

2.6 Identificación de las zonas de alteración y ratioing para acentuar las zonas de alteración

Hasta aquí se ha podido obtener las imágenes de "ratio" que representan claramente las zonas de alteración y los valores de residuales logarítmicos que se deducen haberse convertido en pseudo-reflectancia. El siguiente paso consistió en identificar las zonas de alteración para su posterior clasificación, y en generar las imágenes de ratio que resalten estas zonas. Para su identificación, se utilizaron las imágenes con corrección de brillo, así como las imágenes de residuales logarítmicos y de "ratio", porque fue necesario eliminar las áreas cubiertas de nieve, los sedimentos de los lagos salados, y los afloramientos rocosos que se asemejan a las zonas de alteración (la parte SO de la Imagen L), la cobertura vegetal y los ruidos.

2.6.1 Valores de umbral para la identificación de las zonas de alteración

Teniendo las zonas de alteración claramente definidas como las "áreas supervisadas", se procedió a identificar de las demás zonas de alteración mediante formación de umbrales. Las áreas supervisadas fueron seleccionadas del mapa de distribución de las zonas de alteración elaborado en el primer año del estudio mediante el análisis de las imágenes de LANDSAT TM. Con el fin de elaborar máscaras que cubran, como regla general, todas las zonas identificadas visualmente en las imágenes LANDSAT TM, se aplicaron los criterios no muy rigurosos para la identificación de las posibles zonas de alteración.

(1) Eliminación de las coberturas de nieve

Area objeto:	Todo del área
Imágenes utilizadas:	Imágenes de residuales logarítmicos (siete bandas) + imágenes de transformación lineal de escala de gris
Umbrales y condiciones:	Fueron eliminados como las áreas cubiertas de nieve, todos los pixeles que satisfacían las siguientes condiciones: Bandas 1 y 2 > 220 Bandas del 4 al 7 < 40

(2) Eliminación de los sedimentos de los lagos secos

Area objeto:	Todas las áreas, sin incluir las del (1).
Imágenes utilizadas:	Imágenes de residuales logarítmicos (siete bandas) + imágenes de transformación lineal de escala de gris
Umbrales y	Fueron eliminados como los sedimentos de los

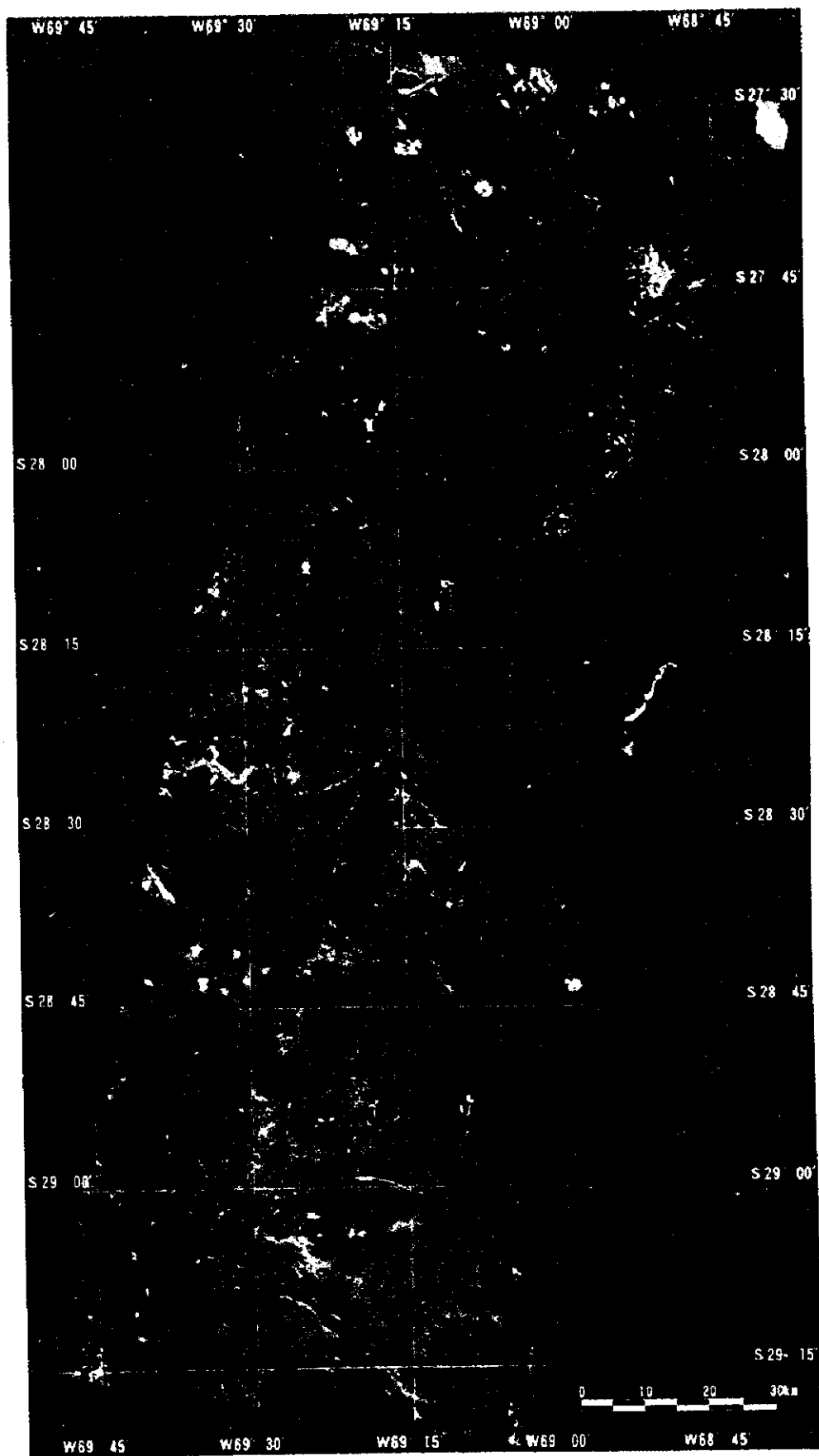


Fig.21 Ratio Image of the U-Image Area (BGR = 5/6, 5/7, 5/8)

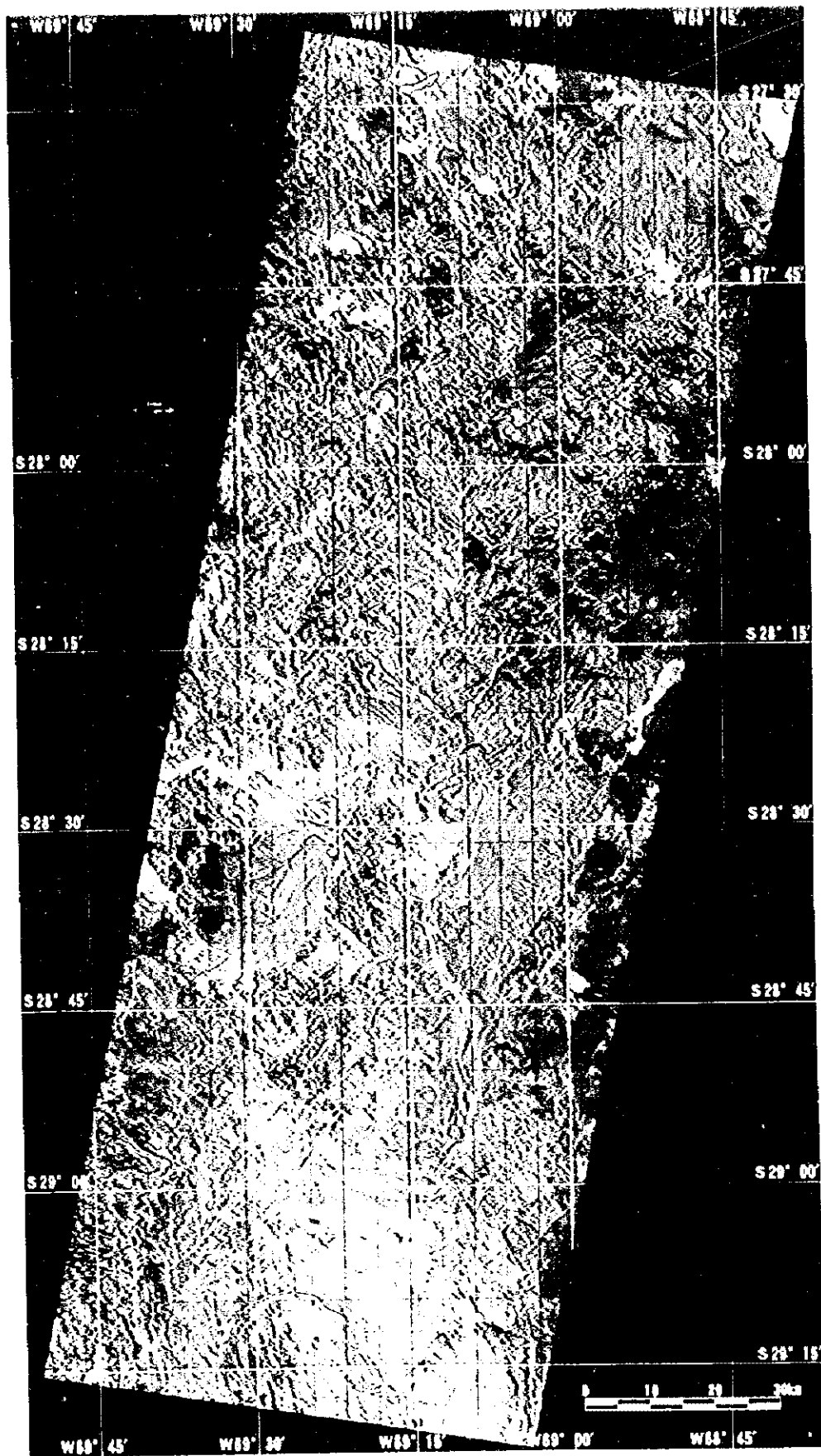


Fig. 21 Ratio Image of the U Image Area (BGR = 5.0, 5.7, 5.8)





Fig.22 Ratio Image of the L-Image Area (BGR = 5/6, 5/7, 5/8)

