


THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

JICA LIBRARY



J 1149075 (2)

1974

1975

1976

**INFORME
SOBRE
EL ANALISIS DE DATOS DE SATELITE
PARA
RECURSOS MINERALES
EN
LA REPUBLICA DE ARGENTINA**

FEBRERO DE 1999

AGENCIA DE LA COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON

AGENCIA DE MINERIA METALICA DEL JAPON



1149075 (2)

PREFACIO

En respuesta a la solicitud del Gobierno de la República Argentina, el Gobierno del Japón decidió realizar el proyecto de exploración minera que comprende el análisis de imágenes de satélite y estudios geológicos a fin de comprobar el potencial minero de la Región Andina Oriental, provincias de La Rioja, San Juan y Mendoza, en las proximidades de la frontera con Chile, y encargó dicho estudio a la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Esta, a su vez, decidió encargar la realización del proyecto a la Agencia de Minería Metálica del Japón (MMAJ), un organismo especializado en estudios geológicos y de recursos minerales.

El estudio se inició en 1997 con una duración de dos años. Los estudios realizados en 1998 correspondieron a la segunda y última etapa del estudio. La MMAJ envió una misión integrada por cuatro especialistas, quienes realizaron los levantamientos en terreno del 5 de octubre al 11 de diciembre de 1998, cumpliendo completamente el cronograma propuesto gracias a la colaboración del Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, Subsecretaría de Minería (SSM) y otras instituciones gubernamentales de la República Argentina.


El presente informe reúne los resultados y las conclusiones del procesamiento y análisis de las imágenes de satélite realizados en esta fase del estudio, y forma parte integral del Informe Final.

Deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento a las autoridades pertinentes del Gobierno de la República Argentina y de las Provincias involucradas, así como a los funcionarios de los ministerios de Relaciones Exteriores, Comercio Exterior e Industria, y de la Embajada del Japón en Argentina, y a todos quienes tuvieron la gentileza de brindar su estrecha cooperación a nuestra misión.

Febrero de 1999



Kimio FUJITA
Presidente
Agencia de Cooperación
Internacional del Japón



Hiroaki HIYAMA
Presidente
Agencia de Minería
Metálica del Japón



RESUMEN

El presente análisis forma parte integral del Estudio Básico de Cooperación para el Desarrollo de Recursos y tiene por objetivo identificar las zonas de alteración promisorias en la Región Andina Oriental que abarca las zonas fronterizas con Chile en las provincias de La Rioja, San Juan y Mendoza de la República Argentina. Para ello, se ha propuesto trabajar sobre la base de las zonas de alteración identificadas en el análisis de la primera etapa del estudio, y clasificarlas en pequeños grupos a fin de conocer la combinación de los minerales utilizando los datos JERS-1 OPS y aplicando metodologías especiales de procesamiento y análisis.

El Area del Estudio está cubierta por nueve escenas de las imágenes JERS-1, que ocupa unos 17.100 km² en la parte Norte, y unos 30.400 km² en la parte Sur, sumando en total 47.500 km² aproximadamente.

Para la búsqueda de los datos de las imágenes, se seleccionaron inicialmente trece escenas de JERS-1 OPS del Area del Estudio. De estas trece, se tuvo que eliminar las cuatro escenas tomadas en invierno donde la cobertura de nieve imposibilitaba realizar el análisis detallado de las zonas de alteración, quedando finalmente nueve escenas.

Para la corrección de sistema se intentó reducir la influencia del retraso de respuesta de los sensores en la gama de infrarrojo de ondas cortas que es una de las características de los datos de JERS-1 OPS. También se realizó el registro entre bandas de las imágenes de la gama de infrarrojo visible y cercano y de la gama de infrarrojo de ondas cortas. Sin embargo, entre las imágenes utilizadas, existían las zonas que no estaban incluidas en el traslapo de las imágenes, y no se ha podido realizar la corrección de la transmisividad atmosférica entre los grupos de las imágenes del Norte y Sur del Area del Estudio.

Para las nueve escenas cuyo brillo fue corregido, se determinó la correspondencia entre dos imágenes en base al traslapo de las imágenes, y luego las imágenes fueron alineadas utilizando el método de mosaico sin costura. Este método, además de eliminar los efectos del paralaje en la alineación de las imágenes, permite unir dos imágenes evitando las zonas que presentan variación de las coberturas terrestres. El siguiente paso consistió en seleccionar los puntos de control terrestre (GCP) en ambas imágenes en mosaico y realizar la conversión geométrica al Sistema de Coordenada Universal Transversal de Mercator (UTM). La resolución espacial fue definida en 18m/1 pixeles para mantener la calidad de las imágenes originales. En todos los procesos del presente análisis se aplicó esta resolución espacial.

El objetivo principal de este análisis es realizar una clasificación detallada de las zonas de alteración. El análisis incluyó además de la generación de las

imágenes de falso color, ratioing, procesamiento de residuales logarítmicos y conversión de brillo a la pseudo reflectancia.

Las imágenes de falso color fueron generadas aplicando AVR= 358 (apto para la clasificación de litofacies) y las imágenes de "ratio" fueron generadas aplicando las combinaciones AVR= 5/6, 5/7, 5/8 (aptas para la identificación de las zonas de alteración). Por otro lado, para el procesamiento de residuales logarítmicos, se utilizaron todas las bandas.

Previo al análisis de las zonas de alteración, se identificaron las zonas de alteración sobre la base de las imágenes de conversión de brillo, de falso color y de "ratio". Los supervisores utilizados para la identificación fueron seleccionados de los resultados de interpretación de las zonas de alteración por las imágenes de LANDSAT TM realizada en el primer año del estudio. Cabe señalar que mediante este método se ha logrado cubrir casi totalmente los resultados de la interpretación visual de las zonas de alteración de las imágenes de LANDSAT TM.

Previo a la clasificación, con el fin de esclarecer la diferencia de los minerales de alteración componentes, fueron generadas las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración (AVR= 5/6, 5/7, 5/8) utilizando los datos únicamente de las áreas identificadas como las zonas de alteración, las mismas que fueron representadas con tonos característicos. En estas imágenes, se logró representar los minerales como alunita y caolín que se forman por la alteración ácida, con tonos de alta luminosidad e intensidad. Los minerales formados por la alteración neutra a ácida como sericita están representadas con tonos de baja luminosidad e intensidad. Al sintetizar los resultados de este trabajo, se logró deducir a grosso modo los minerales de alteración, e interpretar la ubicación de las zonas de alteración y los taludes.

Al analizar las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración descritas anteriormente, se logró agrupar las zonas de alteración identificadas en tres grandes grupos. El primer grupo esta constituido por las posibles zonas de alteración en la zona fronteriza entre Argentina y Chile. Este grupo aparece con tonos de alta luminosidad e intensidad, y se deduce que están compuestas principalmente por los minerales formados por la alteración ácida como alunita, caolinita o yeso. El segundo grupo está constituido por las posibles zonas de alteración que abarcan una superficie extensa donde afloran las rocas del Paleozoico en el Este de la frontera, y se dedujo que corresponde a las zonas de alteración y sus taludes conformados principalmente por los minerales formados por la alteración ácida a neutra como sericita. El tercer grupo está constituido por las posibles zonas de alteración ubicadas dentro de los afloramientos de las rocas volcánicas del Cretáceo a Terciario, en el Sur del territorio chileno y se dedujo que corresponden a las rocas volcánicas no alteradas o ligeramente alteradas.

Se concluyó que se puede clasificar las zonas de alteración en unos cuantos grupos a partir de los tonos representados en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración y se realizó la clasificación combinando el método

del máximo de verosimilitud y el de coincidencia de comportamientos que son dos métodos en los que los efectos de los ruidos y de los valores extraordinarios no son grandes.

En el método del máximo de verosimilitud se requiere definir los supervisores. Sin embargo, dada la poca disponibilidad de informaciones sobre las zonas que puedan servir de supervisores, en el presente análisis se tomaron los tonos que aparecen en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración como los supervisores. Se realizó la clasificación utilizando estos supervisores, y además se aplicó el factor de pseudo reflectancia a los resultados de clasificación para integrar las zonas alteración en 11 grupos. Se hizo la comparación entre los residuales logarítmicos de estos 11 grupos y los residuales logarítmicos de los pixeles, y se fueron clasificando las zonas de alteración de acuerdo a la semejanza del comportamiento.

Al analizar los residuales logarítmicos de cada grupo, se concluyó que los 11 grupos pueden ser clasificados en dos grandes grupos. De los valores de residuales logarítmicos se dedujo que el primer grupo corresponde a las zonas de alteración ácida con predominio de alunita y caolinita, mientras que el segundo consiste en las zonas de alteración ácida a neutra con predominio de sericita y que contiene también caolinita. La distribución de estas zonas coincidía con los resultados de clasificación según tonos que aparecieron en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración.

En este análisis se utilizaron los residuales logarítmicos como pseudo reflectancia para la clasificación. Sin embargo, los valores de pseudo reflectancia obtenidas en las zonas de alteración presentaron absorción en la Banda 3 en todos los grupos. Este comportamiento no es algo propio de las rocas meteorizadas o de los minerales de alteración, por lo que se dedujo que los residuales logarítmicos del Area del Estudio no se asemejaban a la pseudo reflectancia. Por lo tanto, se concluyó que es arriesgado interpretar los minerales de alteración según el comportamiento del espectro de reflectancia.

En una combinación de dos minerales, el espectro de reflectancia muestra una evolución no lineal en función de la relación de volumen. Por consiguiente, es imposible deducir el tipo de minerales o realizar un análisis cuantitativo de las muestras (datos de las imágenes) a partir de la combinación lineal de los miembros finales (definiendo como los "miembro finales" a los valores del espectro de reflectancia de los minerales de alteración). El modelo de "isograin" esclarece la relación que hay entre la relación de volumen y el espectro de reflectancia de los minerales, sobre la base del cual se realizó la composición del espectro de reflectancia de los minerales de alteración en este análisis. Se escogieron siete minerales (alunita, caolinita, yeso, calcita, sericita, cuarzo y limonita) como los miembros finales, los que fueron combinados con una variación de tasa de mezcla por cada 10%. De esta manera se preparó una base de datos del espectro de reflectancia de los minerales de alteración.

Como el siguiente paso, para utilizar esta base de datos es necesario convertir los datos de las imágenes a la pseudo reflectancia. De la precisión de este procedimiento depende la confiabilidad de la interpretación de los minerales. Para este análisis el equipo de estudio se fijó en el comportamiento universal del espectro de reflectancia de las rocas meteorizadas afloradas, sobre la base del cual se determinaron las líneas de suelo, y realizó la conversión a pseudo reflectancia. En este análisis se continuó realizando la clasificación de los minerales de alteración y el análisis semicuantitativo, suponiendo que el factor de conversión a pseudo reflectancia es correcto. El método del análisis consistió en comparar la base de datos del espectro de reflectancia de los minerales de alteración y el comportamiento de pseudo reflectancia de las imágenes, y se tomaron como los resultados de la clasificación a los pixeles donde ambos comportamientos eran más concordantes. Subsiguientemente, se realizó la re-clasificación de las zonas de alteración en cinco grupos según el contenido de los minerales, combinación y relación de volumen.

Como resultado de esta clasificación, se concluyó que las zonas de alteración en la frontera entre Argentina y Chile corresponden a la alteración ácida con predominio de caolinita o alunita, mientras que muchas de las zonas de alteración dentro de las rocas sedimentarias del Paleozoico al Este de la frontera están constituidas por las zonas con predominio de sericita + caolinita o de sericita. Si bien es cierto que es difícil verificar detalladamente la idoneidad de los resultados del análisis en todas las zonas de alteración del Area del Estudio, se realizó un estudio de campo después de este análisis con el fin de hacer una evaluación de las principales zonas de alteración, donde se ha podido comprobar que el método es hasta cierto punto válido cuando se dividen las zonas de alteración en dos grupos; zonas de alteración ácida con predominio de alunita y caolinita y las zonas de alteración neutra predominantemente de sericitización. Por lo tanto, si bien es cierto que el método de conversión a pseudo reflectancia debería ser cada vez mejorado a través de los procesos empíricos, se ha comprobado su validez para la clasificación de las zonas de alteración.

En este trabajo, ha sido sumamente útil haber logrado comprobar la aplicabilidad de estos datos en el análisis detallado de las zona de alteración, sin ignorar los limitantes inherentes como son los ruidos, la reducida gama dinámica, el limitado número de las bandas en la gama de ondas necesaria, etc., ni menospreciar todas las informaciones que ofrecen estas imágenes. El satélite ASTER que será lanzado este año posee cinco bandas en la gama de infrarrojo de ondas cortas, y conjuntamente con el desarrollo y aplicación de la metodología de análisis utilizada en este estudio, permitirán realizar un análisis más detallado que incluye también la clasificación de los minerales.

CONTENIDO

PREFACIO	i
RESUMEN	ii
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	viii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Objetivo del análisis	1
1.2 Alcance del análisis	1
1.3 Datos utilizados.....	1
1.4 Metodología del análisis	5
1.5 Analistas.....	5
Capítulo 2 Procesamiento y análisis de imágenes.....	7
2.1 Generalidades.....	7
2.1.1 Antecedentes.....	7
2.1.2 Método de deducción de los minerales de alteración	7
2.2 Imágenes utilizadas	10
2.2.1 Coberturas de nieve y de nube	10
2.2.2 Calidad de las imágenes	10
2.3 Corrección de sistema y de cantidad de radiación.....	13
2.3.1 Corrección de sistema.....	13
2.3.2 Corrección de la cantidad de radiación	14
2.4 Mosaicos sin costura y conversión geométrica.....	31
2.4.1 Conversión geométrica	31
2.4.2 Disposición de mosaicos sin costura.....	31
2.4.3 Corrección geométrica	34
2.4.4 Corrección de la energía radiante de trayectoria en las Imágenes U y L.....	36
2.5 Generación de las imágenes de análisis espectral.....	36
2.5.1 Eliminación de las zonas cubiertas de nieve y residuales logarítmicos	36
2.5.2 Imágenes de falso color.....	40
2.5.3 Imágenes procesadas por el método de residuales logarítmicos.....	45
2.5.4 Imágenes de "ratio".....	47
2.6 Identificación de las zonas de alteración y ratioing para acentuar las zonas de alteración	54
2.6.1 Valores de umbral para la identificación de las zonas de alteración.....	54
2.6.2 Ratioing para resaltar las zonas de alteración	60

2.6.3	Distribución y tonos de las zonas de alteración en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración.....	69
2.6.4	Diferencia de tonos entre dos imágenes.....	71
2.6.5	Necesidad del ratioing para resaltar las zonas de alteración.....	73
2.6.6	Imágenes de ratioing para enfatizar las zonas de alteración representativas.....	74
2.7	Clasificación de las zonas de alteración.....	82
2.7.1	Preparación de categorías.....	82
2.7.2	Clasificación de las imágenes según la coincidencia de comportamiento.....	91
2.7.3	Identificación de los minerales de alteración según grupos.....	97
2.8	Identificación de los minerales sobre la base de la coincidencia del comportamiento.....	100
2.8.1	Principios del modelo de "isograin".....	100
2.8.2	Preparación del índice de espectros de reflectancia.....	107
2.8.3	Variación del espectro de reflectancia en las combinaciones en dos fases.....	109
2.8.4	Método de conversión de pseudo reflectancia.....	109
2.8.5	Análisis semicuantitativo de los minerales de alteración mediante el método de coincidencia de comportamientos.....	119
2.8.6	Mapas de clasificación de los minerales de las zonas de alteración.....	123
2.8.7	Comparación con el mapa de clasificación de las zonas de alteración según los residuales logarítmicos.....	124
2.8.8	Confiabilidad de los resultados de la interpretación de minerales.....	124
2.9	Resumen del análisis.....	130
2.9.1	Corrección del sistema y de la cantidad de radiación.....	130
2.9.2	Imágenes en mosaico sin costura y la conversión geométrica.....	130
2.9.3	Generación de las imágenes de análisis espectral.....	139
2.9.4	Identificación de las zonas de alteración y ratioing para resaltar las zonas de alteración.....	139
2.9.5	Clasificación de las zonas de alteración.....	140
2.9.6	Interpretación de los minerales a través del método de coincidencia de comportamiento.....	142
2.10	Conclusiones.....	143
	Bibliografía.....	145
	Epílogo.....	xi
	Apéndice	

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1 Location Map of the Study Area
- Fig. 2 Configuration of the Images Used
- Fig. 3 Flow Chart of the Whole Image Processing and Analysis
- Fig. 4 Location Map of the Phase-1 Study Area
- Fig. 5 Spectral Reflectance Curves of Clay Minerals in the Short Wave Infrared Region and Position of JERS-1 Bands
- Fig. 6 Spectral Patterns of Clay Minerals in the Region of Wave Length of JERS-1
- Fig. 7 Examination of Image Quality on JERS-1 OPS
- Fig. 8 Results of Weighted Filter on JERS-1 OPS
- Fig. 9 Flow Chart of Mosaicking Procedure
- Fig.10 Curves of Directional Reflectance Correction on the Lunar Basalt
- Fig.11 Definition of Directional Reflectance
- Fig.12 Results of Measurement on Brightness Gradient of Image
- Fig.13 Distribution of Brightness of Two Images in Overlapped Area
- Fig.14 Distortion of Shadow by Central Projection
- Fig.15 Plane Display of LANDSAT TM Image and TPC for Comparison
- Fig.16 Flow Chart of Processing of Logarithmic Residual Image and Ratio Image
- Fig.17 False Color Composite Image of the U-Image Area (BGR = 358)
- Fig.18 False Color Composite Image of the L-Image Area (BGR = 358)
- Fig.19 Logarithmic Residual Image of the U-Image Area (BGR = 678)
- Fig.20 Logarithmic Residual Image of the L-Image Area (BGR = 678)
- Fig.21 Ratio Image of the U-Image Area (BGR = 5/6, 5/7, 5/8)
- Fig.22 Ratio Image of the L-Image Area (BGR = 5/6, 5/7, 5/8)
- Fig.23 Extracted Alteration Zones from JERS-1 OPS Image and from LANDSAT TM Image in the U-Image Area
- Fig.24 Extracted Alteration Zone from JERS-1 OPS Image and from LANDSAT TM Image in the L-Image Area
- Fig.25 Enhanced Ratioing in the U-Image Area
- Fig.26 Enhanced Ratioing in the L-Image Area
- Fig.27 Belts of Alteration Zones Visually Extracted from LANDSAT TM Images
- Fig.28 Relationship between Tones after Ratioing and Minerals
- Fig.29 False Color Composite Image near Los Mogotes and Alteration Zone Extracted from LANDSAT TM Image
- Fig.30 Enhanced Ratio Image near Los Mogotes
- Fig.31 Flow Chart of Classification of Alteration Zone
- Fig.32 Logarithmic Residual Value of Reclassified Group

- Fig.33 Brightness of Logarithmic Residual Image of Reclassified Group and Reflectance of Alteration Minerals
- Fig.34 Classification of Alteration Zone in the U-Image Area
- Fig.35 Classification of Alteration Zone in the L-Image Area
- Fig.36 Logarithmic Residual Value of Each Group after Correction of Samples
- Fig.37 Flow Chart of Identification of Alteration Minerals
- Fig.38 Multi-layer Structure of the Isograin Model
- Fig.39 Optical Parameters of Single Grain
- Fig.40 Relationship between Scattering Activity (s), Transmitting Activity (t) of Single Grain and Reflectance (R), Transmittance (T) of Single Layer
- Fig.41 Relationship between Boundary Reflectivity, Absorption Coefficient and Scattering Activity – Transmitting Activity
- Fig.42 Relationship between Boundary Reflectivity and Refractive Index
- Fig.43 Mixing of Two Components with Different Optical Properties
- Fig.44 Changes of Spectral Reflectance in Two-Phase Mixture System-1 (End Member : Sericite-Goethite, Kaolinite-Goethite, Alunite-Goethite)
- Fig.45 Changes of Spectral Reflectance in Two-Phase Mixture System-2 (End Member : Alunite-Kaolinite, Sericite-Calcite, Alunite-Gypsum, Kaolinite-Gypsum)
- Fig.46 Bivariate Plot of Reflectance on Soil and Weathered Rock
- Fig.47 Ratio of Observing Brightness in Two Bands from U-Image Data
- Fig.48 Ratio of Observing Brightness in Two Bands from L-Image Data
- Fig.49 Map Showing Alteration Mineral Content from U-Image Data
- Fig.50 Identification of Alteration Minerals in the U-Image Area
- Fig.51 Identification of Alteration Minerals in the L-Image Area
- Fig.52 Identification of Alteration Minerals in Areas Dominated by Alunite
- Fig.53 Identification of Alteration Minerals in Areas Dominated by Kaolinite
- Fig.54 Identification of Alteration Minerals in Areas Dominated by Sericite / Calcite
- Fig.55 Comparison of Pseudo Reflectance in Each Category
-
- Table 1 Coordinates, Acquisition Date and Sun Position of Each Scene
- Table 2 Conversion Error of GCP in the U-Image
- Table 3 Path Radiance (Minimum Brightness)
- Table 4 Logarithmic Residual Processing Coefficient (Rough Estimate)
- Table 5 Logarithmic Residual Processing Coefficient (Rock-Exposure Zone)
- Table 6 Ratio Processing Coefficient (Rock-Exposure Zone)
- Table 7 Ratio Processing Coefficient for Enhancement of Alteration Zone

