagen de un lado de la imagen al otro, se dice que la imagen tiene una frecuencia espacial baja. Si los valores de los píxeles varían radicalmente entre adyacentes en una imagen, se dice que la imagen tiene una frecuencia espacial alta. La Figura N° 30 (a-b) muestra ejemplos de frecuencias espaciales altas y bajas:

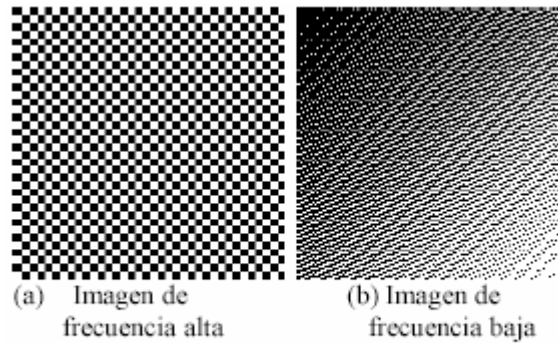


Fig. No. 30 Frecuencias espaciales

Muchos elementos naturales y hechos por el hombre presentan en las imágenes frecuencia espacial alta:

- Fallas geológicas
- Bordes de lagos.
- Caminos.
- Aeropuertos.

El realce espacial involucra el aprovechamiento de información de frecuencia baja o alta dentro de una imagen. Los algoritmos que realzan las frecuencias bajas en la imagen emplean un filtro (normalmente llamado pasa bajo), el cual da énfasis a las frecuencias bajas, mientras quita énfasis a los componentes de frecuencias altas. El realce de información de frecuencia alta dentro de una imagen se llama *realce de bordes*. Este da énfasis a los bordes en

la imagen reteniendo la calidad global de ésta. El Filtro con el que se consigue se denomina *filtro pasa alto*.

Hay tres propósitos principales de las técnicas de realce espacial:

- Mejorar la interpretabilidad de los datos de la imagen.
- Ayudar en la extracción automática de rasgos.
- Quitar y reducir la degradación del sensor.

Métodos de realce espacial

Los dos métodos normalmente usados en realce espacial son:

- Convolución: trabaja el dominio espacial.
- Teoría de transformación de Fourier: trabaja en el dominio de las frecuencias.

Convolución.

La Convolución involucra el paso de una ventana móvil (kernel, matriz de coeficientes o máscara) encima de una imagen, creando otra nueva donde cada píxel en esta nueva imagen es una función de los valores de los píxeles originales dentro de la ventana móvil, siendo los coeficientes de dicha ventana los especificados por el usuario.

La técnica permite aislar (suavizar o realzar) componentes de interés, lo cual hace que se modifiquen los ND originales. Por lo tanto, no es bueno emplearla si se requiere usar los valores originales de la imagen. Un operador de

la Convolución, puede ser considerado como una matriz (o máscara) de coeficientes que serán multiplicados por cada valor del píxel de la imagen para derivar unos nuevos valores de píxel con un realce resultante para la imagen. Esta matriz puede ser de cualquier tamaño en píxeles y no tiene que ser necesariamente cuadrada.

FILTRAJES

Filtros de paso bajo

Tienen por objetivo suavizar los contrastes espaciales presentes en la imagen. En breves palabras, se trata de asemejar el ND de cada píxel al de los píxeles vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de la escena. En términos visuales, esto supone que la imagen filtrada ofrece perfiles menos nítidos, más difuminados.

Este tipo de filtraje se utiliza para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen, fruto de un defecto en la adquisición o recepción de los datos. Así mismo, se ha empleado para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías, como paso previo a la clasificación. En este caso, se pretende atenuar el denominado “ruido de la escena”, producido en las zonas altamente heterogéneas en relación con la resolución espacial del sensor. El caso más claro, y el más estudiado, es el que se produce en las zonas urbanas, en donde se mezclan distintos tipos de cubierta en un reducido espacio. Para disminuir esta variabilidad espacial, se han propuesto diversos filtros de paso bajo,

que tienden a homogenizar los ND de esas zonas. El efecto de estos filtros se ha mostrado bastante eficiente de cara a la clasificación digital (Haack et al, Cushinie y Atkinson, 1985).

El filtro de paso bajo puede obtenerse a partir de diversas matrices de filtraje.

Algunas de las más habituales son:

	1.00	1.00	1.00		0.25	0.50	0.25		1.00	1.00	1.00
(1)	1.00	1.00	1.00	(2)	0.50	1.00	0.50	(3)	1.00	2.00	1.00
	1.00	1.00	1.00		0.25	0.50	0.25		1.00	1.00	1.00

La primera es un simple promedio de los 9 píxeles que componen la ventana de filtraje, mientras las dos segundas matrices ponderan el valor central para evitar una excesiva pérdida de detalle.

En los últimos años se ha aplicado con bastante rendimiento otro tipo de filtraje, basado sobre la mediana en lugar de la media. El filtro mediano, se basa en sustituir el ND del píxel central por la mediana de los correspondientes a los píxeles vecinos. Su interés se corresponde con el propio de la mediana como medida de centralidad: es menos sensible a los valores extremos y entraña una mejor modificación de los datos que la media aritmética: de ahí que se haya recomendado su empleo dentro de las técnicas de análisis exploratorio de datos (Tukey, 1977). En el contexto del tratamiento digital de imágenes, se ha empleado para eliminar valores anómalos aislados, fruto de ruidos aleatorios en la

adquisición de los datos. Preserva mejor los contornos que el filtro promedio, pero demanda un mayor volumen de cálculo, lo que dificulta su aplicación cuando los recursos informáticos son escasos. Se ha aplicado con éxito para reducir el moteado brillante de las imágenes de radar (Blom y Daily, 1982).

Filtros paso alto

Este tipo de filtros pretende aislar los componentes de alta frecuencia en una imagen. En términos especiales, esto supone remarcar digitalmente los contrastes espaciales entre píxeles vecinos, enfatizando los rasgos lineales presentes en la imagen, como carreteras, parcelas o accidentes geológicos. En definitiva, se intenta reforzar los contornos entre áreas homogéneas, evidenciando cualquier discontinuidad.

Varios métodos pueden seguir este objetivo. El más sencillo pasa por restar de la imagen original la obtenida por un filtro de paso bajo. La razón es bastante obvia; si lo que se pretende es aislar los componentes de alta frecuencia (alta variabilidad), basta restar de la imagen original aquellos correspondientes a la baja frecuencia, con lo que sólo quedarían los requeridos, que se añadirían a la imagen original. En suma:

$$ND'_{i,j} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} - ND^L_{i,j})$$

Donde ND' corresponde al ND de salida, ND al original, y ND^L al resultado de un filtro paso bajo.

Más común es, sin embargo, emplear matrices de filtraje, similares a las anteriormente analizadas. En este caso, los CF se disponen de tal modo que se refuerza el contraste entre el píxel central y los vecinos. Dos matrices frecuentemente utilizadas son:

$$\begin{array}{ccc}
 & -1 & -1 & -1 \\
 (4) & -1 & 9 & -1 \\
 & -1 & -1 & -1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 & 0 & 0 & -1 \\
 (5) & -1 & 5 & -1 \\
 & 0 & -1 & 0
 \end{array}$$

Ambas se derivan del análisis de gradientes de cambio de la imagen. El segundo filtro denominado, Laplaciano, se recomienda para el realce de rasgos lineales en la ciudad (Jensen, 1986).

Algunos autores han recomendado el empleo de filtros no lineales para reforzar fronteras o rasgos de interés en la imagen. Uno de los más empleados, en este sentido, es el denominado detector de bordes de Sobel (González y Wintz, 1977), que relaciona la variación entre filas y columnas de la matriz de filtraje. En una ventana de 3 x 3 píxeles, el ND del píxel central se calcula de la forma siguiente:

$$ND'_{i,j} = \sqrt{(C^2 + F^2)}$$

Donde:

$$C = (ND_{i-1, j+1} + 2 ND_{i, j+1} + ND_{i+1, j+1}) - (ND_{i-1, j-1} + 2 ND_{i, j-1} + ND_{i+1, j-1})$$

Y

$$F = (ND_{i-1, j-1} + 2 ND_{i-1, j} + ND_{i-1, j+1}) - (ND_{i+1, j-1} + 2 ND_{i+1, j} + ND_{i+1, j+1})$$

En ocasiones estos filtros de paso alto se enmarcan dentro de una técnica denominada realce de bordes (*edge enhancement*), dirigida a subrayar los cambios especiales presentes en la imagen. Además de los filtros arriba expuestos, una forma sencilla de realzar los bordes sería realizar una copia de la imagen, desplazarla una fila y/o columna sobre la original y restar ambas. Aquellos píxeles que ofrezcan un valor cercano a 0 indicarán áreas de escasa variación, mientras cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será también el contraste especial entre píxeles vecinos. Así mismo puede definirse una dirección de contraste, hacia valores superiores o inferiores según sea negativa o positiva la diferencia. Otros métodos de detección de bordes han sido desarrollados para aplicaciones específicas, como son la detección de lineamientos (Moore y Waltz, 1983), o el realce de plumas de agua (Jensen, 1986, pp. 144-151).

CAPITULO V

TRANSFORMACIONES ESPECIALES DE IMÁGENES DIGITALES

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se incluyen aquellas operaciones dirigidas a crear bandas artificiales, a partir de combinaciones entre las originales, con objeto de mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos dentro de la imagen. Dicho brevemente, son transformaciones dirigidas hacia la clasificación temática, ya sea ésta visual o digital. Obviamente, tales operaciones no proporcionan una nueva información que no estuviera ya incluida en los datos originales. Permiten, no obstante, mejorar la disposición de los datos, de forma que sean más evidentes determinados fenómenos de interés.

La mayor parte de las transformaciones hasta ahora empleadas en teledetección son lineales. En otras palabras, esas nuevas bandas se crean por combinación lineal de las originales: sumas ponderadas, multiplicaciones o divisiones, son las más habituales.

OPERACIONES ENTRE BANDAS

Las operaciones entre bandas proporcionan información adicional a la que existe. Habitualmente emplean las bandas menos correlacionadas, con el fin de que el aporte de estas técnicas de procesamiento sea más significativo. Para representar el rango de la función de una forma lineal y para codificar los valores del cociente en un formato estándar de 8-bit (valores de 0 a 255), se aplica una normalización a las funciones.

Adición

La operación de suma se lleva a cabo entre los píxeles de dos imágenes. Esta suma promediada, se emplea para obtener una nueva imagen con menor influencia del ruido, pues el promedio disminuye los valores altos. Habitualmente, para esta aplicación, se emplean bandas cercanas espectralmente (dos del infrarrojo ó dos del visible).

Sustracción

Se usa para resaltar cambios de regiones entre dos imágenes de la misma área. Para normalizar el resultado se puede adicionársele a la diferencia 255 y dividir entre 2. De esta forma lo que no cambia va a mantenerse gris medio.

Cociente

Como su nombre lo indica, un cociente implica efectuar una división, píxel a píxel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Su empleo se justifica en dos situaciones: (i) para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación, y (ii) para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de estas cubiertas. La firma espectral característica de la vegetación sana muestra un acentuado contraste entre las bandas visibles- y especialmente la banda roja (0.6 a $0.7\ \mu\text{m}$)- y las comprendidas en el infrarrojo cercano (0.7 a $1.1\ \mu\text{m}$). Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben (para realizar la función clorofílica), en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano.

Junto a los índices de vegetación, se han propuesto otros cocientes de bandas para enfatizar distintos tipos de cubierta, especialmente en trabajos de exploración minera (Podwysoki et al, 1985). Este tipo de estudios sólo parecen viables en áreas de vegetación escasa, con objeto de obviar el efecto pantalla de la cubierta vegetal. En un trabajo realizado a partir de imágenes TM sobre el desierto del Mohave (California), se mostró el interés de los siguientes cocientes: TM5/TM7 , para detectar rocas alteradas hidro-térmicamente; con alto contenido de arcillas, micas y rocas sulfatadas; TM5/TM4 , para aislar las cubiertas vegetales de la roca desnuda, y TM3/TM1 , para aquellos materiales con importante presencia de limonita (Podwysoki et al, 1985).

Los especialistas de la compañía suiza **LEICA** propietarios del software **ERDAS IMAGINE 8.6** han implementado una serie de cocientes de bandas que

han tenido buenos resultados para el estudio de diferentes áreas, entre los cuales podemos mencionar:

Índice de Vegetación: TM4/ TM3

Suelos con presencia de óxidos de hierro: TM3/TM1

Suelos con presencia de minerales arcillosos: TM5/TM7

Suelos con presencia de minerales ferrosos: TM5/TM4

Composición Mineral: TM5/TM7, TM5/4, TM3/TM1

Composición Hidrotermal: TM5/TM7, TM3/TM1, TM4/3

En cuanto al empleo de los cocientes de bandas para reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de cada cubierta, varios autores han mostrado el efecto homogenizador de estas combinaciones aritméticas (Short, 1982; Solé, 1986). La reducción en la reflectividad que presenta una zona en sombra es proporcional en distintas bandas, por lo que un cociente tenderá a resaltar el contraste espectral frente al contraste de iluminación, más claro en las bandas originales

COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales (ACP) es ampliamente usado en aplicaciones basadas en el estudio de las diferencias de datos a partir de variables originales, para los cuales se estudian las relaciones, con el fin de extraer datos

que no presenten redundancia y que al mismo tiempo muestren las diferencias, una vez se analicen conjuntamente todas las variables de análisis.

Por estas bondades esta técnica de procesamiento digital, es usada para estudios multitemporales, donde se aplica a cada una de las imágenes, de distintas fechas, que intervienen en el estudio con el fin de reducir el número de bandas significativas para la clasificación. Posteriormente los componentes resultantes se combinan para derivar mapas de cambio, donde se identifiquen coberturas con dinámica temporal. De igual forma esta técnica es empleada para el monitoreo de vegetación, a partir de la generación de imágenes de índices de vegetación, donde pueden diferenciarse las respuestas espectrales de la vegetación y del suelo.

Los *factores o componentes principales* son variables-síntesis que preservan lo más significativo de la información original.

En el caso de la teledetección donde se adquieren imágenes empleando bandas adyacentes en el rango del espectro E-M, la información llega a ser redundante, debido a que algunos tipos de coberturas presentan un comportamiento similar en regiones próximas al espectro. Los valores de varias bandas pueden llegar a presentar una alta correlación entre sí, haciendo que ellas contengan información “redundante”.

El ACP permite obviar este aspecto, al producir nuevas imágenes que sintetizan estas bandas o que constituyen las componentes principales de las bandas originales.

Frecuentemente se habla sobre la capacidad del ACP de disminuir la *dimensionalidad* de n a dos o tres bandas, lo cual hace alusión al conjunto de bandas que deben ser analizadas para producir resultados utilizables.

Habitualmente se puede realizar una composición a color de las componentes principales más adecuadas, pudiendo así extraer información de interés.

Estadísticamente las componentes principales son productos que reflejan la variabilidad de la imagen. Permiten recoger rasgos presentes en la mayor parte de las bandas y otros que son específicos a algún grupo de ellas. La distribución de los datos frente a los ejes de variabilidad puede facilitar una mejor identificación de las diferentes coberturas.

Para realizar el análisis de componentes principales se aplica una transformación a un conjunto de datos multiespectrales *correlacionados*. La aplicación del ACP generará otro conjunto de datos multiespectrales *no correlacionados* que tiene cierto orden de propiedades de varianza.

Esta transformación consta de las siguientes estadísticas:

1. La matriz de varianza-covarianza $n \times n$ (donde n es el número de bandas).
2. Los eigenvalores de la matriz de covarianza. Estos expresan la longitud de cada nuevo componente o la proporción de información original que se retiene.
3. Para interpretar el sentido de los ejes de cada nueva variable, se requiere conocer su relación con los originales. De igual forma para calcular las ecuaciones que servirán para obtener las nuevas imágenes se precisa contar con los coeficientes de la transformación. Ambos aspectos pueden abordarse a partir de los eigenvectores. El eigenvector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener el nuevo componente principal. Esto es equivalente también a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes y los CP las dependientes.
4. Se calcula la matriz de correlación a partir de los eigenvectores, para saber el sentido espectral de los componentes.
5. Se obtiene la imagen de los componentes principales. Para ello se usa la matriz de eigenvectores, donde se mide la relación lineal de cada CP y las bandas originales.
6. Una vez obtenidos los CPs se escalan los resultados.

El ACP deduce tantos componentes como bandas originales. De esta forma la primera componente que se obtenga tendrá la mayor variación, la segunda la siguiente y así sucesivamente. Las últimas componentes serán las que retienen menos variaciones. En la práctica las más usadas son las tres primeras componentes.

CAPITULO VI

EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA

CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS:

Clasificación es el proceso de desarrollar mapas interpretados a partir de imágenes de Sensores Remotos. Como consecuencia, la clasificación es quizás el aspecto más importante del procesamiento de imágenes para el Sistema de Información Geográfica (SIG). Para la mayor parte de usuarios de teledetección, la clasificación supone la fase culminante del tratamiento de imágenes. Hacia ella se

orientan las operaciones aquí mencionadas, puesto que los resultados de la clasificación marcan la calidad final del proyecto desarrollado (Chuvieco, 1990).

Clasificación supervisada vs. no supervisada

Existen dos aproximaciones básicas para el proceso de clasificación: clasificación supervisada y no supervisada. Con la clasificación supervisada se provee una descripción estadística de la manera en la cual las coberturas de uso esperadas deberían aparecer en la imagen y después un procedimiento denominado *clasificador*, es usado para evaluar la probabilidad de que cada píxel pertenezca a una de esas clases.

Con la clasificación no supervisada un enfoque muy diferente es usado. Aquí un tipo especial de clasificador es usado para descubrir los patrones de reflectancia comúnmente ocurridos y patrones distintos de reflectancia en la imagen, basado en que ellos representan las principales clases de cobertura y uso. El analista entonces determina la identificación de cada clase por una combinación de experiencia y trabajo de campo.

En ambos casos el proceso de clasificación puede ser visto como aquel que determina el conjunto al cual cada píxel pertenece. En el caso de la clasificación supervisada los conjuntos son conocidos (o se asume que son conocidos) antes de que el proceso se inicie. Esta clasificación es por ello un proceso de toma de decisiones basado en la información disponible. Con la clasificación no

supervisada, sin embargo, las clases son desconocidas, por eso el proceso se considera de segmentación de clases más que de toma de decisiones.

Patrones de respuestas espectrales o firmas espectrales:

Como ya se conoce, cada material en la naturaleza tiene su propia interacción con la energía electromagnética. Esta interacción varía de una longitud de onda a otra dando lo que se conoce como un patrón de respuesta espectral.

La base de la clasificación es encontrar algunas áreas del espectro electromagnético en las cuales la naturaleza de esta interacción sea diferente para los materiales dentro de la imagen. Muchos definen esto como *firmas*. Esto es, un patrón respuesta que es característico de un material. Sin embargo ya se sabe que en la naturaleza la determinación de firmas distintas es muy complicado debido a:

- Los tipos de vegetación a través de las estaciones pueden variar las firmas.
- El cambio en la iluminación (topografía o estación) y variaciones en la humedad.
- La mayoría de coberturas del suelo son mezclas de rasgos que son captados como un solo píxel.
- Cuando un sensor capta los datos no se puede asegurar que el rango que el rango del espectro que usa, será aquel en el que podrá diferenciarse algún material específico.

Debido a estos problemas planteados, existe una tendencia en clasificaciones supervisadas a desarrollar firmas con referencia a ejemplos específicos sobre la imagen. Estos ejemplos son llamados “training sites” o sitios de muestreos. Son llamados así debido a que se entrena al clasificador en lo que debe buscar.

Por eso, seleccionando ejemplos dentro de la imagen (usualmente comprobada por una visita de campo) se desarrollan firmas que son específicas para la longitud de onda disponible y se evita el problema de las variaciones en el ángulo cenit y la influencia de estaciones. Se puede también escoger ejemplos que son característicos de varias mezclas de clases de coberturas que existan.

Clasificadores duros Vs. Suaves.

Son llamados *clasificadores duros* los que producen una decisión dura acerca de la identificación de cada píxel. En contraste, los *clasificadores suaves* expresan el grado con el cual un píxel pertenece a cada clase considerada. Por lo tanto en lugar de decidir que un píxel es de coníferas o de bosque primario, este puede indicar que su grado de pertenencia es de 0.43 y al de conífera de 0.57, entonces se concluirá que es de coníferas.

Una de las motivaciones de aplicar este último criterio es determinar la mezcla de las clases de cobertura y uso presentes. Una segunda motivación para

el uso de clasificadores suaves es determinar la fuerza de la evidencia, soportando la mejor conclusión que pueda ser hecha. Esto nos permite entender que píxeles muy similares a los sitios de entrenamiento pueden pertenecer a otro tipo que aún no se ha clasificado. Una tercera motivación es su uso con SIG, que permite suplementar la información usada para alcanzar una toma de decisiones final.

CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.

Parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencias previas o por trabajo de campo. Este conocimiento sobre la zona permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas de entrenamiento que se consideran representativas. Tales áreas sirven para entrenar al computador en el reconocimiento de las diferentes categorías. A partir de ellas el computador calcula los valores radiométricos que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus valores.

La cartografía convencional o las fotografías pueden ser de ayuda para la localización más precisa de estas áreas, las cuales deben ser lo suficientemente homogéneas y representativas de la clase que definen.

Respecto a la distribución, conviene tener en cuenta las propias características de la imagen, intentando abarcar las variaciones espaciales que se presentan en cada categoría: su orientación, pendiente, densidad, vigor, contenido de humedad, tipo de suelo, etc. En este sentido se afirma que la variabilidad de la cubierta es directamente proporcional a la resolución del sensor (Cushinie, 1987). Cuanto mayor sea el detalle espacial registrado en la imagen, mayor será su sensibilidad para detectar las variaciones internas de una categoría, antes ocultas bajo un píxel de mayor tamaño.

CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

Está dirigida a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún muestreo previo del área de estudio.

En este método se asume que los valores radiométricos de los píxeles forman una serie de agrupaciones o conglomerados (“clusters”). Estos grupos corresponderían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo que definen diversas clases temáticas. Desgraciadamente estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a las clases de información que el usuario pretende deducir, entonces le toca a este temático interpretar o dar sentido temático a las categorías.

Este método es también una generalización de la cobertura de uso, puesto que cubre las clases mayores y tiende a ignorar aquellas que tienen muy baja frecuencia de ocurrencia.