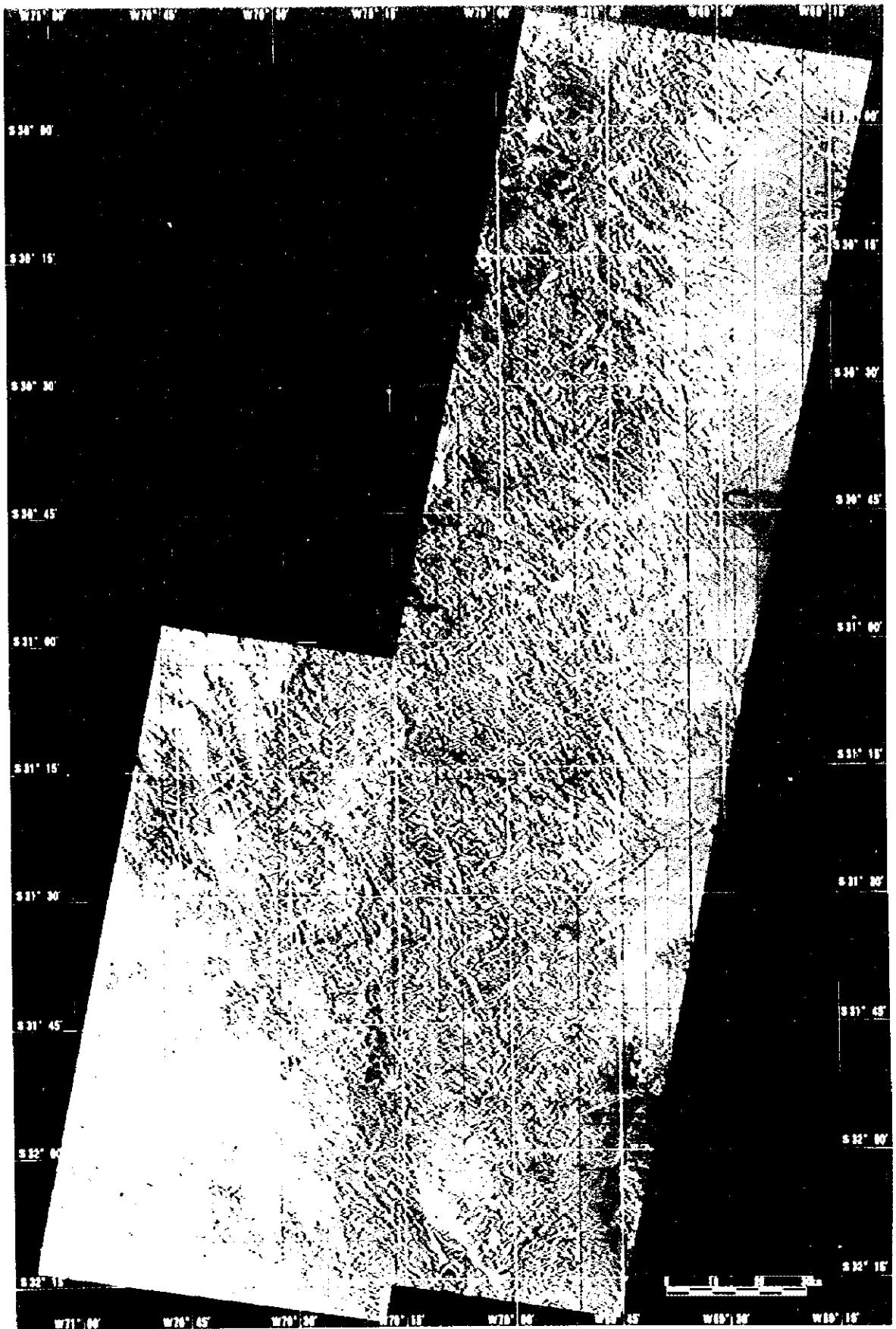
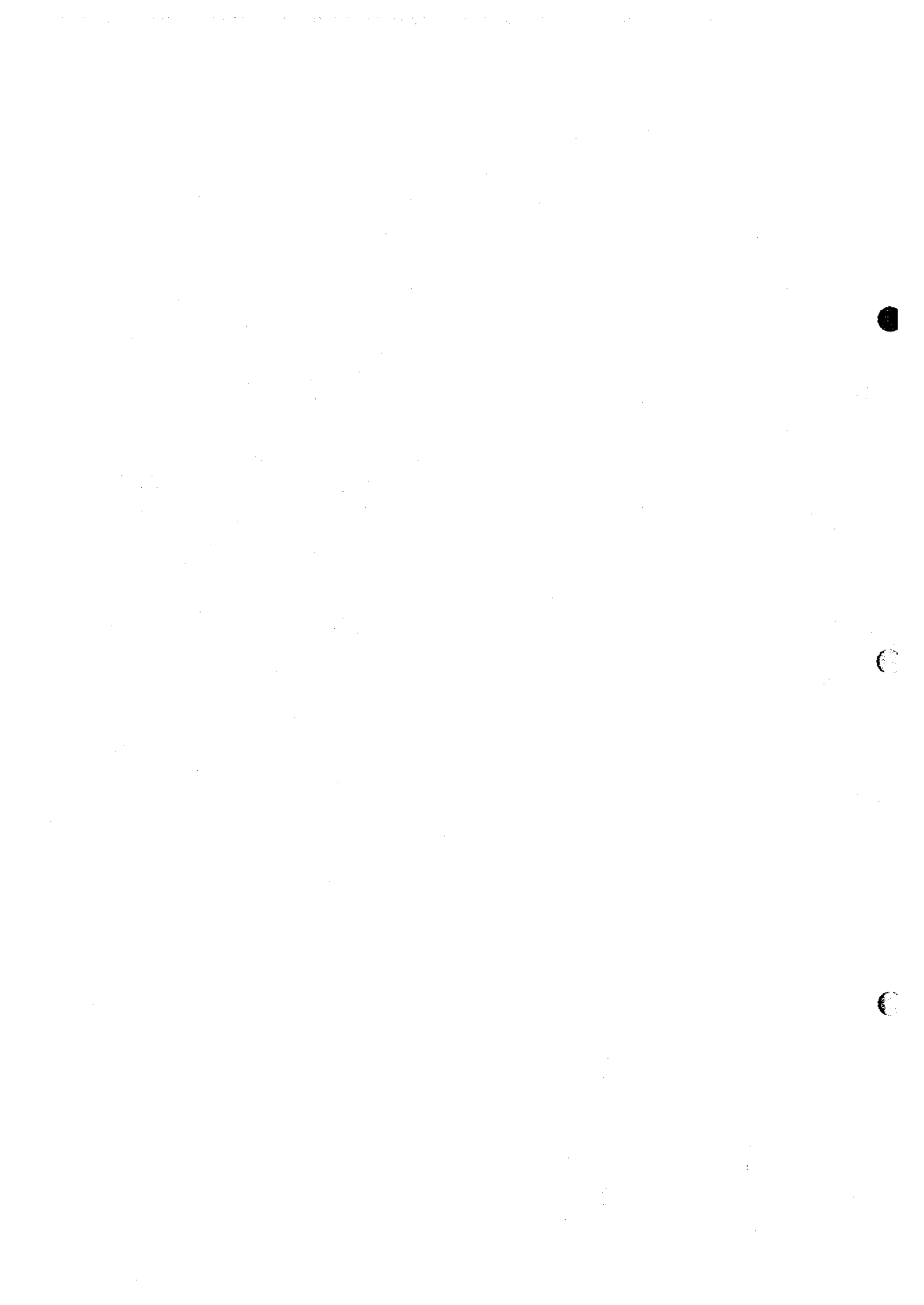


Fig.22 Ratio Image of the I-Image Area (BGR = 5.6, 5.7, 5.8)



condiciones: lagos salados, todos los pixeles que satisficían las siguientes condiciones:
 Bandas 1 y 2 > 220
 Bandas 5 y 6 < 40
 ó
 Banda 5 < 10

(3) Eliminación de ruidos (principalmente, los producidos por el retraso de respuesta)

Area objeto: Todas las áreas, sin incluir las del (1) y (2)
 Imágenes utilizadas: Imágenes de residuales logarítmicos (siete bandas) + imágenes de transformación lineal de escala de gris
 Umbrales y condiciones: Fueron eliminados como los ruidos, todos los pixeles que satisficían las siguientes condiciones:
 Bandas 3 < Banda 2
 Bandas 3 < Banda 5
 Banda 4 < 40

(4) Identificación de las zonas de alteración

Area objeto: Todas las áreas, sin incluir las correspondientes a los numerales (1) al (3)
 Imágenes utilizadas: Imágenes de ratio (AVR = 5/6, 5/7, 5/8) + imágenes de residuales logarítmicos (siete bandas) + imágenes de transformación lineal de escala de gris
 Umbrales y condiciones: Fueron identificadas como zonas de alteración, todos los pixeles que satisficían las siguientes condiciones:
 5/6, 5/7, 5/8 > 125 (ratioing)
 Bandas 4 > Banda 5 (residuales logarítmicos)

Las Figuras 23 y 24 indica la ubicación de las posibles zonas de alteración así identificadas. Con la definición de los valores de umbral se ha podido cubrir casi todas las zonas de alteración interpretadas e identificadas visualmente de las imágenes de LANDSAT TM. Entre las que no fueron identificadas se menciona la zona de alteración (AA7044) del Norte de la Imagen L. Esta se distribuye entre las rocas volcánicas de Oligoceno a Mioceno; aparece en color pardo claro en las imágenes de falso color de JERS-1 OPS (AVR= 358) y en color verde azulado oscuro en las imágenes de "ratio" (AVR= 5/6, 5/7, 5/8). Por este motivo, la zona identificada como AA7044 parece no ser una zona de alteración y podría haber sido un error de interpretación en el análisis de imágenes de LANDSAT TM.

Dado que los criterios de identificación aplicados en esta fase del estudio no han sido rigurosos, tal como se indicó anteriormente, fueron seleccionadas mayor

número de las posibles zonas de alteración que cuando se identificaron visualmente las imágenes de LANDSAT TM, en especial en los taludes y quebradas aguas abajo de las zonas de alteración. Por ejemplo, se identificaron las zonas de alteración alargadas a lo largo de las quebradas al Sur de la Imagen U y al NE de la Imagen L.

2.6.2 Ratioing para resaltar las zonas de alteración

Las imágenes de "ratio" (AVR= 5/6, 5/7, 5/8) utilizadas para la identificación de las zonas de alteración fueron generadas con la sensibilidad y polarización definidas para discriminar las zonas de alteración del resto de las zonas. Por lo tanto, el brillo está saturado en muchas de las zonas de alteración y los diferentes minerales de alteración son difíciles de distinguir por presentar tonalidades muy semejantes. Por este motivo, se ha realizado el ratioing para resaltar las zonas de alteración, a manera de facilitar su posterior clasificación.

Este método consiste en calcular la sensibilidad y polarización a partir de los valores de ratio sólo de las áreas identificadas como las zonas de alteración, y luego exagerar la diferencia de tonos. El brillo del resto de las zonas representadas con esta sensibilidad y polarización es sumamente reducido en todas las bandas. En este análisis, se ha efectuado esta operación sólo en las posibles zonas de alteración, mientras que para el resto de las zonas se insertaron las imágenes monótonas de la Banda 5. De esta manera, se representó claramente la ubicaciones de las posibles zonas de alteración. En la siguiente tabla se indican la sensibilidad y la polarización utilizadas en esta operación.

Table 7 Ratio Processing Coefficient for Enhancement of Alteración Zone

	Ratioing para resaltar las zonas de alteración				Ratioing	
	Promedio	Error estándar	Sensibilidad	Polarización	Sensibilidad	Polarización
5/6	2,024553	0,170549	300,307	-479,785	113,302	-25,149
5/7	1,583126	0,178586	286,697	-325,877	260,159	-249,317
5/8	1,667580	0,186105	275,114	-330,746	166,347	-191,442

En esta tabla se indican también la sensibilidad y polarización de ratioing para su comparación. Se puede observar que la degradación de los colores es 2,65 veces más ampliada en 5/6 y 1,65 veces más en 5/8. Las Figuras 25 y 26 son las Imágenes U y L, sometidas al proceso de ratioing para resaltar las zonas de alteración utilizando la sensibilidad y la polarización indicadas.