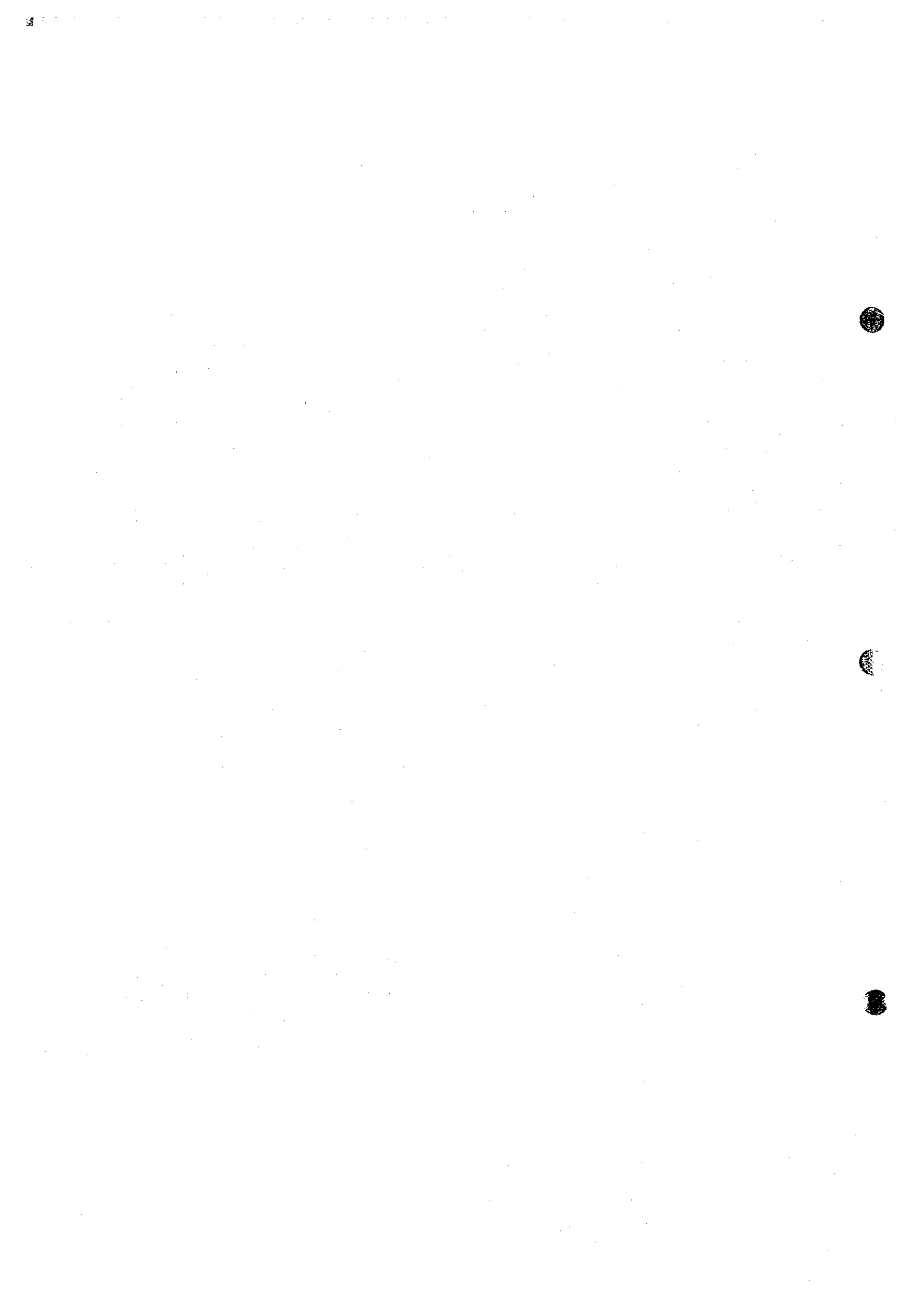
Table 8	Supervisor and Frequency in Arrival (20 in Higher Rank)
Table 9	Groups, Their Frequency in Arrival and Logarithmic Residual Processing Value
Table 10	Optical Parameters Used for Isograin Model
Table 11	Gradient Coefficient of Bivariate Plot in Two Bands
Table 12	Pseudo Reflectance Conversion Coefficient

APPENDICES

Appendix 1	Description of Alteration Zones Extracted from LANDSAT TM Images and Characteristics of Mineral Assemblage Identified from JERS-1 OPS Images
Appendix 2	Material for Presentation of Results of Satellite Data Analysis in Buenos Aires and Lecture Material for Seminar on Remote Sensing and Photogeologic Interpretation Methods in San Juan

LIST OF ATTACHED FIGURES IN SEPARATE VOLUME

- Configuration of Sub-Areas in the U-Image
- Legends for Classification of Alteration Zone and Identification of Alteration Minerals
- Attached Figures of Sub-Areas U-1 to U-14
 - False Color Image (358)
 - Enhanced Ratio Image (ratio)
 - Classification of Alteration Zone (classification)
 - Identification of Alteration Minerals (mineral)
- Configuration of Sub-Areas in the L-Image
- Legends for Classification of Alteration Zone and Identification of Alteration Minerals
- Attached Figures of Sub-Areas L-1 to L-28
 - False Color Image (358)
 - Enhanced Ratio Image (ratio)
 - Classification of Alteration Zone (classification)
 - Identification of Alteration Minerals (mineral)



CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1 Objetivo del análisis

El presente análisis forma parte integral del Estudio Básico de Cooperación para el Desarrollo de Recursos y tiene por objetivo identificar las zonas de alteración promisorias. Para ello, se ha propuesto trabajar sobre la base de las zonas de alteración identificadas en el análisis de la primera etapa del estudio, y clasificarlas en pequeños grupos a fin de conocer la combinación de los minerales aplicando los datos JERS-1 OPS.

1.2 Alcance del análisis

El Area del Estudio fue seleccionada del área analizada en la primera etapa del estudio (Figura 1). Tal como se muestra en la Figura 1, el Area del Estudio se extiende a lo largo de la frontera entre Argentina y Chile con rumbo NS y se divide en dos sectores siguientes: el primero abarca las latitudes S27°20' y S29°20', y el segundo las latitudes S 29°50' y 32°20' (en adelante, se denomina el "Area del Estudio" al conjunto de los dos sectores). El Area del Estudio está cubierta por nueve escenas de las imágenes JERS-1 (Figura 2), que ocupa unos 17.100 km² en la parte Norte, y unos 30.400 km² en la parte Sur, sumando en total 47.500 km² aproximadamente.

1.3 Datos utilizados

(1) Imágenes JERS-1 OPS

En el análisis de las imágenes de esta etapa del estudio, se utilizaron las imágenes JERS-1 OPS con sensores de tres bandas en la región infrarroja de ondas cortas de 2,0 a 2,4µm, a fin de hacer una clasificación detallada de las zonas de alteración identificadas mediante LANDSAT TM y evaluar la composición mineralógica.

Todos los datos utilizados fueron tomados por JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) y grabados en CCT (cinta procesable por computadora) sistemáticamente corregida. Estos fueron obtenidos del Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) a través de National Space Development Agency of Japan (NASDA). Además de las nueve escenas utilizadas en el análisis, fueron obtenidas cuatro escenas más de las áreas aledañas. En la Tabla 1 se entregan las informaciones sobre fecha de obtención, posición solar, etc. de estas 13 escenas.

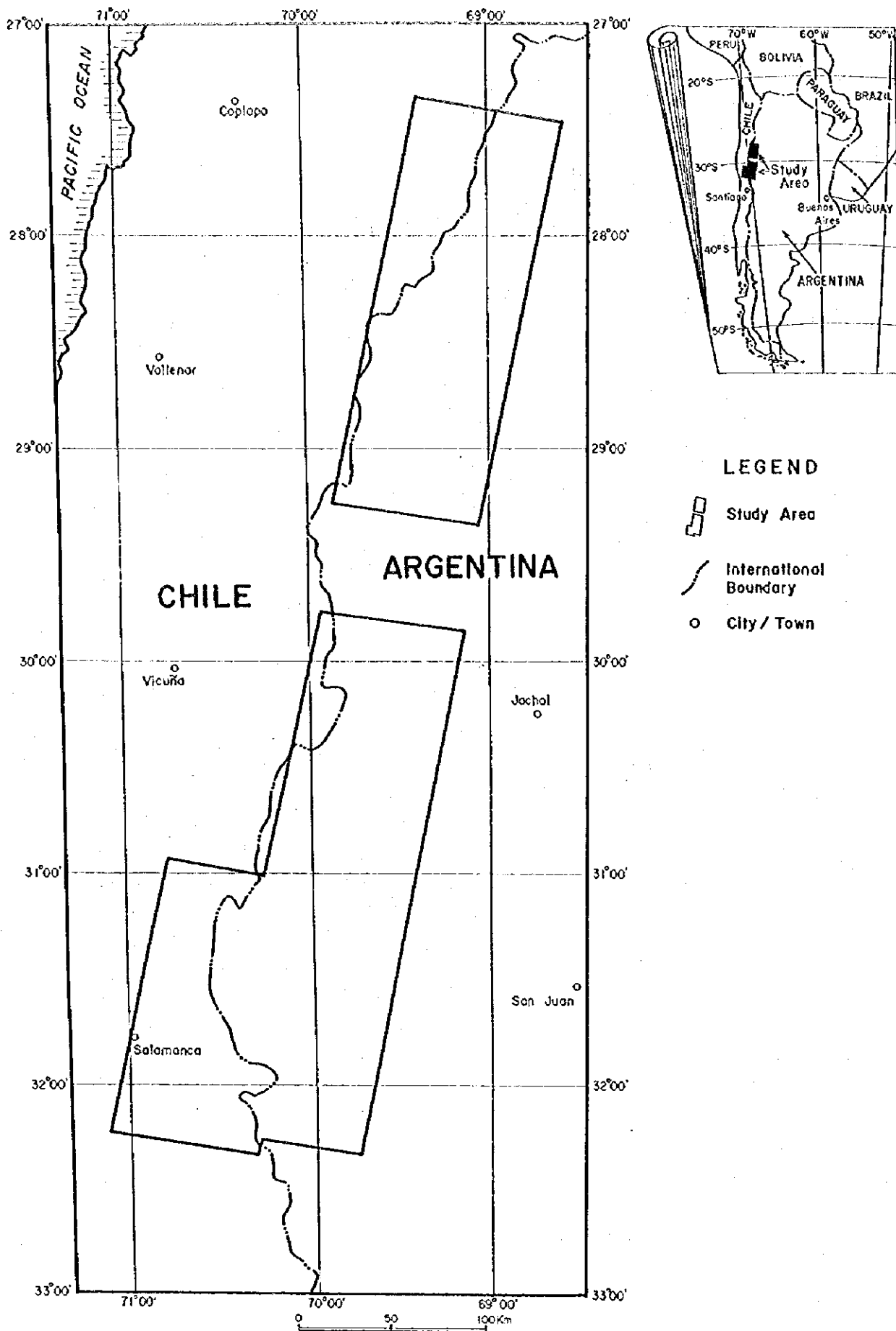


Fig. 1 Location Map of the Study Area

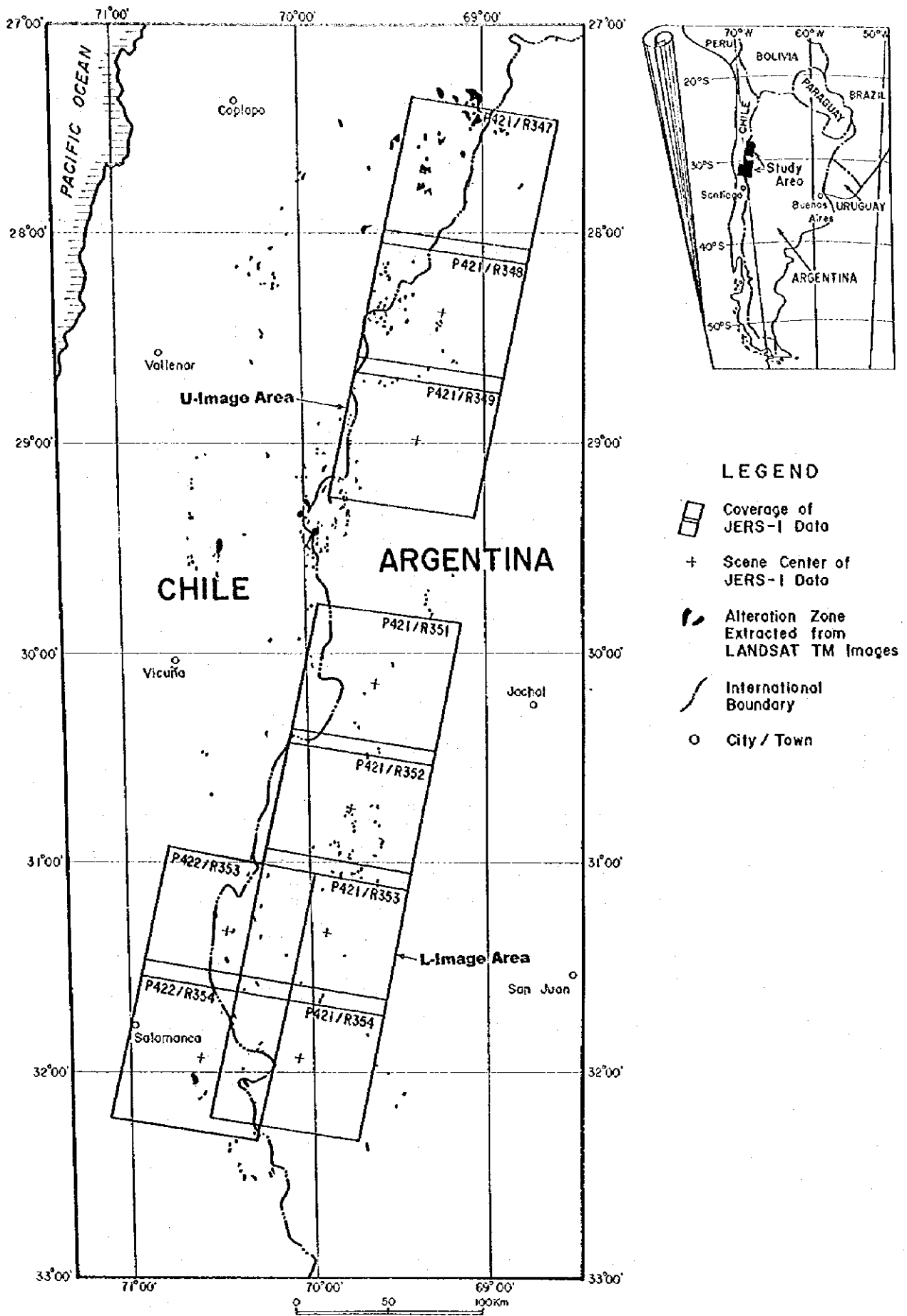


Fig. 2 Configuration of the Images Used

Con el fin de obtener las imágenes apropiadas para el análisis, se solicitó la información a NASDA, a través de ERSDAC, sobre la disponibilidad de los datos de JERS-1; concretamente de las pistas 421 y 422, entre las filas 347 y 354. Con el fin de seleccionar los datos más apropiados para el análisis de imágenes, teniendo en cuenta los factores como la disponibilidad de datos, cobertura de nieve y de nubes, y la fecha de obtención, etc., se seleccionaron prioritariamente las imágenes tomadas en verano con sensibilidad normal (normal gain), y que presentan poca cobertura de nubes. Sin embargo, lamentablemente no se ha podido realizar el análisis de las P421/R350 y P422/R351 - 352, debido a la falta absoluta de las imágenes.

Table 1 Coordinates, Acquisition Date and Sun Position of Each Scene

Nombre del Area	Orbita		Fecha de obtención de datos	Cobertura de nieve	Cobertura de nube	Posición del sol	
	Pista	Fila				Altitud	Azimut
Cerro Pandango	421	347	1993/01/24	10	7	62	77
Cerro Nacimiento del Jagüe	421	348	1993/01/24	5	3	62	76
Río Santa Rosa	421	349	1993/01/24	5	13	62	75
Todecum	421	351	1993/11/28	10	9	67	72
Villa Nueva	421	352	1993/11/28	5	9	67	70
Río Calingasta	421	353	1993/11/28	20	17	67	69
Río Blanco	421	354	1993/11/28	20	12	66	68
	422	347	1993/06/06	90	7	34	27
	422	348	1993/06/06	85	6	33	27
	422	349	1993/06/06	90	18	33	27
	422	350	1993/06/06	90	20	32	27
Laguna Chica	422	353	1993/11/29	15	0	67	70
Salamanca	422	354	1993/11/29	15	0	66	68

Las celdas sin nombres corresponden a las imágenes tomadas en invierno.

Altitud: Altitud del sol en el centro de la imagen (unidad: °)

Azimut: Azimut del sol en el centro de la imagen (calculado en el sentido de las manecillas de reloj, con el Norte 0°)

Para las cuatro escenas correspondientes a P422/R347 - R350 tomadas en invierno, se han obtenido además las imágenes de verano (12 de diciembre de 1992) tomadas con alta sensibilidad. Pese a haber intentado analizar estos datos, se ha llegado a la conclusión de que la calidad de las imágenes no es la más idónea por las siguientes razones: por la saturación de los datos a un nivel de 20 a 50% por haber sido tomado con elevada sensibilidad; los ejes de las imágenes están oscuros, lo que indica que la sensibilidad del sensor no ha sido debidamente corregida; y, porque presentan notorio velado por la luz que se debe a la respuesta retardada del sensor de pixel de alta intensidad en las imágenes de la región infrarroja de ondas cortas. Por lo tanto, sólo se utilizaron los datos obtenidos en verano, y no las imágenes tomadas con alta sensibilidad.

Cabe recordar que los datos de P422/R349 presentaban fallas parciales de líneas.

(2) Informes disponibles

Para el análisis integral y la preparación del presente Informe, se revisaron las literaturas disponibles (incluyendo los mapas geológicos, y de distribución yacimientos) que se enumeran al final del Informe.

1.4 Metodología del análisis

El método de análisis que utilizan los datos de JERS-1 OPS, consiste generalmente de las siguiente ocho fases. Por lo general, la búsqueda de los datos de satélite útiles para el análisis requiere de no poco tiempo. Sin embargo, en este caso se ha considerado la búsqueda de los datos como un trabajo preparativo indispensable para el análisis, y no se incluye entre los siguientes ítems.

- (1) Corrección del sistema y de la cantidad de radiación
- (2) Preparación de los mosaicos sin costura y conversión geométrica
- (3) Generación de las imágenes de análisis espectral
- (4) Identificación de las zonas de alteración y "rationing" para resaltar las zonas de alteración
- (5) Clasificación de las zonas de alteración
- (6) Deducción de minerales mediante el método de coincidencia de comportamientos (pattern-matching)
- (7) Levantamiento en terreno y segundo análisis sobre la base de los resultados del levantamiento
- (8) Preparación del informe

En la Figura 3 se muestra el flujograma del procesamiento y análisis de las imágenes realizado en esta fase del Estudio. Sobre la metodología del estudio del (1) al (6) se detalla en las respectivas secciones del Capítulo 2.