El proceso se lleva a cabo en tres etapas:

1. Selección de las variables que intervienen en el análisis.
2. Selección de un criterio para medir la similitud o distancias entre casos.
3. Selección de un criterio para agrupar los casos similares.

En nuestro contexto las variables son las bandas espectrales usadas en la clasificación, bien sean originales o fruto de una transformación. Los casos son los píxeles que componen la imagen, cada uno de ellos definidos por tantos valores radiométricos como bandas intervienen en el análisis. En este espacio multivariado se trata de encontrar los grupos de píxeles con valores radiométricos similares, para luego equipararlos con alguna de las clases de información de nuestra leyenda.

El método para encontrar esos grupos homogéneos, puede ilustrarse con el caso más simple, en el que se estuvieran trabajando con tres bandas. En un gráfico aparecerían tantos puntos como píxeles localizados de acuerdo con su valor radiométrico en cada banda. (Ver Fig. N° 31).

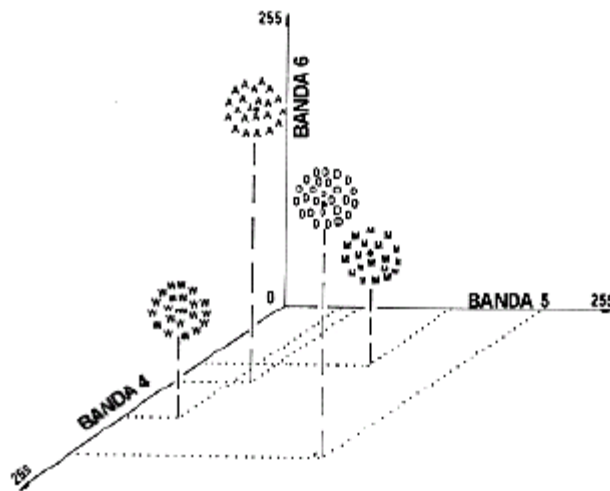


Fig. N° 31 Agrupaciones (cluster) en la clasificación no supervisada

El gráfico evidencia la existencia de agrupaciones de píxeles. La posición de cada agrupación define los valores radiométricos bajos o altos en una u otra banda.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento.

Para el primer aspecto se han propuesto criterios para medir la distancia entre píxeles. El más usado es el de la distancia Euclidiana:

$$Da,b = \sqrt{\sum_{k=1}^m (NDa,k - NDb,k)^2}$$

Ecuación de distancia Euclidiana

$D_{a,b}$ -Indica la distancia entre dos píxeles a y b $ND_{a,k}$ y $ND_{b,k}$ los valores radiométricos de esos píxeles en la banda k .

m -El número de bandas.

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, las opciones son también numerosas. Uno de los más extendidos y usados en el presente trabajos es el de ISODATA.

De acuerdo con Duda y Hart, 1973, en esencia este algoritmo procede a partir de las siguientes fases:

1. Se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario.
2. Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo.
3. Se calculan de nuevo los centros de las clases teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se hayan incorporado.
4. Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual debido al desplazamiento de la etapa anterior no coincidiría con la anterior asignación realizada.
5. Vuelven a calcularse los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones y se retorna a la fase IV.

El proceso se repite hasta que el centro de clase no se desplace significativamente, lo que indica un buen ajuste a los grupos presentes en la imagen. Antes de iniciar una nueva iteración se interrogan parámetros de control introducidos por el usuario como: si se ha alcanzado el número máximo de grupos, si algún grupo tienen número de píxeles inferior al establecido, en cuyo caso se suprime, algún grupo; si está a una distancia menor que la señalada para realizar entonces una fusión, si algún grupo cuenta con una varianza superior a la máxima establecida para que sea dividido.

Si el desplazamiento entre los grupos ha sido inferior al señalado por el usuario se finaliza el proceso.

MÉTODOS MIXTOS.

Los dos métodos supervisado y no supervisado cuentan con ventajas y desventajas. El primero resulta muchas veces subjetivo, pues el usuario establece a priori unas categorías sin valorar las características espectrales de la imagen. El segundo no garantiza que las clases deducidas tengan significado para el usuario del producto, además de ser difícil verificación.

Con el fin de evitar estos inconvenientes se han propuesto alternativas que los combinan. Estas alternativas son:

1. Empleo del supervisado para guiar el no supervisado. En este caso se usa el conocimiento del intérprete para orientar la búsqueda de los

grupos homogéneos. Por ejemplo puede aplicarse el método no supervisado a áreas de la imagen con una cobertura conocida. También se pueden introducir valores radiométricos medios de las categorías de interés, obtenidos en las áreas de entrenamiento y usarlos como centro iniciales del grupo. El proceso de búsqueda así se reduce notoriamente y se forman grupos con significado temático.

2. Se pueden usar separadamente sobre la misma y luego sintetizar las medidas extraídas por ambos. Las categorías se complementan en cuanto a significado espectral y temático.

MÉTODOS PARA LA COMPARACIÓN DE FIRMAS ESPECTRALES

Existen dos formas de realizar estadísticas para evaluar que tan similares son las firmas espectrales a ser empleadas en la clasificación. Una forma es a través del análisis gráfico y otra del estadístico.

Métodos gráficos

El más elemental es un *diagrama de firmas* donde en la abcisa se colocan las bandas que intervienen en el análisis y en la ordenada los valores medios de píxeles para cada categoría. Este gráfico es muy útil para proporcionar una primera valoración de las tendencias espectrales de cada categoría. Las líneas paralelas y próximas indican una sobre posición entre categorías, mientras las

intersecciones entre líneas manifiestan las bandas donde es más probable separar las categorías que representan. Ver figura No.32

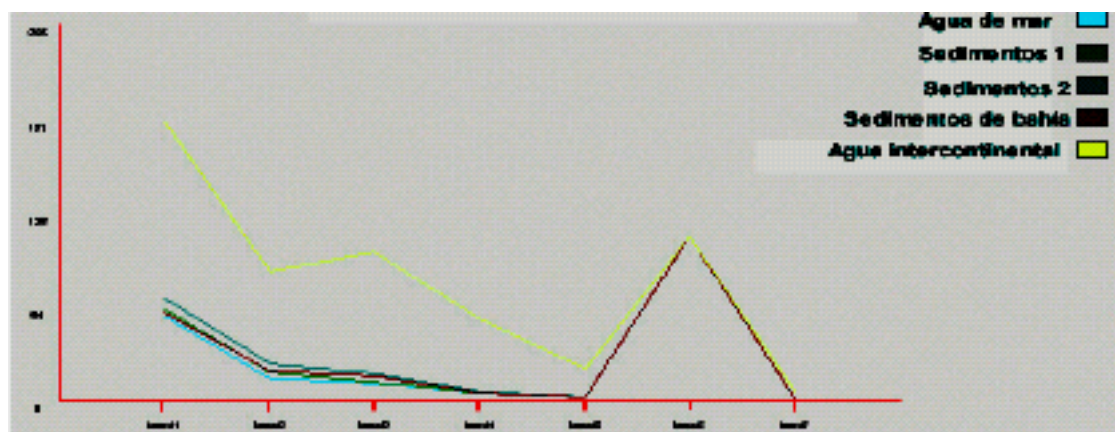


Fig. No. 32 Diagrama de firmas para el análisis gráfico de firmas espectrales

Otra forma gráfica de realizar el análisis es a través de un *gráfico de dispersión espectral*. Este es un diagrama de barras que recoge en cada banda y para categoría el rango digital cubierto por la media más y menos una o dos desviaciones estándar típicas.

Un *histograma de frecuencias* de los valores radiométricos que componen las diferentes categorías es la tercera opción para realizar el análisis de firmas. Esto se realizará para todas las categorías al mismo tiempo asumiendo que los valores radiométricos en el seno de cada categoría se distribuyen normalmente. La interpretación que se puede dar a este gráfico es que entre mayor sea el solape entre categorías, mayor será la confusión al querer discriminarlas. Esto nos puede estar dando un error previsible en la posterior clasificación.

Métodos estadísticos

Uno de los más conocidos de este grupo es la *separabilidad estadística* (Swain y Davis, 1978):

$$D_{\text{norm } A, B} = (|\text{promND}_A - \text{promND}_B|) / (S_A + S_B)$$

La distancia normalizada entre las clases A y B es fruto de establecer la diferencia absoluta entre medias, promediada por la suma de sus desviaciones típicas. Esta medida se aplica a cada par de bandas que intervienen en la clasificación.

Un poco más compleja es la divergencia estadística. Aquí se parte de asumir que los valores radiométricos en una categoría se distribuyen normalmente, asumiendo la separabilidad como la medida de solape entre las categorías vecinas. Por cuanto se calcula el valor para un espacio multivariado se considera el vector de medias y la matriz de varianza covarianza entre pares de categorías.

CAPITULO V

METODOLOGIA

Uno de los objetivos del presente trabajo era el de realizar una caracterización mineralógica del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro a través de percepción remota con imágenes multiespectrales, pero durante el desarrollo de la investigación se determinó que tan detallado estudio no se podía realizar debido a que las imágenes Landsat 7 poseen solamente 8 bandas multiespectrales. Durante el desarrollo de la investigación se consultaron varios trabajos de percepción remota aplicados a la geología en donde la imagen de satélite utilizada fue ASTER; el cual posee 14 bandas, lo que facilita una caracterización más detallada de la mineralogía de superficie.

Se logró consultar algunos autores (Azcurra Diego y Castro Silvia) de la Universidad de Buenos Aires, quienes mencionan las limitaciones de las imágenes Landsat 7, en contraste con las imágenes ASTER para realizar caracterización mineralógica. Por tal motivo este objetivo no se pudo alcanzar, obteniéndose sin embargo excelentes resultados en discriminar zonas con alto contenido de minerales ferrosos, suelos con alta concentración de óxidos de hierro y minerales arcillosos.

Para efectuar este estudio se utilizó la imagen 001/054 del sensor ETM+ del satélite Landsat-7, con fecha de adquisición 03/03/2003. Esta escena tiene 185 x

170 Km. y comprende las regiones aledañas al embalse del Guri Edo. Bolívar, situándose las regiones de interés al oeste del mencionado embalse.

Se han procesado nueve bandas (tres bandas visibles, cinco bandas infrarrojas y una banda pancromática) del sensor ETM+, con resolución de 30m para los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 8, de 60m para los canales térmicos 6a - 6b y de 15m para el canal pancromático.

Para realizar el procesamiento digital de la imagen se utilizó el software *ERDAS IMAGINE 8.6*, con el cual se efectuaron los siguientes procedimientos:

1) Extracción de la sub-imagen:

Para poder realizar todas las operaciones de procesamiento de imagen es necesario extraer la zona de interés de la imagen original (32.000 Km²) de Landsat 7, ya que ésta, posee una amplia extensión. Para ello se utiliza la opción Inquire Box (Figuras 33 y 34) del software mencionado anteriormente, el cual despliega un pequeño cuadro que puede ser definido en función del área de interés. Posteriormente se realiza la siguiente secuencia con los menús Data prep. (Figura No 35), Sub-set image (Figuras No. 36 y 37) con los cuales se obtiene una sub-imagen con un área de 424,13 Km², siendo esta la más conveniente para el trabajo a realizar.

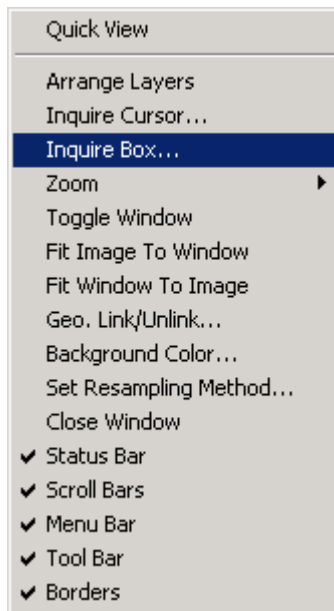


Fig. N° 33 Función de Erdas Imagine 8.6 para seleccionar un área de una imagen

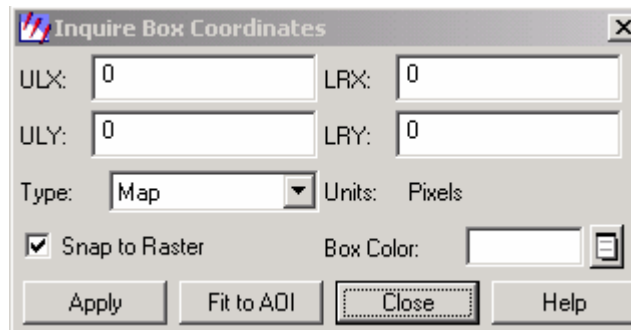


Fig. N° 34 Ventana de Inquire box en donde se definen las coordenadas de la imagen seleccionada

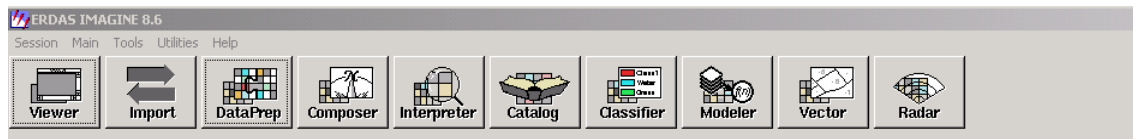


Figura No. 35 Menú principal de Erdas Imagine en donde esta la opción de Data Prep

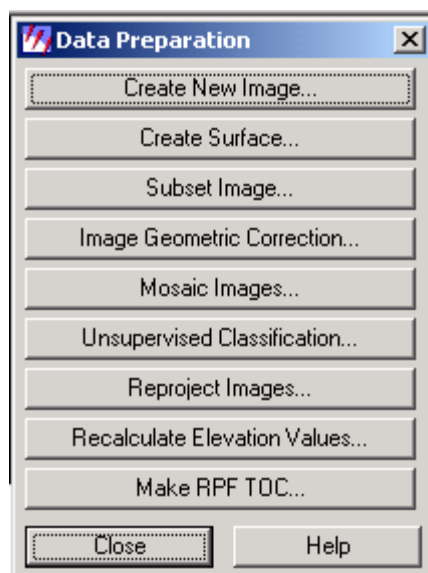


Fig. N° 36 Menú de Data preparation en donde esta la función Subset Image para crear una sub-imagen

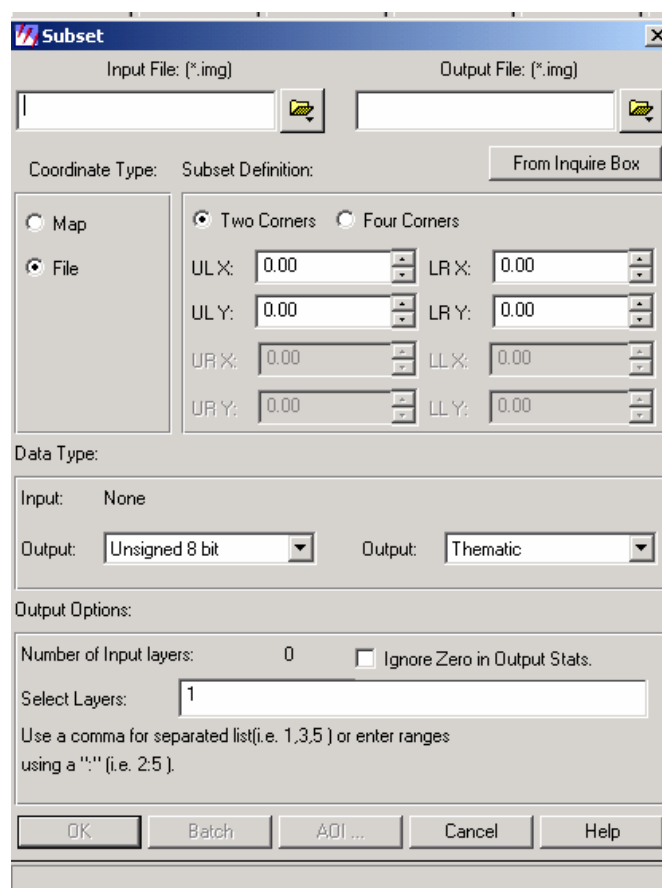


Fig. N° 37 Ventana Subset en donde finaliza el procedimiento para generar una sub-imagen

2) Georeferenciación:

Para poder realizar la georeferenciación y a su vez la rectificación polinomial es necesario poseer la cartografía de la zona a georeferenciar. La cartografía a utilizar puede ser en formato raster (digital) o mapas impresos. Para la georeferenciación de la zona de interés se utilizó un mapa impreso en escala 1: 100.000. Antes de iniciar el proceso de georeferenciación es necesario realizar la respectiva corrección geométrica, para lo cual se toman en cuenta datos como (Figura N° 38):

- Grado del polinomio a ejecutar por el software empleado (se usó un polinomio de grado 1)
- Tipo de proyección geográfica (UTM)
- Nombre del esferoide (International 1909)
- Nombre del Datum (PSAD56)
- ZONA UTM (20)

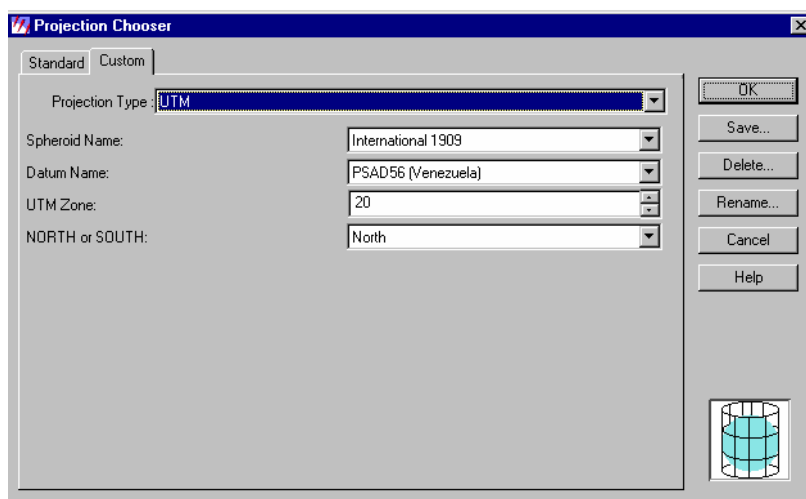


Fig. N° 38 Proyección seleccionada para realizar la Georeferenciación

Al ya tener definido estos parámetros se define también el orden del polinomio a ejecutar en el programa, utilizándose para esta georeferenciación un polinomio de grado 1 (Figura No. 39), debido a que la zona de estudio es mayormente plana, y el grado del polinomio a utilizar esta relacionado directamente con la topografía de la zona de estudio, así pues al tener una zona montañosa se requerirá utilizar un polinomio de grado mayor a uno. A medida que aumenta el grado de polinomio a usar se necesitará seleccionar más puntos de control (GCP).

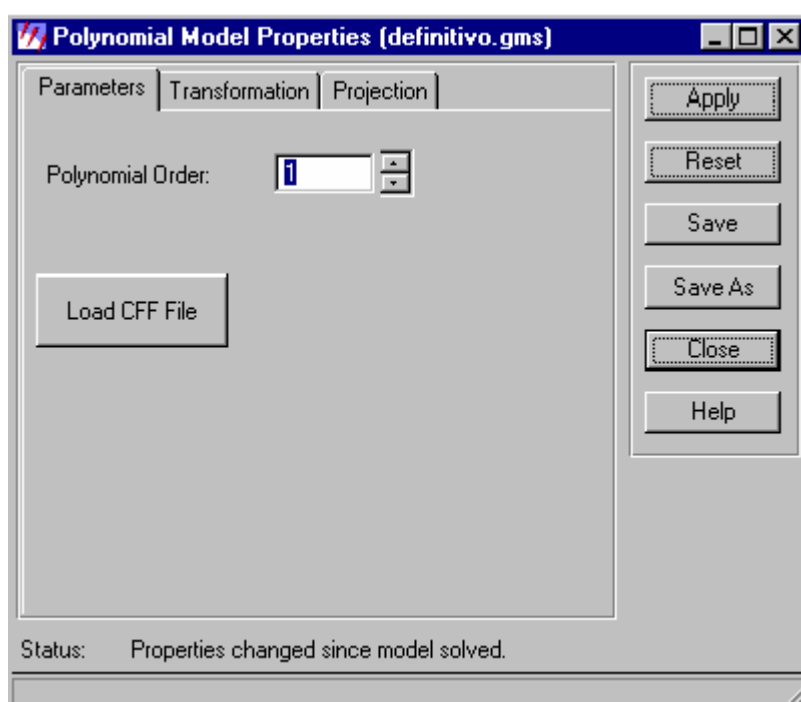


Fig. N° 39 Orden del polinomio seleccionado para la georeferenciación

Después de establecer estos parámetros se comienza a realizar el proceso en sí de la georeferenciación. Como se mencionó anteriormente la georeferenciación es la asignación de coordenadas de un mapa a una imagen, en nuestro caso a la imagen 001/054. En el proceso de georeferenciación se

utilizaron 12 puntos de control (Figura No 40) distribuidos uniformemente en la imagen, en puntos donde se pudiesen identificar en el mapa de referencia como por ejemplo confluencias de ríos e intersecciones de ríos con carreteras entre otros.