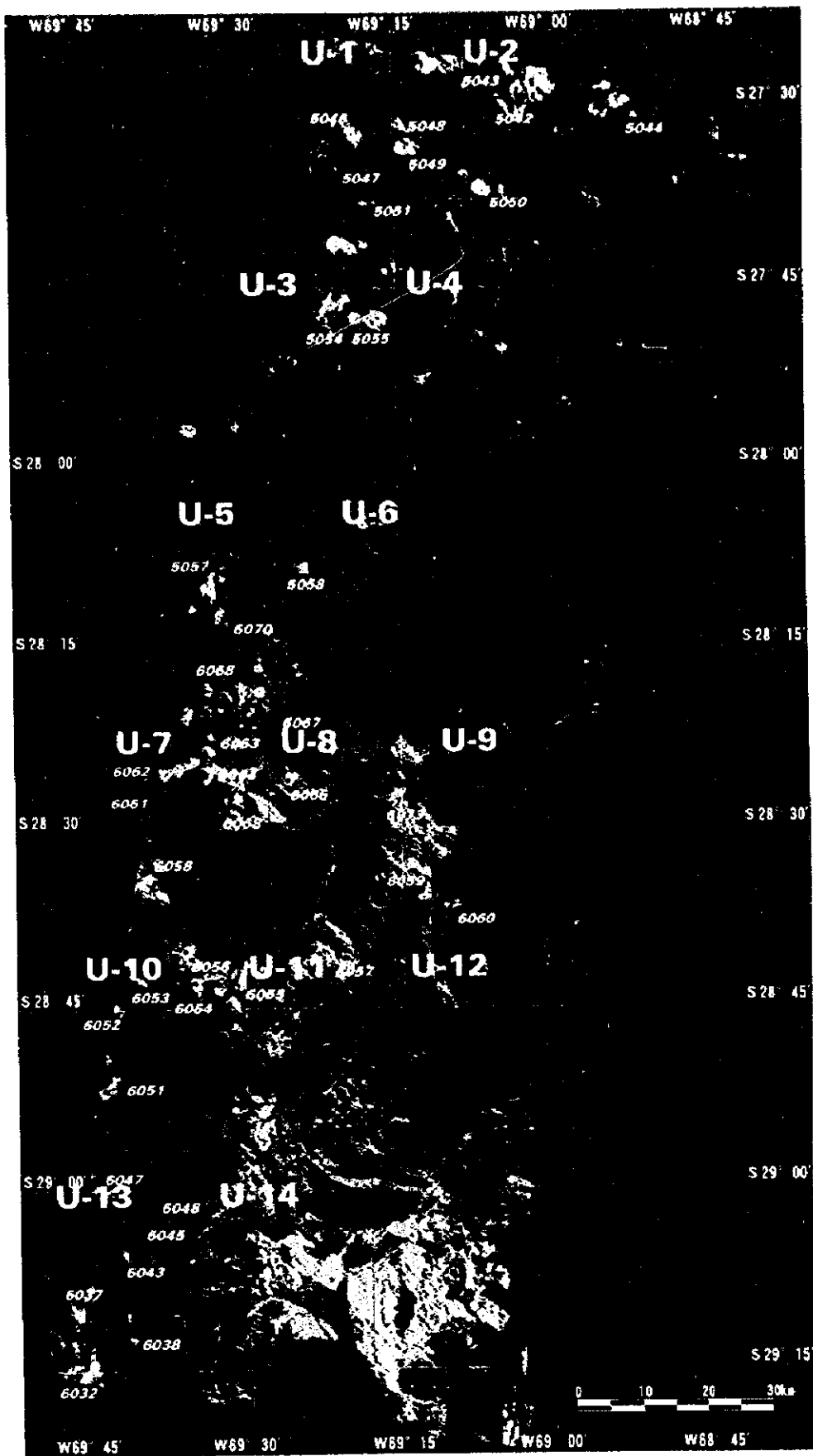


Fig.23 Extracted Alteration Zones from JERS-1 OPS Image and from LANDSAT TM Image in the U-Image Area

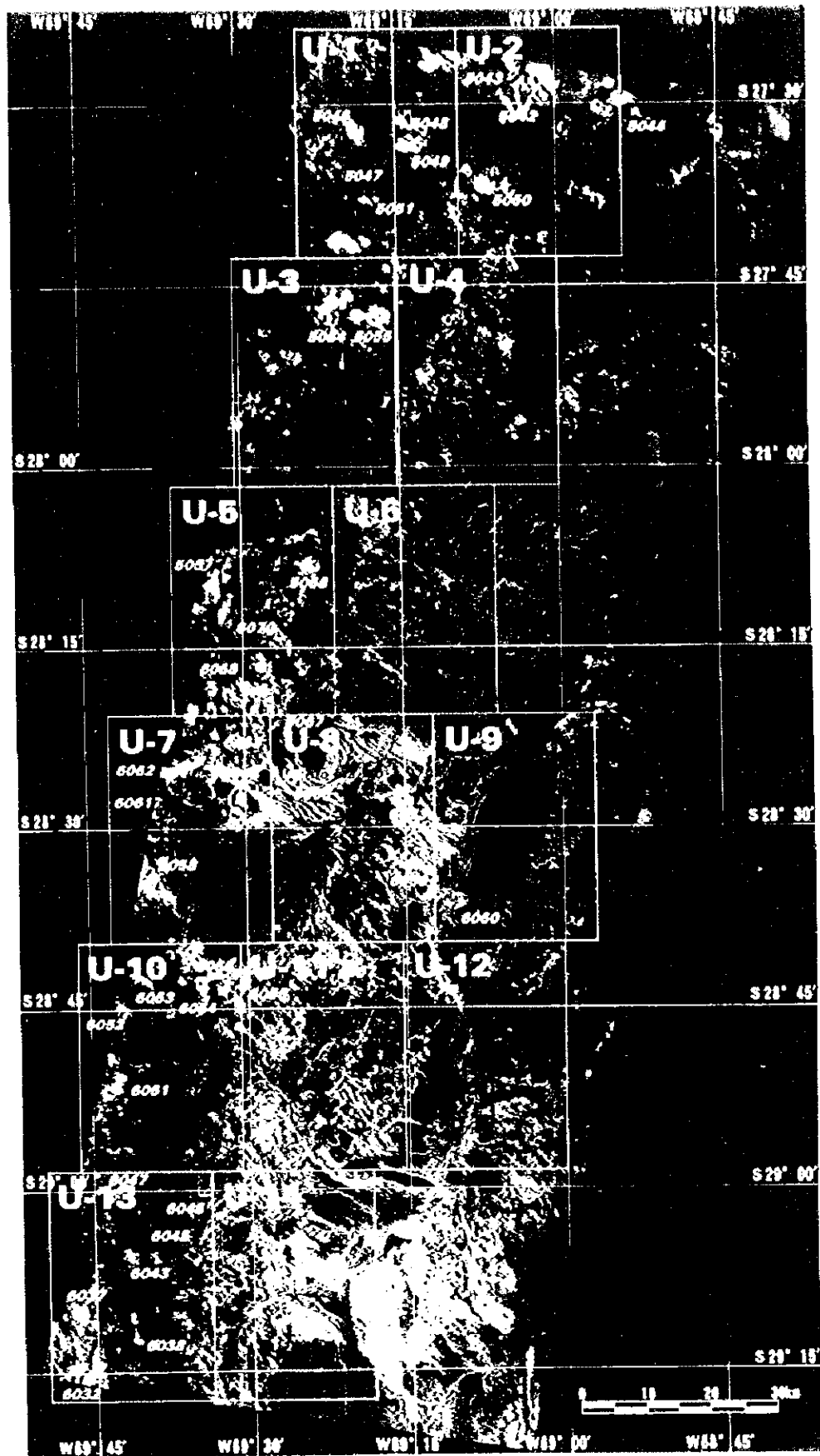


Figure 1. Extracted Attention Zone from JERS-1 OPS image of the study area. BANDS 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100.