1.5 Analistas

Yoneharu MATANO	Procesamiento de datos y generación de imágenes (JMEC*)
Masataka OCHI	Análisis y preparación del informe (JMEC*)
Tomoji SANGA	Procesamiento de datos, generación de imágenes, análisis y preparación del informe (JMEC*)
Jiro KAMADA	Procesamiento de datos y generación de imágenes (JMEC*)

* JMEC: Japan Mining Engineering Center for International Cooperation

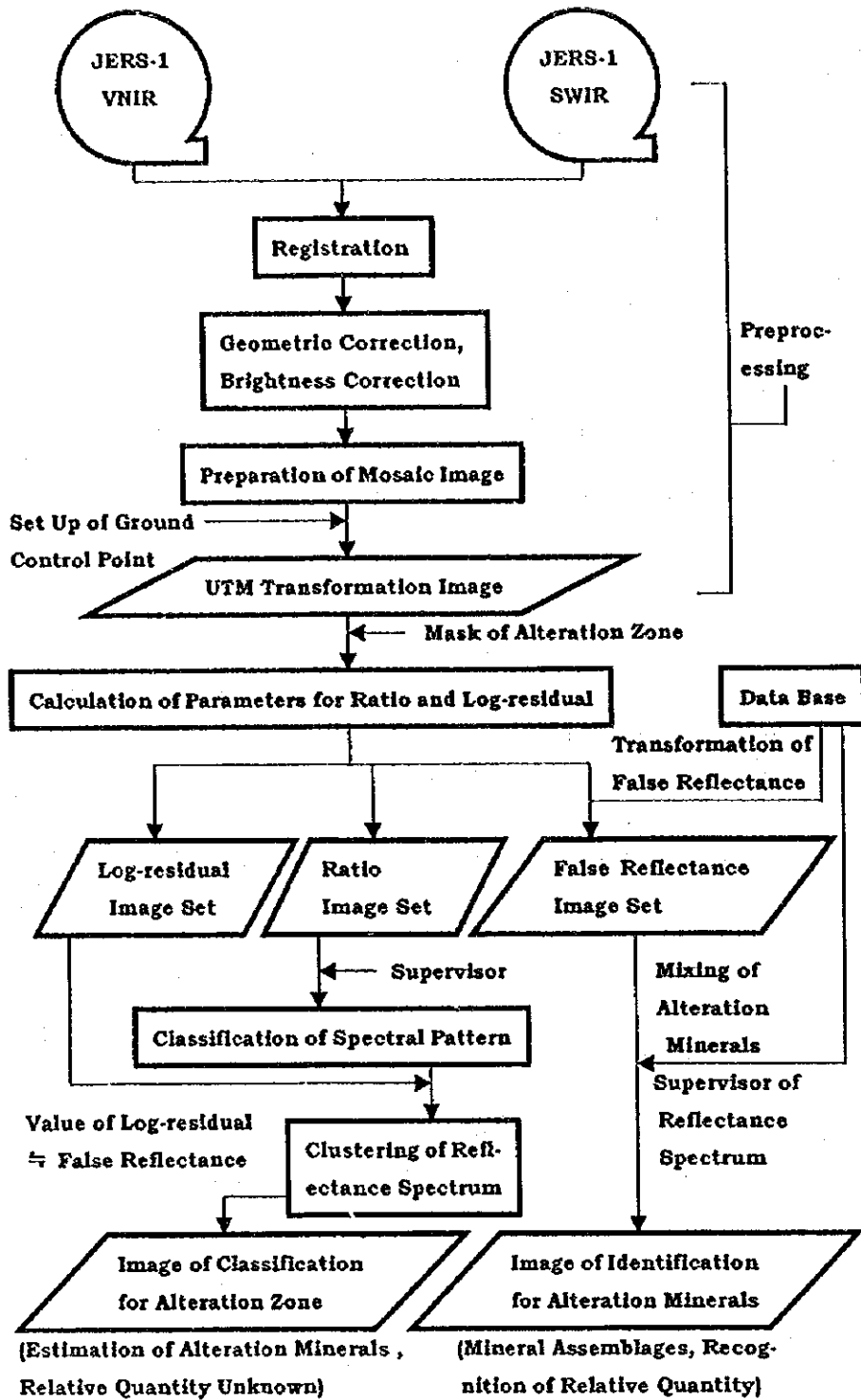


Fig. 3 Flow Chart of the Whole Image Processing and Analysis

CAPITULO 2

PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE IMAGENES

2.1 Generalidades

2.1.1 Antecedentes

En el primer año del estudio, se realizó el análisis de imágenes de una amplia región (unos 650.000 km²) que se extiende con rumbo SN, a lo largo de la frontera entre Argentina y Chile, y que abarcaba desde Santiago, Chile, hasta Mendoza, Argentina (véase la Figura 4). El análisis del primer año consistió en la interpretación fotogeológica de las imágenes de LANDSAT TM del Area del Estudio, cuyos resultados fueron cotejados con otros datos disponibles para evaluar de manera integral la geología, la distribución de los yacimientos, criaderos, etc. y así identificar las zonas promisorias.

Para ello, se utilizaron los datos de las imágenes de LANDSAT TM para realizar el análisis geológico y estructural y la identificación de las zonas de alteración del Area del Estudio, tomando en cuenta la geología superficial. Con estas imágenes, se generaron las imágenes de falso color (AVR = 145) de escala 1:250.000 y las imágenes "ratio" (AVR = 3/1, 5/4, 5/7) y se procedió a la fotointerpretación geológica. Además, a fin de interpretar las estructuras regionales, se redujeron las imágenes a 1/4, y se generaron las imágenes mosaico (imágenes de falso color y de "ratio") de las 23 escenas.

2.1.2 Método de deducción de los minerales de alteración

Muchos de los minerales que componen las zonas de alteración muestran espectros de absorción peculiares en la gama de infrarrojo de ondas cortas entre 1,0 y 2,5 μ m, tal como se muestra en la Figura 5, lo cual se debe a la vibración armónica y mixta de la vibración normal de las moléculas de agua (H₂O), iones de hidróxido (OH), de carbonato (CO₃) y del ácido sulfúrico (SO₄). Por lo tanto, de las características del espectro de absorción se deduce la presencia de los minerales de alteración como caolinita y alunita. Como sensores ópticos con la longitud de banda para observar la gama de infrarrojo de ondas cortas, se mencionan el LANDSAT TM (bandas 5, 7) y JERS-1 OPS (bandas 5, 6, 7 y 8). En el caso de la Banda 7 de LANDSAT TM, si bien se distinguen los minerales de carbonato de los minerales arcillosos, no permite deducir las especies de minerales arcillosos por cubrir una gama bastante amplia entre 2,08 y 2,35 μ m. Mientras tanto, en el caso de JERS-1 OPS, la Banda 6 cubre entre 2,01 y 2,12 μ m, la Banda 7 entre 2,13 y 2,25 μ m y la Banda 8 entre 2,27 y 2,40 μ m, por lo que de la posición y la profundidad

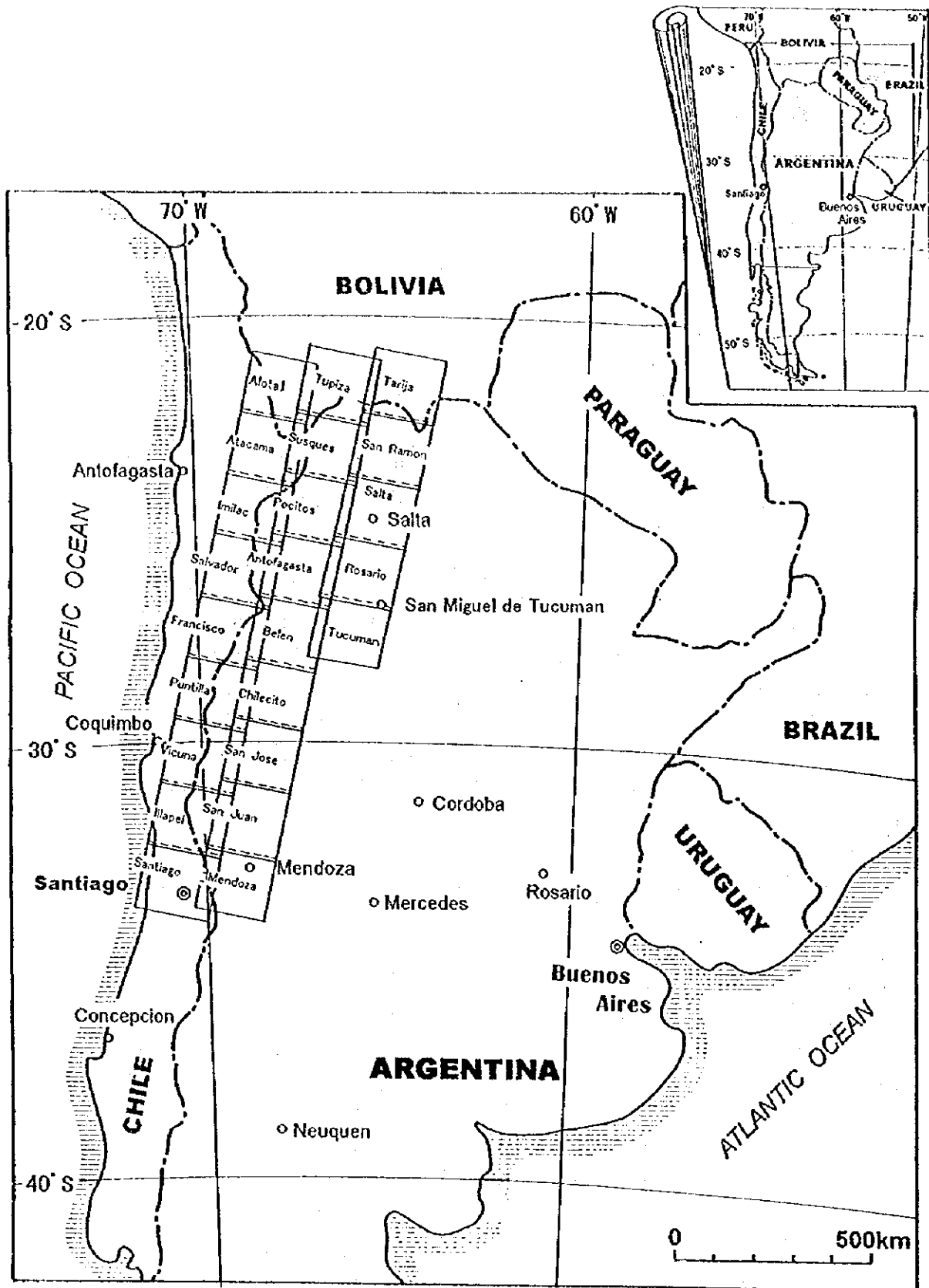


Fig. 4 Location Map of the Phase-1 Study Area

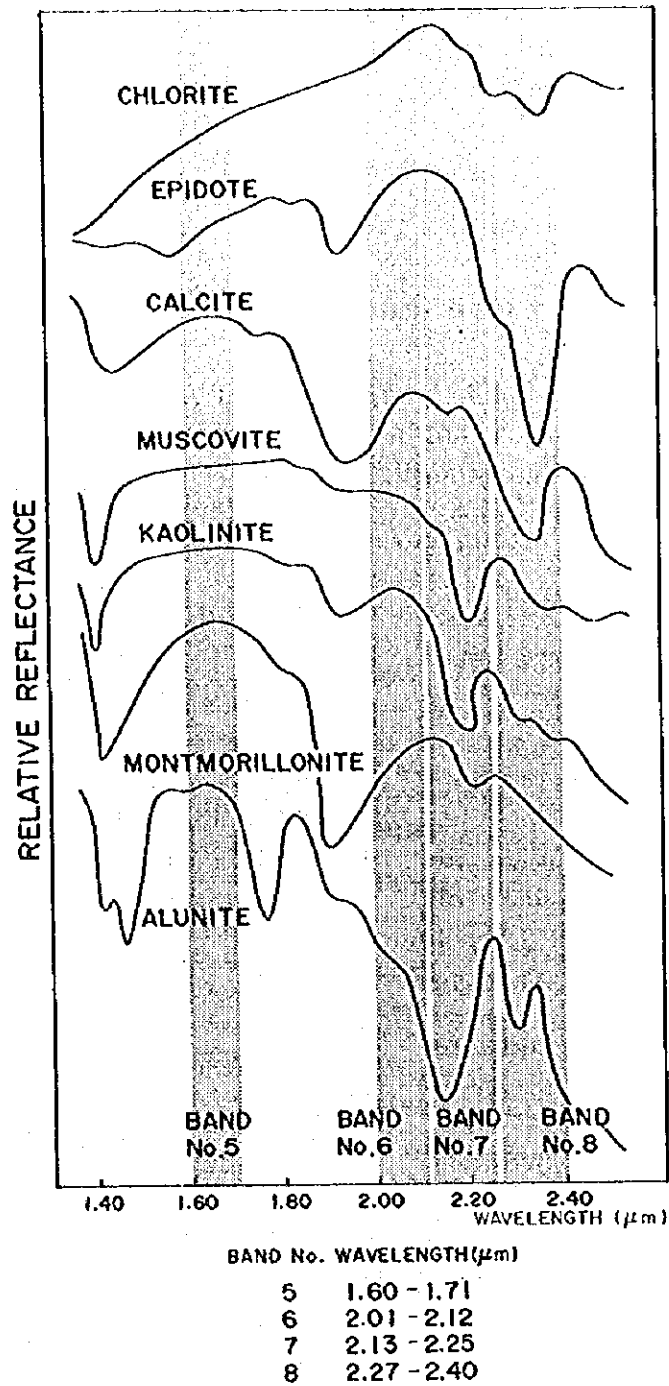


Fig. 5 Spectral Reflectance Curves of Clay Minerals in the Short Wave Infrared Region and Position of JERS-1 Bands

de la absorción (comportamiento de absorción) se puede distinguir hasta cierto grado los minerales arcillosos. En la Figura 6, se muestran los minerales de alteración más representativos, calculados con el factor de reflectancia de la longitud de onda de observación de JERS-1 OPS. Tal como demuestra esta figura, existe una notoria diferencia entre los modelos de absorción de yeso, alunita, caolinita y sericita.

2.2 Imágenes utilizadas

2.2.1 Coberturas de nieve y de nube

Para confirmar la calidad de las imágenes, el volumen de nube y de nieve, de las escenas indicadas en la Tabla 1, se generaron las imágenes de falso color (AVR= 358) según las escenas (Figuras Anexo 3 a U-1a, etc.). Dado que el factor de reflectancia de las nubes es alta en todas las longitudes de ondas, éstas aparecen blancas en las imágenes de falso color con esta combinación de bandas. La nieve aparece en colores entre azul oscuro a azul porque la absorción es mayor en el lado de la onda larga que la Banda 3. Esta combinación de bandas es válida no sólo para interpretar las zonas de alteración y la geología, sino también para la discriminación de nubes y nieve.

Estos estudios aclararon que casi no aparecen las nubes en las 9 escenas, excepto P422/R347-R350. En cuanto a P422/R347-R350, aparecen nubes finas en el centro de la imagen (cerca de la frontera entre Argentina y Chile). La cobertura de nieve aparece en las montañas altas que representan un 10% de toda la superficie, salvo en la imagen de P422/R347-R350 tomada en invierno.

En la imagen P422/R347-R350, una buena parte de la superficie (más de 60%) está cubierta por la nieve. Posteriormente, para estas áreas, se procedió a la generación de las imágenes de residuales logarítmicos (AVR= 678) que reflejan sensiblemente la nieve. Estas imágenes aclararon que incluso las áreas que parecían no estar cubiertas de nieve, muestran el espectro de reflectancia característico que indica mayor absorción en el lado de la onda larga que la Banda 3. Esto indica la presencia de capas finas de nieve en estas áreas, y que la influencia de la nieve se extiende en toda la imagen. Es así como se concluyó que es imposible realizar el análisis espectral de la imagen P422/R347-R350 tomada en invierno.

2.2.2 Calidad de las imágenes

Las imágenes de JERS-1 OPS en la gama de infrarrojo cercano son de buena calidad, y tampoco se observa la variación periódica de polarización en cada cuatro líneas.

Mineral	Reflectance(%)						
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Ser	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
Qtz	40.0	40.3	40.7	41.2	41.5	41.3	41.4
Kao	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
Gyp	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2
Goe	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3
Cal	40.2	40.4	40.5	41.8	42.9	38.9	25.2
Aln	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4

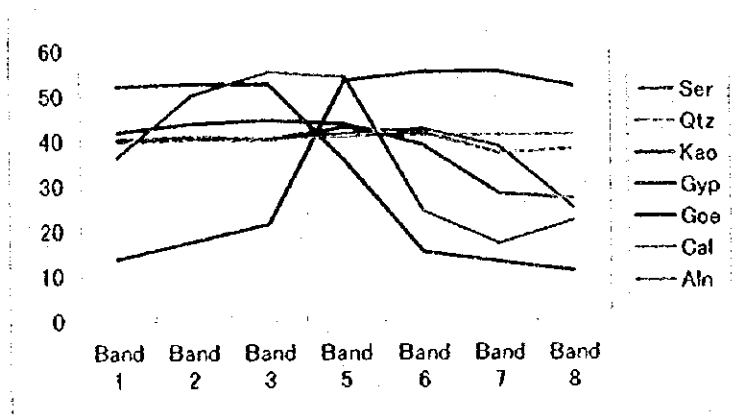
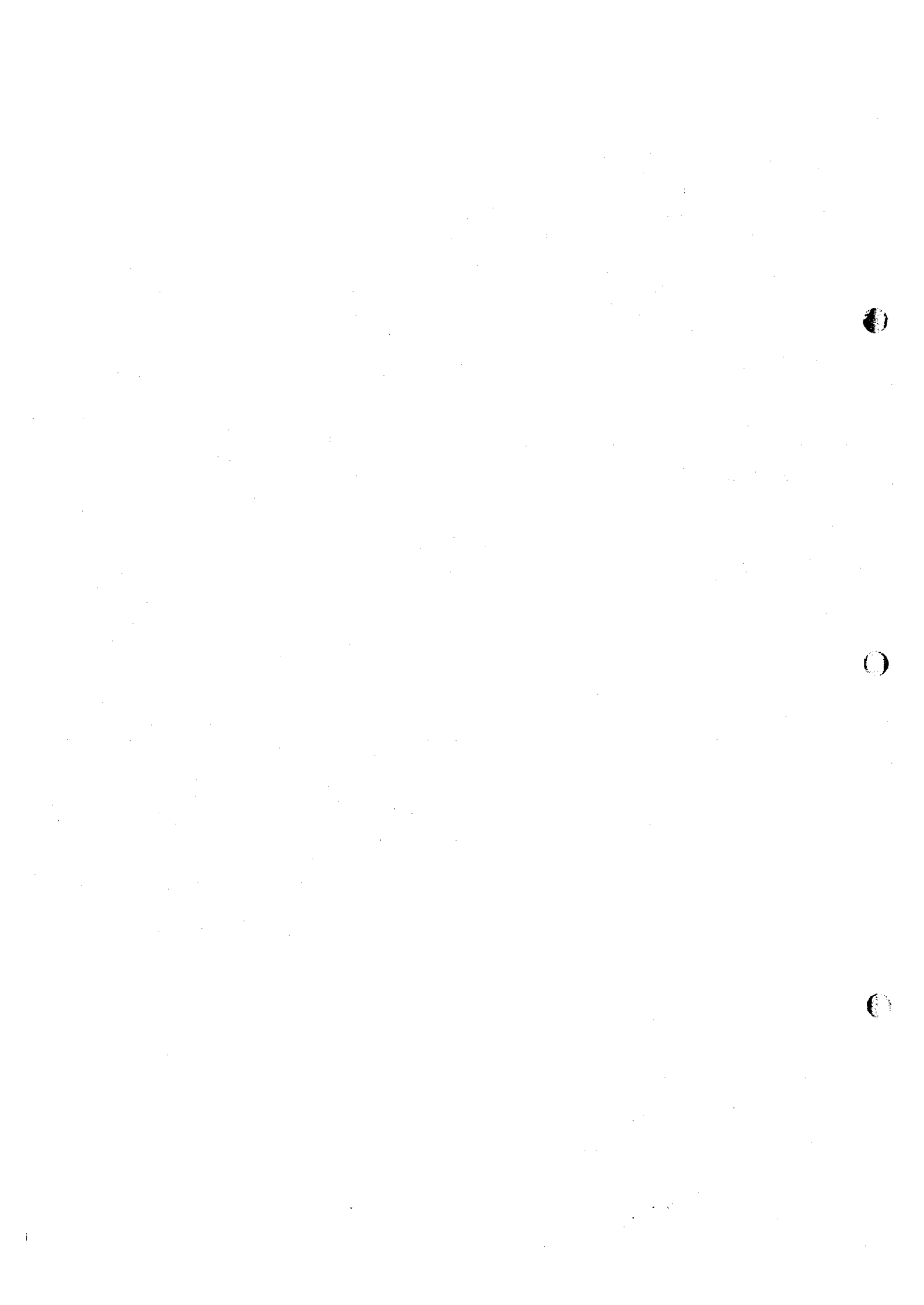


Fig. 6 Spectral Patterns of Clay Minerals in the Region of Wave Length of JERS-1



En la región infrarroja de ondas cortas, la Banda 5 arroja buenos resultados, pero no ocurre así con las bandas de 6 a 8, tal como se puede ver en la Figura 7. El defecto se debe principalmente al velado de luz que aparece en la parte baja del pixel de alta intensidad provocado por el retraso de la respuesta de los sensores. Dado que el grado de tardanza difiere entre los sensores de ambos lados, es diferente también el largo del velado (la cola) de los pixeles impares y pares, lo que hace aún más difícil interpretar los detalles de las imágenes.

En la imagen P422/R349, apareció una falla horizontal de imagen en la gama de infrarrojo de ondas cortas. La falta es de unas cinco líneas, para la que se realizó la interpolación lineal con los pixeles de arriba y de abajo a manera de mejorar su apariencia.

2.3 Corrección de sistema y de cantidad de radiación

2.3.1 Corrección de sistema

Las imágenes de JERS-1 OPS presentan dos problemas inherentes. El primero es el de velado de luz de los pixeles de alta intensidad debido al retardo de la respuesta del sensor en la gama de infrarrojo de onda corta. El sensor de esta región está integrado por dos sistemas; las imágenes de la gama de infrarrojo de ondas cortas son generadas alternando ambos sensores por cada pixel. Dado que el retraso de respuesta de ambos sistemas difiere, el fenómeno se hace notorio en CCD de las hileras impares que pares como se observa en la Figura 8 (Agencia Nacional del Desarrollo Espacial del Japón- NASDA, 1993). Por lo tanto, en una imagen compuesta alternando ambas hileras, como se muestra en la Figura 8, aparecen los ruidos de forma de peine mirando hacia abajo en el límite entre la intensidad alta y baja. En la imagen del nivel 0 antes de someter a la corrección geométrica, estos ruidos de forma de peine miran hacia abajo siguiendo la disposición de sensor. En cambio, en las imágenes corregidas geométricamente de nivel 2 ó más, aparecen las franjas inclinadas, tal como se muestra en la Figura 8. Esto es porque la re-disposición de imágenes hace que la imagen del nivel 2 deforme la imagen del nivel 0 en paralelogramo.