La resolución espacial que posee la imagen Landsat 7 es de 30 m, por esta razón el obtener un error menor, igual ó cercano a esta dimensión es un error bastante aceptable teniéndose entonces como máximo error RMS (residual medium square) de 34,923 siendo este error aceptable (Figura 41)

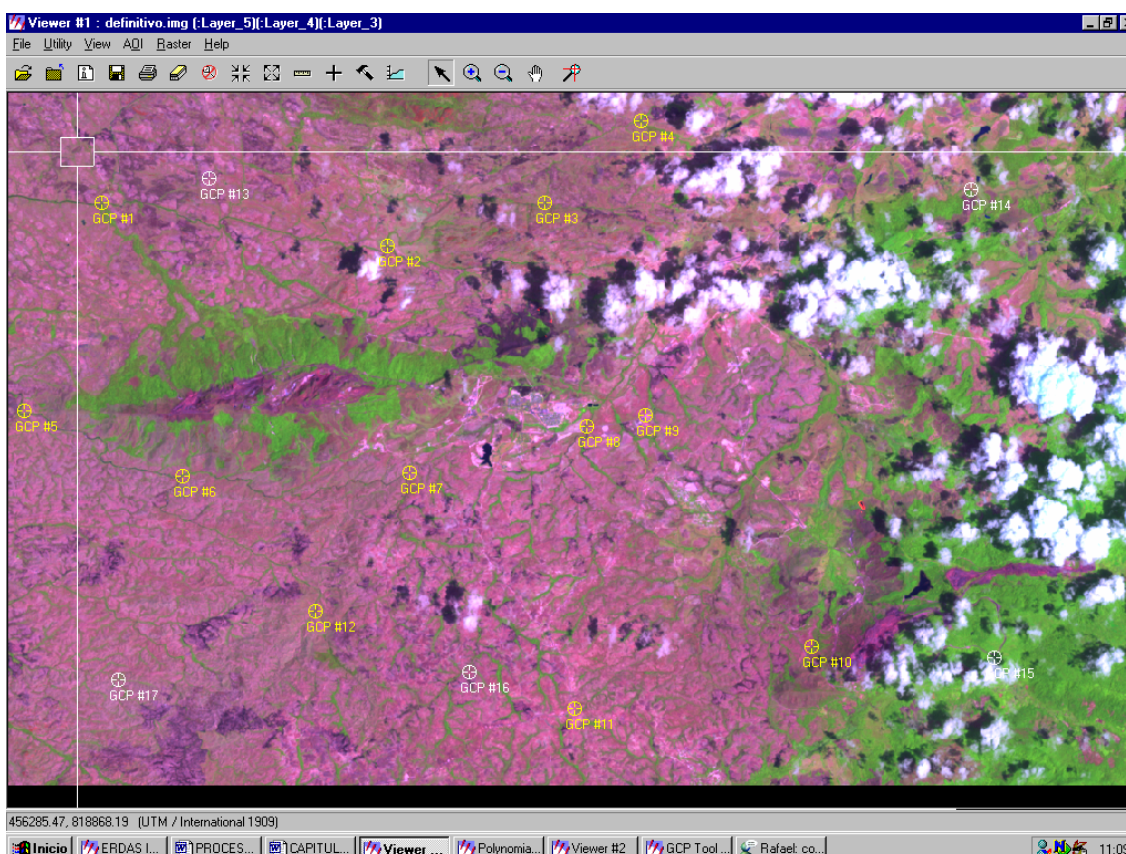


Fig. N° 40 Imagen Landsat 7 de la zona de estudio con los puntos de control en amarillo

ool : (Input : definitivo.img) (Reference : defini2ref.gcc)

Edit Help

</

Fig. N° 41 Resultados obtenidos en GCP Tool de los puntos de control, obsérvese que el mayor RMS error estuvo en el punto 4 siendo aceptable.

Cuando se ha completado la etapa de seleccionar los puntos de control y chequeo, se pasa a la fase final de la georeferenciación que es la Transferencia de los Niveles Digitales a la posición corregida final o también llamado método de remuestreo de imagen (Ver Figuras No.42 y 43). El algoritmo utilizado para esta transferencia fue el del vecino más cercano (Nearest Neighbor), ya que este algoritmo proporciona una solución más rápida a la hora del cálculo matemático y supone menor transformación de los Niveles Digitales originales. En la figura 44 se puede apreciar el resultado de la Georeferenciación. Al finalizar la georeferenciación se corrobora la precisión de la misma solapando y comparando sobre la imagen, los mapas de la zona georeferenciados.

En vista que la imagen Landsat 7 posee una mejor resolución espacial que sus antecesores, se quiso comprobar tal ventaja usándola con su georeferenciación original, obteniendo entonces resultados favorables. Se utilizó la cartografía de la zona para realizar dicha prueba coincidiendo 100 % el solapamiento de ambas.

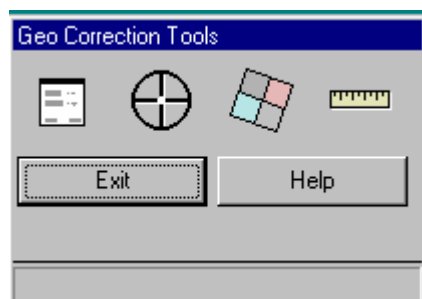


Fig. N° 42 Dialogo en donde se selecciona la operación para la aplicación del algoritmo de remuestreo de la imagen, siendo el segundo icono de derecha a izquierda el de la función utilizada.

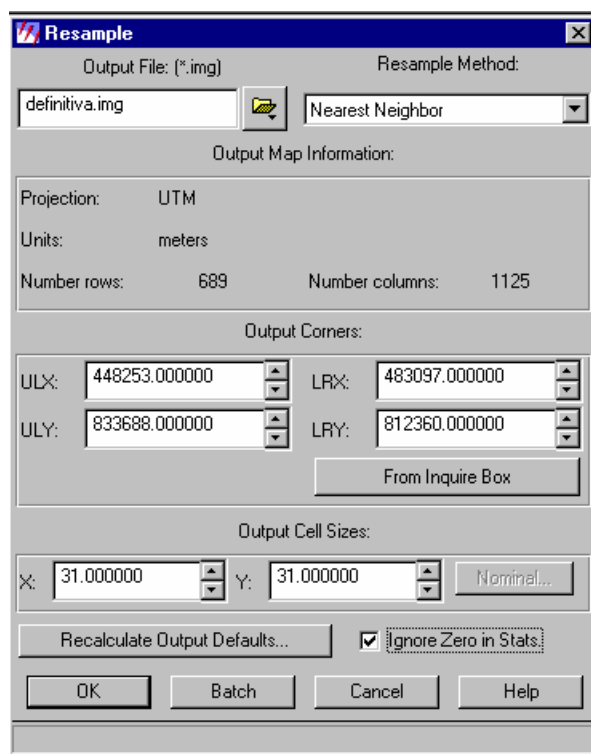


Fig. N° 43 Ventana donde se aplican los algoritmos de remuestreo (Resample), seleccionando el método del vecino más cercano (Nearest Neighbor)

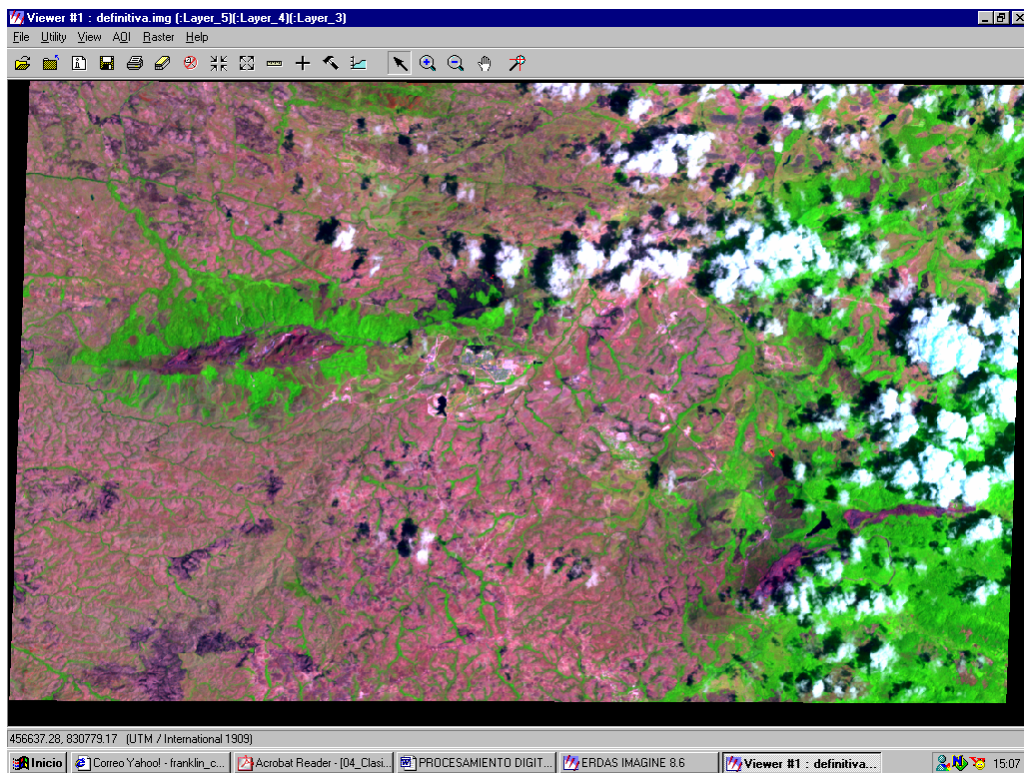


Fig. N° 44 Imagen Landsat 7 Georeferenciada

3) Despliegue de imágenes:

a) Combinación de bandas:

Este procedimiento consistió en realizar diferentes combinaciones de bandas de la imagen hasta conseguir las que realzaban más la zona de interés con respecto a sus adyacencias, consiguiéndose así las combinaciones 5-4-2 y la 6-5-3 como las mas apropiadas para contrastar el cerro Bolívar y el cuadrilátero San Isidro. Esto permitió resaltar los suelos con alto contenido de minerales ferrosos, óxidos de hierro y minerales arcillosos.

b) Imagen Infrarrojo termal:

Esta banda se selecciona en el momento de abrir un archivo de extensión .img, colocando en la opción Display as: Gray Scale como se muestra en la figura No 45, allí se puede desplegar cualquier banda por separado para su análisis individual.

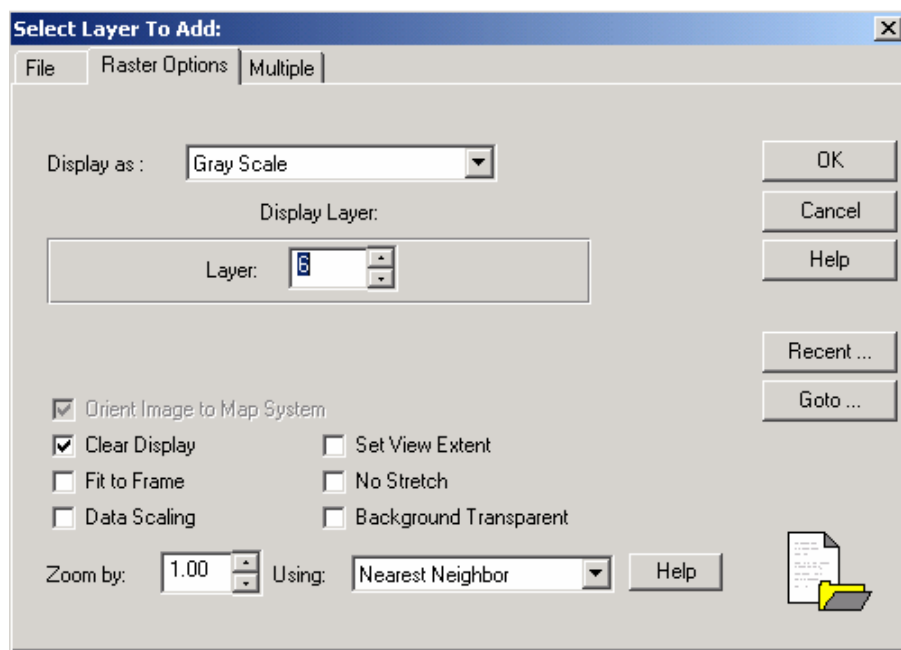


Fig. N° 45 Despliegue de imagen con solamente la banda 6 (infrarroja termal)

4) Mejoramiento espacial:

Con este procedimiento se busca mejorar la resolución visual de la imagen obtenida. Para ello se utiliza del menú Interpreter la opción Spatial enhancement que sirve para realizar mejoramiento espacial a la imagen, de tal manera que se pueda obtener una imagen de la zona de interés con una mejor calidad visual, para así realizar más fácilmente la interpretación visual (Figura N° 46) para después seleccionar la función de Resolution merge (Figura N° 47) que es la operación que fusiona la imagen multispectral con la pancromática. Con este

proceso se logra la fusión de la imagen pancromática con la multiespectral (Figura N° 48). Esto permite mejorar la visualización de la imagen hasta una escala máxima de 1:25.000 ya que a una escala de mayor detalle se pierde la resolución. Por otra parte, se utilizaron diversos filtros para generar una mejor imagen multiespectral. Los filtros utilizados fueron:

- Convolución – 5x5 Edge enhance.
- Sharpen



Fig. N° 46 Menú Image Interpreter para seleccionar la función de Spatial Enhancement

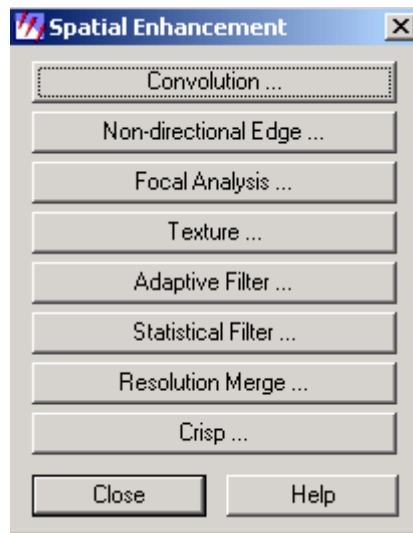


Fig. Nº 47 Menú Spatial Enhancement donde está la función Resolution Merge para fusionar imágenes

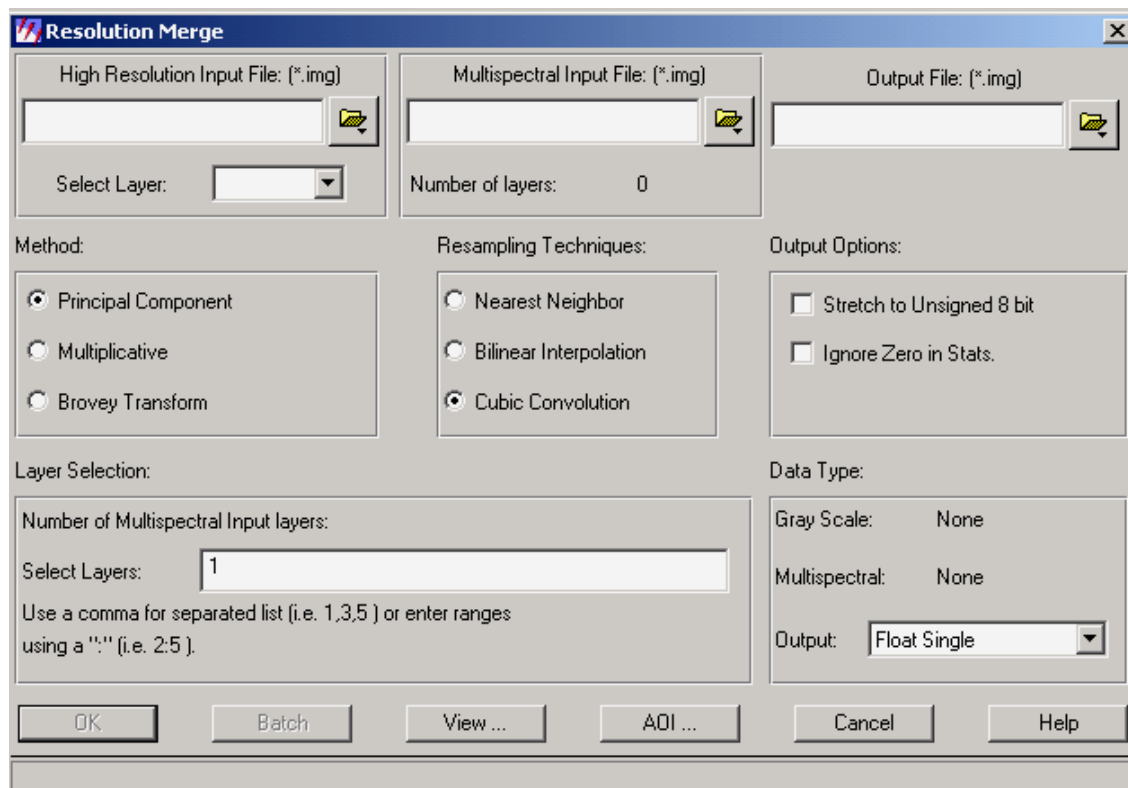


Fig. Nº 48 Fase final para la fusión de imágenes con la función Resolution Merge

Para el mejoramiento visual también se utilizaron funciones de mejoramiento de brillo y contraste del software.

5) Mejoramiento espectral:

En el mejoramiento espectral se utilizaron los algoritmos de cocientes de bandas. Estos algoritmos permiten obtener imágenes que permiten discriminar la mineralogía de la zona. En el software ERDAS se realizaron los cocientes de bandas con la función Índice de Spectral Enhancement. Esta función permite seleccionar los cocientes de bandas con los cuales se desea distinguir los minerales de interés presentes en superficie. Los algoritmos seleccionados fueron:

- La banda 3/ banda 1 para los óxidos de hierro
- La banda 5/ banda 7 para los minerales arcillosos
- La banda 5/ banda 4 para los minerales ferrosos
- La banda 5/ banda 7 (canal rojo), banda 5/ banda 4 (canal verde), banda 3/ banda 1 (canal azul) para la composición mineral.

6) Clasificación no supervisada:

Para realizar esta operación se elige del menú principal la opción Classifier, de donde se selecciona la función Unsupervised classifier (Clasificación no supervisada). En este proceso se utilizó el algoritmo ISODATA, usando 20 firmas espectrales en toda la imagen y desplegándola en pseudo color. Se decidió hacer este tipo de clasificación no supervisada por la facilidad de trabajar con muchas firmas espectrales, mientras que la clasificación supervisada es ideal para zonas de pocas firmas espectrales.

7) Elaboración de gráficos de perfiles espectrales:

Se realizaron gráficos de perfiles espectrales (niveles digitales del píxel vs. bandas multiespectrales) para comparar varias firmas espectrales de interés, así como también gráficos de perfiles de valores de píxel vs. distancia, para visualizar y analizar mejor las zonas de interés en cuanto a sus valores de píxeles espacialmente. Los pasos utilizados para poder generar los mencionados gráficos se describen a continuación:

- 1) Del menú Viewer se selecciona el icono que permite generar los gráficos de perfiles espectrales.
- 2) Luego se selecciona de la ventana desplegada la opción Spectral profile.
Después se selecciona el icono que permite seleccionar los puntos de la imagen desplegada, donde se generaran los perfiles espectrales.

Después de haber culminado el procesamiento digital de la imagen se pasa a la fase de interpretación visual en donde se utilizaron mapas de afloramientos geológicos suministrados por CVG-Ferrominera para la zona del Cuadrilátero San Isidro y se utilizaron mapas geológicos para el Cerro Bolívar de Liddicoat, W. 1960 publicado en el 3º Congreso Geológico de Venezuela.

8) Elaboración del modelo digital de elevaciones:

Se realizó un modelo digital de elevaciones con el módulo de *ERDAS IMAGINE 8.6 - VIRTUAL GIS*, en donde se fusiona la imagen multiespectral con una imagen de radar suministrada por la USGS. Este modelo permitió tener una mejor perspectiva de toda la zona de estudio en tres dimensiones.

CAPITULO VIII

RESULTADOS Y ANALISIS

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo, se describen a continuación los resultados y el análisis de estos, en la identificación mineralógica de la zona del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro.

Combinación de bandas multiespectrales 5-4-2 (rojo-verde-azul)

Al efectuar un análisis visual con las diferentes bandas del sensor ETM+ se observa que los minerales ferrosos y los óxido-ferrosos se discriminan con mayor nitidez en la combinación de bandas del infrarrojo medio e infrarrojo cercano (bandas 5-4) y del visible (banda 2) (Ver Figura No 49). Aquí se resaltan dichos suelos con tonalidades rojas y azules, destacándose en rojo las zonas de mena de alto tenor y en azul las de bajo tenor. Estos resultados concuerdan con el hecho de que las zonas en donde se observa el gran contraste son efectivamente el Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro, minas donde la concentración de materiales ferrosos es más alta que su entorno.