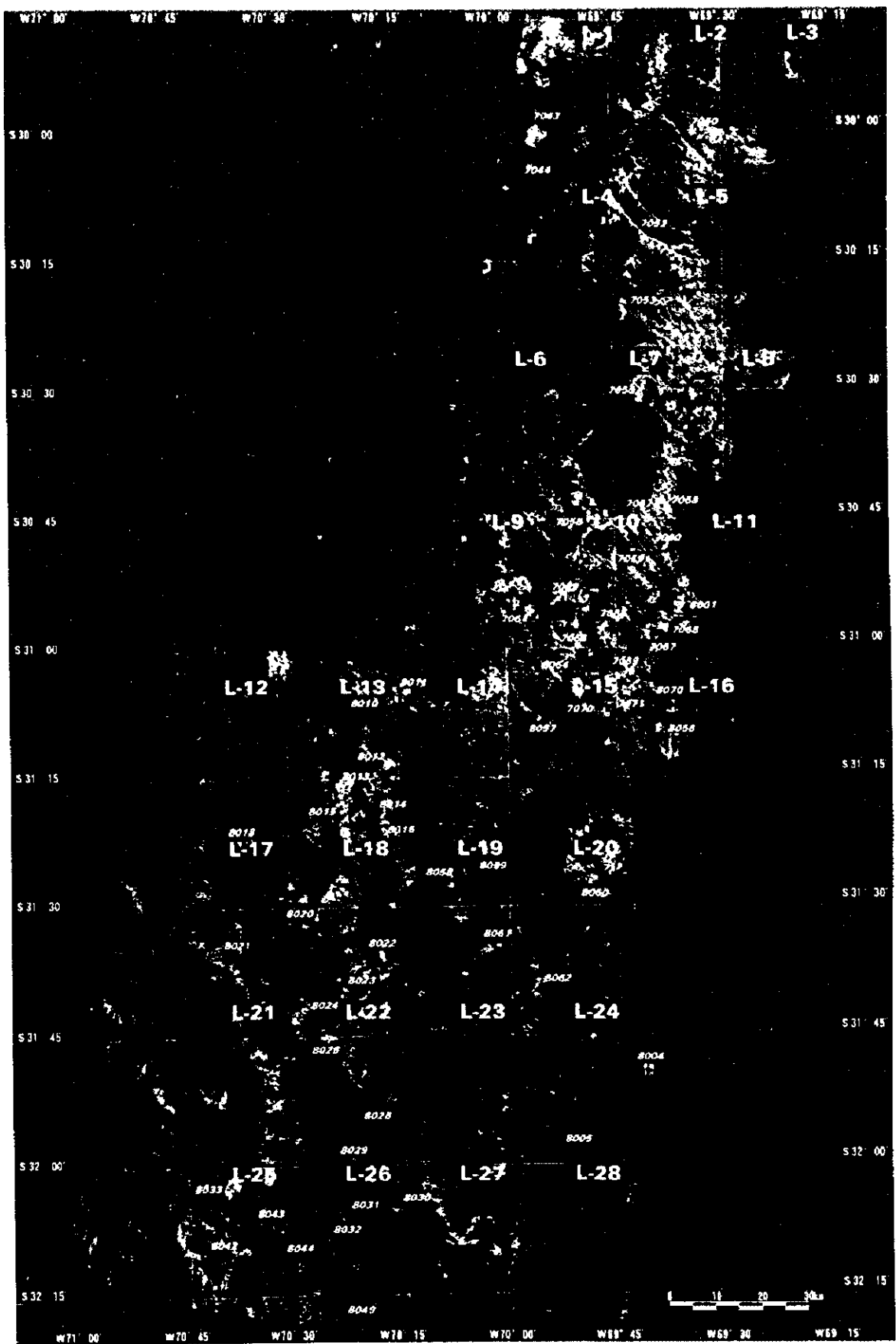
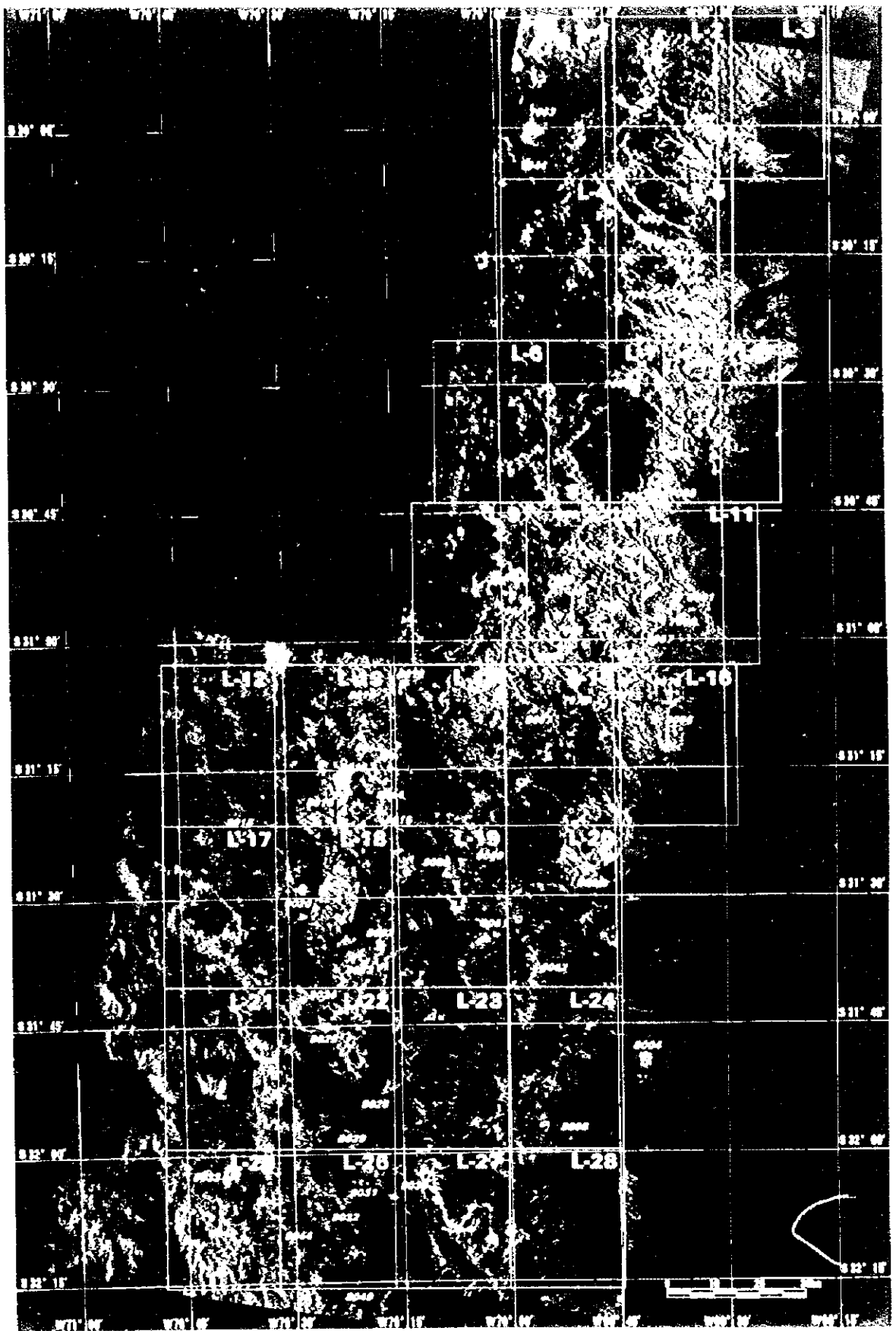


Fig.24 Extracted Alteration Zone from JERS-1 OPS Image and from LANDSAT TM Image in the L-Image Area





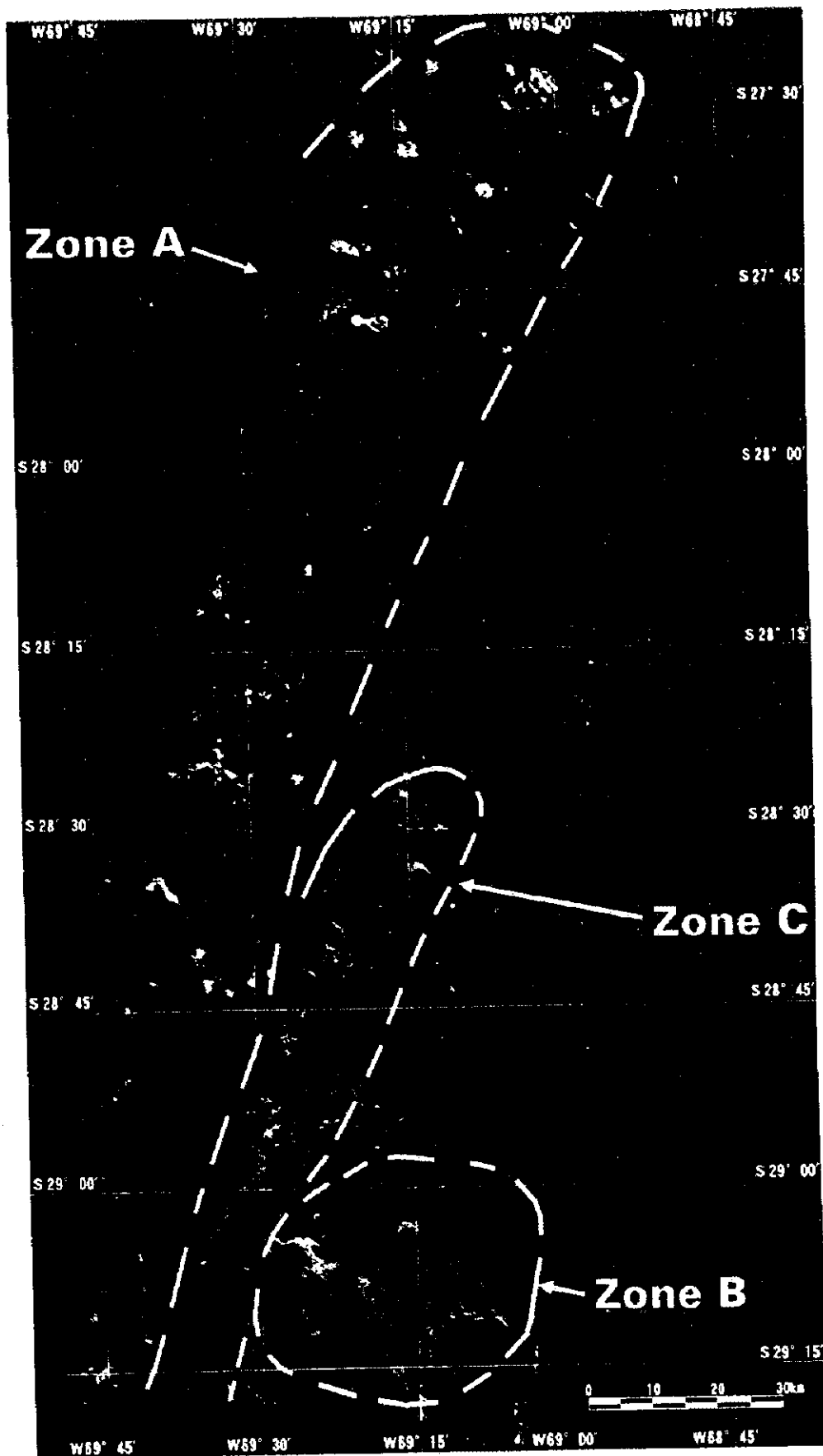
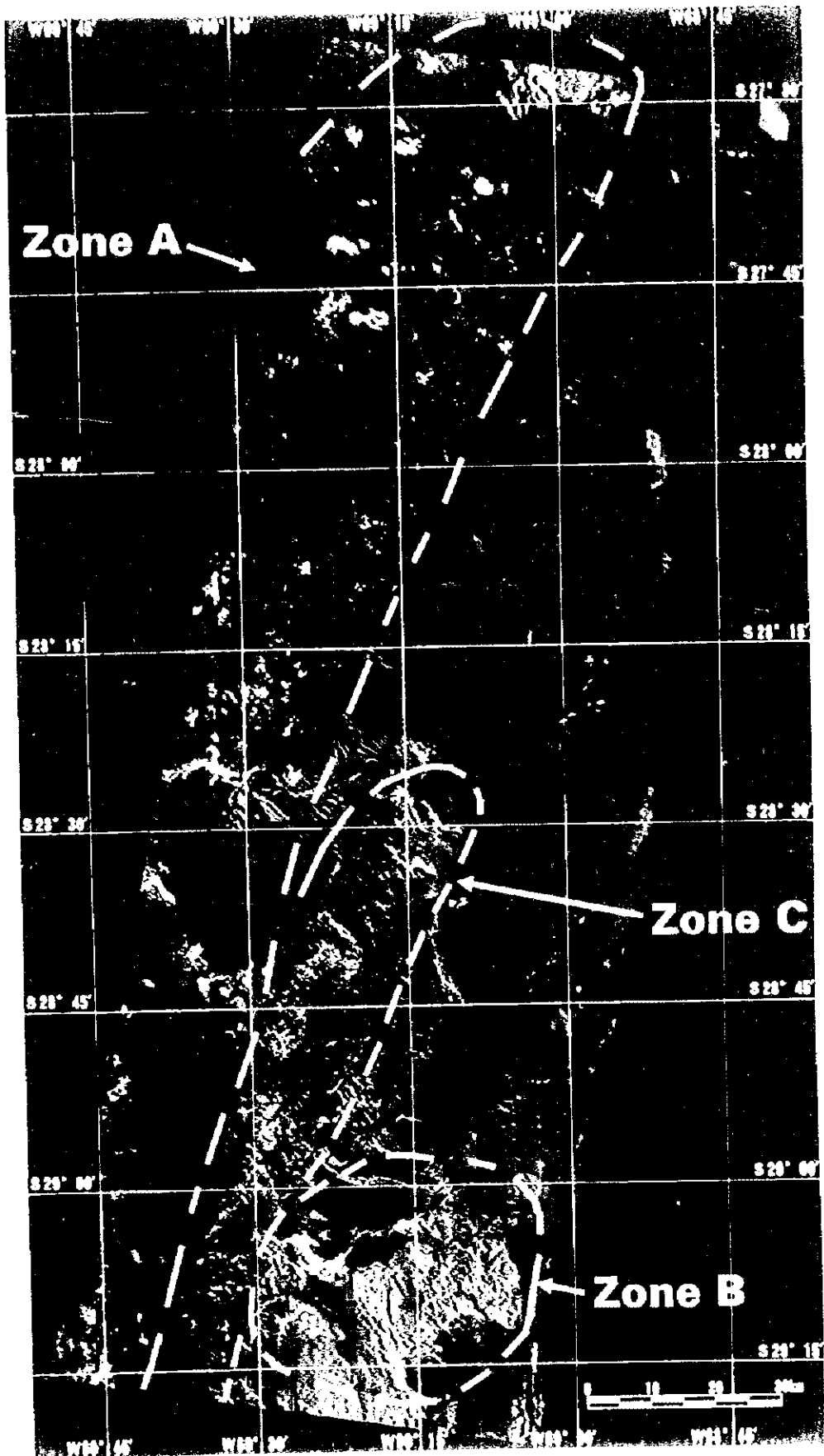
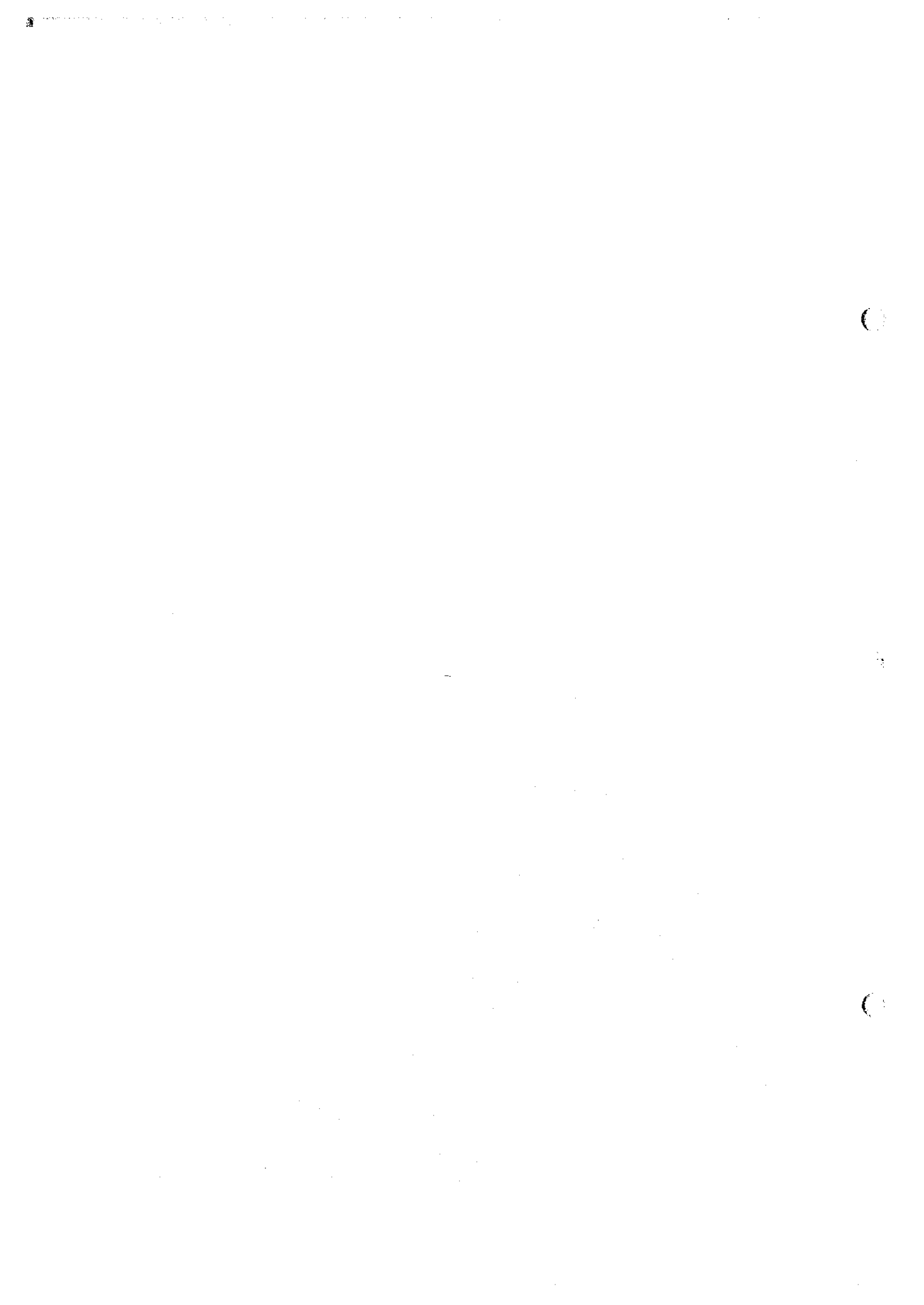