Los ruidos en forma de peine producidos por la tardanza en la respuesta de la gama de infrarrojo de ondas cortas y los consecuentes ruidos de franjas inclinadas pueden ser eliminados, tal como se muestra en la Figura 8, utilizando el filtro con contrapeso (Agencia de Minería Metálica del Japón, 1995, 1996). En el caso de procesar las imágenes desde el nivel 0, la escena será de mejor calidad al interpolar los pixeles impares con los pares. Sin embargo, en el presente Estudio no se aplicó este método dado que se utilizaron las imágenes del nivel 2.

El otro problema de las imágenes de JERS-1 OPS consiste en que las imágenes entre las bandas de la gama de infrarrojo de ondas cortas, no son

exactamente coherentes con las de la gama de infrarrojo visible y cercana. Las imágenes de JERS-1 OPS están integradas por dos radiómetros para las gamas de infrarrojo visible y cercano, y de infrarrojo de ondas cortas. El primero consiste en el método de dispersión por prisma que toma las imágenes de un mismo punto inmediatamente abajo en la misma hora, mientras que el segundo consiste en el método de dispersión por filtro espectral en el que las bandas toman las imágenes de diferentes puntos en una misma hora. Teóricamente, si la corrección es correcta, no se producen el desplazamiento de píxeles en ambas imágenes, lo cual no ocurre en muchos casos.

El desplazamiento de uno a tres píxeles mencionado no influye mucho en la calidad de las imágenes de falso color, pero sí en las imágenes de "ratio" que se basa sobre la relación de brillo entre bandas. En este último caso, se forman las franjas de tonos muy variados en los límites de materiales, y entre las partes soleadas y sombreadas. Es por este motivo que se ha desarrollado el método de registro basado sobre el método de correlación con el uso de plantilla para corregir el paralaje entre las bandas (Agencia de Minería Metálica del Japón, 1995). Este método fue aplicado también en el presente Estudio para corregir el desplazamiento de píxeles.

En la Figura 9 se muestra el flujograma de los procedimientos de generación de imágenes en mosaico.

2.3.2 Corrección de la cantidad de radiación

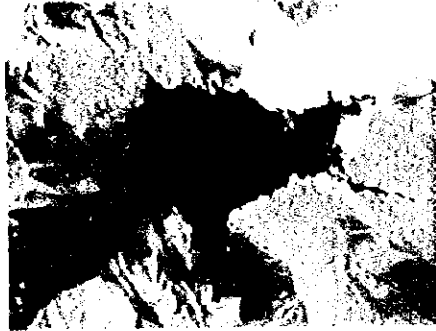
Los valores de brillo captados por los sensores ópticos como JERS-1 OPS son, en las gamas de rayos visible y del infrarrojo cercano, la reflectancia del rayo solar desde la superficie de la tierra, lo que plantea la posibilidad de identificar la naturaleza de los objetos terrestres por su respectivo espectro de reflectancia específica. La energía radiante espectral que incide en el sensor del satélite, es la luz solar reflejada por la superficie terrestre y que atraviesa la atmósfera. Por lo tanto, la energía radiante captada por el sensor incluye, además de la luz reflejada desde la superficie terrestre, la denominada "energía radiante de trayecto" que es la luz difusa y dispersa desde la atmósfera, y la denominada "luz celestial" que es la radiación difusa producida por la dispersión de la luz solar en la atmósfera y que incide omnidireccionalmente. Por lo tanto, cuando el sensor percibe la longitud de onda λ directamente hacia abajo, el valor aproximado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} K(\lambda) [\tau_a(\lambda) \{U(\lambda) + P(\lambda)\} \rho(\lambda) + b(\lambda)] d\lambda \quad (3-1)$$

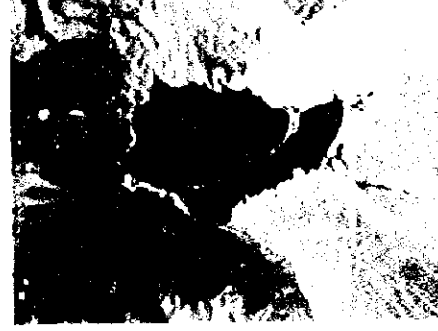
Donde,

P421/R347

Band 5



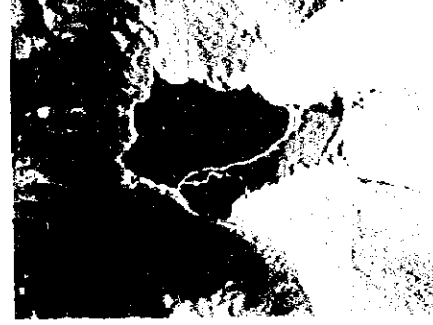
BGR 123



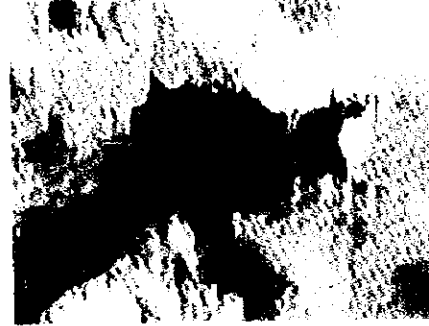
Band 6



Band 1



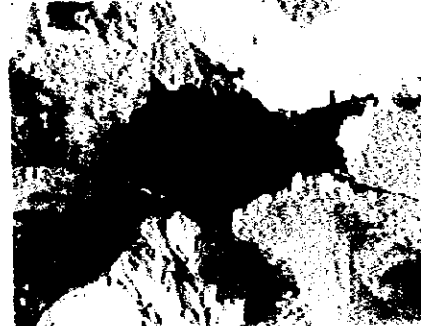
Band 7



Band 2



Band 8



Band 3



0 10km

Fig. 7 Examination of Image Quality on JERS-1 OPS



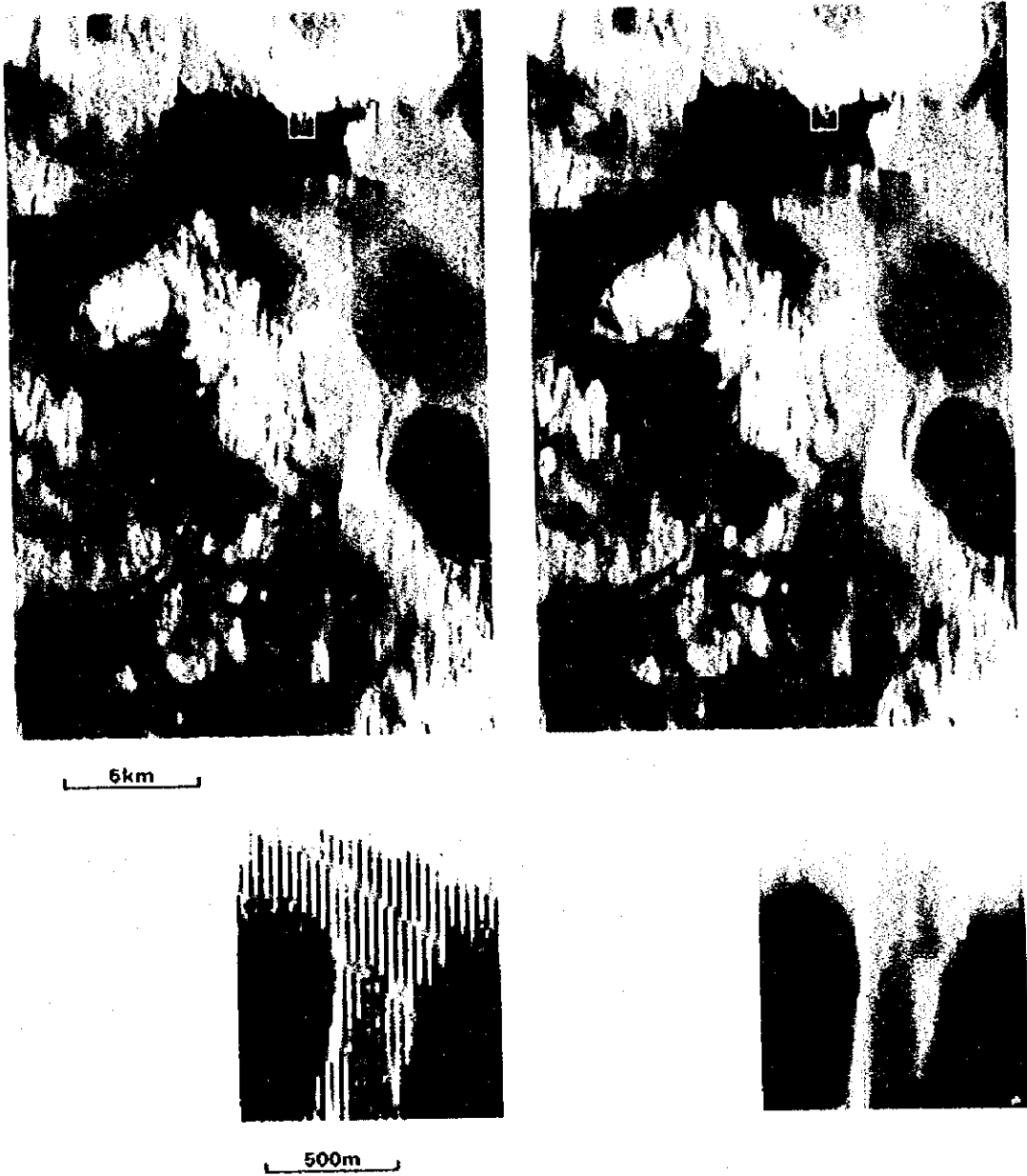
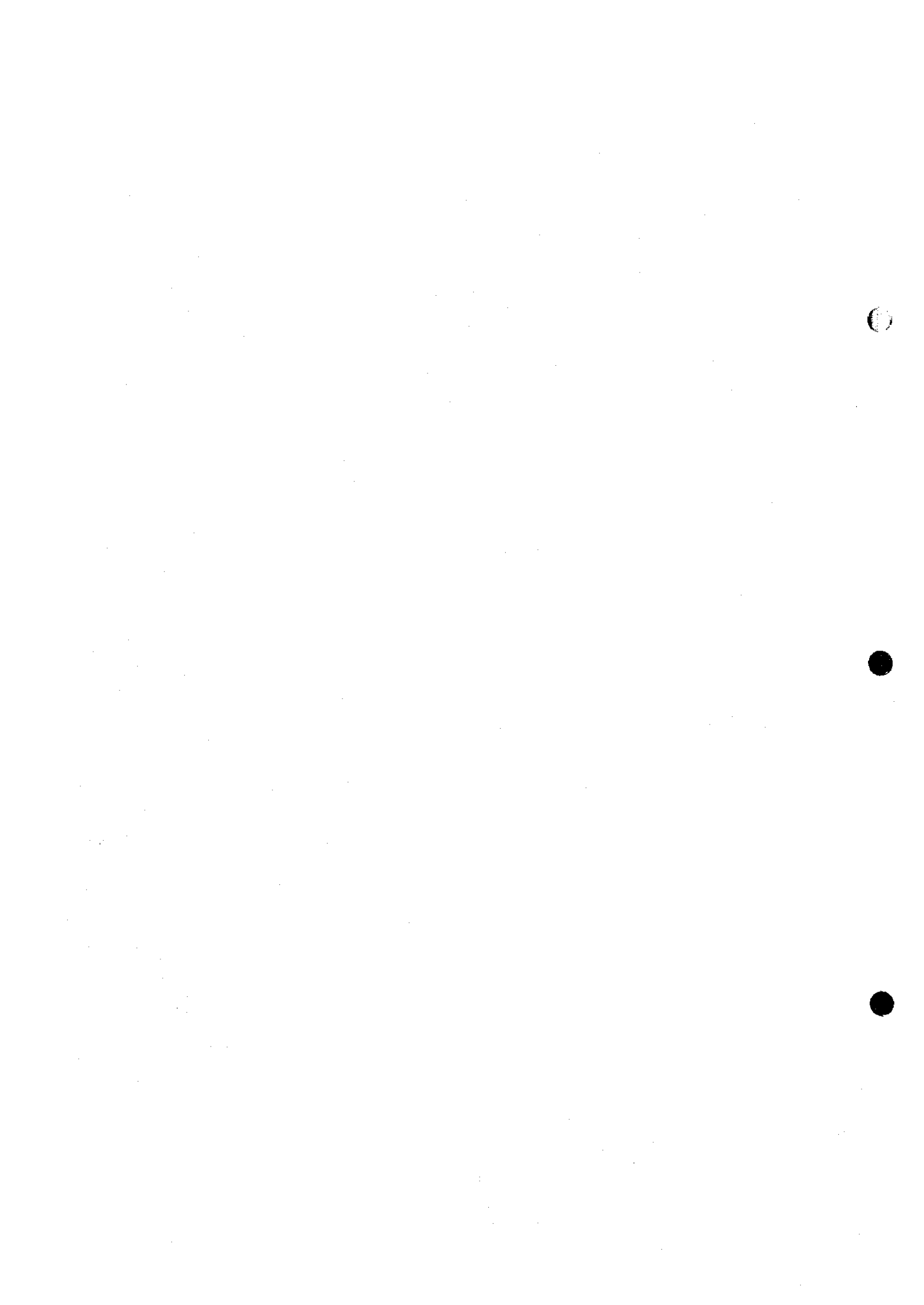


Fig. 8 Results of Weighted Filter on JERS-1 OPS



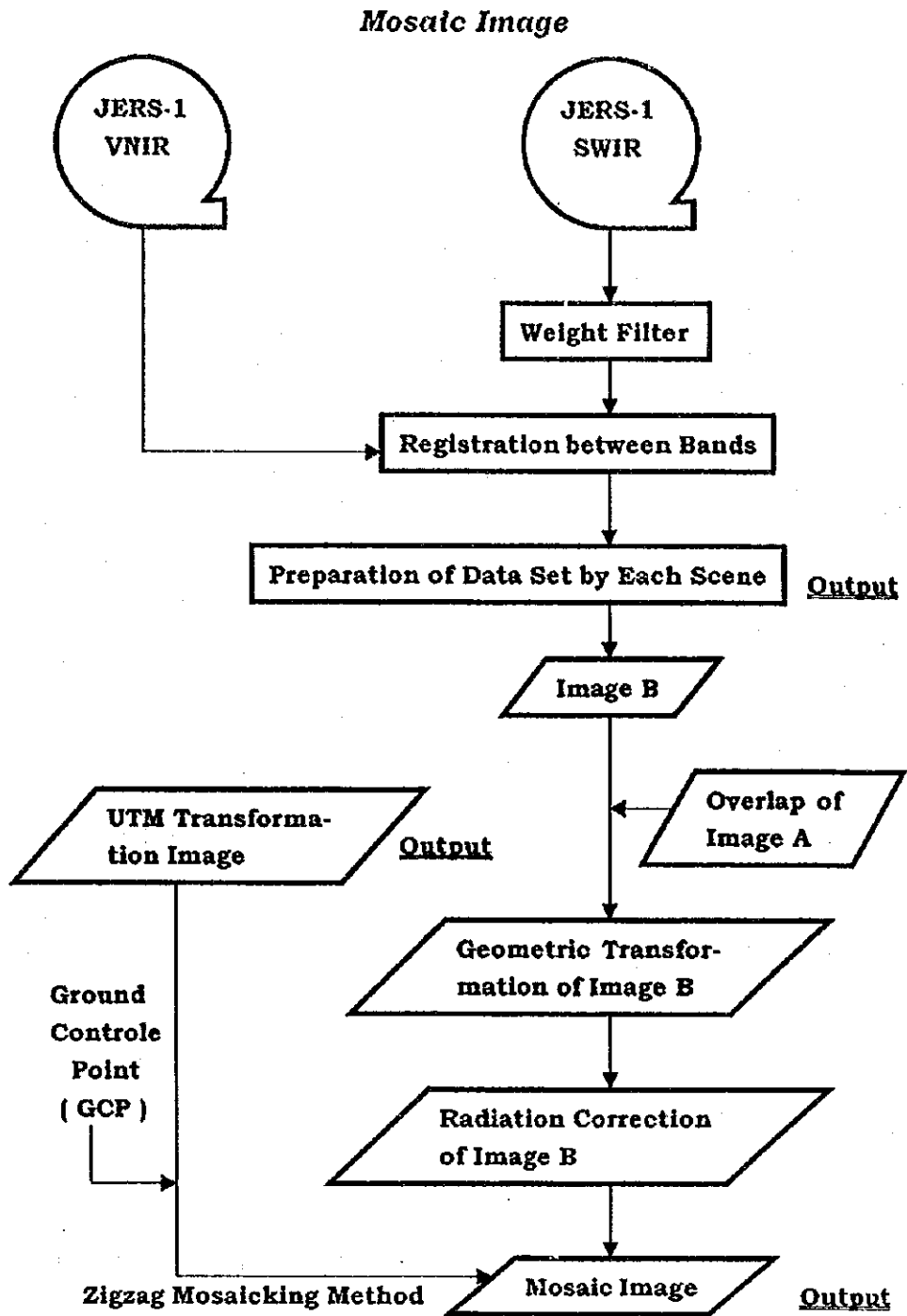


Fig. 9 Flow Chart of Mosaicking Procedure

- $I_s(\lambda_1, \lambda_2)$: Factor de energía radiante espectral entre las ondas λ_1 y λ_2 que penetran al sensor
 $K(\lambda)$: Características de respuesta del sensor
 $\tau_a(\lambda)$: Transmisividad de la luz reflejada en la atmósfera
 $U(\lambda)$: Energía radiante de la luz solar directa
 $\rho(\lambda)$: Factor de reflectancia de la superficie terrestre
 $b(\lambda)$: Radiación y difusión atmosférica entre el sensor y el objeto
 $P(\lambda)$: Energía radiante de la luz celestial que es la luz difusa inferior de la luz solar

De estos, $b(\lambda)$ es el factor de adición del brillo que incide al sensor, mientras que $U(\lambda)$, $P(\lambda)$ y $\tau_a(\lambda)$ son factores de multiplicación. La incidencia de estos varía según el vapor y aerosol en la atmósfera, lo cual plantea que los datos de un mismo objeto pueden variar si se toman en diferentes temporadas. De la misma manera, dado que la absorción y/o dispersión de luz dependen de las ondas, la relación de brillo entre las bandas del espectro de reflectancia de una determinada sustancia no es igual en las imágenes tomadas en diferentes temporadas. Por lo tanto, en el caso de procesar imágenes sin las debidas correcciones de la cantidad de radiación de cada banda, las mismas sustancias pueden aparecer en diferentes tonalidades, imposibilitando su comparación e identificación.

Por lo tanto, en este análisis se procedió a realizar la corrección de la cantidad de radiación de las imágenes tomadas en diferentes temporadas, sobre la base de las siguientes hipótesis:

- Las respuestas del sensor serán expresadas en modelo del rayo primario ($y = ax$) en función del brillo incidente.
- La transmisividad de la atmósfera a la luz reflejada es igual en todos los puntos de una imagen.
- La radiación y dispersión atmosférica entre el sensor y el objeto son iguales en todos los puntos de una imagen.
- La energía radiante de la luz celestial es igual en todos los puntos de una imagen.

(1) Corrección de la cantidad de luz incidente

La luz solar directa que incide sobre una determinada unidad de superficie puede variar según los lugares en una misma unidad. Es decir, si en el cono Sur la radiación solar proviene del Norte, la luz directa que incide en una unidad de superficie dentro de una imagen es mayor en el Norte que en el Sur. La corrección de la luz incidente se efectuó de manera tal que la altitud solar sea de 60° desde cualquier coordenada geográfica, azimut y altitud del sol de cada uno de los pixeles dados en una imagen.

(2) Corrección del factor de reflectancia direccional

Se define que la reflectancia es 1 cuando se observa verticalmente la luz reflejada que incide verticalmente en un objeto de reflectancia difusa perfecta. Al cambiar la posición de observación de vertical a horizontal en estas condiciones, el factor de reflectancia se reduce dentro del rango de 1 a 0. La Figura 10 muestra el coeficiente de corrección de reflectancia direccional de basalto de la luna calculado de las imágenes. La Figura 10 muestra la curva de coeficiente de corrección de las longitudes de ondas de $0,415\mu\text{m}$, $0,90\mu\text{m}$ y $1,00\mu\text{m}$. Como se puede observar, el brillo del basalto de la luna observada desde un ángulo cenital de 30° , corresponde al 55% del brillo observado en dirección vertical.

El ángulo de vista horizontal de una imagen de JERS-1 OPS1 es de $7,4^\circ$ aproximadamente, lo cual plantea que cuando la luz solar penetra desde el lado derecho de la imagen como se indica en la Figura 11, el ángulo entre el sol - objeto-observador (ángulo de desfase) difiere aprox. $7,4^\circ$ entre derecha e izquierda, produciendo algo similar a cuando se ha observado el objeto de reflectancia difusa perfecta desde distintos ángulos. Este factor de reflectancia direccional difiere según los objetos y longitud de ondas y depende de los relieves topográficos, lo que imposibilita la corrección por cada pixel. Sin embargo, al comparar los extremos este y Oeste de una imagen (suponiendo que la posición del sol al lado este, azimut de 90° , altitud de 60° , que no existen relieves topográficos y que se distribuyen las sustancias semejantes a basaltos de la luna) se produce una disminución de brillo de un 4% al lado derecho (este) de la imagen donde se abre el ángulo de desfase. Por lo tanto, al unir dos imágenes en dirección E-O, suponiendo que el brillo es 1,0 en el extremo O de las imágenes adyacentes, éste se reduce por un 8% en el extremo Este, resultando en una imagen oscura en el lado este en comparación al lado Oeste.