Cuando se desplegaron las imágenes multiespectrales a escala 1:25.000 ésta comenzó a distorsionarse, por lo cual se decidió remuestrear la imagen por el método de Convolución cúbica de un píxel de 30 m a un píxel de 15 m, consiguiéndose así resultados visuales bastantes favorables (ver figuras 49a-49b)



Fig. N° 49: Combinación de las bandas 5-4-2, donde se puede apreciar el realce de colores rojos en el Cerro Bolívar (esquina superior izquierda) y el Cuadrilátero San Isidro (esquina inferior derecha)
Escala 1:100.000

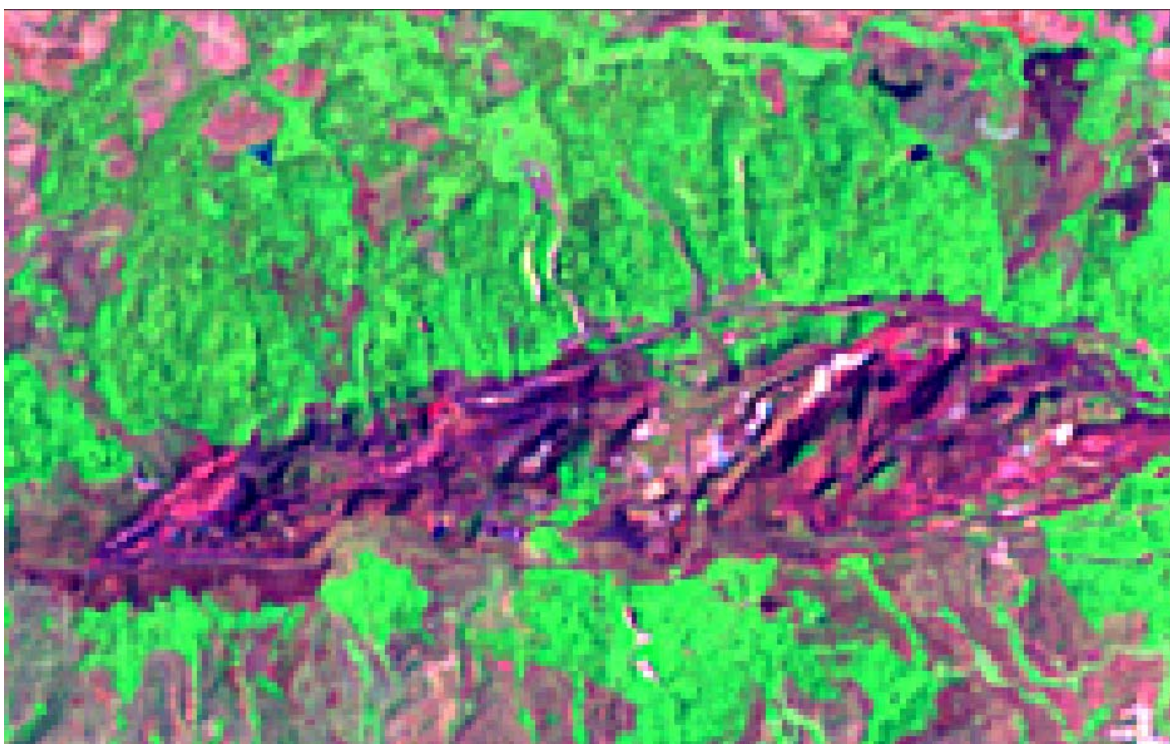


Fig. N° 49-a: Imagen multiespectral cerro Bolívar bandas 5-4-2.
Los tonos rojos  resaltan la mena de alto tenor, mientras los tonos azulados  y las tonalidades marrones  representan mena de bajo tenor y lateritas respectivamente. Escala 1:25.000

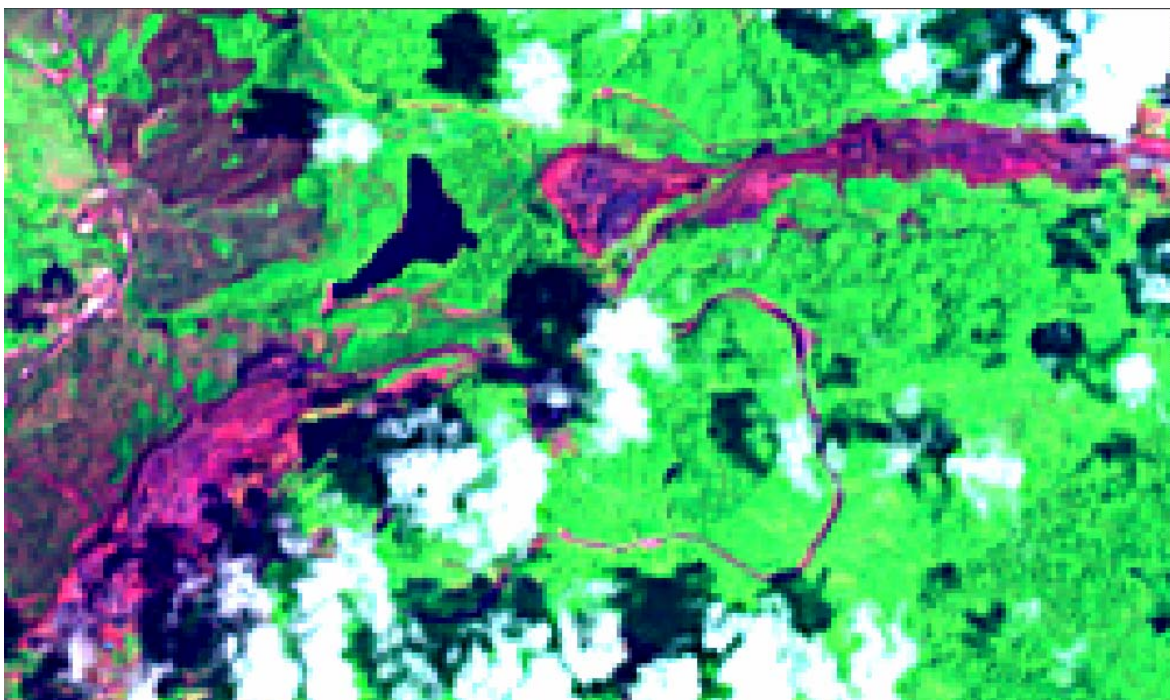


Fig. N° 49-b: Imagen multiespectral Cuadrilátero San Isidro bandas 5-4-2.
Aquí también se pueden apreciar como los tonos rojos del Cerro San Isidro (inferior izquierda) y Las Pailas- Los Barrancos (derecha superior) resaltan las zonas de mena de alto tenor, mientras que los tonos azulados resaltan la mena de bajo tenor. Escala 1:25.000

Combinación de bandas 5-4-2 imagen fusionada multiespectral-pancromática:

Para analizar visualmente mejor las zonas de interés se fusiona la imagen multiespectral con la pancromática (Fig. N° 50, 50a ,50b) obteniéndose así una mejor resolución espacial, observándose bien la heterogeneidad entre suelos, en la cual se puede diferenciar tanto en el Cerro Bolívar como en el cuadrilátero San Isidro, dos tonalidades bien diferenciadas: azul y roja, representando las zonas azuladas, mena de bajo tenor y las rojas, mena de alto tenor; logrando corroborarse este análisis con la ayuda de los respectivos mapas geológicos de las zonas de interés. Obsérvese como la fusión de las imágenes originó

tonalidades de colores un poco más oscuras que la multiespectral, pero a su vez una mejoría sustancial en la calidad de la imagen (Fig. N° 47a y 47b).

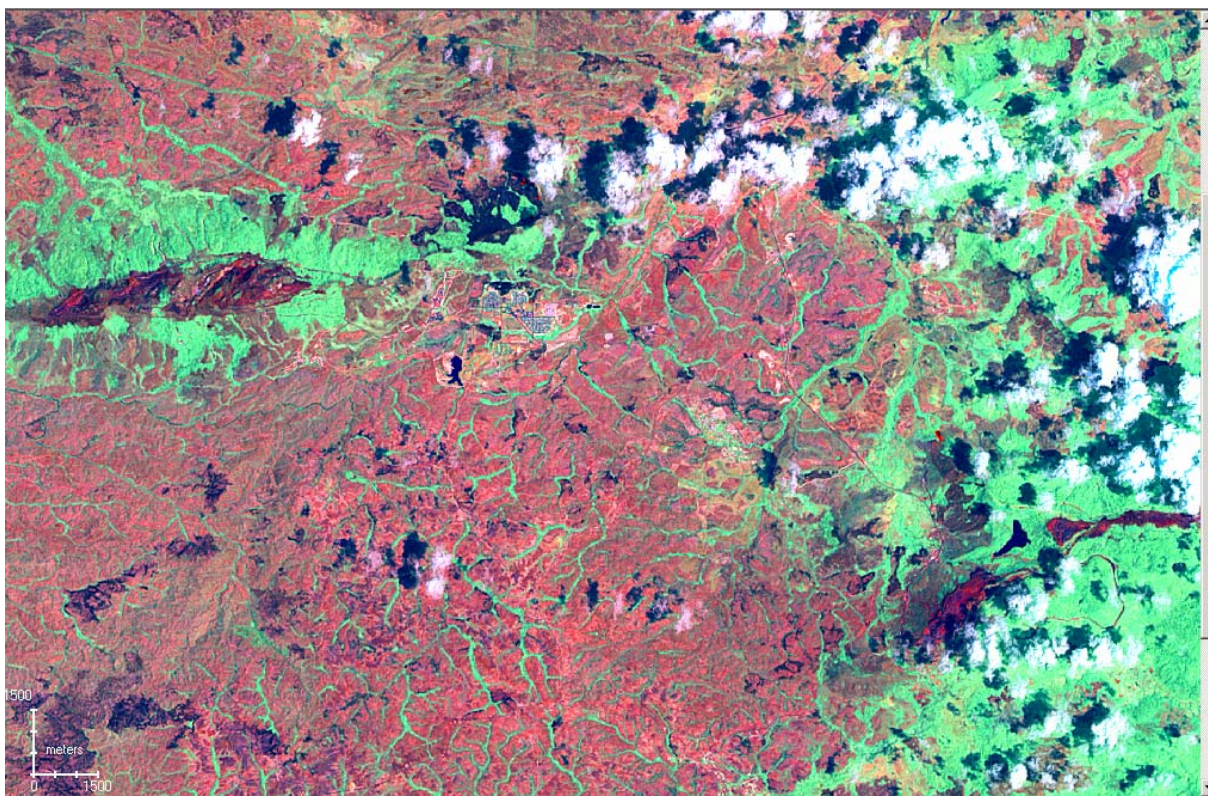


Fig. N° .50 Resultado de la fusión entre la imagen multiespectral y pancromática combinación de
bandas 5-4-2

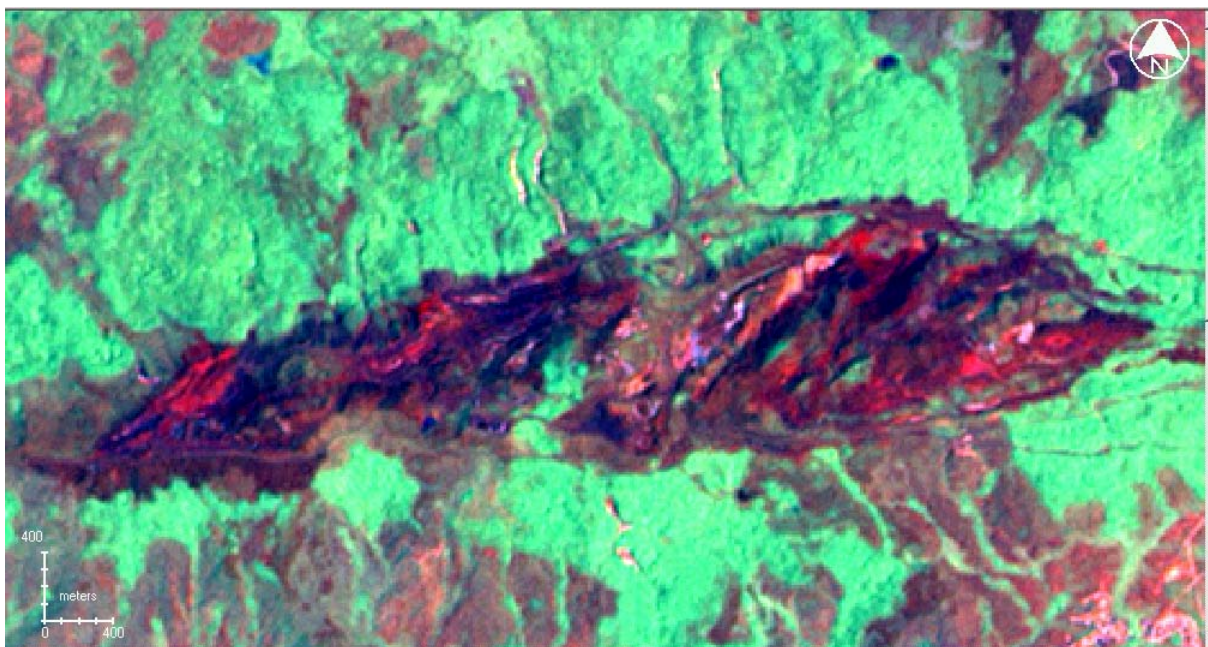


Fig. N° 50a Imagen del Cerro Bolívar combinación de bandas 5-4-2, resultado de la fusión de la imagen multispectral con la Pancromática, obteniéndose así una mejor resolución espacial.

Obsérvese como los tonos rojos  resaltan la mena de alto tenor, azul  bajo tenor y las tonalidades marrón  y rosado  del centro del Cerro Bolívar zonas de lateritas

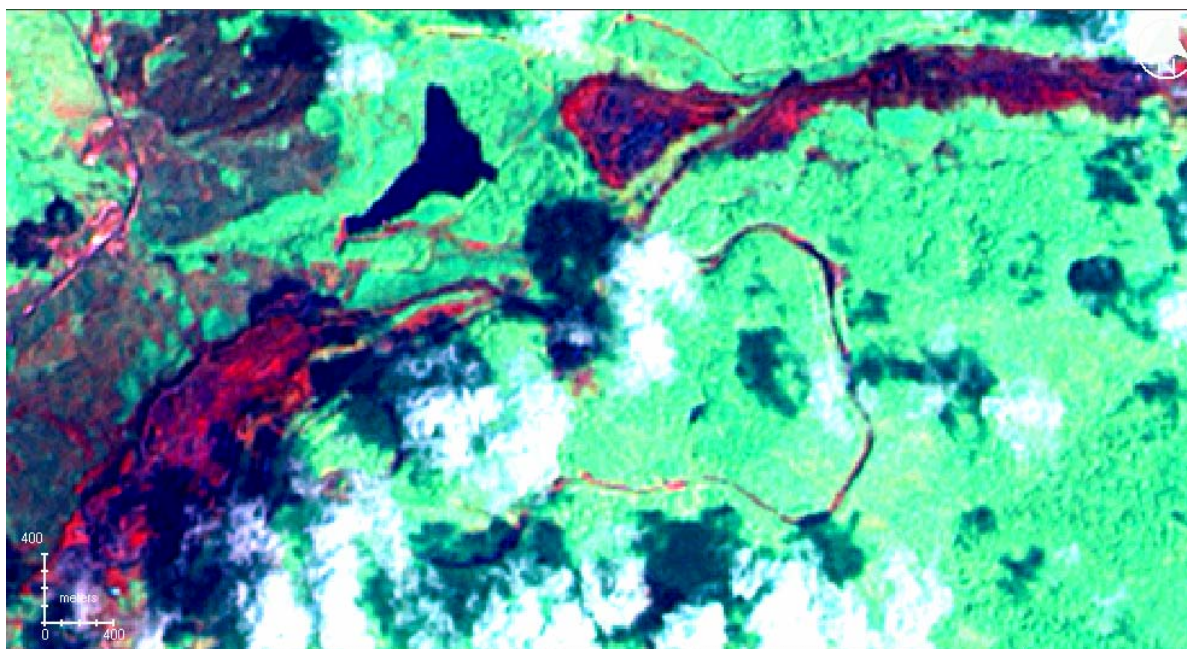


Figura No 50-b Cuadrilátero San Isidro.

Fusión de la imagen multispectral – pancromática, combinación de bandas 5-4-2.

Las zonas rojas  del Cerro San Isidro y Las Pailas- Los Barrancos resaltan las zonas de mena de alto tenor y las zonas azules  mena de bajo tenor.

Análisis cuantitativo de la imagen multiespectral sin fusionar y fusionada.

Al efectuarse el análisis del gráfico de las imágenes fusionada y no fusionada del Cerro Bolívar (figs. N° 51 y 52) se observa que la tendencia de las curvas en ambos perfiles es similar, lo cual sugiere que la utilización de la imagen fusionada no altera significativamente los valores digitales de los píxeles; siendo esto una ventaja debido a su alta resolución visual. En virtud de este resultado no se realizaron análisis adicionales de imágenes multiespectrales sin fusionar para las zonas de estudio. Por otra parte en la banda 5, se puede apreciar la diferencia entre los niveles digitales correspondientes a cada elemento de la superficie (menas, lateritas, vegetación, etc.). Esto valida la combinación de bandas utilizadas para la discriminación de los minerales ferrosos y otros elementos circundantes en la zona de interés.

Al analizar el gráfico de perfil espectral de la imagen fusionada (Fig. N° 51) podemos observar como las bandas 6 y 7 (infrarrojo termal 6a y 6b) son las que mejor hacen resaltar las clases consideradas (lateritas, menas, etc.) a excepción de la clase “suelos desnudos fuera del Cerro Bolívar” que presenta en el gráfico sin fusionar (Fig. N° 51) valores más altos en la banda 5 que en la banda 6. Esto significa que en la utilización de la imagen sin fusionar se obtienen realces más altos en la banda 5 que en la 6.

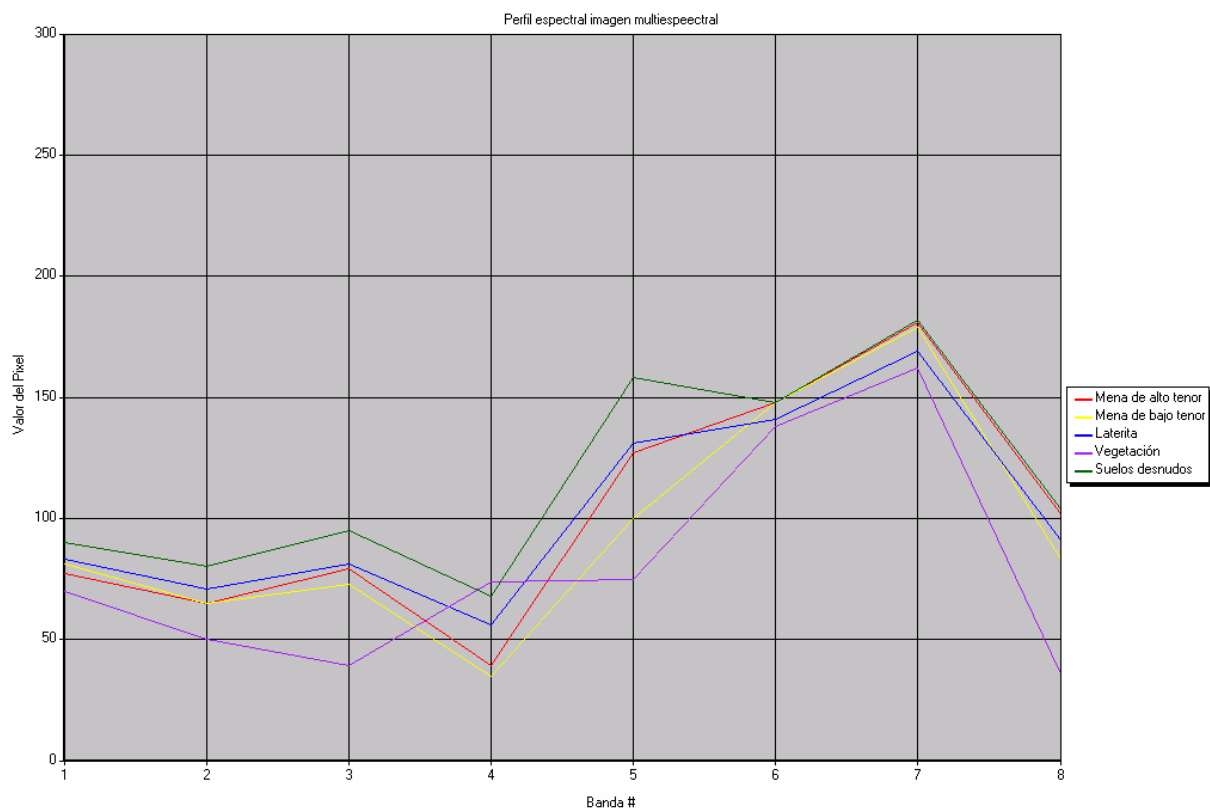


Fig. N° 51 Perfil espectral imagen no fusionada Cerro Bolívar

Tabla N° 3 Valores máximos y mínimos de los ND de los píxeles de imagen no fusionada Cerro Bolívar

	Banda 1 Mx Mn	Banda 2 Mx Mn	Banda 3 Mx Mn	Banda 4 Mx Mn	Banda 5 Mx Mn	Banda 6/7 Mx Mn	Banda 8 Mx Mn
Mena alto tenor	80 76	69 64	87 76	43 37	140 121	151 148 186 181	117 95
Mena Bajo tenor	84 76	70 58	84 65	43 34	104 82	149 147 181 178	88 69
Laterita	83 79	71 66	81 69	60 53	131 116	145 141 174 169	93 74
Vegetación	71 69	51 49	40 38	81 73	79 70	138 138 163 162	38 31
Suelos desnudos fuera del Cerro Bolívar	94 89	82 76	95 89	70 66	158 141	148 145 182 177	104 87

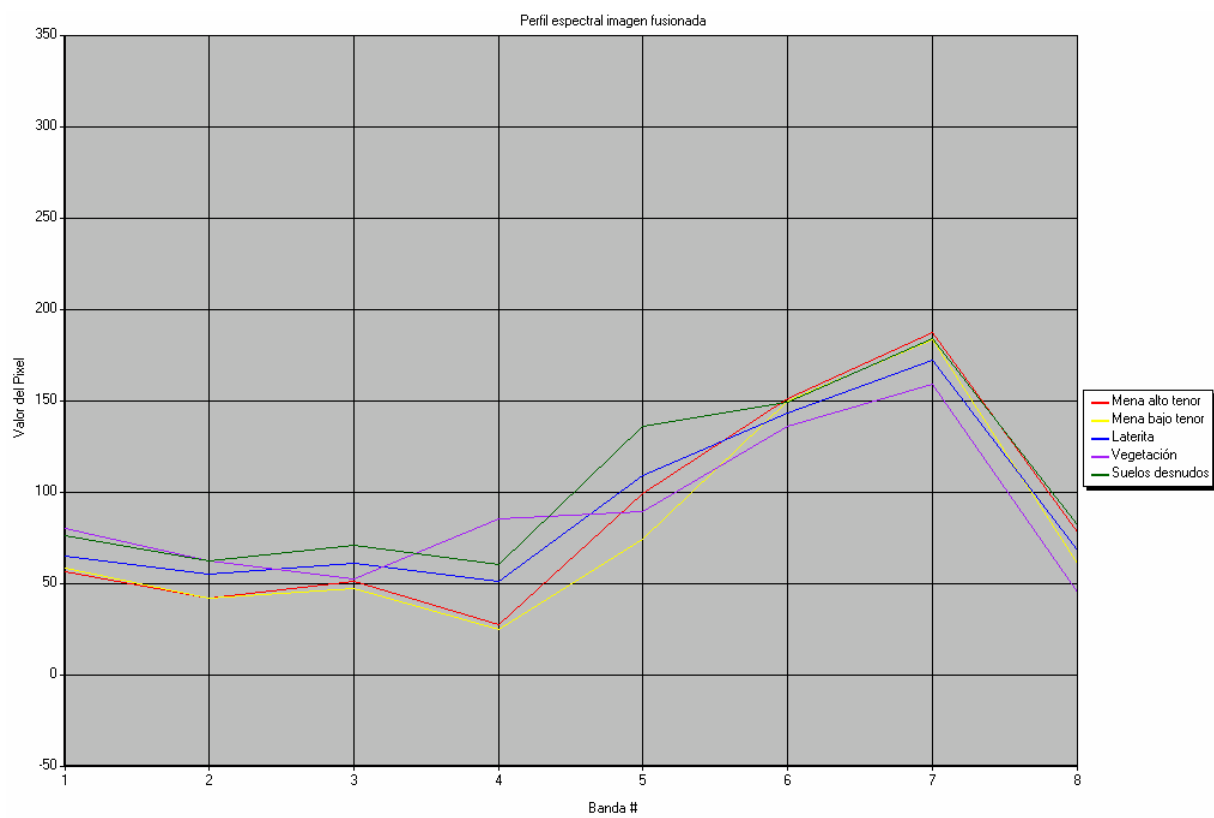


Fig. N° 52 Perfil espectral Cerro Bolívar imagen fusionada

Tabla N° 4 Valores de gráfico imagen fusionada del Cerro Bolívar
Mostrando los valores máximos y mínimos de los ND de los píxeles

	Banda 1 Mx Mn	Banda 2 Mx Mn	Banda 3 Mx Mn	Banda 4 Mx Mn	Banda 5 Mx Mn	Banda 6/7 Mx Mn	Banda 8 Mx Mn
Mena alto tenor	58 53	45 38	56 48	29 24	110 95	153 149 190 184	74 87
Mena Bajo tenor	58 62	45 41	52 45	27 25	82 68	150 149 183 181	68 57
Laterita	60 72	60 49	69 53	53 48	119 103	144 142 173 171	80 65
Vegetación	85 79	67 72	58 51	87 81	92 86	137 136 160 158	48 44
Suelos desnudos fuera del Cerro Bolívar	78 71	64 57	74 64	62 58	138 130	150 149 185 182	86 77

Combinación de bandas 6-5-3 imagen fusionada multiespectral-pancromática:

Al utilizar la combinación de bandas 6-5-3 (infrarrojo termal a – infrarrojo medio – visible) en la imagen fusionada se obtuvieron también resultados satisfactorios (Figura N° 53), pudiéndose observar cómo el realce de colores es más notable, obteniéndose a su vez una mejor resolución espacial. Al analizar la Figura N° 53a se puede observar como los tonos amarillos son los que resaltan las

zonas de mena de alto tenor; mientras que la zona de mena de bajo tenor es destacada por tonalidades rojas. En el caso de las lateritas, estas se destacan por el color marrón y blanco.