Fig.25 Enhanced Ratioing in the U-Image Area





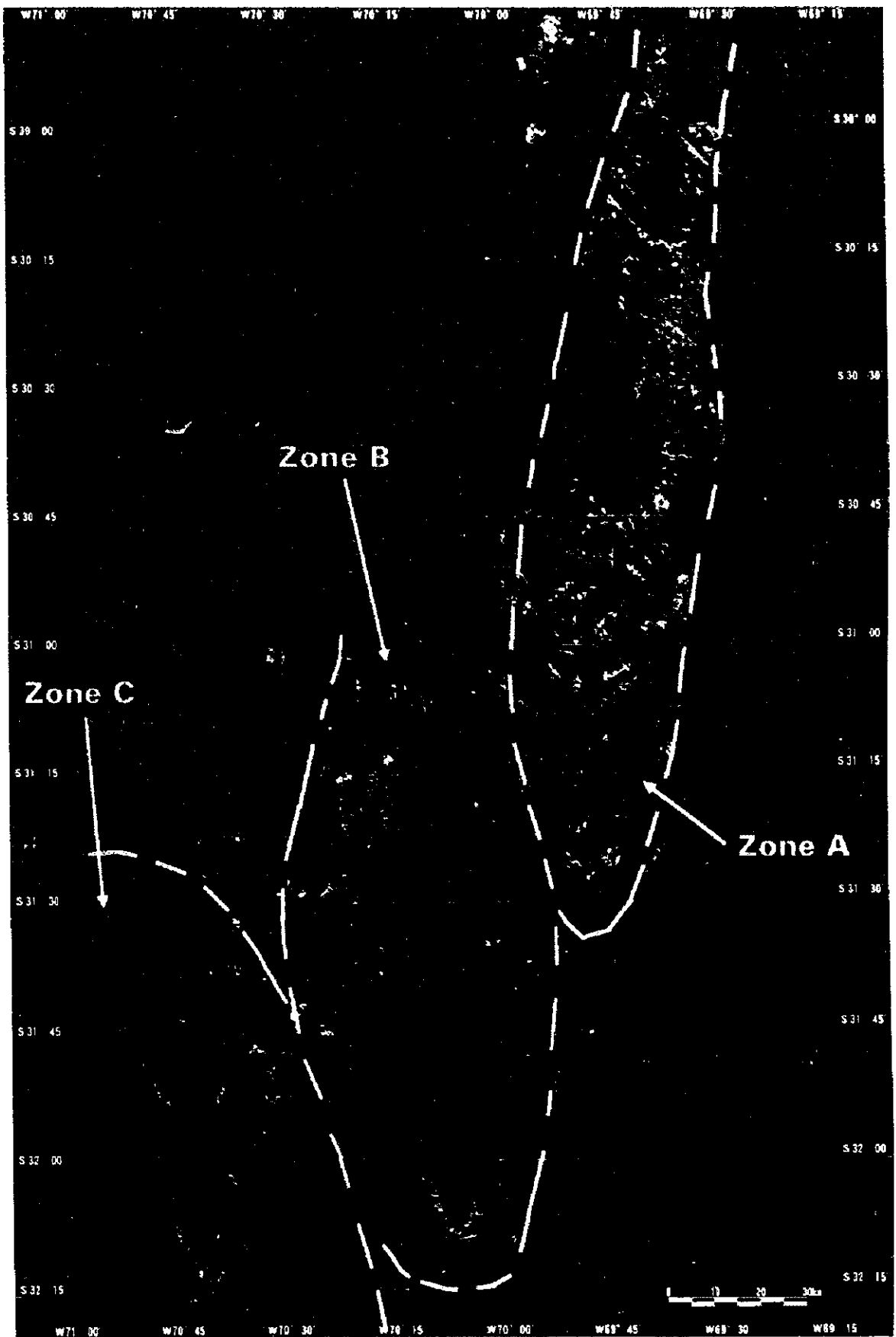
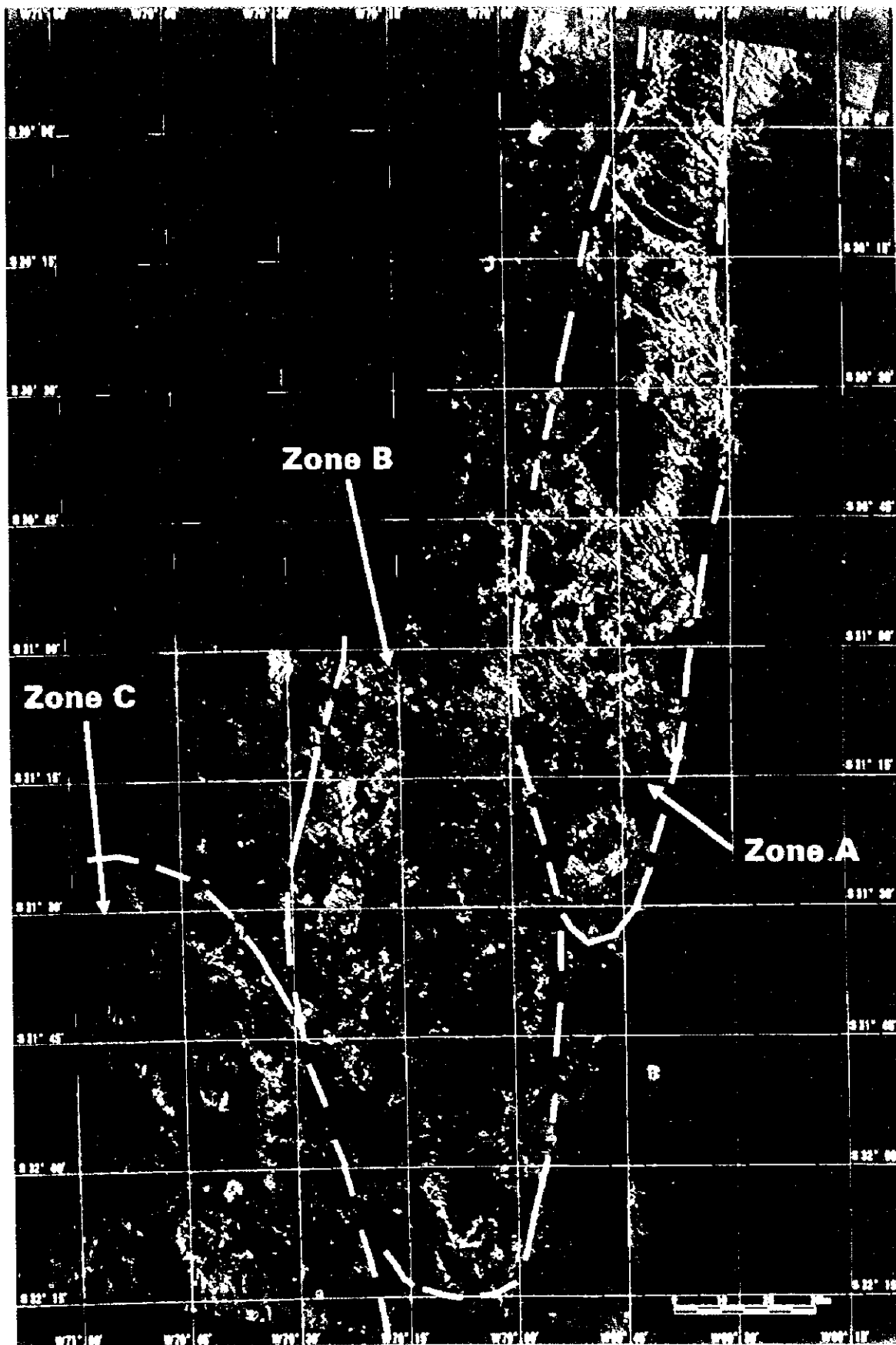