Por lo tanto, se efectuó el estudio de la variación de los valores de brillo de las imágenes sometidas a corrección atmosférica utilizando la estadística para anular los efectos de relieves topográficos y las diferencias de las sustancias terrestres. El volumen de estadísticas fue calculado para todas las disposiciones en dirección E-O, después de calcular el promedio de brillo de los pixeles dispuestos en una hilera vertical (S-N). Luego, los valores medios de brillo en dirección E-O fueron representados en una gráfica y la pendiente de brillo fue traducido en el modelo del rayo primario aplicando el método del mínimo cuadrado. La Figura 12 es el gráfico de los valores medios de brillo de dirección E-O, donde no se reconoce la tendencia ascendente hacia la derecha (E) más notoria que cuando se realizó el mismo análisis en el primer año del estudio con los datos de LANDSAT TM. Probablemente, esto se deba a que la superficie estudiada ha sido más reducida en este estudio y la distribución desequilibrada de los elementos terrestres ejerció influencia sobre el volumen de estadísticas, ya que en la imagen utilizada para el cálculo la geología se hallaba dominada por las estructuras de

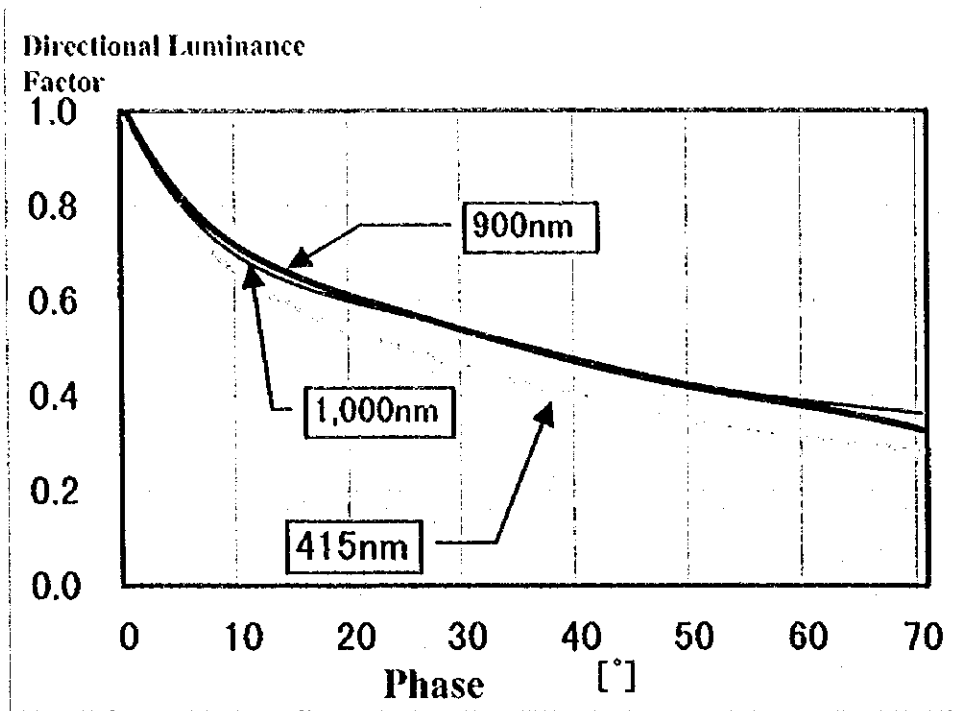


Fig.10 Curves of Directional Reflectance Correction on the Lunar Basalt

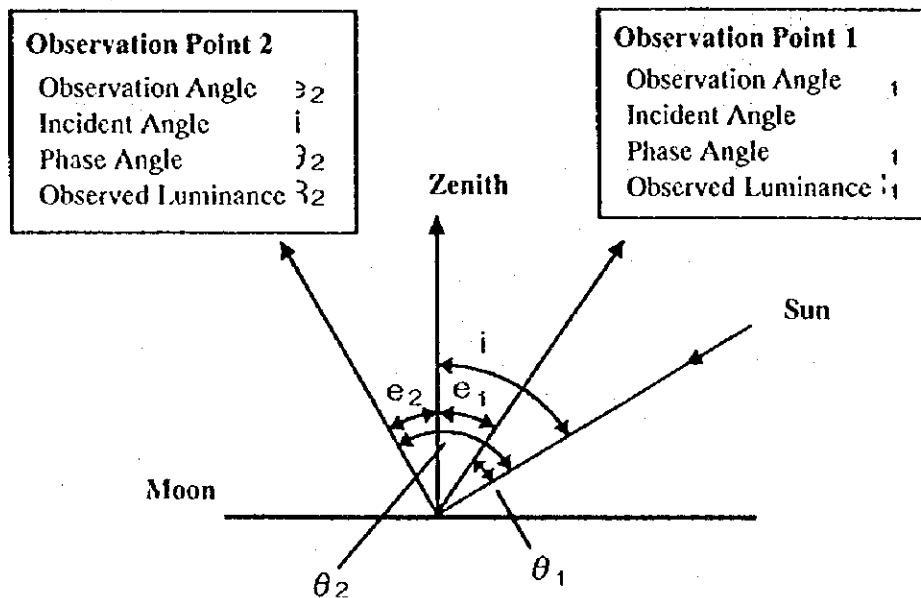


Fig.11 Definition of Directional Reflectance

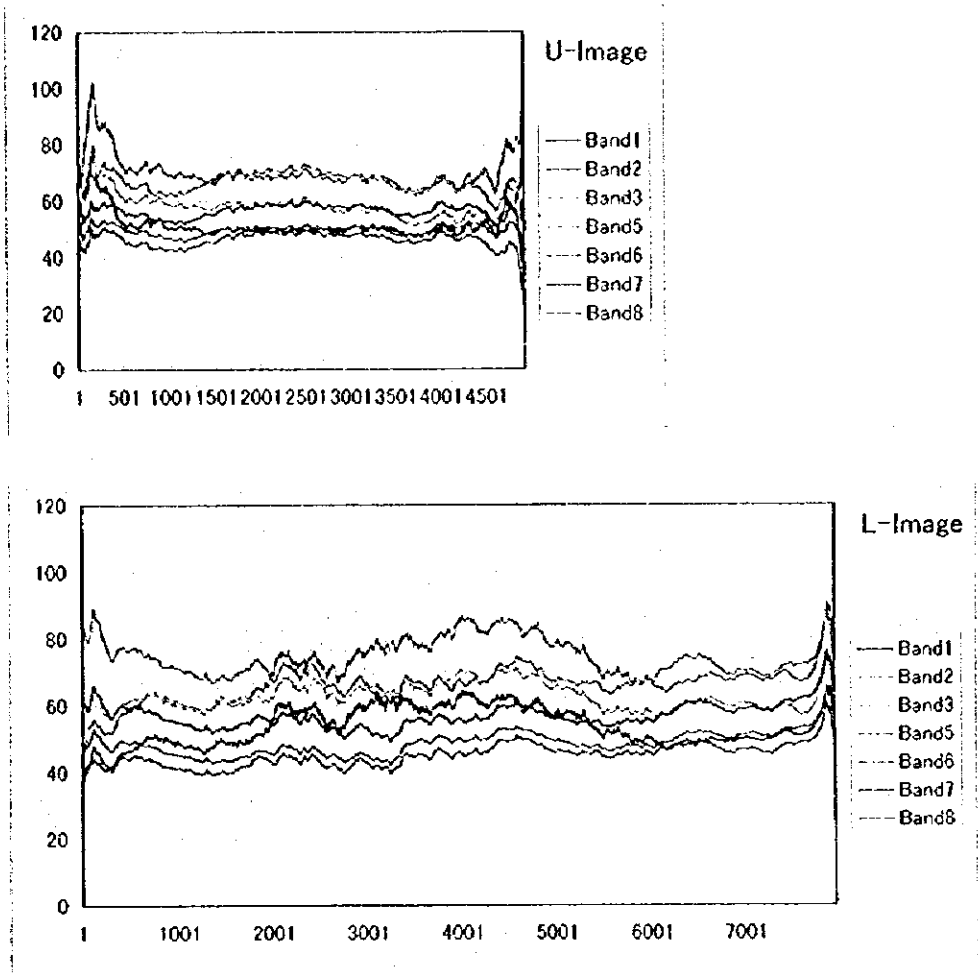
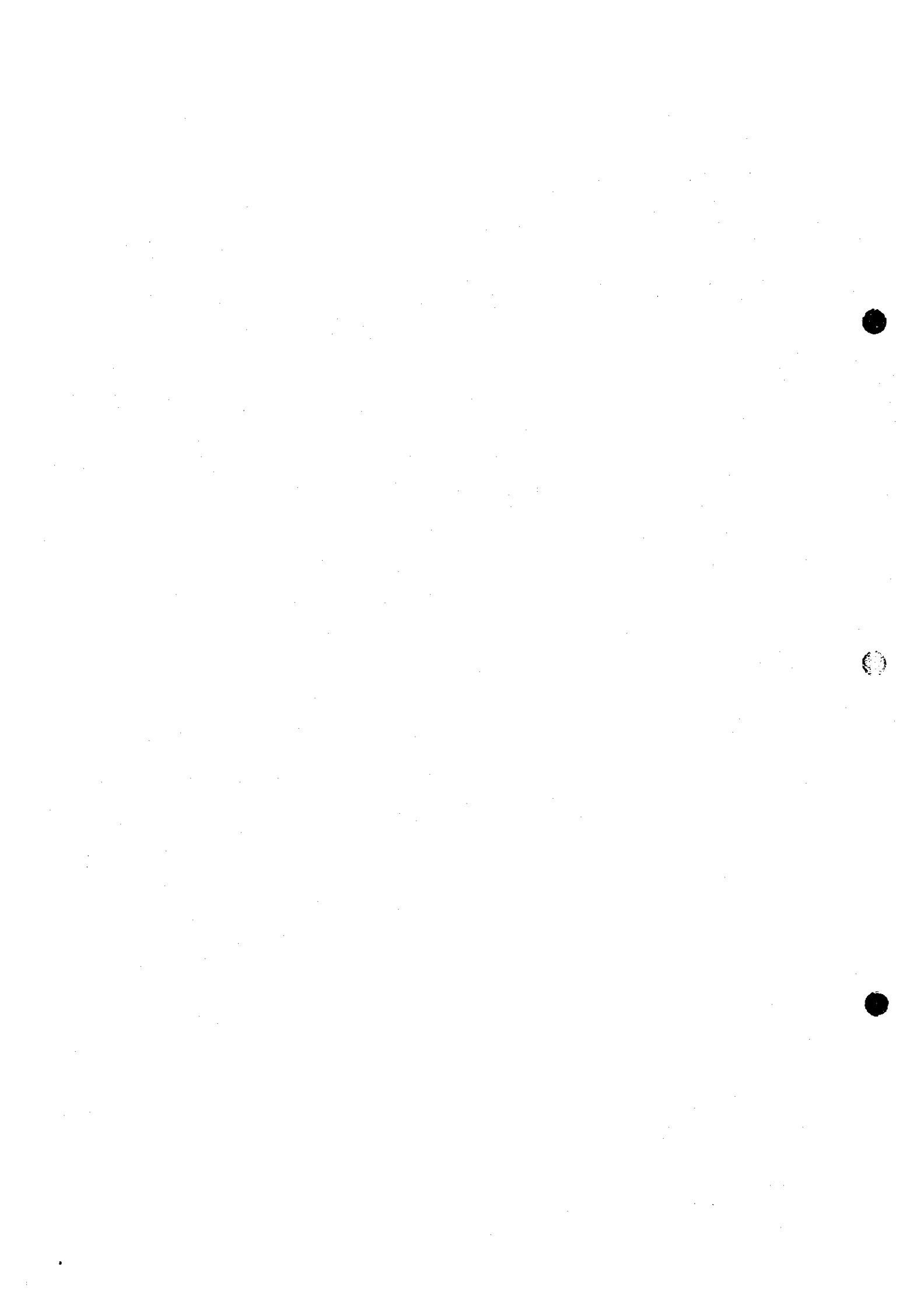


Fig.12 Results of Measurement on Brightness Gradient of Image



rumbo N-S que predominaba en la zona. Por ejemplo, en la parte Oeste (hacia Chile) de la imagen se distribuyen las rocas volcánicas de Cretácico a Terciario, mientras que en la parte Este (hacia Argentina), se distribuyen ampliamente las rocas sedimentarias pérmicas y en el extremo este los taludes del Cuaternario en rumbo SN. La parte central de la imagen está ocupada por las montañas altas cubiertas de nieve de la frontera entre Argentina y Chile. Como se puede ver, la distribución de los elementos terrestre está controlada por la estructura de SN, lo que impidió que el factor de reflectancia direccional influyera en el volumen de estadísticas.

En las imágenes de LANDSAT TM utilizadas en el análisis del primer año se observó un pendiente de brillo que consistía en una reducción de un 7% en el extremo derecho de la imagen, en comparación al extremo izquierdo (suponiendo para éste un valor de 1,0). Al calcular el valor teórico aplicando el factor de reflectancia direccional del basalto de la luna, la reducción del brillo en el extremo derecho de la imagen llegó a un 10%. Similar resultado se obtuvo para el valor real, aunque éste muestra una reducción más leve que el valor teórico. Dado que en este Estudio, no se puede estimar el factor de reflectancia direccional mediante el método estadístico, se ha realizado la corrección utilizando el factor de reflectancia direccional obtenido del cálculo del valor teórico.

La corrección del factor de reflectancia direccional se hace mediante la siguiente expresión:

$$C_{\text{phot}}(i, e, \theta) = \frac{C_{\text{drt}}(30^\circ) \cdot \cos 30^\circ / (1.0 + \cos 30^\circ)}{C_{\text{drt}}(\theta) \cdot \cos i / (\cos e + \cos i)} \quad (3-2)$$

Donde,

- I : Angulo cenital del sol en un determinado pixel... ángulo incidente
- E : Angulo de observación en un determinado pixel (ángulo con el cénit)
... ángulo de observación
- θ : Angulo entre el sol - objeto - ángulo de observación ...ángulo de desfase
- Cdrt : Coeficiente de corrección del factor de reflectancia direccional

En este caso, $C_{\text{drt}}(\theta)$ es dependiente del objeto y longitud de ondas, y se puede calcular mediante la siguiente expresión aproximada aplicando el valor de $10\mu\text{m}$ de onda para el basalto de luna (Sanga y otros, 1998).

$$C_{\text{drt}}(\theta) = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3 + e\theta^4 + f\theta^5 + g\theta^6 \quad (3-3)$$

Donde, $a = 0,9937$; $b = -5,182\text{E-}2$; $c = 2,954\text{E-}3$; $d = -9,465\text{E-}5$; $e = 1,584\text{E-}6$; $f = -1,312\text{E-}8$ y $g = 4,249\text{E-}11$

El ángulo de desfase calculado mediante la expresión (3-1) varía dependiendo de la posición de los pixeles observados y su valor puede ser calculado sobre la base de los datos de azimut e inclinación desde el satélite en los pixeles observados, así como de azimut y altitud del sol. Si bien es cierto que el azimut y la altitud del sol varían dependiendo de la posición de los pixeles; en este caso, no obstante, se ha aplicado el valor nominal de la parte central de la imagen, tomando en cuenta que el ámbito de observación es reducido (unos 80 km en dirección E-O). Para el cálculo del ángulo de observación no se ha considerado la posición del satélite y se ha supuesto que en el pixel de observación en el eje central de la imagen, el satélite está mirando hacia el cénit. En este caso, la posición del satélite en el extremo izquierdo de la imagen es de azimut 90°, ángulo cenital 3,7°; y en el extremo derecho es de azimut 270°, ángulo cenital 3,7°.

Con estos parámetros, se realizó la corrección del factor de reflectancia direccional de cada pixel.

(3) Corrección atmosférica y de la sensibilidad del sensor

La corrección atmosférica consiste en rectificar los valores de $\tau_a(\lambda)$ y $b(\lambda)$ para lo que se requiere obtener previamente la incidencia $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ y la reflectancia terrestre $\rho(\lambda)$.

La corrección del rayo incidente del numeral anterior (1) presume que todos los objetos que aparecen en la imagen son planos. Sin embargo, en realidad, debido a los relieves topográficos de la zona, las imágenes tomadas en diferentes temporadas arrojan diferentes valores de $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ según la posición solar. Para su corrección, se puede aplicar el DTM (modelo terrestre digital) de alta precisión, aunque este método no resulta muy realista puesto que las áreas donde es aplicable el modelo son muy limitados. Por lo tanto, en este análisis se aplicó otro método que consiste en seleccionar un determinado número de pixeles correspondientes entre dos imágenes, procesar estadísticamente el traslapo de imágenes para anular los efectos de los relieves topográficos.

El método de concordancia de desviación estándar y del promedio de brillo basado sobre la estadística de toda la parte traslapada de las imágenes es el método más utilizado. Consiste en lo siguiente:

$$P'_{ij} = (P_{ij} - P_{av}) / \sigma_p \times \sigma_q + Q_{av} \quad (3-4)$$

P'_{ij} :	Valor de conversión de nivel de gris	P_{ij} :	Un punto arbitrario en una imagen de conversión de brillo
P_{av} :	Brillo medio de la imagen de conversión de brillo	σ_p :	Desviación estándar de brillo de la imagen de conversión de brillo
Q_{av} :	Brillo medio de la imagen de referencia	σ_q :	Desviación estándar de la imagen de referencia

En este caso, se supone que no existen grandes variaciones en las coberturas terrestres en el traslapo de las imágenes y que los valores $\rho(\lambda)$ en las dos temporadas son iguales. Sin embargo, al utilizar las imágenes tomadas en dos estaciones diferentes, como en el caso del presente análisis, no se puede aplicar el promedio de brillo ni el método de desviación estándar debido al cambio de vegetación, cobertura de nieve, nube, neblina, lagos, cauce de los ríos y las estructuras terrestres en el traslapo de las imágenes.

Por lo tanto, se aplicó el método que se describe a continuación:

Para todos los puntos correspondientes del traslapo de las dos imágenes, se tomaron los valores de brillo de la imagen de referencia en el eje horizontal, y los valores de la imagen a procesar en el eje vertical. Subsiguientemente, se analizaron las diferencias de brillo entre los puntos. Al trazar los resultados en el gráfico de dispersión, la distribución de los puntos donde la variación del espectro de reflectancia (λ) de los objetos (como vegetación, sombras, nieve y nube) es grande, aparecen en grupos de puntos singulares, facilitando la interpretación.

La Figura 13 es el mapa de distribución de brillo del traslapo de las imágenes P421/R353, 354 y P422/R353, 354 tomadas en diferentes fechas. Se ha preparado el gráfico de dispersión atribuyendo en la abscisa los valores de brillo de las imágenes del lado este (P421/R353, 354) y en la ordenada las del lado Oeste (P422/R353, 354). Los grupos de puntos que se distribuyen cerca del borde superior o del lado derecho en el gráfico de dispersión de la Banda 1, aparecen cuando existe la cobertura de nieve en una sola imagen y el grupo de los puntos en la esquina superior a la derecha, representa las áreas cubiertas por nieve en ambas imágenes. Los colores expresan la frecuencia de aparición: aparecen mayormente los colores violeta, azul, azul claro, amarillo y rojo, en este orden.

La mayoría de los puntos correspondientes, excepto los de las áreas cubiertas de nieve, no muestran grandes variaciones en $\rho(\lambda)$ y se deduce que los puntos restituidos se distribuyen de manera concentrada alrededor de una determinada línea recta. En la Banda 1 de la Figura 13, el grupo de puntos que aparecen con mayor frecuencia es representado en color rojo y la parte de mayor incidencia se distribuye alrededor de la línea recta con inclinación de 45° . Cabe señalar que la frecuencia de aparición de los puntos restituidos se reduce drásticamente cuanto más lejos estén de esta línea recta. Tal distribución refleja la diferencia de $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ producida por los relieves topográficos. Al realizar la regresión primaria de estos puntos aplicando el método del mínimo cuadrado, se anulan los efectos de la topografía. De los valores de $\{U(\lambda)+P(\lambda)\}$ y del método de regresión primaria corregida de $\rho(\lambda)$ se obtiene el coeficiente de corrección atmosférica por los valores de $\tau a(\lambda)$ y de $b(\lambda)$.

La regresión primaria permite aproximar a la línea recta que pasa por el origen, si las imágenes han sido obtenidas en un mismo día, lo cual indica que la transmisividad atmosférica $\tau a(\lambda)$ y la radiación y dispersión atmosférica $b(\lambda)$

muestran valores iguales en las dos imágenes. En el caso de que las imágenes hayan sido obtenidas en diferentes fechas, la fórmula de regresión primaria puede ser expresada como $y = ax + b$ sin pasar por el origen y en muchos casos el coeficiente no es $a=1,0$. Esto indica que los valores de la transmisividad atmosférica $\tau a(\lambda)$ y de la radiación y dispersión atmosférica $b(\lambda)$ son diferentes y que pueden ser igualados entre ambas imágenes aplicando dicha fórmula.