En la imagen del Cuadrilátero San Isidro (Figura N° 53b) para la misma combinación de bandas utilizadas, se pudo observar un gran contraste entre la mena de alto tenor realzada por tonos amarillos y la mena de bajo tenor realzada por tonos rojos.

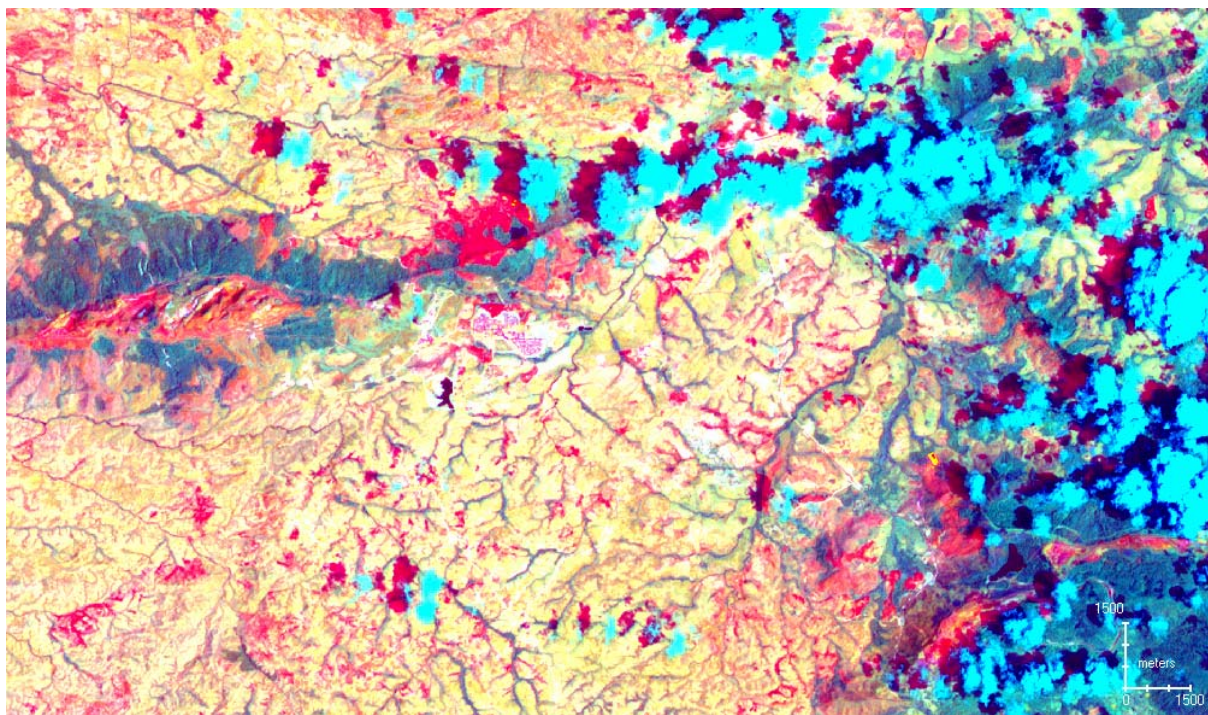


Fig. N° 53. Imagen fusión multiespectral- pancromática combinación de bandas 6-5-3
Escala 1:100.000

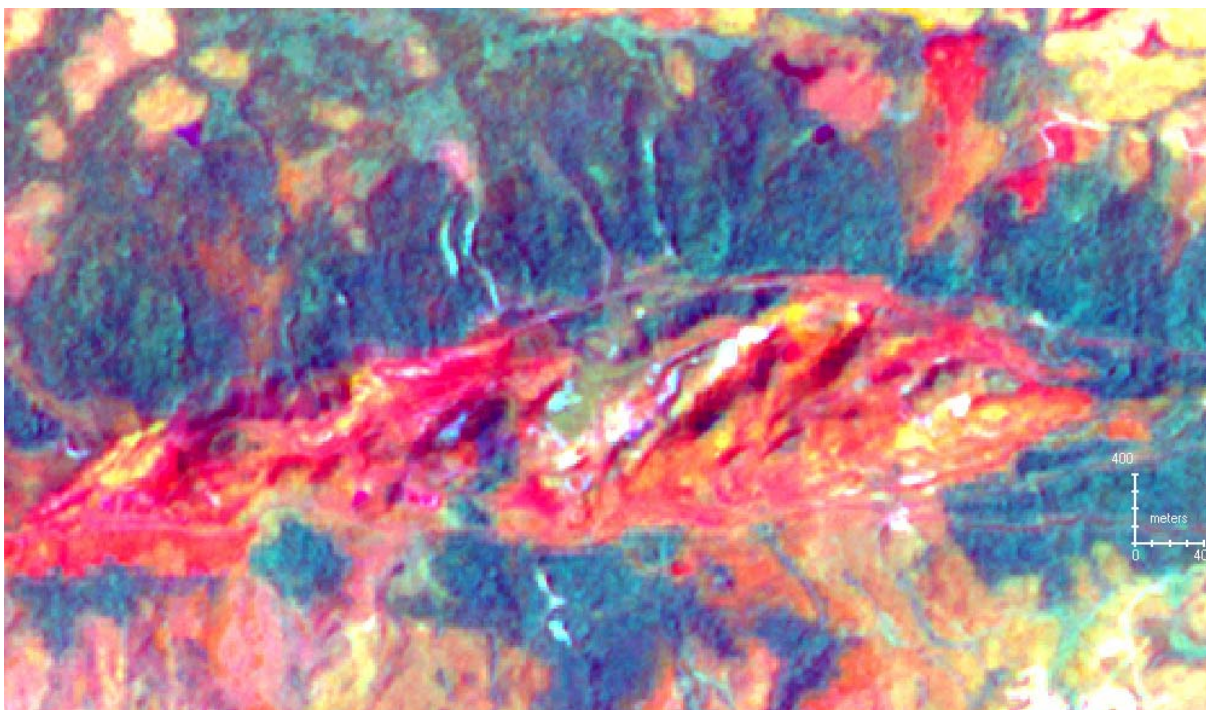


Fig. N° 53a Cerro Bolívar.

Fusión de imagen multiespectral – pancromática bandas 6-5-3.

Los colores amarillos  resaltan la mena de alto tenor, rojo  de bajo tenor y los colores marrones  del centro del cerro y blanco resaltan lateritas.

Escala 1:25.000

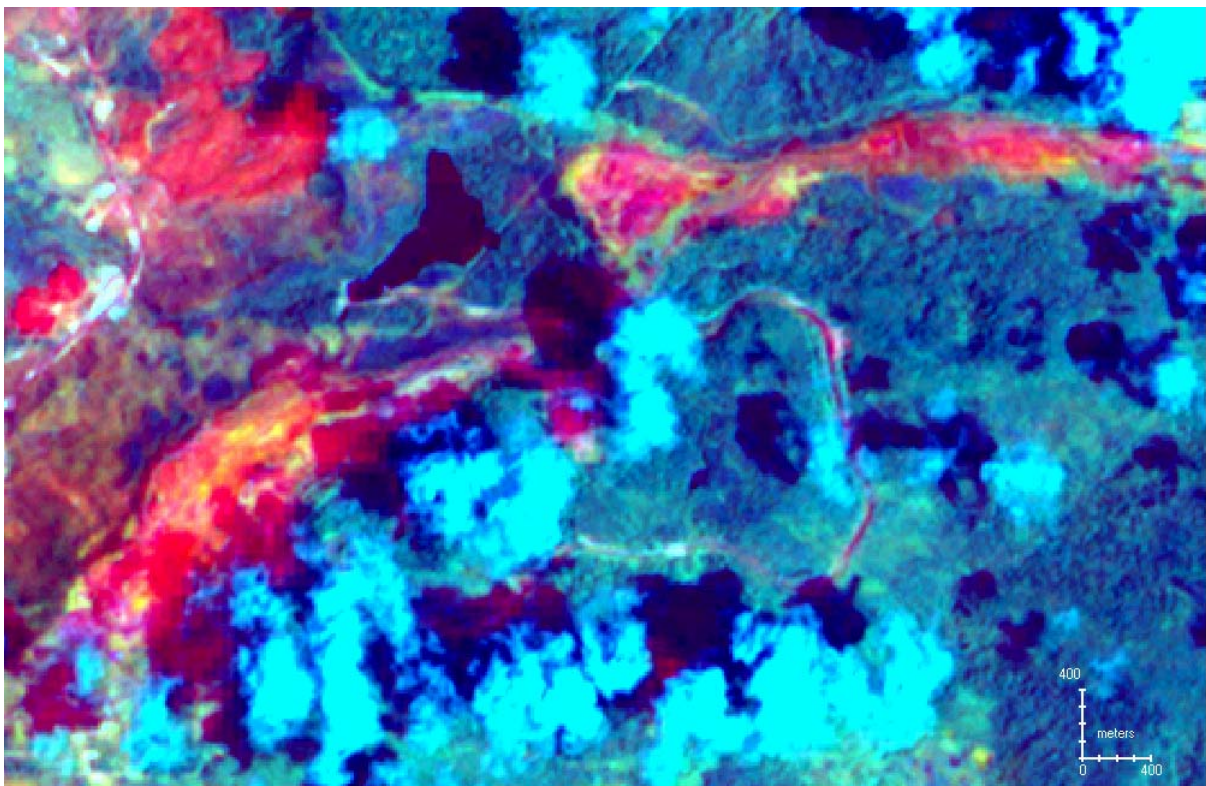


Fig. 53b Cuadrilátero San Isidro.

Fusión de imagen multiespectral – pancromática bandas 6-5-3.

En la imagen mostrada los colores amarillos  resaltan las zonas de mayor concentración de hierro (alto tenor) y los colores rojos  resaltan también la presencia de hierro pero con menor concentración (bajo tenor)

Imagen con banda termal 6a

En la banda seis del termal Landsat 7 ETM+ (Figuras.54, 54a y 54b) se puede apreciar la escena más simplificada. Las áreas más cálidas (mostradas en tonos más claros) están asociadas principalmente a suelos sumamente secos y con un alto contenido de minerales ferrosos. Estos últimos son cuerpos negros imperfectos que absorben la radiación solar y la re-emiten como radiadores fuertes. Las zonas con presencia de minerales arcillosos, lateritas y suelos húmedos son mostradas en tonos grises, lo cual implica que menor energía solar es absorbida por ellas, y por lo tanto presentan menor energía radiante. La

vegetación y cuerpos de agua son las zonas más frías de la imagen, visualizándose en tonos completamente negros.

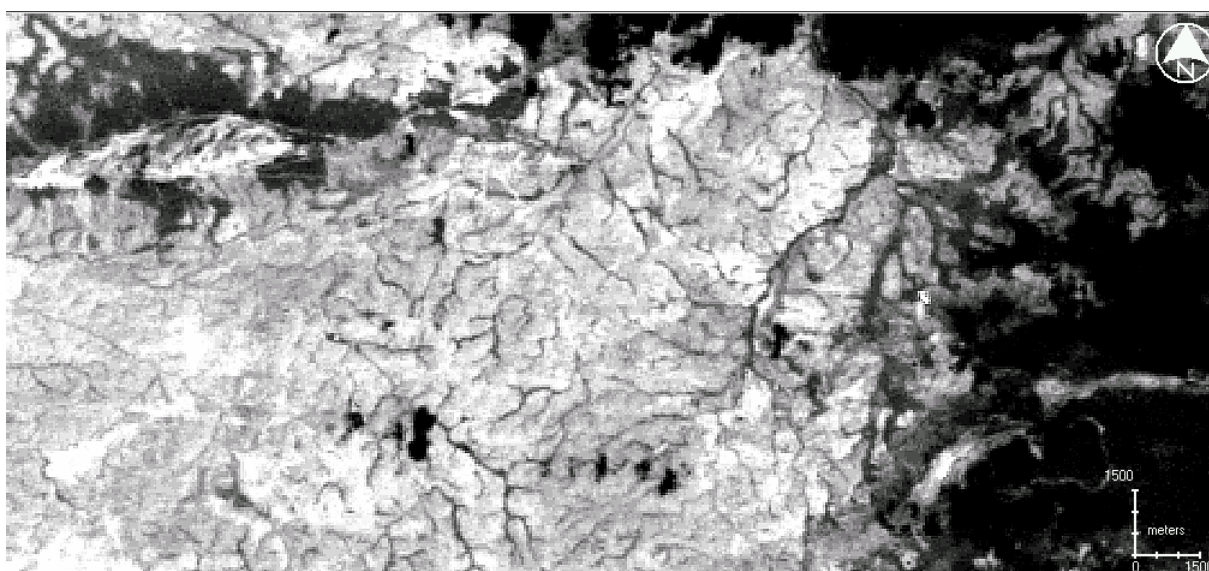


Fig. N° 54 Banda 6 del infrarrojo termal Landsat 7 ETM+ mostrando en tonos más claros las zonas de mayor irradiación térmica (calientes) y las zonas más oscuras de menor irradiancia térmica (frías)
Escala 1:100.000

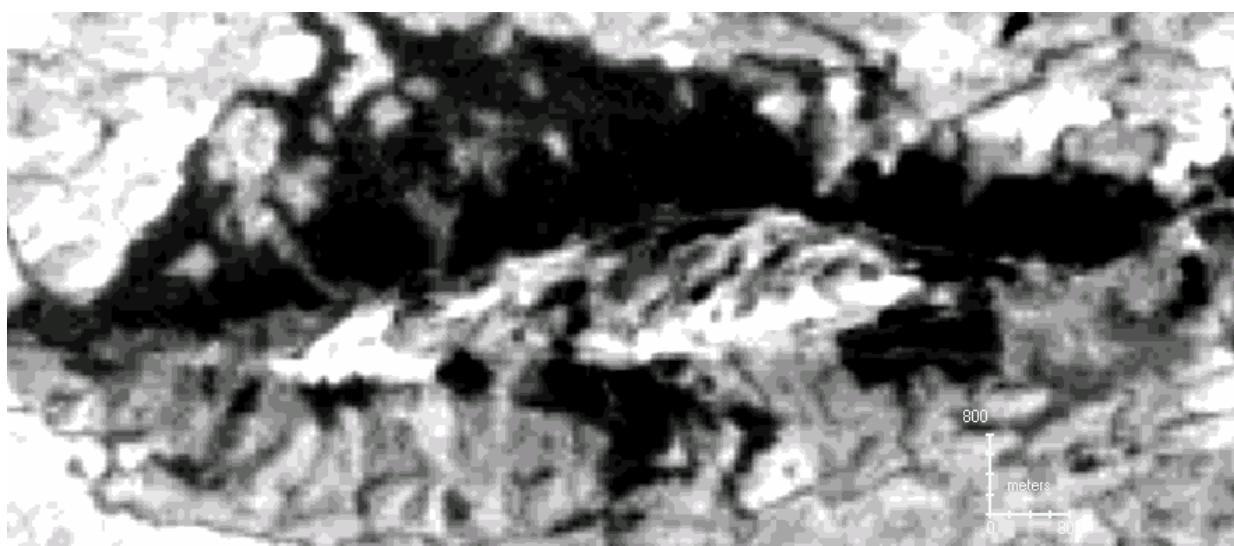


Fig. N° 54a Imagen del Cerro Bolívar banda 6 del infrarrojo termal, en donde se observan varias zonas del Cerro Bolívar con una alta irradiación térmica (zonas blancas) estando estas zonas asociadas a minerales ferrosos principalmente. Las zonas más oscuras de menor irradiancia térmica están asociadas principalmente a vegetación y los tonos grisáceos a zonas de lateritas y minerales arcillosos.

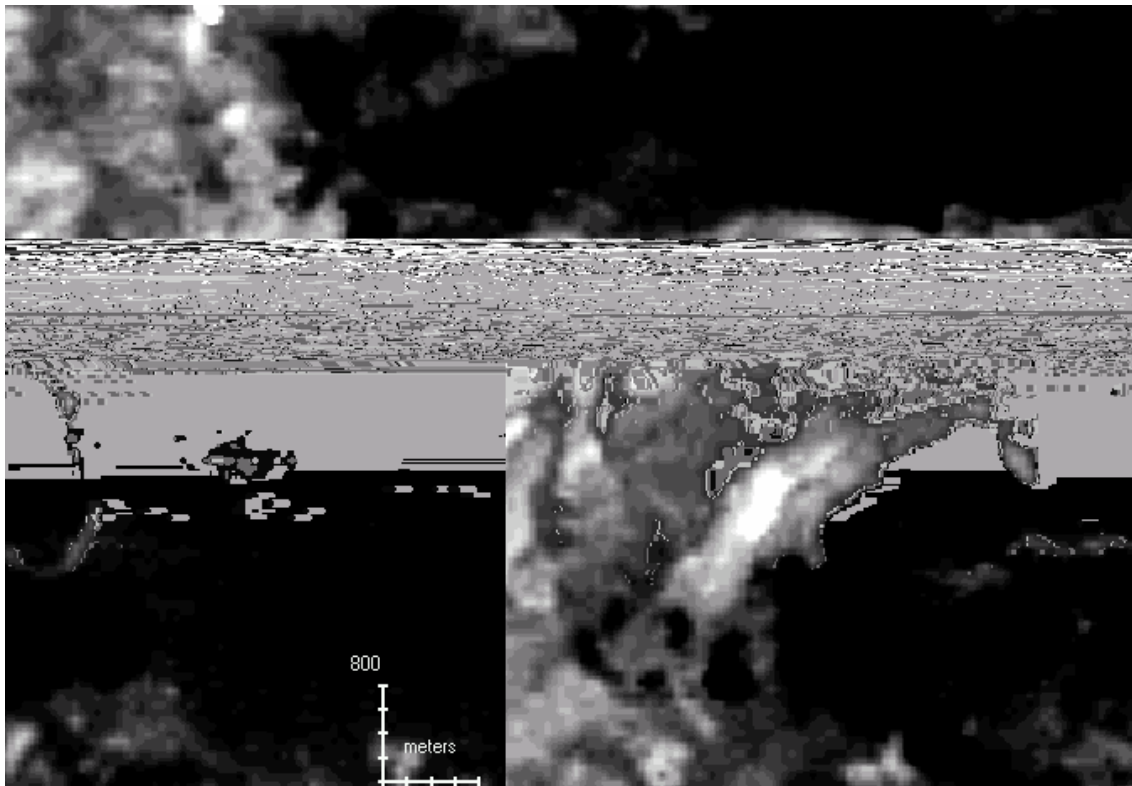


Fig. No. 54b Imagen del Cuadrilátero San Isidro banda 6 del infrarrojo termal.

Obsérvese como la zona de mayor irradiación térmica (zona blanca) coincide con la zona de mayor concentración de hierro del cerro San Isidro. El Cerro las Pailas y Los Barrancos (zona superior) poseen también zonas blancas indicando zonas de irradiación térmica altas y a su vez presencia de minerales ferrosos.

Las zonas oscuras representan la vegetación aledaña a las minas con una baja irradiación térmica.

Escala 1:50.000

Imágenes por cocientes de bandas

Otra forma de lograr una buena interpretación visual del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro ha sido la utilización de los algoritmos de cocientes de bandas para óxidos de hierro, minerales ferrosos y minerales arcillosos. El primer resultado mostrado es el de óxidos de hierro (Figuras 55, 55a y 55b), donde los tonos blancos resaltan la presencia de rocas con alto contenido de óxidos de hierro. Este resultado se comparó con las imágenes obtenidas por la combinación de bandas, donde se apreció que la mayoría de las zonas del Cerro Bolívar interpretadas como mena de alto tenor coincidieron con las zonas de altas

concentraciones de óxidos de hierro. Sin embargo, en el Cuadrilátero San Isidro no fue total la coincidencia, ya que en esta zona no se vislumbran altas concentraciones de óxidos de hierro (Figura 55b), zona donde existe alta concentración de la misma; pero en el Cerro Las Pailas-Los Barrancos si se presentó en la imagen alta concentración de óxidos de hierro, resultado que sí coincide con las imágenes anteriores y con los mapas de la zona.