Fig.26 Enhanced Ratioing in the L-Image Area





2.6.3 Distribución y tonos de las zonas de alteración en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración

(1) Imagen U (Figura 25)

Las zonas de alteración según las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración elaboradas de la Imagen U pueden ser clasificadas en las tres grandes zonas siguientes según su forma y tono.

La Zona A está constituida por las zonas de alteración que se extienden en forma de franja al Oeste del eje central de la imagen, que aparecen predominantemente en color blanco azulado a amarillento. Normalmente, son zonas grandes (de aprox. 1 km de diámetro) y sus bordes son claros. Aguas abajo de estas zonas se extiende un área de color menos intenso (opaco) a unos 5 km. de largo, que probablemente se debe a los sedimentos fluviales o taludes formados por las materias provenientes de las zonas de alteración aguas arriba. Las posibles zonas de alteración se distribuyen principalmente dentro de las rocas graníticas y de las rocas volcánicas terciarias.

La Zona B corresponde a la parte de color rojo oscuro que aparece al SE de la imagen U, que ocupa una extensión relativamente grande (zona de rocas graníticas erosionadas). Se localiza dentro de la zona de distribución de las rocas graníticas de la parte SE que aparece en color blanco en la imagen de falso color (Figura 17). Si bien es cierto que, normalmente, las zonas de alteración aparecen en color verde claro en las imágenes de falso color, cuando están dentro de las rocas graníticas toman el color blanco grisáceo. También en las imágenes de residuales logarítmicos (Figura 19) y de "ratio" (Figura 21) aparecen en diferentes tonalidades en comparación con las demás zonas de alteración. Por lo tanto, en la parte SE de la Imagen U donde se concentran las partes de color rojo oscuro, es muy probable que se haya identificado una zona que no sea la de alteración.

Sin embargo, el segmento rojo oscuro presente dentro de la zona de distribución de las rocas graníticas al centro de la Imagen U, parece tener otro significado, puesto que esta parte ha sido identificada visualmente como la zona de alteración AA6059, según las imágenes de LANDSAT TM. Esta zona aparece en color verde claro en la imagen de falso color (Figura 17), amarillo claro en la imagen de "ratio" (Figura 21) y violeta claro en la imagen residuales logarítmicos (Figura 19), presentando características similares a las de una zona de alteración. Por esta razón, es muy probable que esta parte que aparece en color verde oscuro sea una zona de alteración.

La Zona C está constituida por las zonas de color azul claro que se distribuyen al Sur del eje central de la imagen U. Estas son pequeñas zonas de varias centenas de metros cada una, con bordes no muy definidos, y están presentes dentro de la zona de distribución de las rocas sedimentarias devónicas o carboníferas. Considerando que las rocas sedimentarias contienen calizas y que

las posibles zonas de alteración identificadas se distribuyen a lo largo de una estratificación, es probable que el color se deba a la reacción a calizas.

(2) Imagen L (Figura 26)

Las posibles zonas de alteración en la Imagen L revisten diferentes tonos en comparación con las de la Imagen U. Mientras que muchas de las zonas de alteración en esta última se caracterizan por ser relativamente grandes, con bordes claros y de color amarillento, las zonas de la Imagen L son menos grandes y sus bordes son confusos. Sus colores son predominantemente azules y pocas aparecen en color amarillento como en el caso de la Imagen U. Las posibles zonas de alteración en la Imagen U se clasifican en tres grandes zonas siguientes según sus tonalidades.

La Zona A se distribuye en las zonas montañosas que colindan al Oeste de la cuenca del nordeste de la Imagen L. De estas, las zonas que se extienden dentro de las montañas se caracterizan por su color blanco azulado brillante y forma irregular. Estas se distribuyen desde el NE hasta el E de la Imagen L. Las zonas que están en las proximidades del borde de la cuenca del Este revisten un tono rojizo y los colores se van transformando gradualmente. Por otro lado, en la parte NE existe una franja blanca a lo largo del río. Las zonas de colores blanco azulado a violeta rojizo presentes en las áreas montañosas están dentro de la zona de distribución de las rocas sedimentarias del Carbonífero a Pérmico (segmentos verdes de la Figura 18) y casi no se identifican dentro de la zona de distribución de las rocas volcánicas del Oligoceno a Mioceno (segmento violeta de la Figura 18). Las mismas características han sido identificadas visualmente en las imágenes de LANDSAT TM. En este caso fueron identificadas múltiples zonas de alteración dentro de la zona de distribución de las rocas sedimentarias del Carbonífero a Pérmico. Las zonas de alteración interpretadas en ambas etapas del estudio son casi iguales.

Estas posibles zonas de alteración aparecen en color verde claro en la imagen de falso color (Figura 18) con un tono algo más brillante que las rocas circundantes no alteradas. En la imagen "ratio" (Figura 22), todas estas zonas aparecen en color blanco amarillento. Es muy probable que todas ellas sean zonas de alteración por presentar las características singulares como tales.

La Zona B está conformada por las posibles zonas de alteración que se distribuyen alrededor del eje central de la Imagen L y que aparecen en colores verde oscuro o blanco amarillento. En la parte Norte existen dos ó tres zonas grandes (con un diámetro de 5 km. aprox.) con bordes relativamente bien definidos. La que se ubica al extremo Norte es la zona más grande dentro de la Imagen L, aunque ésta no ha sido identificada como zona de alteración en el análisis de las imágenes de LANDSAT TM. Esto se debe a que la imagen de P233/R081 ha sido tomada en invierno cuando el área estaba cubierta de nieve. Es muy probable que

este segmento sea una zona de alteración, también por las características que presenta en las imágenes "ratio", de falso color y de residuales logarítmicos. La posible zona de alteración del extremo Norte se caracteriza por distribuirse entre las rocas volcánicas del Oligoceno a Mioceno. Por otro lado, las rocas volcánicas terciarias se extienden en forma alargada en rumbo NS a lo largo del eje central. En esta parte, muy pocas zonas de alteración han sido identificadas en el análisis efectuado en el primer año. Corresponde a esta parte la zona blanca a lo largo del eje central en la imagen de ratioing para resaltar las zonas de alteración (Figura 26).

La Zona C está constituida por las posibles zonas de alteración que se distribuyen en el territorio chileno al Oeste. Muchas de ellas aparecen en color violeta rojizo. Es un grupo singular puesto que las zonas de este tono en las imágenes tanto U como L aparecen únicamente en esta parte. Se localiza dentro de la zona de distribución de las rocas volcánicas del Cretáceo a Terciario, las mismas que en la imagen de falso color (Figura 18) están representadas en colores verde azulado a verde, siendo difícil distinguir de ellas las zonas de alteración. En la imagen de "ratio" (Figura 22) estas rocas aparecen en colores que varían de rosado claro a blanco amarillento, que son similares a los colores de las zonas de alteración, por lo que, en este caso también es difícil hacer una discriminación. Por lo tanto, es probable que la mayoría de las posibles zonas de alteración sea simplemente parte de las rocas volcánicas no alteradas.

2.6.4 Diferencia de tonos entre dos imágenes

Al observar las Imágenes U y L, muchas de las posibles zonas de alteración en la Imagen U aparecen en colores blanco amarillento a azulado, mientras que en la Imagen L, en color blanco azulado. De esta manera, existe una diferencia de tonos entre las dos imágenes, la cual se debe probablemente a dos causas. La primera es que las zonas de alteración revisten diferente naturaleza en las dos imágenes, y la otra es el probable error de corrección de brillo entre ambas.

Sobre la primera causa, es probable que dependiendo de la naturaleza de las zonas de alteración, éstas pueden tomar diferentes tonos. Las zonas de alteración al Oeste de la Imagen U, por ejemplo, se encuentran dentro de las rocas volcánicas y/o graníticas del Terciario (principalmente del Oligoceno a Mioceno). Este grupo de zonas conforma una faja continua de rumbo NNE-SSO desde la parte NO hasta el extremo SE de la imagen, y forma parte de la Faja El Indio. Esta Faja, según la interpretación visual de las imágenes de LANDSAT TM, parece extenderse hasta el Norte de la Imagen L (Figura 27) y se identifican las posibles zonas de alteración de casi el mismo tono en la parte Norte (Figura 26).