Dado que la sensibilidad del sensor es diferente según la fecha de obtención de las imágenes, los valores $\tau a(\lambda)$ y $b(\lambda)$ deben ser multiplicados por $K(\lambda)$ a efectos de corregir la sensibilidad.

Considerando la alta precisión de corrección atmosférica en las mismas fechas de obtención de imágenes, se corrigieron nueve escenas, sin incluir las de P422/R347 a R350, siguiendo los procedimientos que se describen a continuación.

- (a) Se ha propuesto efectuar la corrección atmosférica de cada Pista (Path), teniendo como imagen de referencia a la que está más al Norte. Por lo tanto, en este análisis se realizará inicialmente la corrección de la cantidad de radiación de las siguientes tres combinaciones: P421/R347 - R349 (3 escenas); P421/R351 - R354 (4 escenas); y, P422/R353 - R354 (2 escenas).
- (b) Efectuar la corrección atmosférica de cada imagen desde el Norte hacia el Sur.
- (c) Para la corrección de los juegos EO P421/R351 - R354 y P422/R353 - R354, se utilizará la parte traslapada de ambas imágenes, teniendo como referencia a las imágenes de P421/R351 - R354 (lado este).

Cabe recordar que en este estudio, no se pudo proceder la corrección atmosférica de las imágenes 421/R347-349 y de P421/R351-P421/R354, a falta del traslapo de las imágenes. Las imágenes mosaico de P421/R347-349 han sido generadas con diferentes criterios que las de P421/R351-R354 y P422/R353-R354, por lo que no se puede comparar directamente los valores de brillo en estas imágenes.

A manera de simplificar la redacción, del apartado 2.4 y posteriores, se denominará como "Imagen U" a la "propia imagen mosaico" y a la "cobertura de la imagen mosaico" de las tres escenas del Norte del Area del Estudio. De la misma manera, se denominará como "Imagen L" a las seis escenas del Sur (véase la Figura 2).

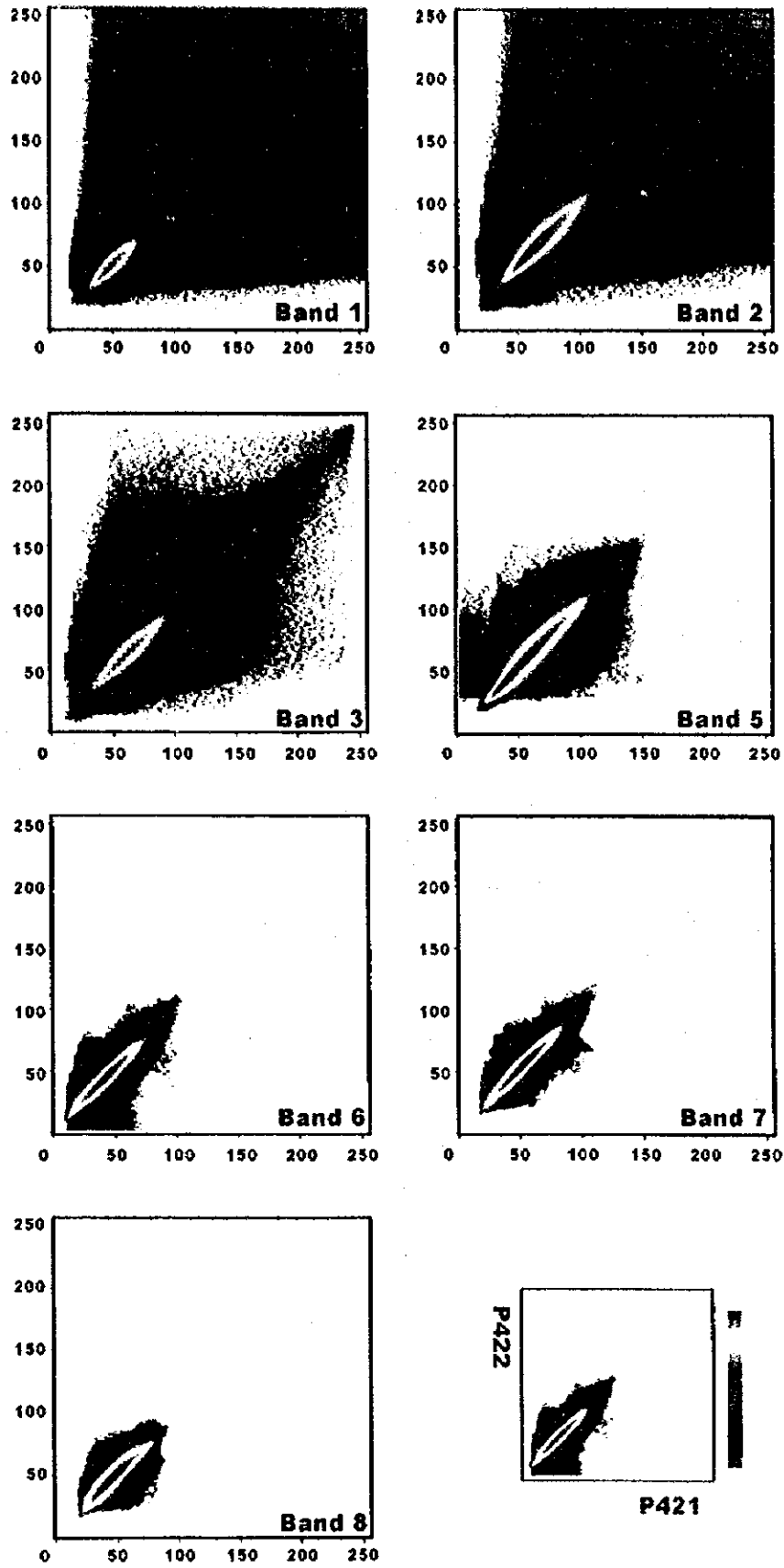


Fig.13 Distribution of Brightness of Two Images in Overlapped Area



2.4 Mosaicos sin costura y conversión geométrica

2.4.1 Conversión geométrica

Con los procedimientos del apartado 2.3.3, las Imágenes U y L han sido sometidos a la conversión de brillo aplicando los mismos criterios.

Dos imágenes continuas tomadas en la misma fecha pueden ser unidas desplazando horizontalmente una de las dos imágenes, dado que éstas han sido tomadas en forma de faja, de la que se van extrayendo las imágenes según el número de filas. Sin embargo, las imágenes de JERS-1 OPS no pueden ser unidas simplemente desplazándolas paralelamente, sino que requiere ampliar o reducir el tamaño o girar las imágenes. Lo mismo ocurrió con las imágenes utilizadas en este estudio. Por este motivo, se ha efectuado la conversión geométrica a través del método de transformación de Helmert (transformación por similitud).

Cabe anotar que se ha definido la resolución espacial en 18 m/1pixel, manteniendo la resolución original.

2.4.2 Disposición de mosaicos sin costura

Entre las dos imágenes tomadas en diferentes temporadas, existen una clara diferencia de tonos en su unión, debido a la variación de la cobertura terrestre, posición de sombras y nubes, etc. Si bien es cierto que esta diferencia no constituye grandes impedimentos para la interpretación fotogeológica, produce una impresión de imágenes mosaico "mal acabadas". Además, en las imágenes OPS aparecen distorsiones debido al paralaje (distorsión por la proyección central, Figura 14). Esta distorsión no puede ser eliminada mediante alineación, dado que el volumen de distorsión varía dependiendo de la altitud y la posición del satélite. Para resolver este problema, se ha aplicado el método de "disposición de mosaicos sin costura" que consiste en alinear las imágenes en las partes donde la distorsión de paralaje sea relativamente pequeña o donde existan menos cambios de las coberturas terrestres.

Aquí se entrega una breve explicación del método de disposición de mosaicos sin costura (que en el informe del estudio del primer año, se denominó el "método de alineación de márgenes en zigzag"). Este ha sido desarrollado para alinear las imágenes mosaico SAR, donde la magnitud de "layover", por ejemplo, de una misma montaña, se difiere en los lados cercano y lejano. Esto produce dos inconveniencias en la composición de mosaico.

La primera es que la diferencia de "layover" entre los lados lejano y cercano de las partes traslapadas de las imágenes adyacentes OE, las áreas traslapadas aparecen en diferentes formas en ambas imágenes.

La segunda es la baja confiabilidad de los puntos correspondientes. A los puntos correspondientes se les atribuyen las mismas coordenadas, que

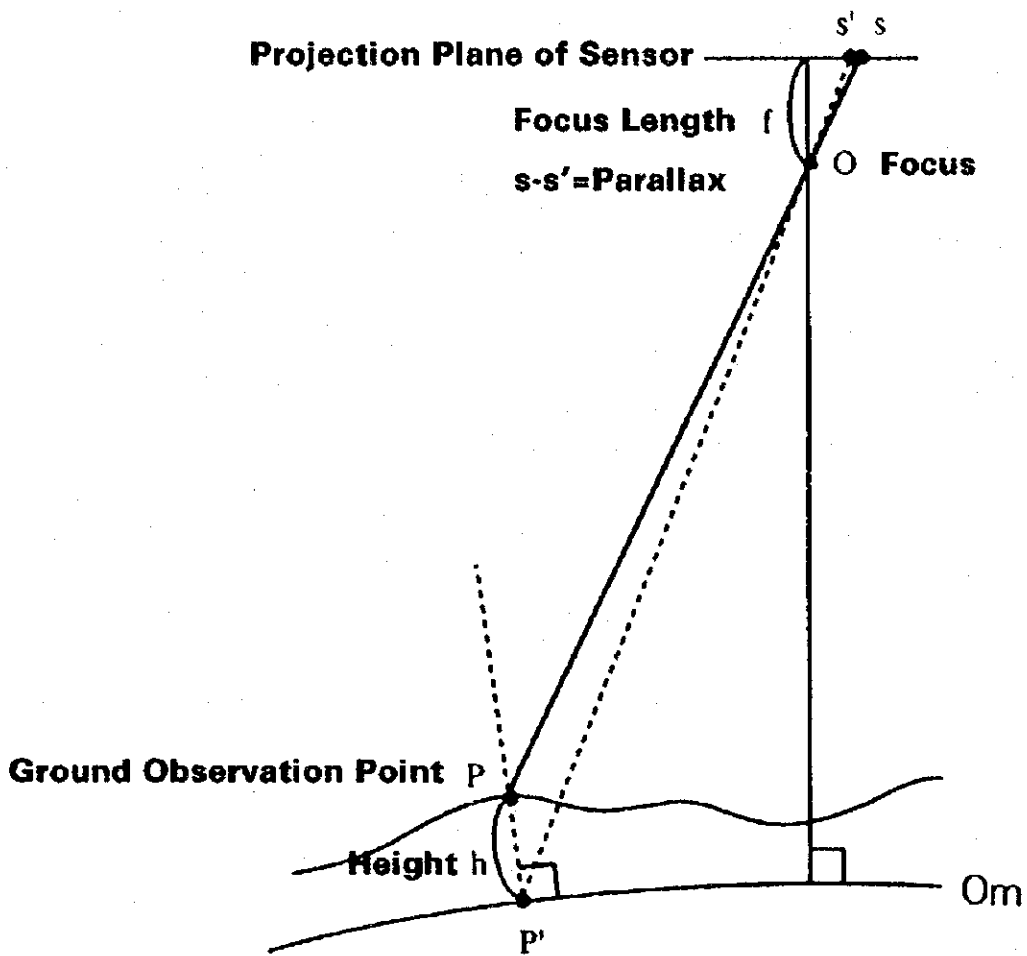


Fig.14 Distortion of Shadow by Central Projection

eventualmente encubre el "layover". En el caso de contar con sólo pocos puntos correspondientes, la distorsión del "layover" es mayor y no permite obtener correctamente el coeficiente de conversión geométrica. Las imágenes mosaico generadas aplicando un coeficiente no muy preciso, produce distorsión en los bordes de las imágenes. La incidencia es particularmente grave cuando en una imagen mosaico de gran cobertura, preparada alineando varias imágenes y el error acumulado de la conversión geométrica se traduce en la acumulación de la distorsión en los bordes de las imágenes mosaico.

Un fenómeno similar ocurre con el sensor óptico de las imágenes de LANDSAT TM y de JERS-1 OPS. Cualquier satélite estaría observando la superficie terrestre de ambos extremos con ángulos oblicuos, lo que produce necesariamente paralajes en estos extremos, a menos que estén totalmente libres de relieves topográficos. A modo de ejemplo, se supone que existe una montaña aislada de 2.500 m.n.s.m. en la parte traslapada de dos imágenes de LANDSAT TM alineadas en dirección EO. En la imagen Oeste, la cima de la montaña se ve desplazada unos 200m hacia este, y viceversa.

Como consecuencia, se hace necesario alinear dos imágenes que incluyen en total 400m de paralaje en dirección EO en el traslapo.

A continuación se describen los procedimientos adoptados para alinear las imágenes que encubren las distorsiones producidas por "layover" y por paralaje:

- (1) Elaborar la expresión matemática de conversión geométrica para hacer concordar dos imágenes sobre la base de los datos de la observación visual o de la posición de satélite (valores nominales), aplicando el modelo de transformación de Helmert. En este caso, para JERS-1 OPS se tomaron los datos de la observación visual.
- (2) Definir una pequeña sección (de 15 x 15 píxeles aprox.) en el traslapo de las imágenes para detectar la posición donde concuerda esta pequeña sección, aplicando el método de "coincidencia de plantilla (template matching)" con coeficiente correlativo de superficie.
- (3) Repetir la misma operación a un determinado intervalo para la alineación lateral y vertical (con 20 píxeles) para definir el vector de movimiento de la posición de concordancia de las partes traslapadas en general.
- (4) Sobre la base del vector de movimiento, cuyo coeficiente correlativo de superficie sea mayor al valor de umbral (en este análisis, más de 0,5), calcular el coeficiente de conversión geométrica mediante el método del mínimo cuadrado. Entre estos puntos de correspondencia, se incluyen los vectores de desplazamiento de las áreas donde presentan mayor "layover" o paralaje; omitiendo estos puntos (definiendo el valor de umbral en $+ 1 \sigma$) se calcula el

coeficiente de corrección geométrica de transformación de Helmert mediante el método del mínimo cuadrado.

- (5) Realizar la conversión geométrica aplicando el coeficiente obtenido en el numeral precedente (4).
- (6) Definir una pequeña ventana en la primera línea del traslape de las imágenes, y aplicar el método de coincidencia de plantilla utilizando el coeficiente correlativo. Identificar la parte más coincidente (donde la distorsión de paralaje o el "layover" sea la mínima). Esta parte será la línea de unión. Cabe recordar que las áreas donde presentan mayor variación de la cobertura terrestre o están cubiertas por nubes, no sirven de línea de unión por ser reducida la razón correlativa de superficie.
- (7) Repetir la misma operación de línea en línea hacia abajo para identificar el centro de alineación idónea, es decir, donde las dos imágenes son más coherentes. De esta manera, se puede trazar la línea de unión de las imágenes evitando las partes donde sean mayores las distorsiones de paralaje o de "layover", las partes que presenten mayor variación de cobertura terrestre o sombras y las partes cubiertas de nieve o nubes.
- (8) Alinear las dos imágenes a lo largo de la línea de costura identificada.

Estos procedimientos de composición de mosaico permiten generar imágenes mosaico sin costura. De ahora en adelante se denominará "imágenes con el brillo corregido" a las imágenes mosaico que hayan sido sometidas a la corrección de brillo.

2.4.3 Corrección geométrica

Con los procedimientos descritos hasta el apartado 2.4.2, se generaron dos imágenes mosaico (Imágenes U y L) con una resolución espacial de 18m. En el siguiente paso, se seleccionaron unos diez puntos de control terrestre (GCP) en cada imagen (unos 30 en la Imagen U y 60 puntos en la Imagen L) con el uso del plano de navegación táctica (Tactical Pilotage Chart -TPC) de escala 1:500.000. Estos puntos fueron convertidos geoméricamente en el Sistema de Coordenada Universal Transversal de Mercator (UTM). Si bien es cierto que como GCP generalmente se seleccionan los elementos artificiales (cruces de caminos, etc.), en el presente estudio se han seleccionado los elementos naturales (confluencia de quebradas, etc.) debido a la ausencia de los elementos artificiales.

En la tabla siguiente se entregan los resultados del error entre la lectura y el re-cálculo de GCP en la Imagen U.

Table 2 Conversión Error of GCP in the U-Image

Número	Abscisa			Ordenada		
	Lectura	Re-cálculo	Error	Lectura	Re-cálculo	Error
1	2641,00	2639,91	1,09	1342,00	1332,82	9,18
2	4236,00	4244,27	-8,27	506,00	509,54	-3,54
3	3220,00	3233,96	-13,96	1492,00	1497,68	-5,68
4	994,00	984,70	9,30	2994,00	2997,59	-3,59
5	2936,00	2921,47	14,53	2860,00	2865,98	-5,98
6	4326,00	4305,53	20,47	3412,00	3415,48	-3,48
24	2054,00	2045,42	8,58	10656,00	10664,22	-8,22
25	802,00	797,59	4,41	11212,00	11224,78	-12,78
26	3175,00	3176,22	-1,22	11384,00	11381,46	2,54
27	4059,00	4059,41	-0,41	11017,00	11010,18	6,82
Error medio			10,11			6,97

Como resultado del re-cálculo de estos GCP, se detectó el error en la ubicación de GCP hasta un máximo de 20 pixeles (400 m aprox.). Una de las causas de este error podría ser la falta de precisión del plano topográfico TPC. En la Figura 15 se hace una comparación de las imágenes de LANDSAT TM generadas en el primer año del estudio, con el plano topográfico TPC. Como se puede observar, la localización de las quebradas no coinciden con las imágenes y la forma de las quebradas tampoco es igual. La otra causa del error podría ser la incidencia del paralaje, del que se habló en el apartado 2.4.2. Dado que las imágenes tomadas por el sensor OPS corresponden a la proyección central, en todas las imágenes se produce el paralaje, similar al que se observa en la Figura 14. Por lo tanto, cuando el punto P del plano topográfico debe ser proyectado en S' de la imagen, en realidad el punto correspondiente P' de la imagen aparece proyectado en S por efectos de paralaje. Esto es porque en la coordenada de los GCP encubre el error de paralaje (S-S') por los efectos de las altitudes. Este error no toma un valor constante, sino que puede variar según las altitudes y la posición de las imágenes. Por otro lado, mientras que la cuenca oriental del Area del Estudio se distribuye a altitudes menores de 2.000 m.n.s.m., las montañas de la zona fronteriza entre Argentina y Chile exceden los 5.000 m.n.s.m., es decir, presentan relieves topográficos más acentuados. Esto se traduce en mayor variación del error de paralaje en comparación con otras zonas. Como consecuencia, no se ha podido proyectar con precisión las imágenes en el Sistema de Coordenada UTM. Si es posible obtener los datos topográficos digitales de la zona, se podría calcular el paralaje en las coordenadas de los GCP seleccionados sobre las imágenes, a partir de las informaciones de la órbita del satélite. También para las imágenes, se podría calcular y corregir el paralaje por cada pixel y generar las imágenes de proyección ortogonal coherente con el plano topográfico.

2.4.4 Corrección de la energía radiante de trayectoria en las Imágenes U y L

A falta del traslapo entre las Imágenes U y L, no se ha podido realizar la corrección precisa de brillo entre ambas. Suponiendo que la transparencia de la atmósfera en ambas ha sido constante, la energía radiante de trayectoria (path radiance) puede ser corregida atribuyendo brillo mínimo de imágenes, aunque no exista el traslapo de imágenes. En la Tabla 3 se muestran los valores de la energía radiante de trayectoria de las Imágenes U y L.

Table 3 Path Radiance (Minimum Brightness)

Imágenes	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
U	11	13	7	8	8	14	16
L	14	14	5	14	9	16	18

2.5 Generación de las imágenes de análisis espectral

Hasta aquí se prepararon las imágenes con el brillo corregido de dos grupos de imágenes: Imagen U (correspondiente a la parte Norte del Area del Estudio) e imagen L (la parte Sur). El siguiente paso, fue la generación de las imágenes de falso color, "ratio" y de residuales logarítmicos.

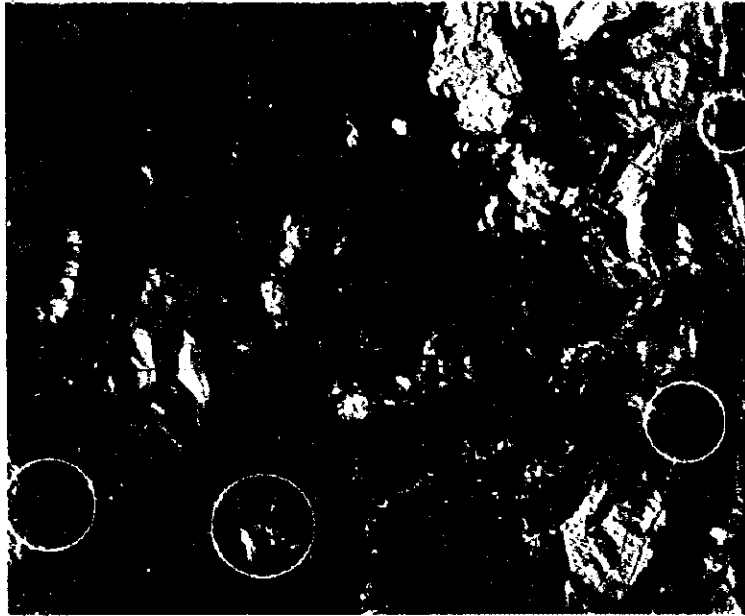
En la Figura 16 se entrega el flujograma de los procedimientos de generación de las imágenes de residuales logarítmicos y de "ratio".