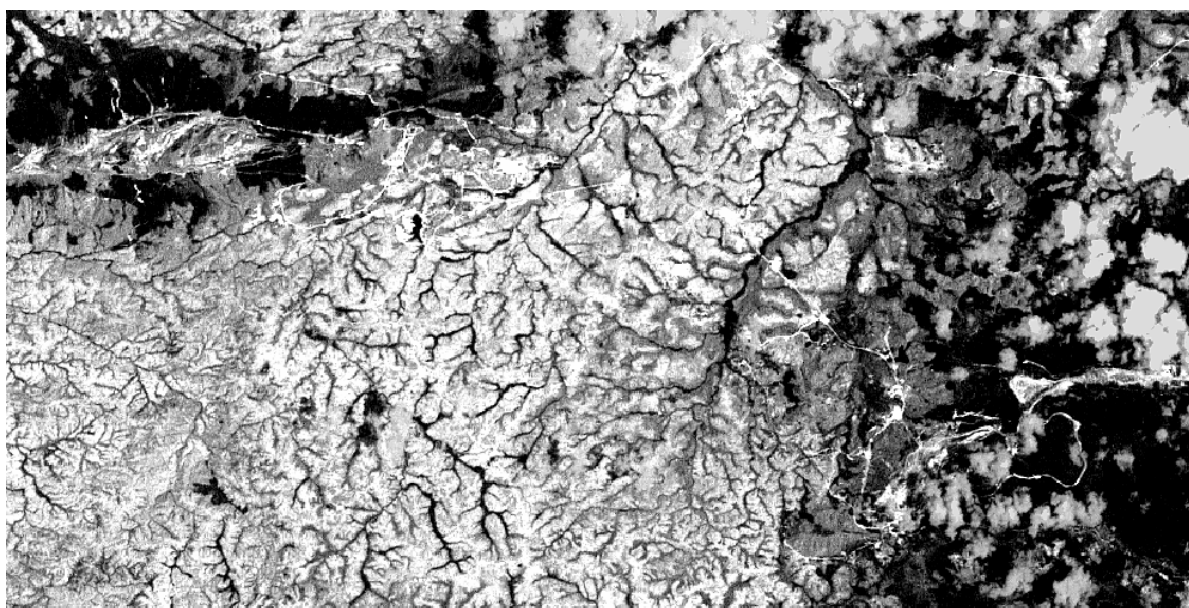


Fig. N° 55 Cocientes de bandas para resaltar óxidos de hierro (tonos más blancos)

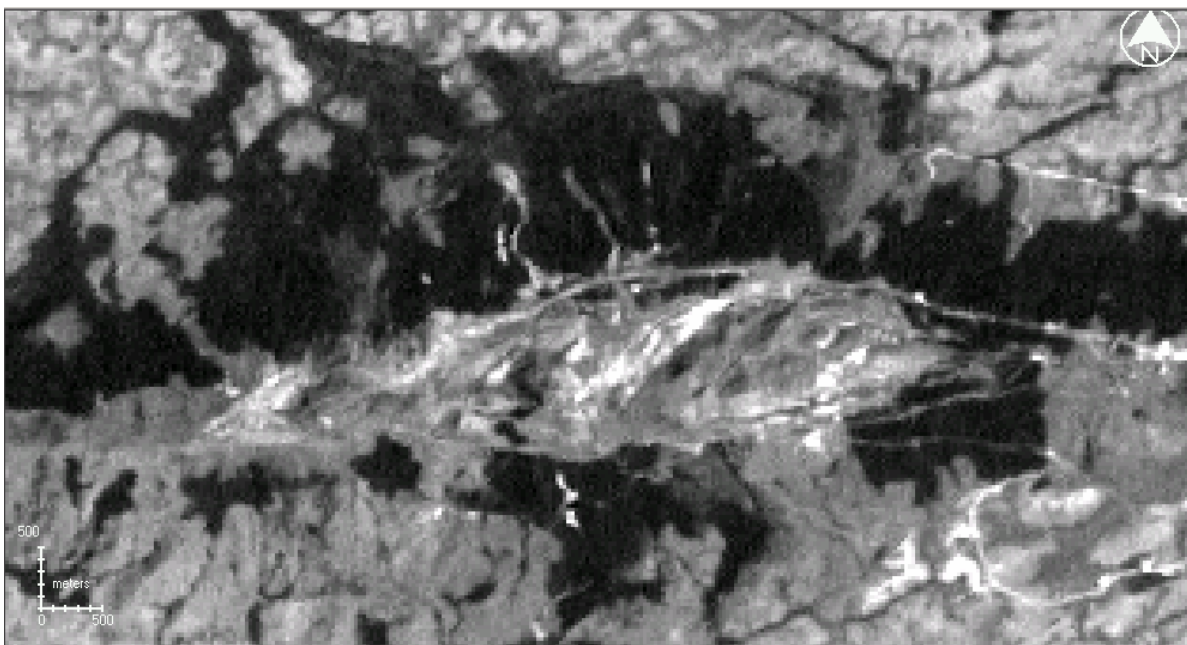


Fig. N° 55a Cociente de banda para resaltar óxidos de hierro del cerro Bolívar.
Los tonos más blancos indican concentraciones altas de óxidos de hierro

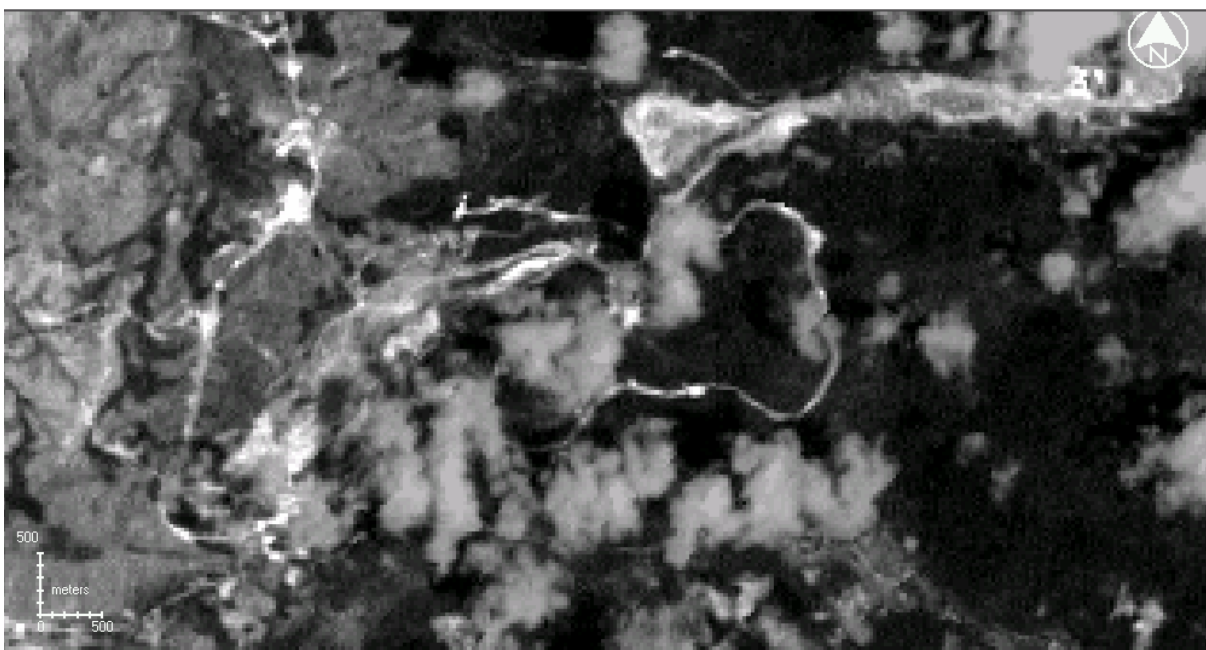


Fig. N° 55b Cociente de banda para resaltar óxidos de hierro resaltado en tonos blancos en el Cuadrilátero
San Isidro.

Los resultados obtenidos con los cocientes de bandas para la discriminación de minerales ferrosos fueron bastante satisfactorios (Figura N° 56), ya que la imagen resultante coincide perfectamente con las zonas de alta presencia de minerales ferrosos (Figura N° 55a, 55b) pero sin poder distinguirse la mena de alto tenor de la de bajo tenor.

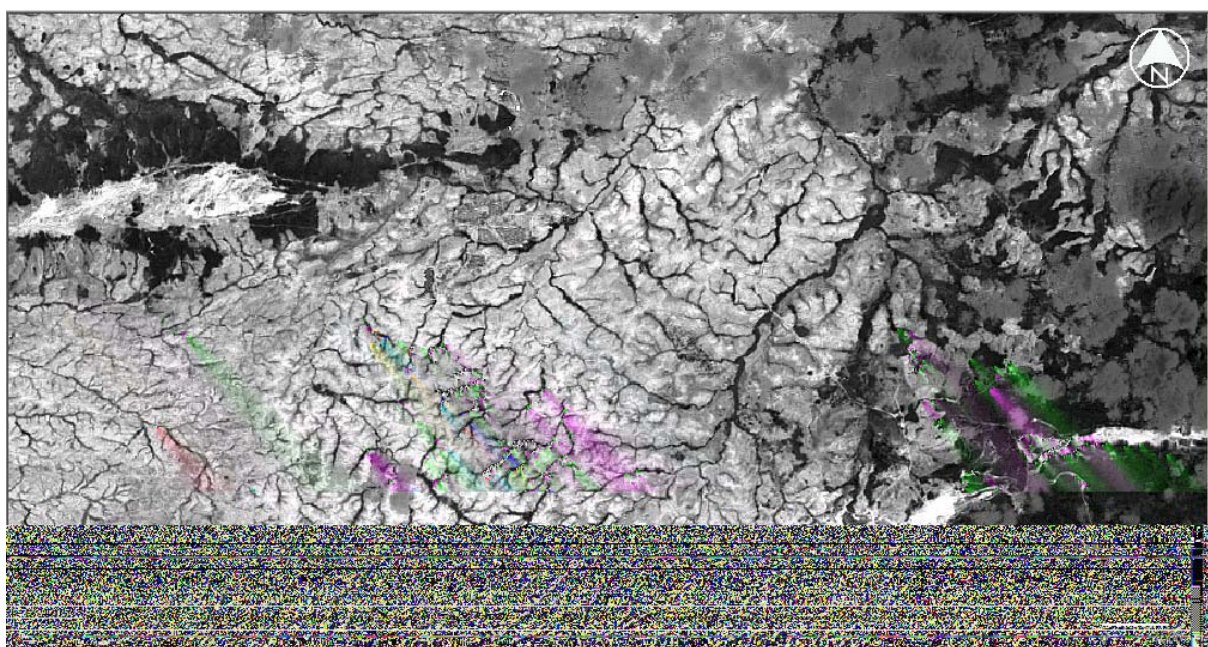


Fig. N° 56 Cocientes de bandas para resaltar minerales ferrosos (tonos más blancos)

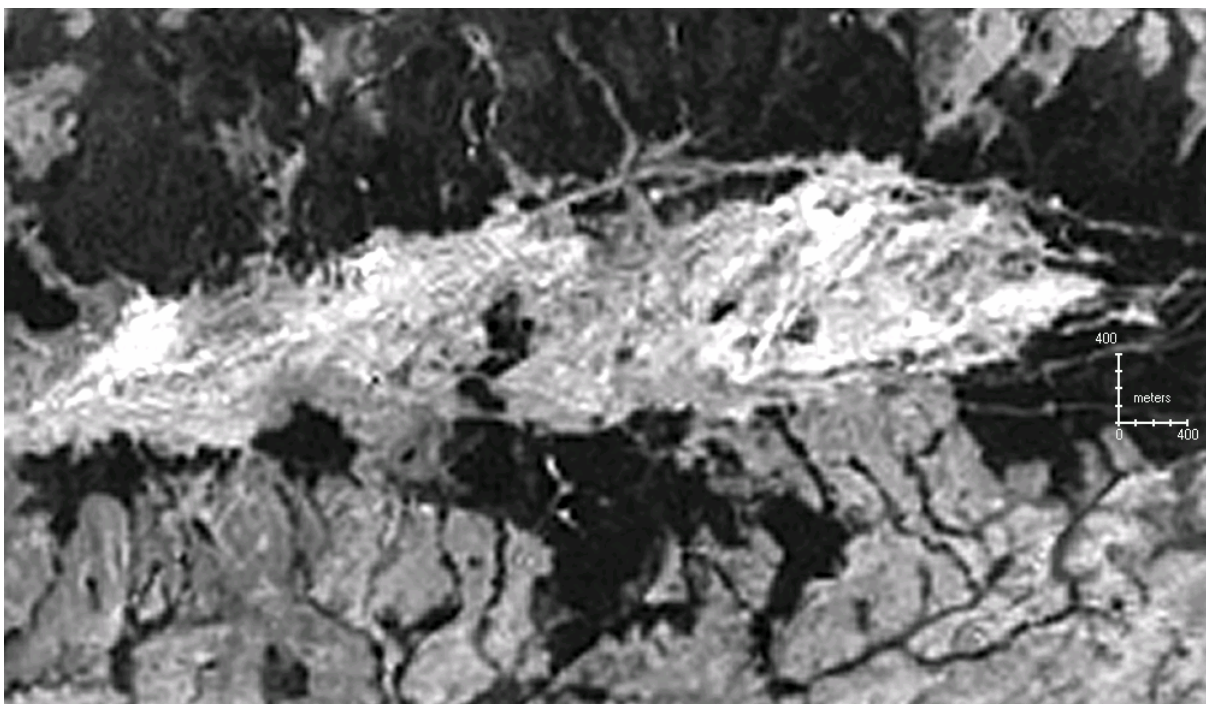


Fig. N° 56a Cociente de bandas para resaltar minerales ferrosos del Cerro Bolívar en donde los tonos blancos son las zonas de mayor concentración de minerales ferrosos.
Escala 1:25.000

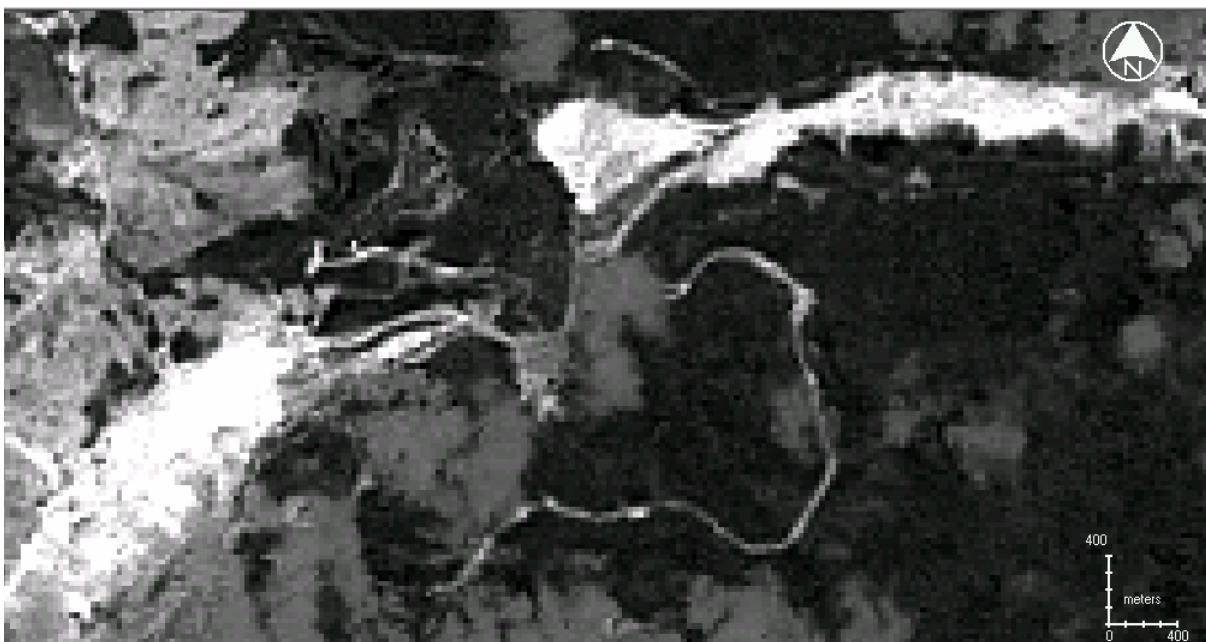


Fig. N° 56b Cociente de bandas para resaltar minerales ferrosos del Cuadrilátero San Isidro. Las zonas más blancas coinciden con el cerro San Isidro (inferior izquierda), las Pailas y el cerro los Barrancos (superior derecha) indicando así alta concentraciones de minerales ferrosos.

Al analizar las imágenes resultantes de los cocientes de bandas para minerales arcillosos se observó que las zonas del Cerro Bolívar donde se realizaron los minerales arcillosos coinciden con las zonas de lateritas (Figura 57a). Con respecto a los resultados obtenidos en el Cuadrilátero San Isidro se puede decir que las zonas realzadas como concentraciones de minerales arcillosos coinciden con las menas de alto tenor; presentando este algoritmo un error con en la discriminación de minerales arcillosos con respecto a óxidos de hierro.

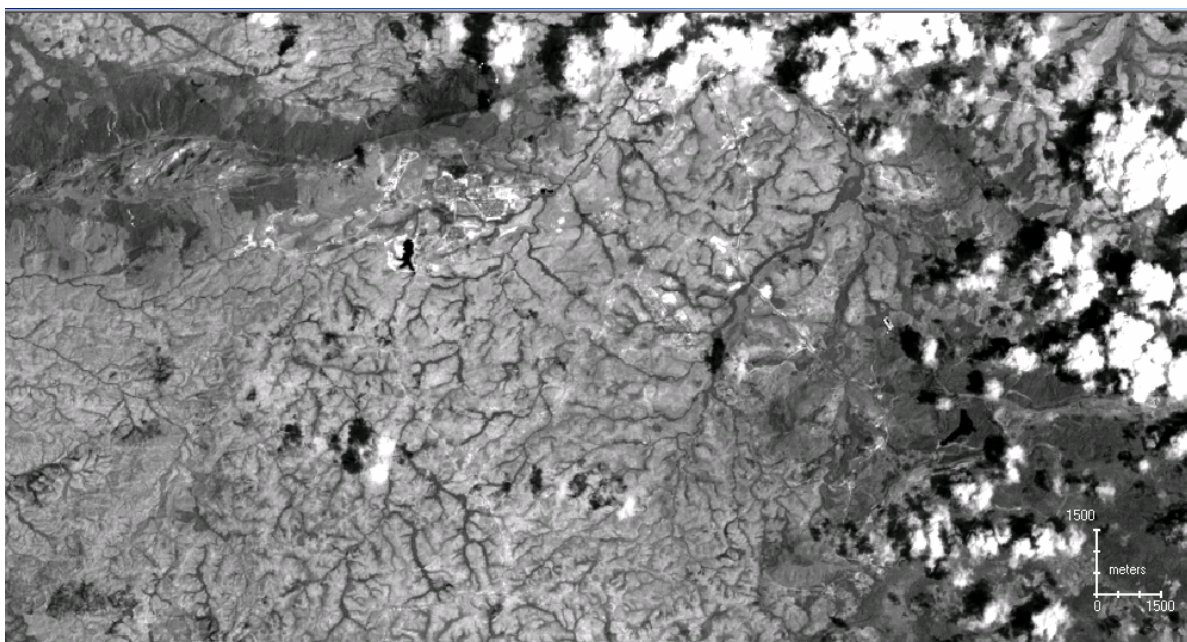


Fig. N° 57 Cociente de bandas para realce de minerales arcillosos (tonos blancos)
Escala 1:100.000

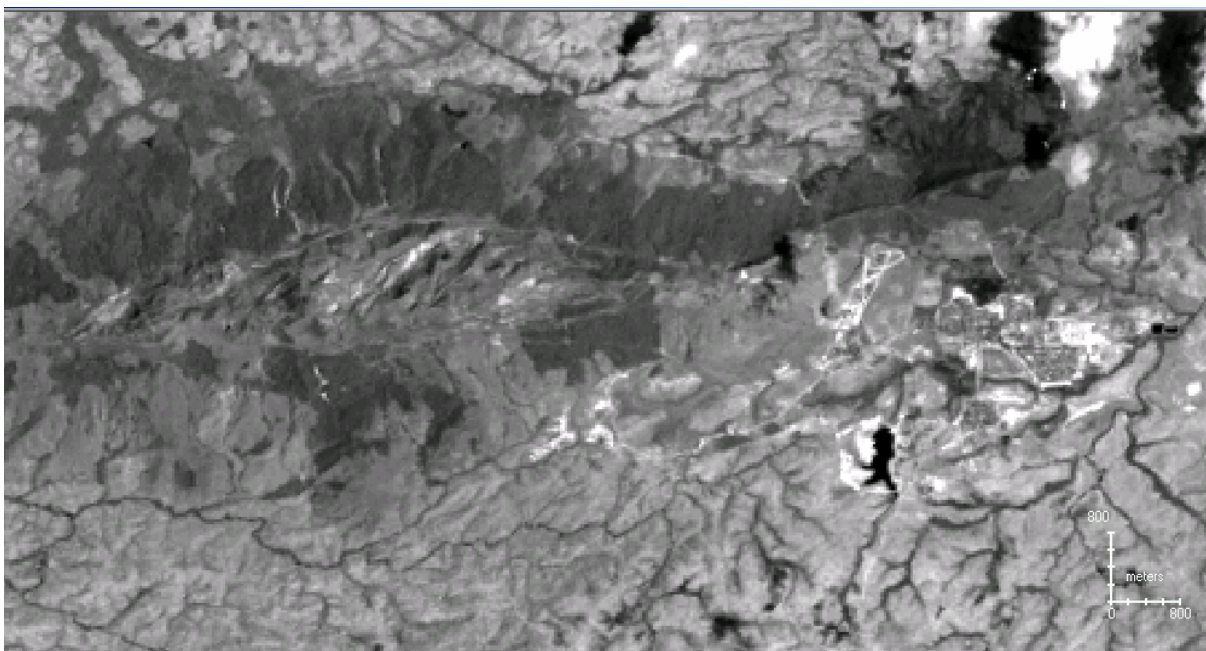


Fig. N° 57a Cociente de bandas para realce de minerales arcillosos del Cerro Bolívar y sus adyacencias.
Se puede observar en tonos blancos poca presencia de minerales arcillosos en el Cerro Bolívar
Escala 1:50.000

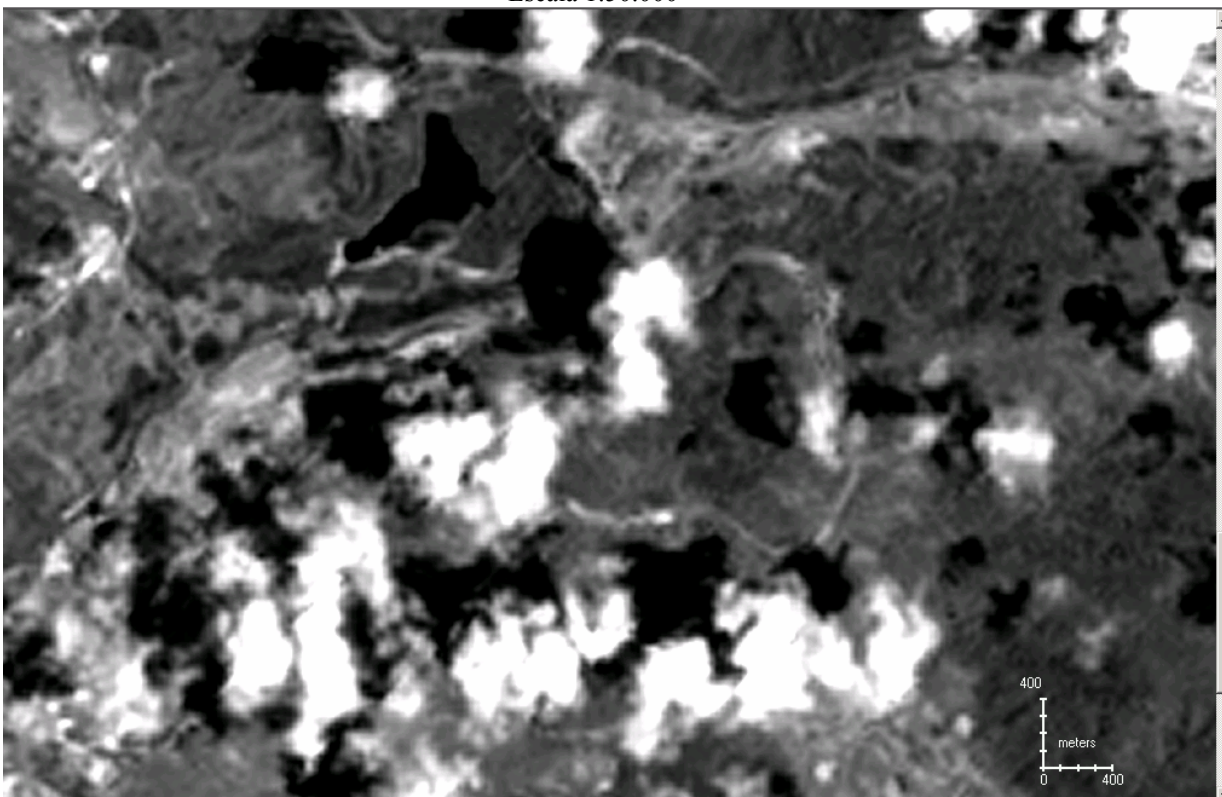


Fig. N° 57b Cociente de bandas para realce de minerales arcillosos del cuadrilátero San Isidro
Las zonas resaltadas en blanco resaltan la presencia de minerales arcillosos.
Nótese que el algoritmo resalta notablemente también las nubes presentes en la imagen.
Nótese que Escala 1:25.000

El cociente de bandas composición mineral está formado por la combinación de los cocientes de bandas de minerales arcillosos (canal rojo), minerales ferrosos (canal verde) y óxidos de hierro (canal azul), en los cuales dichos minerales estarán resaltados de acuerdo al canal en donde se encuentren, pudiéndose observar e interpretar estas imágenes con base a este criterio (Figuras N° 58, 58a y 58b).