En cuanto al error de la corrección de brillo entre las imágenes U y L, tal como se describió en el apartado 2.3.3, no se ha podido realizar dicha corrección a falta del traslapeo entre las dos imágenes mosaico. Por esta razón, se generaron los

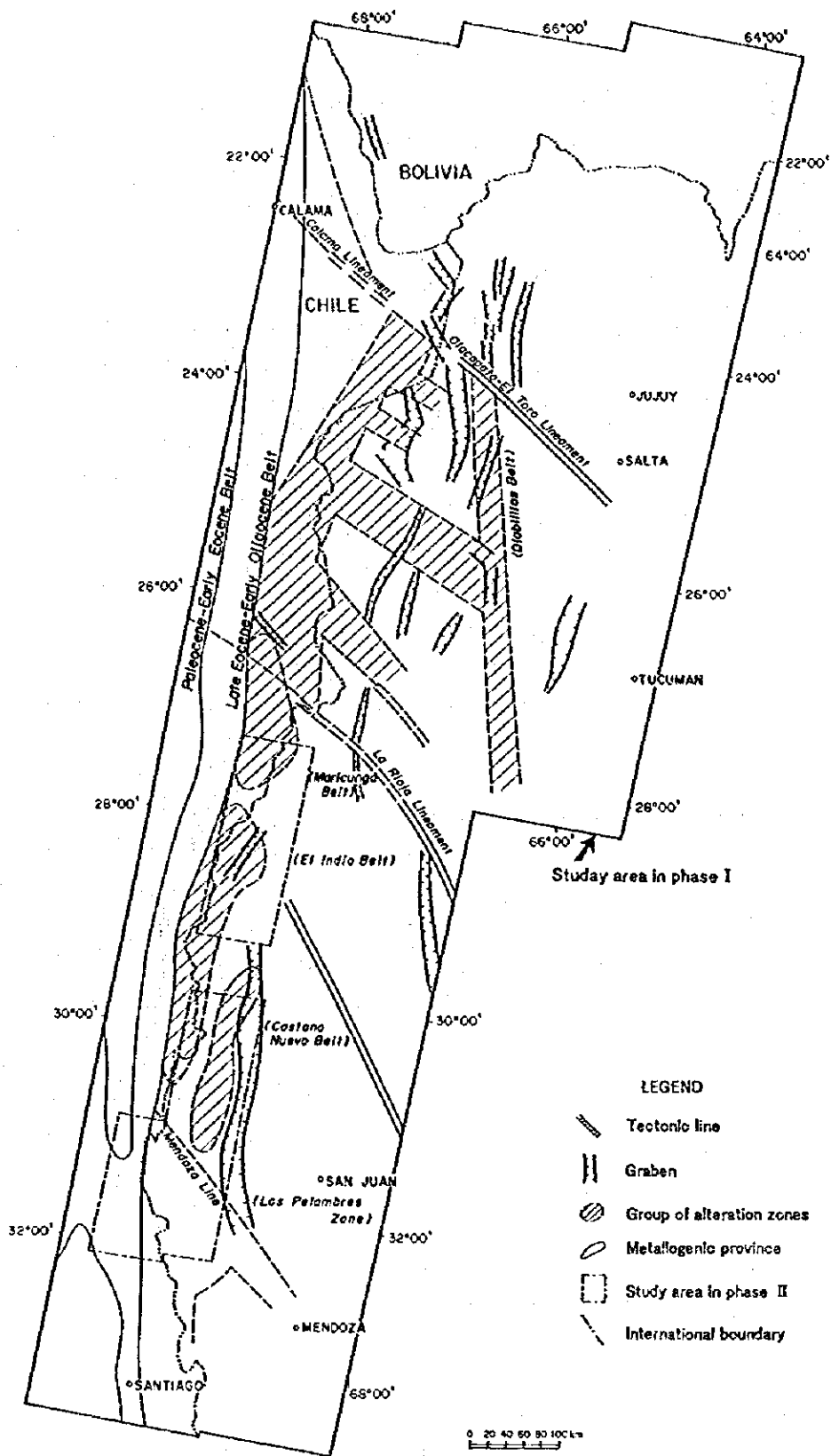


Fig.27 Belts of Alteration Zones Visually Extracted from LANDSAT TM Images

mosaicos suponiendo que no existe variación en la transmisividad atmosférica o en el comportamiento de respuesta de los sensores entre ambas. Sin embargo, al comparar el brillo entre las imágenes tomadas en diferentes fechas, utilizando el gráfico de dispersión como el que se muestra en la Figura 13, la línea de regresión no siempre muestra una inclinación del 45°. Este fenómeno se debe a la variación de la transmisividad atmosférica y de las características de respuesta de los sensores. Se deduce que la transmisividad atmosférica es muy sensible en la gama de ondas cortas de las bandas 1 y 2, lo que no ocurre en la gama de infrarrojo de ondas cortas. Dado que la variación de la transmisividad atmosférica en la gama de infrarrojo de ondas cortas es menor en comparación con la gama de rayos visibles, el gráfico de dispersión del brillo en el infrarrojo de ondas cortas debe concentrarse teóricamente alrededor de la línea con inclinación del 45°. Sin embargo, al trazar un gráfico de dispersión como el que se muestra en la Figura 13, la inclinación de la línea de regresión en la gama de ondas cortas muestra variaciones similares a la gama de rayos visibles. Por lo tanto, cuando se observa un mismo objeto en dos fechas diferentes, la relación de bandas ya no es constante. Por más que se apliquen la misma sensibilidad y polarización, no siempre el objeto aparece en el mismo tono. Al comparar las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración, se observa que la parte SE de la Imagen U y la parte NE de la Imagen L aparecen en tonos sensiblemente diferentes, aunque estas zonas parecen pertenecer al mismo grupo. Por ejemplo, el segmento rojo oscuro de la Imagen U y el segmento rojo azulado claro en la Imagen L son ligeramente diferentes. En el ratioing, para el color rojo se atribuye las bandas 5/8; el brillo de la Banda 8 en la Imagen L, probablemente sea menor en comparación al de la Banda 8 de la Imagen U.

2.6.5 Necesidad del ratioing para resaltar las zonas de alteración

Esta operación permite eliminar las sombras producidas por los relieves topográficos y resaltar los efectos del espectro de reflectancia. Sin embargo, su desventaja está en que no se puede hacer una evaluación absoluta de los colores. Es decir, los valores medios de cada ratio son asignados a 128 y se les da mayor nitidez a las imágenes (en 256 tonos) utilizando la desviación estándar de los valores de ratio. Por lo tanto, estos tonos dependen de las características espectrales de reflectancia de los materiales que se distribuyen en la zona para la que se realizó el procesamiento estadístico de los valores de ratio.

Esto lo demuestra el hecho de que las zonas de alteración son representadas en diferentes tonos en las imágenes de "ratio" ordinario y en las de ratioing para resaltar las zonas de alteración. Por este motivo, es difícil deducir los minerales de alteración a partir de los tonos.

En la Figura 28 se muestra la relación de los valores de ratio de siete minerales de alteración (yeso, alunita, caolinita, limonita, cuarzo, sericita y

calcita) en una zona de alteración identificada, suponiendo que estos minerales están presentes en la misma proporción..

Para facilitar la operación, no se ha tomado en cuenta la variación de la reflectancia cuando se mezclan dos diferentes minerales. Se ha supuesto que las imágenes hayan sido generadas con combinaciones de AVE = 5/6, 5/7, 5/8.

Cuando se aplican estas condiciones se deduce que los minerales de alteración tomarán los siguientes tonos en las imágenes.

Alunita:	Verde azulado claro
Yesos:	Rosado claro
Caolinita:	Blanco amarillento oscuro
Calcita :	Rojo algo oscuro
Sericita, cuarzo y limonita:	Verde oscuro algo oscuro

Al resaltar las zonas de alteración realizando el ratioing para las bandas 5/6, 5/7 y 5/8, los minerales de alteración aparecen en diferentes tonos. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 28, la diferencia entre sericita, cuarzo y limonita es tan imperceptible que no permite distinguir uno del otro ni siquiera con el ratioing. Además, el espectro de reflectancia presenta variaciones no lineares según el la mezcla de los minerales de alteración y su proporción.

Especialmente, en el caso de alunita, cuando se mezcla una pequeña cantidad de otros minerales de alteración (por ejemplo, 10%), el espectro de reflectancia de alunita cambia drásticamente y muestra un comportamiento similar al del otro mineral de alteración. Por lo tanto es difícil identificar cualquier mineral de alteración a partir de la diferencia de tonos a través del proceso de ratioing, aún cuando la proporción de tales minerales de alteración puedan ser especificada por algún método.

2.6.6 Imágenes de ratioing para enfatizar las zonas de alteración representativas

Aunque sea difícil deducir el tipo de minerales de alteración por la diferencia de tonos mediante ratioing, sí es posible clasificar las zonas de alteración en base a los tonos. En este apartado se analizarán los tonos de las zonas de alteración y su distribución en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración.

La Figura 29 es una composición en la que se plasmaron las zonas de alteración de Los Mogotes (AA6058) al Oeste de la Imagen U, interpretadas visualmente de las imágenes de LANDSAT TM sobre las imágenes de falso color. La zonas de alteración interpretadas están representadas con líneas continuas amarillas. Sin embargo, cabe señalar que los bordes de las zonas son provisionales y no coinciden con el perímetro real de las mismas. Las zonas de alteración en esta imagen aparecen en colores que varían de blanco a verde azulado claro. Asimismo, se observan los segmentos verde azulado opaco en los taludes agua abajo de las