2.5.1 Eliminación de las zonas cubiertas de nieve y residuales logarítmicos

El análisis espectral ha estado orientado a las zonas de afloramiento y de alteración. Las imágenes contienen algunos elementos que podrían incidir negativamente al análisis, como son la nieve, nubes, sedimentos de los lagos salados, etc. Para eliminar estos elementos, antes de proceder al análisis, se debió realizar el enmascarado (masking). Cuando los elementos que se quieren eliminar muestras brillos muy singulares, el enmascarado permite separarlos claramente aplicando los valores de umbral. Por lo tanto, se hace necesario generar nuevas imágenes que sean aptas que faciliten este trabajo de separación.

En este análisis, no se ha definido el valor de umbral para eliminar las nubes, puesto que la Imagen U no presentaba nubes, y la Imagen L presentaba solamente fina cobertura de nube en la parte Sur, donde no se identifica ninguna zona de alteración.

Las partes cubiertas de nieve presentan las siguientes tendencias: la reflectancia en las bandas del 1 al 3 es alta, mientras que en las bandas del 5 al 8



LANDSAT TM



Tactical Pilotage Chart

10 km



Fig.15 Plane Display of LANDSAT TM Image and TPC for Comparison



Logarithmic Residual Image and Ratio Image

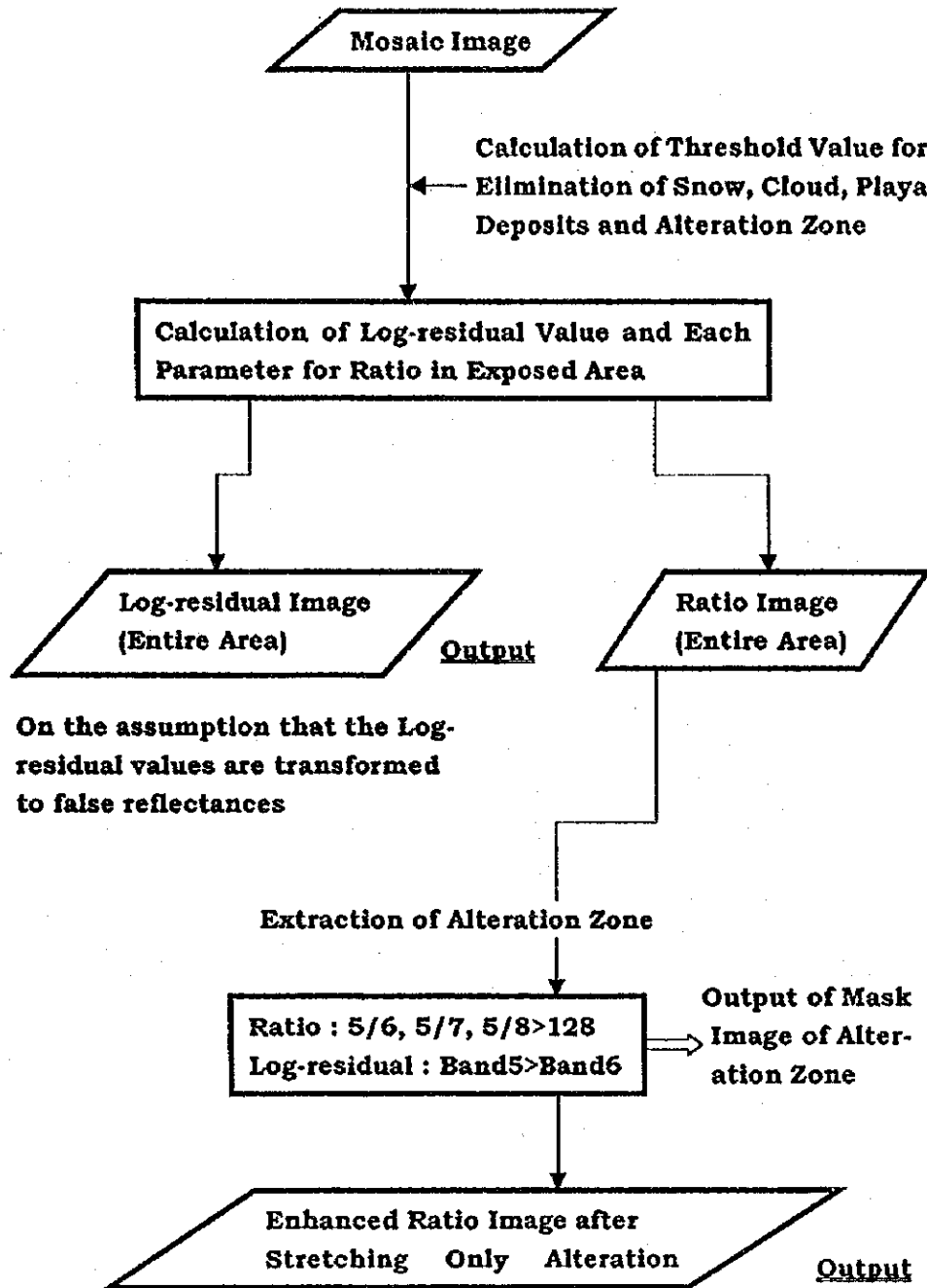


Fig.16 Flow Chart of Processing of Logarithmic Residual Image and Ratio Image

es baja por los efectos de la absorción.

El brillo de las partes cubiertas de nieve de las imágenes con brillo corregido excede los 220 en las bandas 1 y 2, mientras que en la banda 3 muestra una cifra elevada de alrededor de 150. Sin embargo, en los límites de nieves, se hace difícil definir el valor de umbral de las imágenes dado que los valores de brillo van variando gradualmente, por lo que en este caso, se ha definido el valor de umbral utilizando el método de residuales logarítmicos que distingue claramente los límites de las nieves.

2.5.2 Imágenes de falso color

Sobre la base de las imágenes enmascaradas y las imágenes con brillo corregido generadas mediante los procedimientos antes descritos, se ha calculado el volumen de estadísticas del brillo de las todas las áreas, excepto las cubiertas por nieve; y de esta manera se prepararon las imágenes de falso color (AVR= 358, véase las Figuras 17 y 18). Cabe señalar que para las Imágenes tanto U como L, se aplicó el mismo factor para darles mayor nitidez y las mismas materias aparecen en las mismas tonalidades cuando la transmisividad atmosférica es constante. En las imágenes, la nieve aparece con color azul marino y las zonas de alteración con azul claro a verde claro. Mientras tanto, los afloramientos rocosos aparecen con tonalidades que varían desde pardo a amarillo claro. Sin embargo, aparecen con tonalidades similares las zonas de alteración y las rocas volcánicas terciarias en el territorio argentino al SO de la Imagen L, lo que hace difícil distinguir solamente las zonas de alteración en ella. Además, la diferencia de tonos de las zonas de alteración no es muy evidente, por lo que no se puede hacer una clasificación solamente con la imagen de falso color. Cabe señalar que los números de las figuras, son los mismos atribuidos a las zonas de alteración identificadas mediante el análisis de imágenes efectuado en el primer año del estudio.

Las imágenes de falso color presentan las siguientes características:

- Permiten interpretar los afloramientos rocosos en varios tonos.
- Permiten distinguir claramente las zonas de alteración, aunque en algunos casos, éstas pueden aparecer en tonos similares con los afloramientos rocosos.
- No permiten realizar una clasificación detallada de las zonas de alteración.
- En algunos casos, no se distinguen claramente los límites de la cobertura de nieve.
- No permiten distinguir los sedimentos de los lagos salados de la cobertura de nieve.
- Dependiendo de los relieves, varía la incidencia de la luz. (Esto, a la vez, permite interpretar los relieves topográficos.)

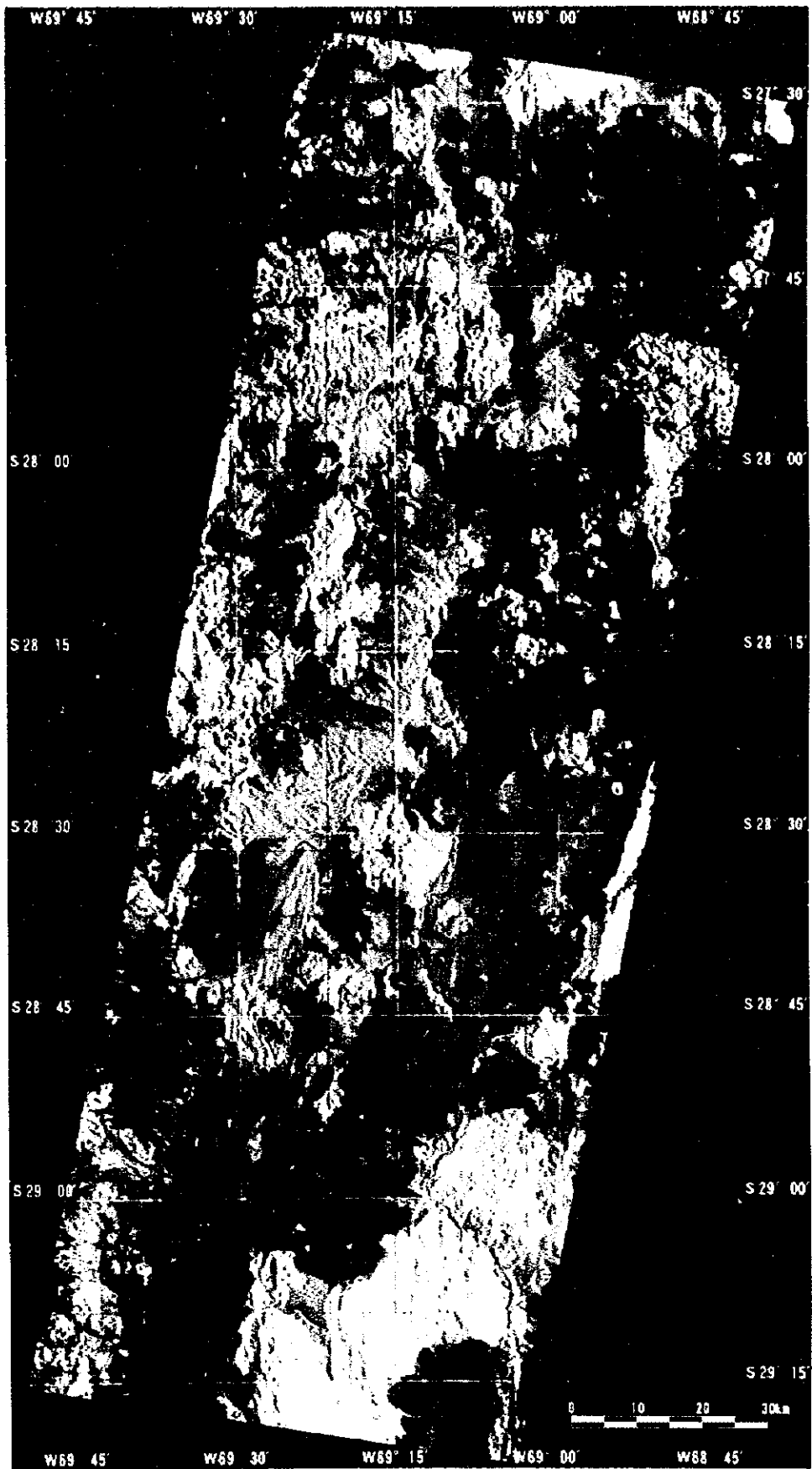


Fig.17 False Color Composite Image of the U-Image Area (BGR = 358)

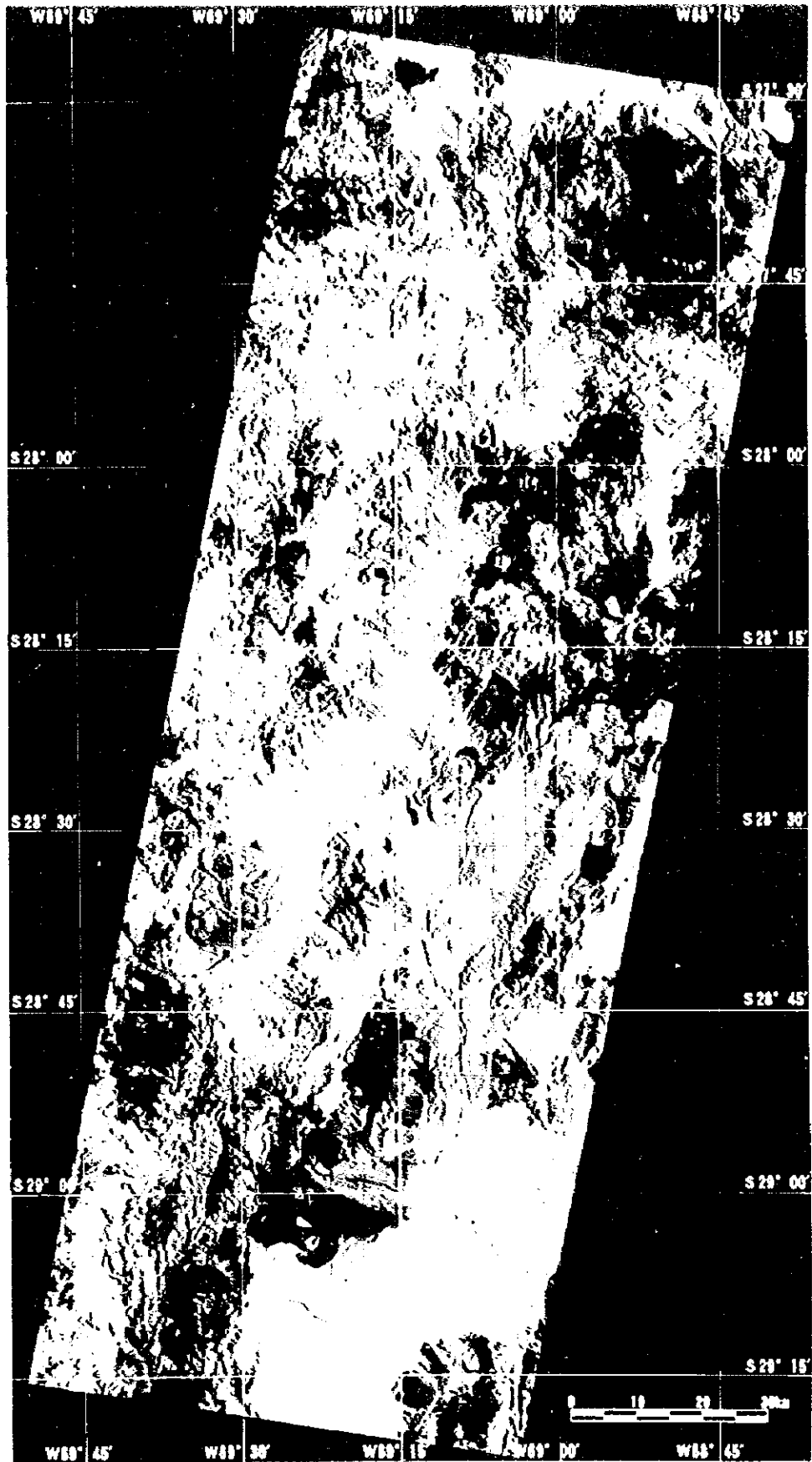


Fig.17 False Color Composite Image of the U-Image Area (BGR 0458)





Fig.18 False Color Composite Image of the L-Image Area (BGR = 358)



Fig.18 False Color Composite Image of the I. Image Area (BGR 358)



2.5.3 Imágenes procesadas por el método de residuales logarítmicos

Existen dos métodos de conversión de los datos espectrales multicanales en el factor de reflectancia.

El primero consiste en tomar los datos espectrales de un área y compararlos con los datos del satélite. Por ejemplo, existe un método de mide el espectro de reflectancia de los elementos terrestres en un área cubierta por un material homogéneo identificable desde el satélite. Si bien es cierto que éste permite obtener la reflectancia absoluta, su aplicación no es común , primero por que requiere de los datos reales y segundo porque es difícil identificar un área cubierta de materias homogéneas.

El otro método consiste en calcular la "pseudo reflectancia" a partir de los datos de satélite. Este método, a su vez, se divide en dos métodos: el de modelo de residuales logarítmicos (Log-Residual) y el método de residuales logarítmicos de escala de gris (Ministerio de Comercio Internacional e Industria, Agencia de Recursos Naturales y Energía, 1996). Ambos se asientan sobre una determinada hipótesis. En este estudio se aplicó el modelo de residuales logarítmicos por una serie de razones, como ser, la indisponibilidad de los datos reales de espectro de reflectancia y la presencia de afloramientos de diversos tipos de rocas en el Area del Estudio. Las imágenes, por lo tanto, han sido generadas aplicando la pseudoreflectancia.

(1) Principios del procesamiento de residuales logarítmicos

El procesamiento de residuales logarítmicos supone que la radiancia captada por los sensores es el producto de tres elementos, que son la reflectancia, efectos topográficos y efectos de la irradiación. Consiste en normalizar la radiancia de cada banda y de cada pixel calculando el promedio geométrico para convertir los modelos de respuesta entre las bandas en modelos de reflectancia. Sin embargo, considerando que este método no incluye los factores de adición, se requiere eliminar los efectos de la dispersión de la atmósfera (en especial, los de la difusión de Rayleigh) en la gama visible.

Los valores de residuales logarítmicos son calculados por el siguiente método Cuando,

- $X_{i\lambda}$: Brillo observado por el canal λ en un punto muestral "i"
- $X \cdot \lambda$: Media logarítmica total en el canal λ
- $X_i \cdot$: Media logarítmica en todos los canales para el punto muestral "i"
- X : Media logarítmica de todos los puntos muestrales y canales

Entonces, el valor de residuales logarítmicos (Y_i) para la onda λ se expresa:

$$Y_i = \log X_{i\lambda} \cdot X_i \cdot X \cdot \lambda + X \quad (5-1)$$

(2) Procesamiento por residuales logarítmicos

Tal como se ha indicado anteriormente, en el procesamiento de residuales logarítmicos se requiere estimar los factores de adición, incluyendo la difusión atmosférica. En este caso, se ha aplicado el valor más reducido calculado en el apartado 2.4.5. como la energía radiante de trayectoria, para calcular el valor de residuales logarítmicos. El cálculo de este valor consiste de dos procedimientos. En primer lugar, se obtiene el factor de residuales logarítmicos a partir de una pequeña área libre de cobertura (nieve y vegetación). Esto es porque en las imágenes de residuales logarítmicos (AVR= 678) los límites de la cobertura de nieve aparecen claramente y sus valores sirven para determinar el valor de umbral de las áreas cubiertas de nieve.

El segundo paso consiste en calcular el factor aplicable al procesamiento de residuales logarítmicos de toda el Area del Estudio, a partir del lado este de las Imágenes U y L (P421/R351 - R354) libre de cobertura vegetal, utilizando las imágenes enmascaradas.

En la siguiente tabla se resumen los factores de residuales logarítmicos obtenidos en el primer cálculo para una zona pequeña.

Table 4 Logarithmic Residual Processing Coefficient
(Rough Estimate)

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Todas
χ^2	3,7175	4,0355	4,0235	4,0688	3,7899	3,7153	3,4489	3,8285

El siguiente paso consistió en calcular la desviación estándar de los valores de residuales logarítmicos según bandas, con el fin de visualizar claramente la variación de brillo entre bandas; se aplicó el valor $\pm 2,5\sigma$ a los 256 tonos para obtener las imágenes de residuales logarítmicos. Dado que este método realiza el "stretching" a cada banda, la relación de brillo entre las bandas pierde precisión a cambio de acentuar sus características.

De estas imágenes de residuales logarítmicos se definieron los valores de umbral en > 220 para las bandas del 1 al 3, y de < 40 para las bandas del 5 al 8; las partes que satisfacen estas condiciones fueron interpretadas como las áreas cubiertas de nieve.

Luego, se procedió a calcular los valores de residuales logarítmicos de la parte Este de las Imágenes U y L (las áreas con cobertura vegetal casi nula) utilizando estos valores de umbral. En la siguiente tabla se entregan los factores del procesamiento por residuales logarítmicos.

**Table 5 Logarithmic Residual Processing Coefficient
(Rock-Exposure Zone)**

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Todas
λ	3,699	4,0179	4,0148	4,0778	3,7973	3,7246	3,4525	3,8265

Subsiguientemente, se aplicaron estos factores a todas las bandas para generar las imágenes procesadas por residuales logarítmicos (AVR= 678), las cuales se muestran en las Figuras 19 y 20. En estas imágenes las áreas cubiertas de nieve aparecen en tonalidades muy oscuras, por los efectos de la absorción, lo cual permite identificar fácilmente el límite de la nieve. Por otro lado, las zonas de alteración que habían sido representadas en color verde claro en las imágenes de falso color aparecen aquí en violeta clara. Además, estas imágenes representan los afloramientos rocosos en tonos adecuados. Sin embargo, dado que las imágenes no representan la delicada diferencia de tonos según las especies de minerales de alteración, no sirven para clasificar las zonas de alteración. Por esta razón, estas imágenes han sido utilizadas para conocer los modelos de espectro de reflectancia (valores de residuales logarítmicos).