En la escena del Cerro Bolívar (Figura 58a) se puede observar como las zonas de mena de alto tenor están resaltadas en colores amarillos, menas de bajo tenor en verde y lateritas en tonos rosados y grises. En cuanto a la escena del Cuadrilátero San Isidro (Figura 58b) se puede vislumbrar como la mayor parte de la zona está resaltada por colores verdes-amarillentos, lo cual implica que la casi totalidad de esta zona está compuesta de minerales ferrosos. No obstante, el contraste de los colores verde y amarillo no permite discriminar con precisión las menas de alto y bajo tenor. Ahora bien, al analizar el Cerro Las Pailas podemos diferenciar claramente tres zonas o clases:

la primera clase resalta en amarillo la zona de mena de alto tenor, la segunda tonos verdosos que resaltan la zona de mena de bajo tenor, y la tercera resalta la zona de lateritas en tonos rosados y marrones oscuros.

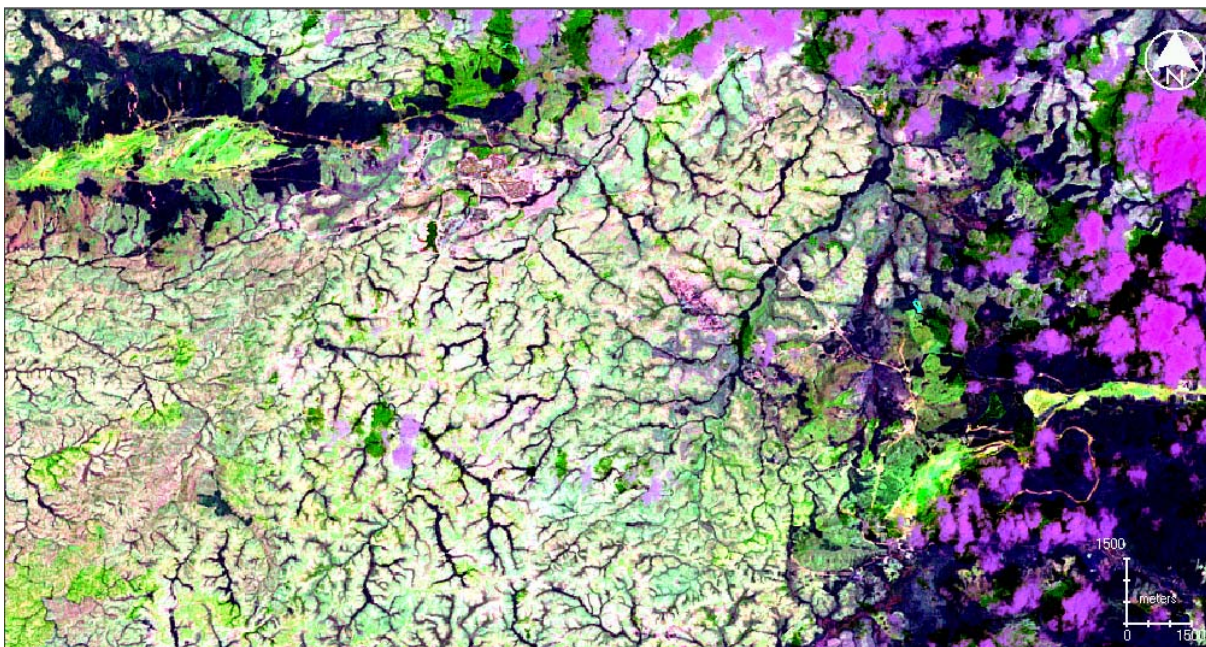


Fig. N° 58 Índice composición mineral, que resalta principalmente en verde la presencia de minerales ferrosos.

Escala 1:100.000

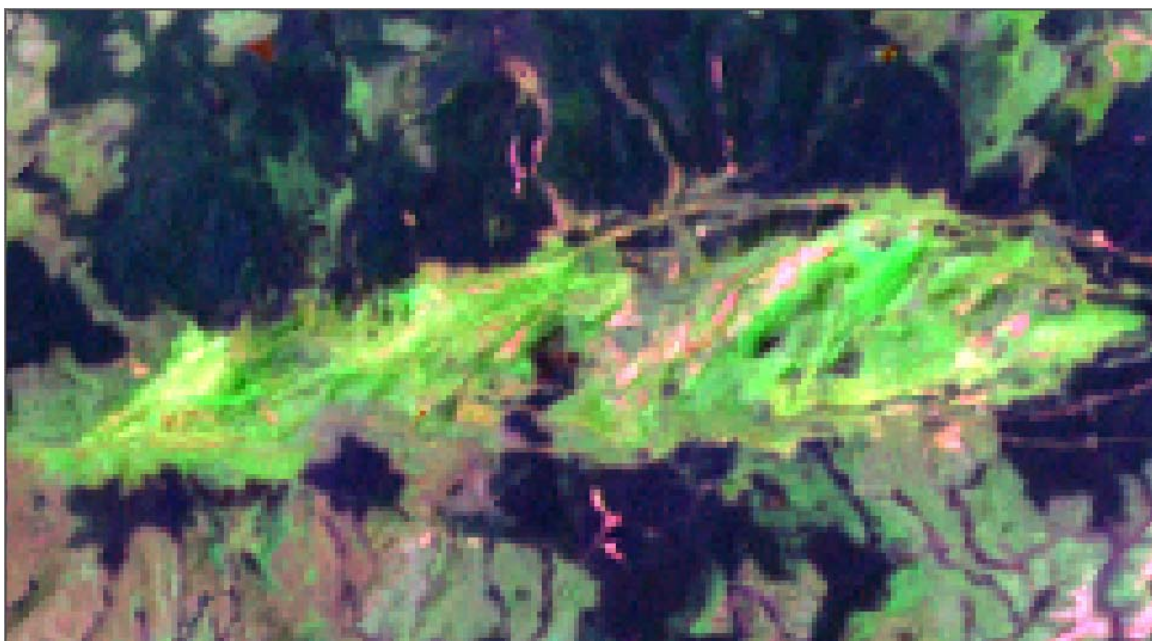


Fig. N° 58a Índice composición mineral del cerro Bolívar.

Los colores amarillos-verdosos indican mena de alto tenor, verdes indican la presencia la mena de bajo tenor, los tonos rosados y grises lateritas.

Escala 1:25.000

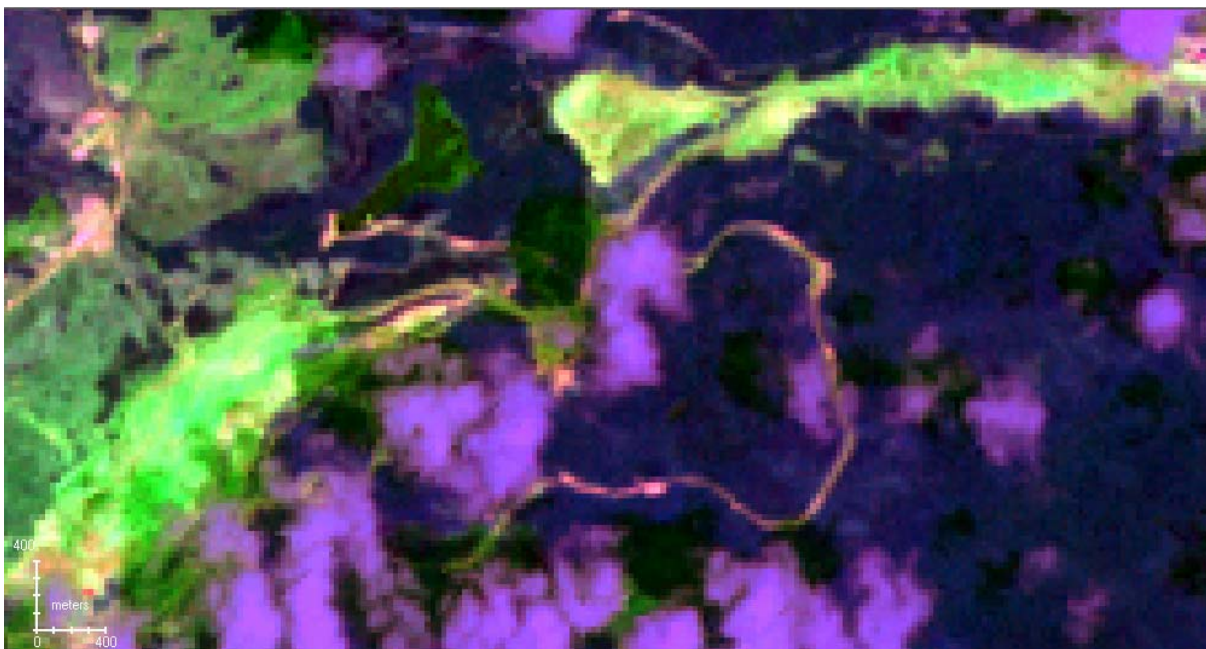


Fig. N° 58b Índice composición mineral del cuadrilátero San Isidro.

En la imagen presente el color amarillo resalta la mena de alto tenor, verde resalta la mena de bajo tenor y las lateritas es resaltado por los tonos marrones en el Cerro Las Pailas- Los Barrancos.

Escala 1:25.000

Modelo digital de elevaciones:

Para poder tener una perspectiva tridimensional de toda la zona de estudio se realizó un modelo digital de elevaciones, en donde se puede observar desde distintas perspectivas (en el software ERDAS IMAGINE 8.6) toda la zona de estudio. Esta utilidad que presenta el módulo VIRTUAL GIS hace útil este modelo en la exploración geofísica (Fig. N° 58)

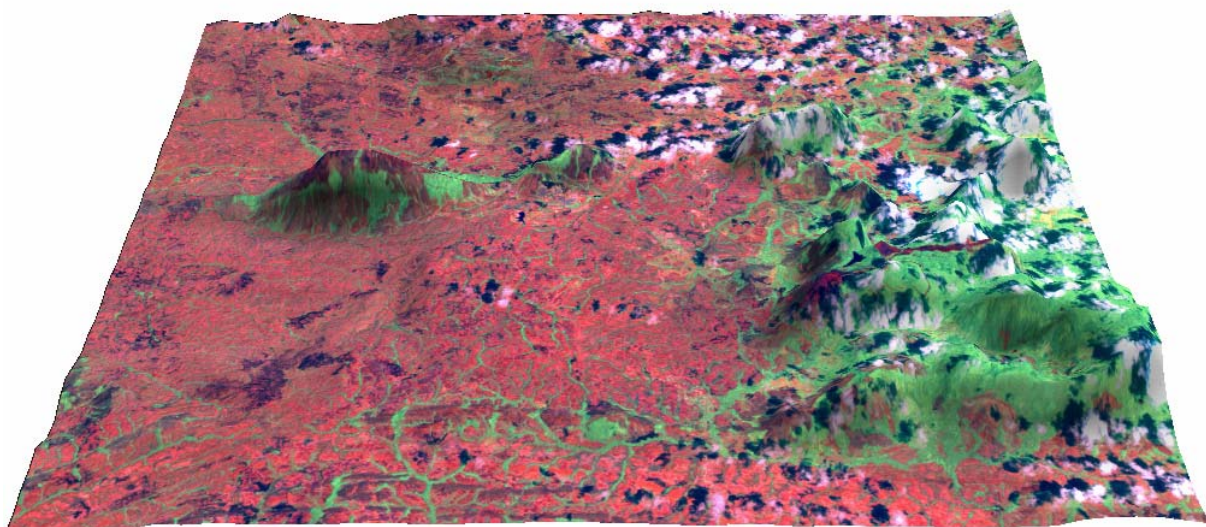


Fig. N° 59 Modelo digital de elevaciones del Cerro Bolívar y el Cuadrilátero San Isidro

CONCLUSIONES

- ✓ Con los análisis multiespectrales se pudo observar con precisión, la alta concentración de los distintos tipos de minerales usando las bandas del infrarrojo medio y térmico.
- ✓ El uso de cocientes de bandas permitió discriminar las zonas con presencia de minerales ferrosos, óxidos de hierro y minerales arcillosos.
- ✓ La correlación de los resultados con mapas geológicos de campo fue satisfactoria, de tal manera que se corrobora la efectividad de la herramienta
- ✓ Al fusionar las bandas multiespectrales con la pancromática se obtuvieron resultados en donde se pudieran apreciar visualmente las diferentes características mineralógicas del yacimiento.
- ✓ La técnica de la fusión de las bandas multiespectrales/pancromáticas no alteran la tendencia original de sus curvas espectrales.
- ✓ La información obtenida mediante las imágenes de satélite se puede extrapolar a otras áreas con presencia de minerales ferrosos, de forma que la cartografía de suelos se beneficie de la rapidez y precisión de esta técnica.
- ✓ . La presencia de nubes y cobertura vegetal densa en el área de estudio impone severas limitaciones a la prospección geofísica-minera mediante sensores remotos.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo al análisis efectuado a los perfiles espectrales de la imagen no fusionada vs. fusionada, se recomienda el uso de esta última debido a su mejor resolución espacial y espectral.
- Se recomienda la utilización de un espectrómetro de campo, con el objeto de correlacionar estos datos con las imágenes de satélite.
- El uso de otros sensores con mayor numero de bandas multiespectrales (por ejemplo el ASTER), puede permitir la realización de una caracterización mineralógica más detallada, y así obtener resultados más confiables y precisos.
- El uso de imágenes multiespectrales sería de gran utilidad para la planificación de la explotación minera, por tal motivo se recomienda su uso para optimizar la misma.

ANEXOS

ANEXO I:

MAPAS GEOLÓGICOS DEL CUADRILATERO SAN ISIDRO, CERRO BOLÍVAR Y CARACTERIZACIÓN MINERALOGICA DEL CERRO BOLÍVAR

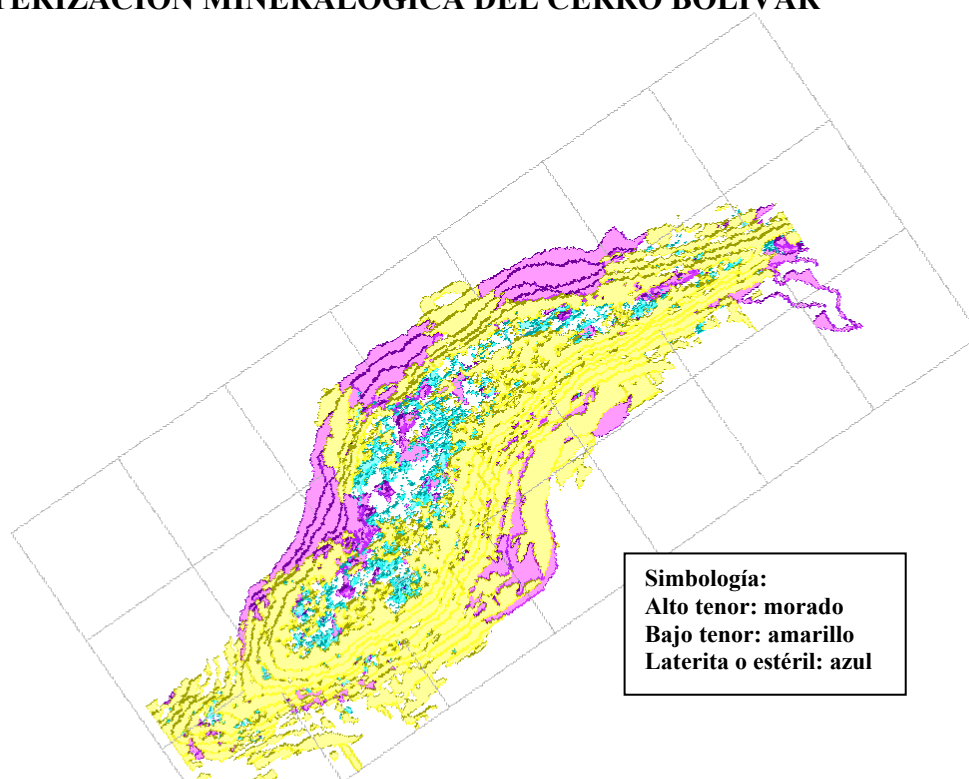
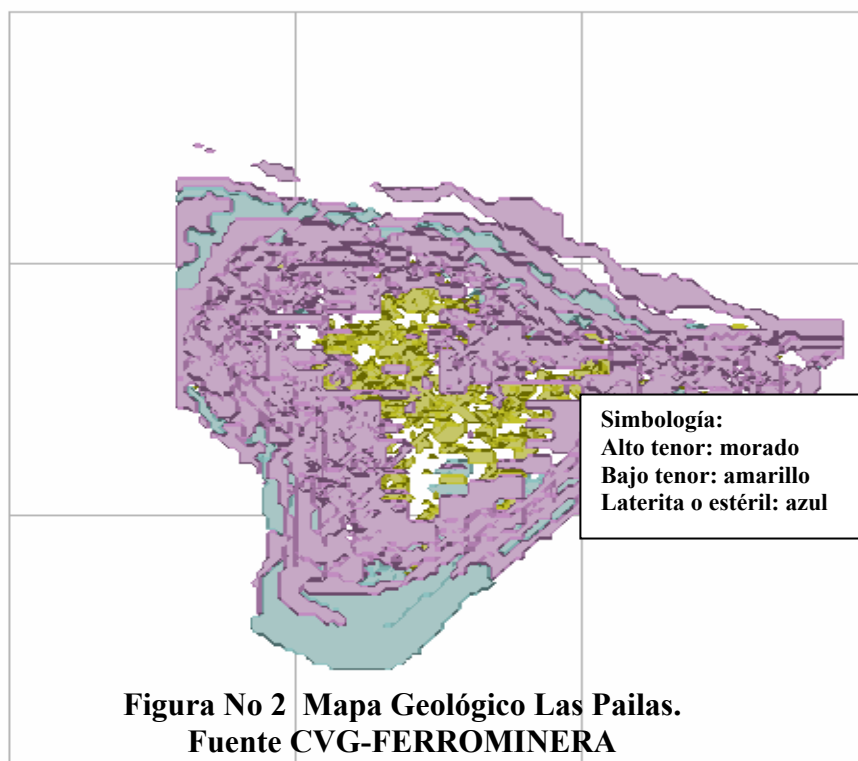


**Figura No 1 Mapa geológico Cerro San Isidro
Modificado de la Fuente CVG-FERROMINERA**



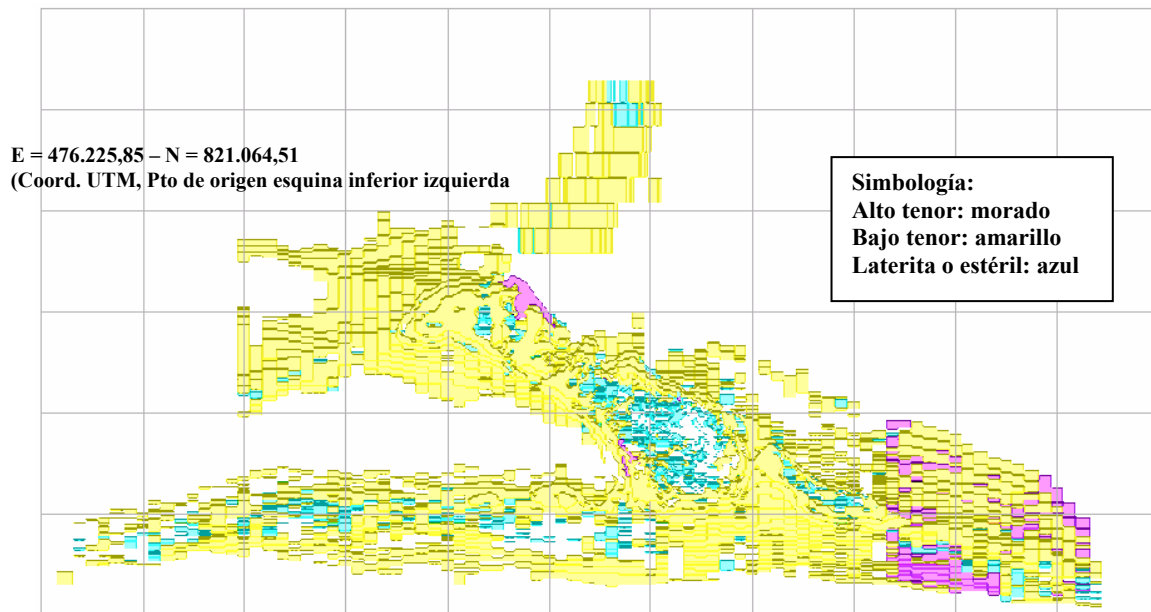


Fig. N° 3 Mapa geológico Los Barrancos. Fuente CVG-FERROMINERA

CARACTERIZACIÓN MINERALOGICA DE LA CUARCITA FERRUGINOSA

DURA

Las muestras estudiadas por C. Bertani y L. Moreno en el Cerro Bolívar fueron seleccionadas de forma tal que fuesen representativas de todo el Cerro Bolívar. A continuación (Tabla No1, 2, 3, 4,5) se listan los valores promedios de los resultados de análisis químicos, sus máximos, mínimos y desviación estándar por yacimiento de 50 muestras escogidas (ver Fig. No 2)