Las imágenes de residuales logarítmicos (AVR= 678) presentan las siguientes características:

- Permiten obtener los valores de residuales logarítmicos deducibles como pseudo espectro de reflectancia.
- Las mismas materias son representadas con los mismos colores, independientemente de los efectos de los relieves topográficos, exposición de laderas, sombras, etc.
- Los límites de las coberturas de nieve son fáciles de identificar.
- Los afloramientos rocosos aparecen monótonos y su geología es difícil de distinguir.
- Permiten interpretar fácilmente las zonas de alteración, pero a veces aparecen en tonos semejantes a los afloramientos rocosos.
- No permiten realizar la clasificación detallada de las zonas de alteración.

En vista de que los límites de las coberturas de nieve en las imágenes procesadas por residuales logarítmicos son claros se utilizaron éstas para generar las imágenes enmascaradas de las zonas con nieve.

2.5.4 Imágenes de "ratio"

- (1) Principios del ratioing

La energía radiante N_i (unidad: mW/cm^2sr) del objeto terrestre percibido por el sensor puede ser expresado con la siguiente fórmula matemática:

$$N_i = (1/\pi)(H_i R_i T_i A_i) + N_{p_i} \quad (5-2)$$

Donde "H" es la irradiación solar, "R" es la reflectancia del objeto terrestre, "T" es la transmisividad atmosférica (vertical), "A" es el coeficiente determinado por el ángulo entre la superficie terrestre y la línea que une el sol y el objeto terrestre y el ángulo entre el objeto terrestre y el sensor, "N_p" es la energía radiante de trayectoria de la atmósfera, e "i" es la banda del sensor.

Si se puede estimar el valor "N_p", "A" tendrá un valor fijo sea cual fuese el canal, mientras que "H" y "T" tomarán los valores fijos por cada canal, pudiendo resaltar las características espectrales al obtener la relación entre dos canales. Es decir, al relacionar los canales que detecten los valores máximo y mínimo en los modelos de espectro de reflectancia de un determinado mineral, aumenta el valor de la relación de pixeles donde existe el mineral facilitando la discriminación con otros pixeles donde no existe tal mineral.

La base conceptual del "ratioing" es resaltar las áreas de distribución de un determinado mineral en las imágenes, aprovechando estas características.

(2) Ratioing

También en el proceso de ratioing es necesario estimar la energía radiante de trayectoria. En este análisis se ha corregido la energía radiante de trayectoria aplicando los mismos valores utilizados en el procesamiento de residual logarítmico. Dado que el objetivo del ratioing es clasificar los minerales de alteración con absorción en $2\mu m$, se definieron las combinaciones singulares de bandas para el ratioing (AVR= 5/6, 5/7, 5/8). A todos los numeradores del ratioing se atribuyeron la banda 5 porque de esta manera se logra identificar claramente las zonas de alteración y porque permite captar visualmente la diferencia de las zonas de alteración según las combinaciones de los minerales de alteración. Es decir, mientras que en las rocas no alteradas o poco alteradas la reflectancia en la gama de infrarrojo de ondas cortas asciende gradualmente, las rocas alteradas por sericitización, caolinitización, o alunitización, la reflectancia en esta gama se reduce y las zonas de alteración aparecen con tonalidad clara. Tal como se muestra la Figura 5, los puntos de absorción y sus modelos varían según los minerales de alteración y las diferentes combinaciones de minerales son representadas en colores diferentes.

Por lo general, la tasa de brillo entre bandas (valores de ratio) toma los valores que varía desde 0 hasta 10. Para representar la tasa entre bandas es necesario realizar la conversión de escala de gris mediante la función lineal:

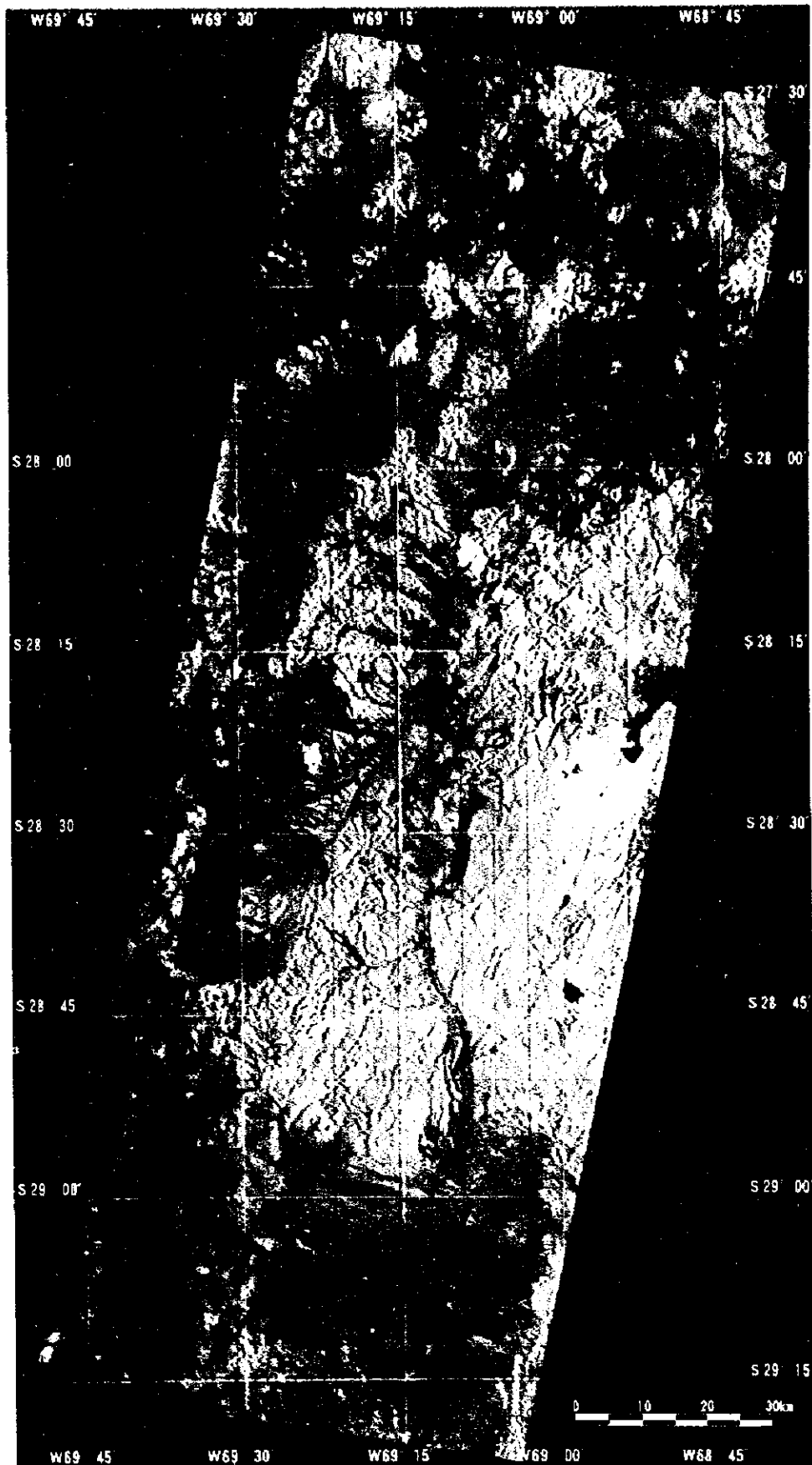


Fig.19 Logarithmic Residual Image of the U-Image Area (BGR = 678)

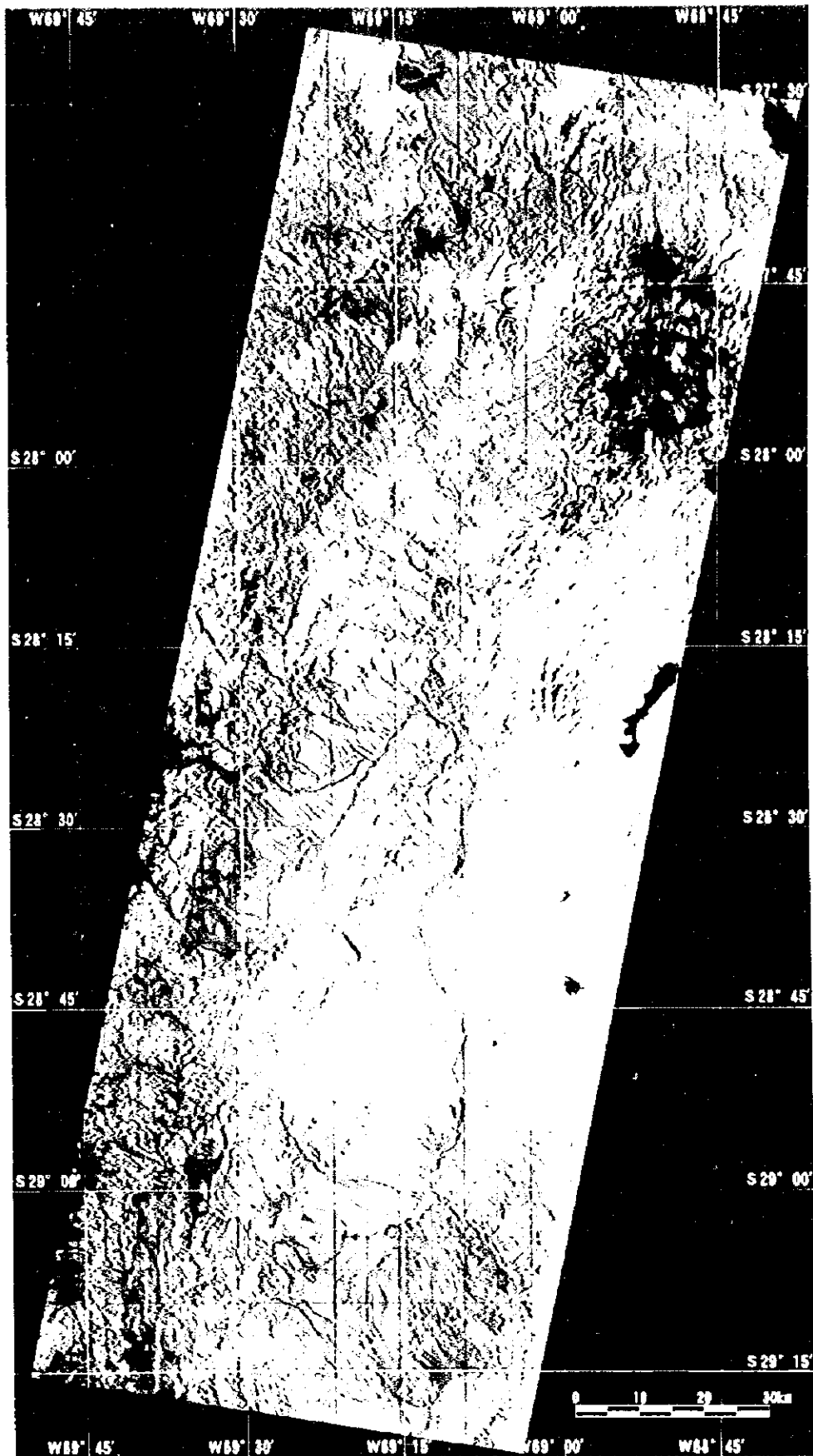


Fig.19 Logarithmic Residual Image of the U-Image Area (BGR - 678)



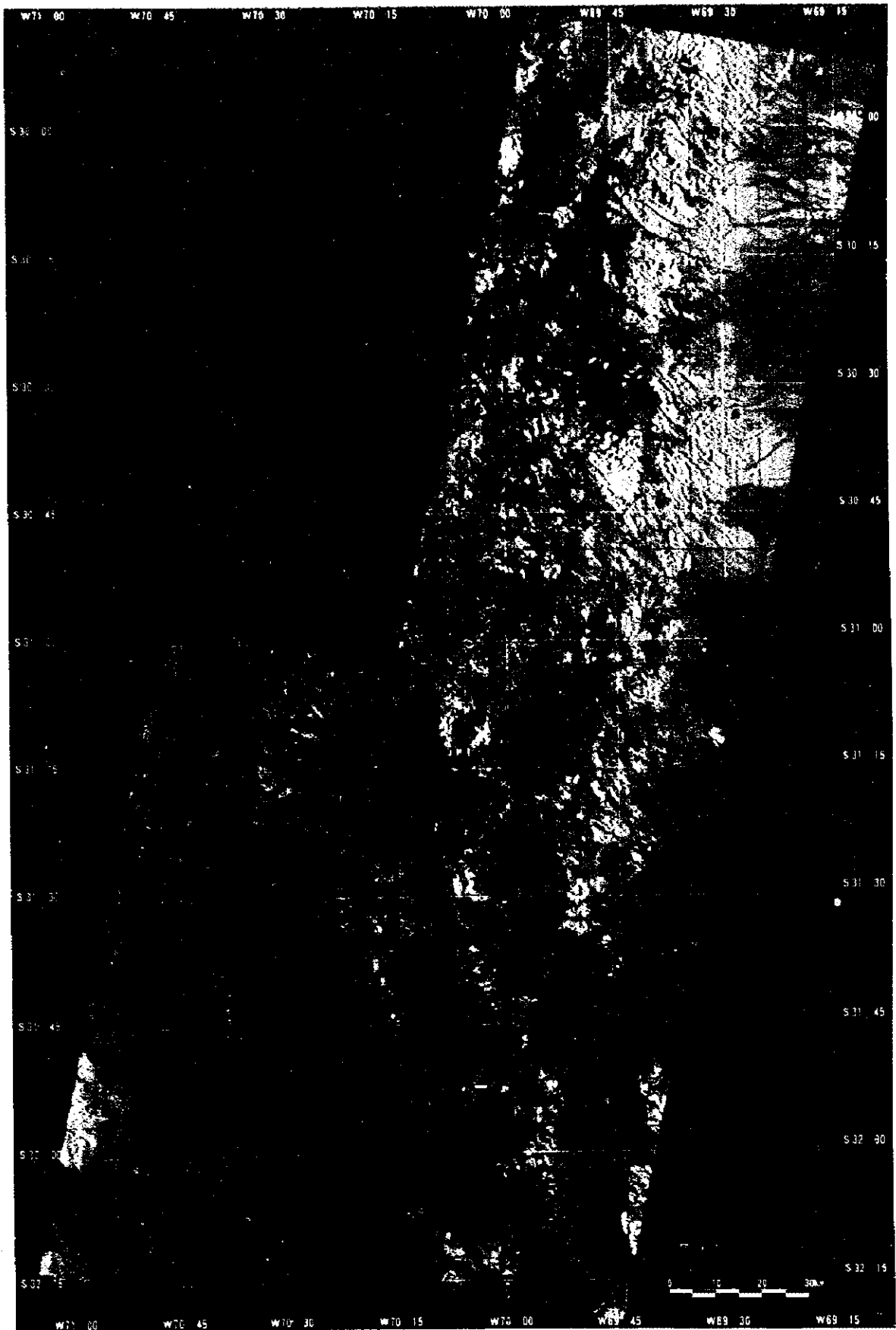
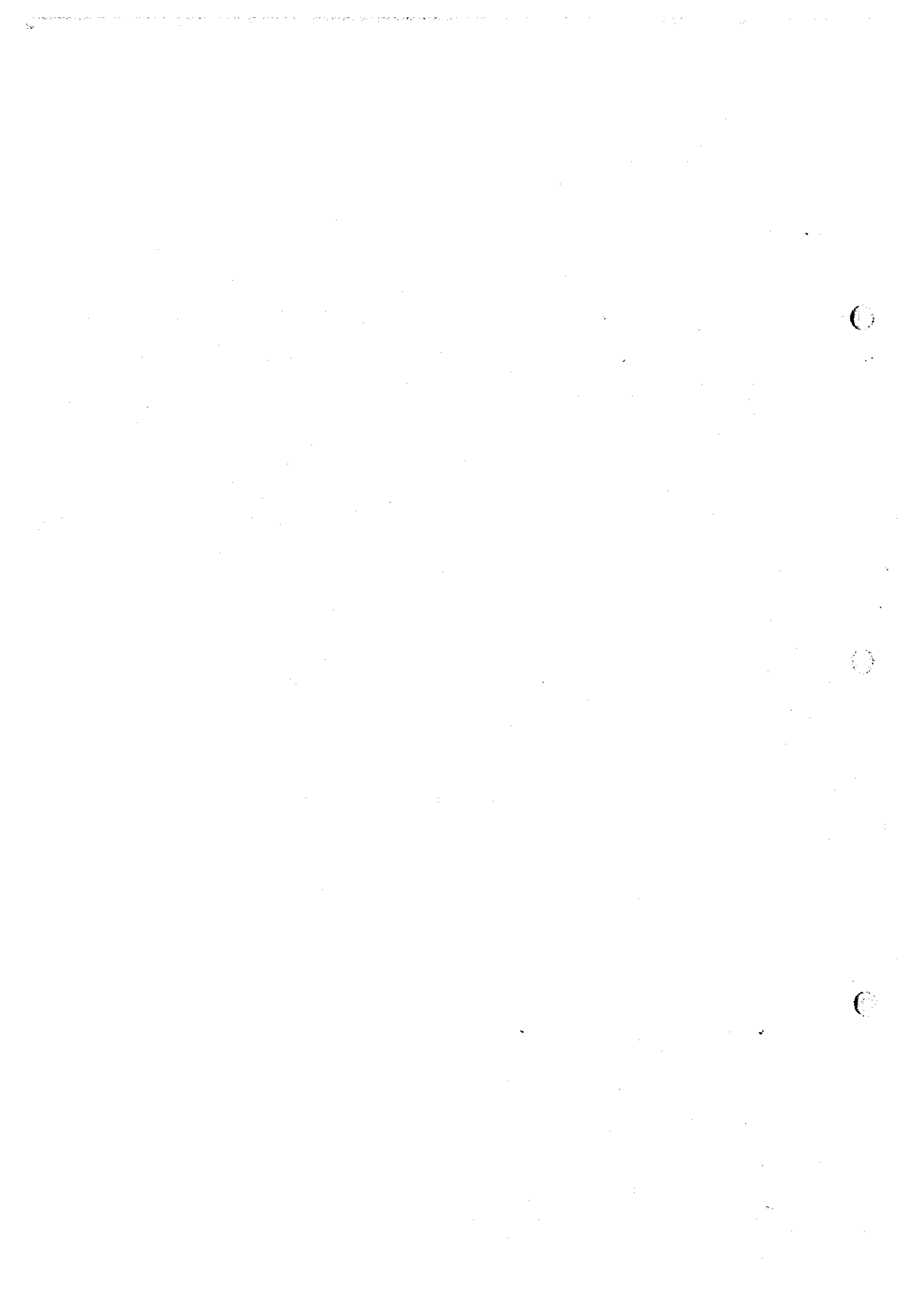


Fig.20 Logarithmic Residual Image of the L-Image Area (BGR = 678)



Fig.20 Logarithmic Residual Image of the L-Image Area (BGR 678)



$$GI = a \cdot Fi + b$$

(5.3)

En este caso, "Fi" es el valor de "ratioing", "Gi" es el nivel de gris en las imágenes impresas, "a" es la sensibilidad y "b" es la polarización. Los valores "a" y "b" se obtienen de la distribución de las tasas reales de ratioing. A igual que en el procesamiento de residuales logarítmicos, los afloramientos rocosos fueron identificados utilizando las imágenes con las zonas de nieve enmascaradas y se obtuvo el factor de ratioing desde la parte Este de las Imágenes U y L. En la siguiente tabla se resumen los valores de sensibilidad y polarización:

Table 6 Ratio Processing Coefficient (Rock-Exposure Zone)

Relación	Promedio	Desviación estándar	Sensibilidad	Polarización
5/6	1,351691	0,451890	113,302	-25,149
5/7	1,450332	0,196803	260,159	-249,317
5/8	1,920333	0,307791	166,347	-191,442

Las Figuras 21 y 22 son las imágenes de "ratio" (AVR= 5/6, 5/7, 5/8) procesadas con la sensibilidad y polarización indicadas. En estas imágenes, las zonas de alteración aparecen blancas y se distinguen fácilmente del resto de las zonas. Sin embargo, al aplicar la sensibilidad y la polarización a todos los afloramientos, el brillo de las zonas de alteración llegó a saturarse, haciendo muy difícil distinguir la diferencia de tonos entre las diferentes zonas de alteración.

Las imágenes de "ratio" (AVR= 5/6, 5/7, 5/8) presentan las siguientes características:

- Las zonas de alteración aparecen blancas y se distinguen fácilmente del resto.
- Las mismas materias aparecen en los mismos colores independientemente de los efectos de los relieves topográficos, exposición de laderas y sombras.
- El límite de las coberturas de nieve no es claro.
- Los sedimentos de los lagos salados son representados en color singular (verde amarillento claro).
- Dado que los valores de ratio están atribuidos a las zonas de alteración, los afloramientos rocosos aparecen monótonos, haciendo difícil distinguir la geología.
- Dado que la sensibilidad y la polarización ocupan todas las gamas, la diferencia de tono de las zonas de alteración es casi imperceptible y no permite hacer su clasificación.