**Tabla No1
YACIMIENTO A**

	Fe %	SiO₂ %	Al₂O₃ %
Media	37.68	44.97	0.23
Desviación estándar	0.44	0.62	0.06
Valor máximo	38.16	45.4	0.30
Valor mínimo	37.28	44.25	0.18

**Tabla No2
YACIMIENTO B**

	Fe %	SiO₂ %	Al₂O₃ %
Media	41.72	38.55	0.24
Desviación estándar	3.6	5.75	0.14
Valor máximo	45.99	49.0	2.82
Valor mínimo	34.84	31.25	0.10

Tabla No3

YACIMIENTO C2

	Fe %	SiO₂ %	Al₂O₃ %
Media	40.74	0.20	0.20
Desviación estándar	3.49	5.66	0.051
Valor máximo	47.92	56.69	0.30
Valor mínimo	34.06	30.11	0.15

Tabla No4
YACIMIENTO C4

	Fe %	SiO₂ %	Al₂O₃ %
Media	39.85	41.46	0.29
Desviación estándar	2.69	4.24	0.25
Valor máximo	42.73	47.10	0.75
Valor mínimo	36.18	37.40	0.18

Tabla No 5
PONDERADOS DEL CERRO BOLIVAR

	Fe %	SiO₂ %	Al₂O₃ %
Media	40.64	41.23	0.22
Desviación estándar	3.39	5.48	0.10
Valor máximo	47.93	56.69	0.75
Valor mínimo	34.84	30.11	0.10

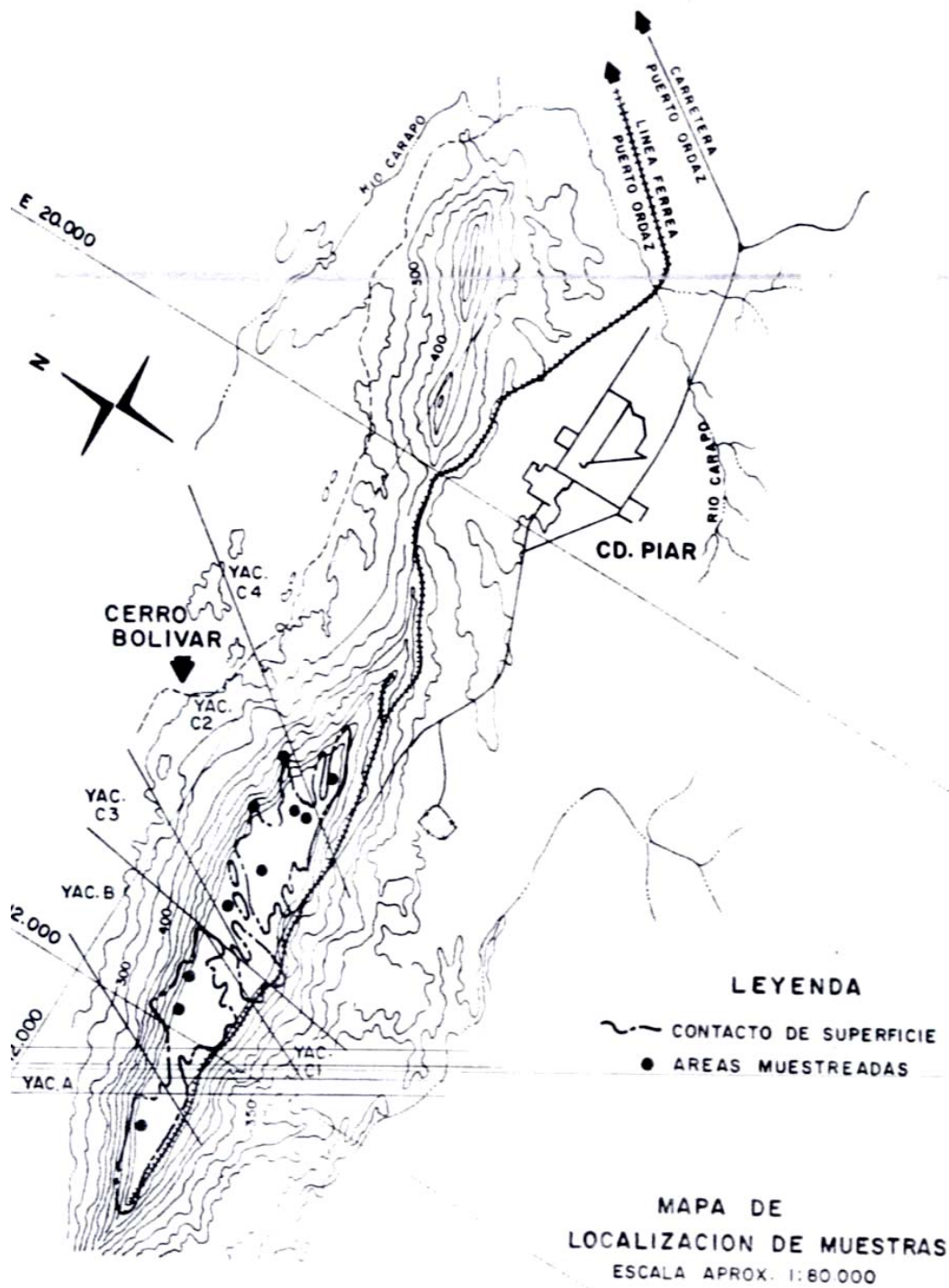


FIG. 2

Fig. N° 4 Mapa de localización de muestras de la caracterización mineralógica.
(Fuente C. Bertani y L. Moreno, 1989)

ANEXOS II:

SISTEMA LANDSAT 7 SATÉLITE DE TECNOLOGÍA DE RECURSOS DE LA TIERRA (ERTS)

ANTECEDENTES

Lanzado en 1972, fue el primer satélite de observación de la tierra. Landsat se diseñó como un experimento para probar la viabilidad de coleccionar datos multiespectrales de observación de la Tierra desde un satélite. Por ello se fue perfeccionando este aspecto en cada nuevo lanzamiento en las bandas del visible e IR cercano (Landsat 1, 2,3) y en las del IR medio y termal Landsat (4 y 5).

Los sensores que posee este sistema son:

Barredor multiespectral (MSS)

Vidicóm de haz de retorno (RBV)

Mapeador temático (TM)

En la tabla No.6 se presenta la síntesis de los satélites Landsat enviados al espacio y sus diferentes sensores RBV, MSS y TM, con sus respectivas bandas espectrales.

Tabla No.6 satélites del programa Landsat enviados al espacio

SATELITE	LANZAMIENTO	RETIRO	BANDAS RBV	BANDAS MSS	BANDAS TM
ERST-1	7/23/72	1/6/78	1,2,3 (imágenes simultáneas)	4,5,6,7	Ninguna
ERST - 2	7/22/75	2/25/82	1,2,3 (imágenes simultáneas)	4,5,6,7	Ninguna
Landsat -3	3/5/78	3/31/83	A,B,C,D	4,5,6,7,8	Ninguna
Landsat - 4	7/16/82		Ninguna	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,7
Landsat - 5	3/1/84		Ninguna	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,7
Landsat - 6	10/5/93	Falló su lanzamiento	Ninguna	Ninguna	1,2,3,4,5,6,7, más banda pancromática (ETM)
Landsat 7	04/15/1999		Ninguna	Ninguna	1,2,3,4,5,6,7, más banda pancromática (ETM +)

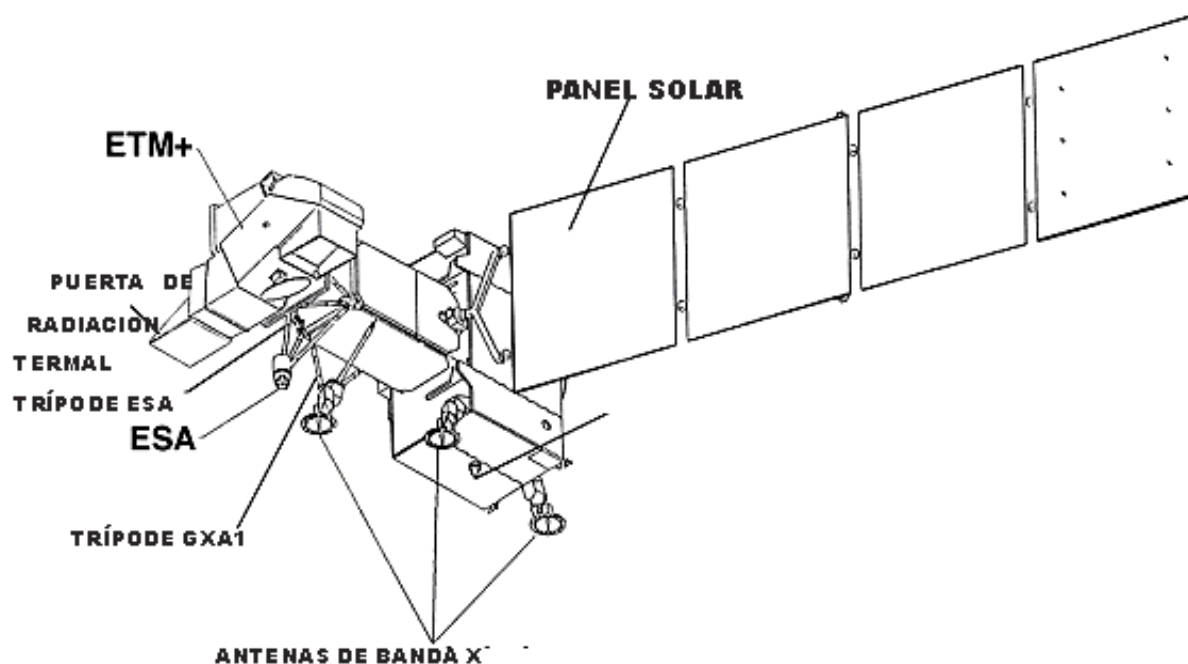


Figura No 16 Estructura externa de satélite Landsat 7

GLOSARIO

Absorción: en física, la captación de luz, calor u otro tipo de energía radiante por parte de las moléculas. La radiación absorbida se convierte en calor; la radiación que no se absorbe es reflejada, y sus características cambian. Principalmente causada por tres gases

Activo, sistema: Se habla de sensores activos, cuando son capaces de emitir sus propias ondas electro – magnéticas, y grabar posteriormente el haz reflejado por el objeto bajo estudio.

Banda espectral: Se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamientos electro – magnéticos similares.

Barrido multiespectral, equipos de: Se trata de equipos sensoriales que permiten explorar secuencialmente la superficie de la Tierra, dividiendo la radiación captada en diversas bandas espectrales.

Bit: Refiere a un dígito del sistema binario.

Byte: Un grupo de ocho bits de datos numéricos.

Calibración: Proceso de comparar ciertas medidas específicas

Clasificación digital: Proceso por el que se asigna un píxel de una imagen multiespectral a una de las categorías de la leyenda, generalmente sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen.

Cluster: Se habla de cluster o conglomerado cuando los píxeles o elementos de una imagen tienden a formar grupos con similares condiciones espectrales. El agrupamiento automático no supervisado (clustering) pretende encontrar estos espectrales idóneos como reflejo de los naturalmente existentes en la imagen.

Color: Fenómeno físico de la luz o de la visión, asociado con las diferentes longitudes de onda en la zona visible del espectro electromagnético.

Componentes principales: Es una técnica de tratamiento estadístico que permite condensar una serie de variables en un menor número sobre la base de sus correlaciones mutuas.

Conducción: La transferencia de energía electromagnética a través de un material por interacción molecular.

Contraste: Diferencia de valor o tono entre las áreas más claras y más oscuras de una imagen.

Correcciones: Indican las operaciones digitales tendentes a dotar a la imagen de las características idóneas para la clasificación. Estos procesos pueden dividirse en: correcciones radiométricas y geométricas.

Cuerpo negro: Se trata de un emisor ideal, que radia el máximo de energía por unidad de superficie en cada longitud de onda y para una temperatura dada. Un cuerpo negro también absorbe toda la energía que sobre él incide.

Energía electromagnética: Energía propagada a través del espacio o de otro medio material en un modelo armónico ondulatorio con un componente magnético y otro eléctrico.

Emisividad: Es una medida relativa que describe la habilidad de un cuerpo para emitir energía en comparación a cómo la emiten los cuerpos negros.

Espectro electromagnético: Este término hace referencia a la localización de las distintas radiaciones según su longitud de onda y frecuencia.

Filtros digitales: Se trata de matrices de coeficientes numéricos que permiten atenuar a acentuar según su finalidad y estructura las gradaciones radiométricas presentes en los datos originales.

Firma espectral: Es la expresión de un objeto sobre una imagen que nos permite reconocerlo. Las firmas están afectadas por las características del objeto que originan su interacción con la energía electromagnética, y son distintas según las longitudes de onda.

Frecuencia: Número de ciclos por segundo que pasan por un punto fijo.

Histograma: Una representación gráfica de las frecuencias observadas en una determinada imagen.

Imagen: Hará referencia a la representación de la superficie de la tierra obtenida a través de medios ópticos, electro-ópticos, óptico-mecánicos o eléctricos, registrando en forma digital, la radiación reflejada o emitida por los objetos sobre esa superficie.

Infrarrojo: Porción del espectro comprendida entre 0.7 y 100 micras, que tiene gran importancia para estudios de teledetección. Normalmente suele dividirse en infrarrojo cercano (0.7 – 1.3 μm), medio (1.3 – 3 μm) y lejano (7 a 15 μm). Este último también se conoce como infrarrojo térmico.

Lateritas: Se pueden definir como horizontes edáficos fuertemente enriquecidos en óxidos e hidróxidos metálicos, como consecuencia de la acumulación de estos componentes en respuesta a la meteorización química avanzada de una roca que ya previamente mostraba un cierto enriquecimiento de estos componentes. Se forman fundamentalmente sobre rocas ígneas básicas o ultra básicas, ricas en minerales ferromagnesianos como el olivino o el piroxeno.

Lambertiana, superficie: Indica un perfecto difusor, que refleja la energía incidente, por igual, en todas las direcciones.

Landsat: Serie de satélites construida por la NASA dedicados específicamente a la detección de recursos naturales.

Longitud de onda: Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas.

Mena: Mineral a partir del cual se extrae un metal, tal como se encuentra en el yacimiento.

Micrómetro: Unidad de longitud empleada para medir longitudes de onda de alta frecuencia. Equivale a la millonésima parte de un metro.

Microondas: Porción del espectro electromagnético comprendida entre 1 mm y 1 m.

Nivel digital: Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico – electrónico.

Paragénesis: Este término designa la relación genética determinada de elementos en una asociación de minerales o metales en series características con arreglo a su origen y el proceso mediante el cual se ha desarrollado cada serie, al orden de formación o alteración de los minerales de una roca.

Píxel: Un píxel (abreviatura del término inglés "picture element") es uno de los miles de minúsculos puntos que aparecen en la cuadrícula de una pantalla o de una hoja impresa. Estos puntos, o bloques, tienen cada uno su color para mostrar imágenes en las pantallas del ordenador o computadora, y representan los elementos más pequeños que pueden manipularse para generar gráficos. Como no son infinitamente pequeños, los píxeles sólo se aproximan al color real de un objeto. Por esta razón, las líneas de los gráficos generadas por una computadora (denominadas mapas de bits) suelen tener un aspecto dentado si se miran de cerca.

Plataformas: Son los vehículos o sitios donde se transportan los sensores. Pueden ser plataformas satelitales o plataformas aéreas.

Programas en teledetección, son los proyectos determinados que se emprenden por distintos países, con el fin de realizar el lanzamiento de un satélite o de un avión con un sensor remoto, que capte los datos a distancia de la superficie de la tierra. A lo largo de la historia de la Percepción Remota, son muchos los programas que han existido, algunos muy conocidos son el LANDSAT, SPOT, JERS, etc.

Radiación: Proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio; el término también se emplea para las propias ondas o partículas. Las ondas y las partículas tienen muchas características comunes; no obstante, la radiación suele producirse predominantemente en una de las dos formas

La radiación electromagnética: Es independiente de la materia para su propagación; sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Esta radiación abarca una gran variedad de energías

Reflexión: Es el retroceso de la energía electromagnética desde una superficie.

Reflectancia: Es el cociente de la cantidad de radiación electromagnética reflejada desde una superficie sobre la cantidad que originalmente chocó con la superficie. Esta definición implica que alguna de la energía que choca una superficie no es reflejada, pues puede ser transmitida o absorbida.

Refracción: Es la desviación de la luz. Sucede cuando la luz pasa a través de dos medios con diferente densidad (capas atmosféricas). Causa espejismo durante los días soleados. Aminoran las firmas espectrales en días húmedos y calientes, debido a que esta densidad en las capas atmosféricas se altera.

Satélite artificial: Cualquiera de los objetos puestos en órbita alrededor de la Tierra con gran variedad de fines, científicos, tecnológicos y militares

Sensores Remotos: Son los dispositivos que permiten la referenciación a distancia de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra. Estos son de diferentes tipos, de acuerdo con los principios básicos de diseño, su forma de registrar los datos y la fuente de energía que emplean. Pueden ser cámaras, radares, barredores ópticos, óptico- mecánicos, eléctricos, etc.

Teledetección: Técnica empleada para obtener información a distancia sobre objetos y zonas de la superficie de la Tierra, basada fundamentalmente en el análisis de las imágenes obtenidas desde aeronaves y satélites preparados para ello. Las cámaras y otros instrumentos que registran esta información se denominan sensores, que son transportados en aviones y satélites artificiales. Estos sistemas de teledetección se emplean de forma habitual para el

reconocimiento, la confección de mapas y la observación de los recursos y el medio ambiente de la Tierra. También se han empleado para explorar otros planetas

Thematic Mapper: Se trata de un equipo de barrido multiespectral bastante sofisticado, que se incorpora a los satélites de recursos naturales Landsat

Transmisión: Es el movimiento de la luz a través de una superficie que depende de la longitud de onda. Cuando la radiación es transmitida no sufre atenuación.

Ventanas atmosféricas: Aquellas porciones del espectro en las cuales la atmósfera ofrece poca atenuación a la radiación electromagnética.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASCANIO, G y Araujo, E, (1977)V Congreso Geológico Venezolano, Caracas, , p 234-241

BARRIOS, F. y L. MORENO (1985), Algunas consideraciones geológicas sobre el yacimiento de hierro de San Isidro. VI Congreso Geológico Venezolano, Caracas tomo 6: pp. 3832 -3853

BERTANI, C. y L. MORENO (1989), Caracterización mineralógica del elemento fósforo del Cerro Bolívar. VII Congreso Geológico Venezolano, tomo 4 pp. 1745-1768.

BILL DICKINSON Jr. From Remote sensing tutorial .[En línea]:

<http://aol.wff.nasa.gov/>

[consulta 5/6/2003]

CAMPBELL , J.G: (1981), The use of Landsat MSS data for geological mapping, en J.G. Campbell, Ed, Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications, London Remote Sensing Society, pp.143-162

CASELLES, V. y , J.A. SOBRINO (1988),: Determination of the effective emissivity and temperature under vertical observation of a citrus orchard. Application to frost nowcasting, "International Journal of Remote Sensing", vol.9 pp.715-727.

CHUVIECO EMILIO (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial, Rialp, S.A. Madrid 2ª Edición. 450 p.

DOUGAN, Thomas (1972). Origen y metamorfismo de los gneises de Imataca y los Indios, Rocas Precámbricas de la región. Los Indios – El Pilar. Estado Bolívar, Venezuela
Bol. Geol. Caracas. Publ. Especial N°5.

EAS INSTITUTE. [En línea] <http://www.eas.purdue.edu/eas591f>
[Consulta: 01/07/2003]

EURIMAGE [En línea]: http://www.eurimage.com/Products/KVR_1000.html .
[Consulta: 01/07/2003]

ELACHI, C: Introduction to the physics and techniques of remote sensing, New York (1987), John Wiley & Sons.

“Fundamentals of Remote Sensing” tutorial, by the Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada.
[En línea]: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam.html>
[Consulta: 10/06/2003]

GARCÍA M y PÉREZ GONZÁLEZ, Discriminación de Gypsisoles mediante el sensor ETM+ del satélite Landsat 7. [En línea]: <http://www.eucmax.sim.ecm.es/>
[Consulta: 01/03/2004]

JENSEN, J.R. (1986),: Introductory digital image processing. A remote sensing perspective, Englewood Cliffs Prentice – Hall.

KALLIOKOSKI, J. (1965) Geología de la parte norte-central del Escudo de Guayana, Venezuela. Bol. Geol. Caracas, Vol. VII, N° 3

LEXICO ESTRATIGRAFICO ELECTRONICO DE VENEZUELA.

[En línea]: <http://www.pdv.com/lexico> [Consulta: 01/06/2003]

LIDDICOAT, W, (1960) Guía de excursión: Cerro Bolívar. III Congreso Geológico Venezolano tomo 1 Caracas,. pp. 55-58

MARQUETTI, C; YOKOKAWA, K, [en línea] Procesamiento y análisis de imágenes ASTER para el estudio metalogenetico de Maliman, San Juan, Argentina. [En línea]: <http://www.geosatar.gov.ar>.
[Consulta: 19/06/2003]

MATHER, P.M: (1987) Computer Processing of Remotely Sensed Images, Chichester, John Wiley.

NASA: Landsat data user handbook

[En línea]<http://geo.arc.nasa.gov/esdstaff/landsat.html> [Consulta: 01/06/2003]

Sensores remotos de la India [En línea] <http://www.csre.iitb.ernet.in/isro/index.html>
[Consulta 2/6/2003]