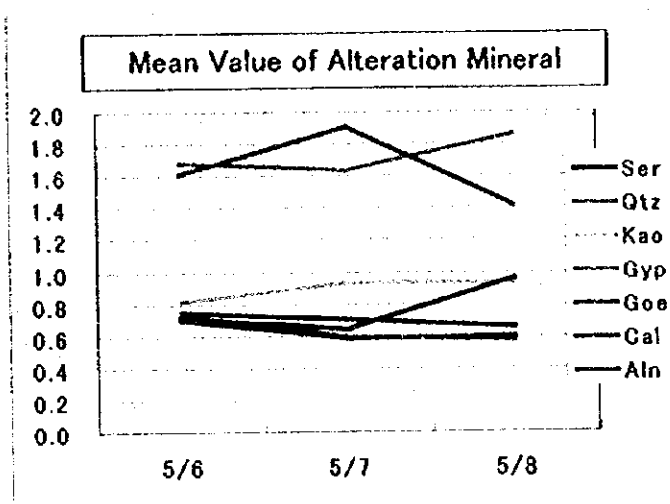


Fig.28 Relationship between Tones after Ratioing and Minerals

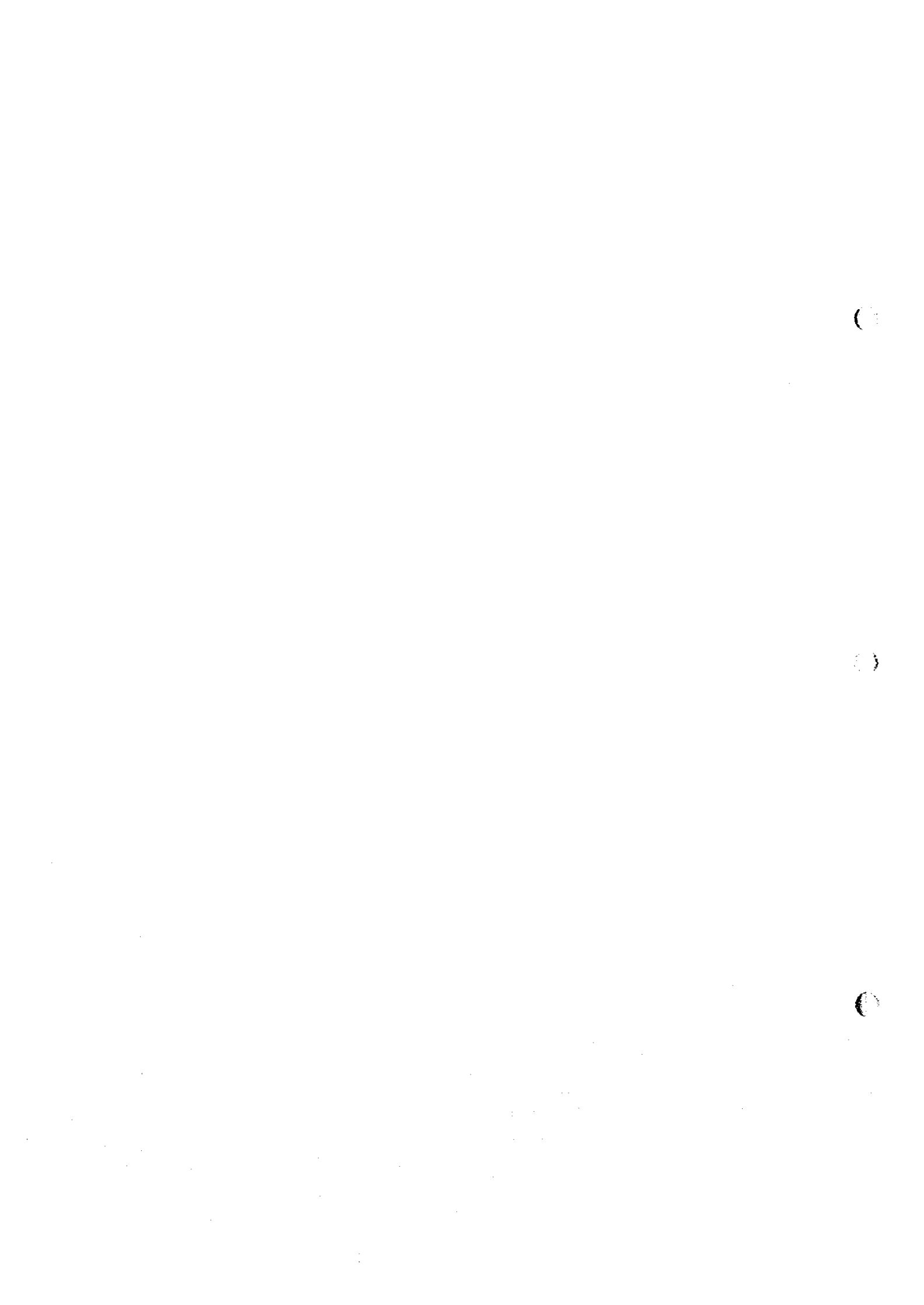




Fig.29 False Color Composite Image near Los Mogotes and Alteration Zone Extracted from LANDSAT TM Image



Fig. 29 False Color Composite Image near Los Mesquites and Alteration Zone. Extracted from LANDSAT TM Image.



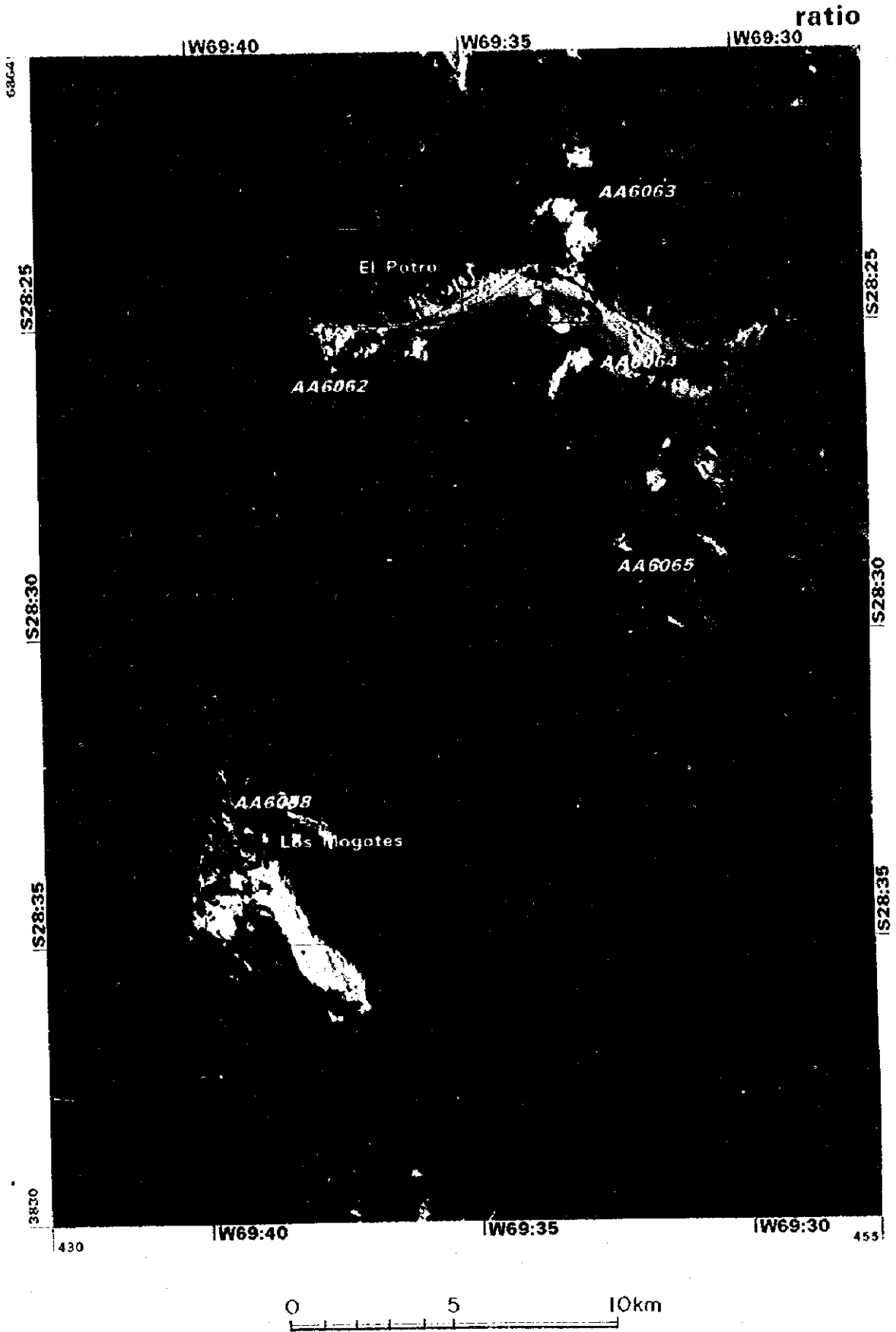
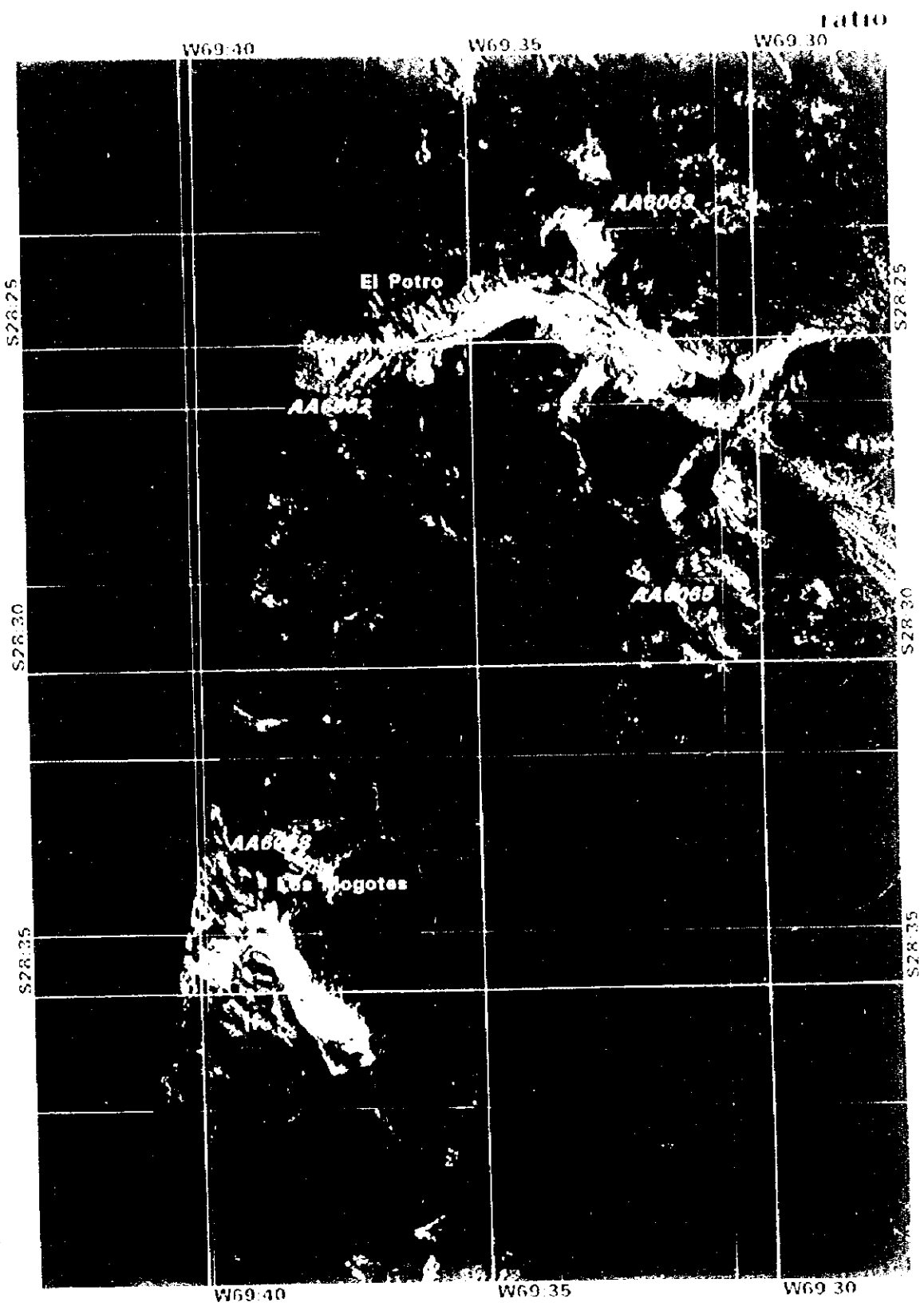


Fig.30 Enhanced Ratio Image near Los Mogotes



zonas de alteración y a lo largo de las quebradas más hacia abajo.

La Figura 30 corresponde a la imagen de ratioing para resaltar las zonas de alteración (AVR= 5/6, 5/7, 5/8) de esta área. Tal como se indicó anteriormente, las zonas que no son de alteración, según la formación de umbrales, están representadas en blanco y negro. Mientras tanto, las zonas de alteración aparecen en tonos variados, pudiendo distinguir los tipos de minerales de alteración.

Los tonos de las zonas de alteración en esta imagen, se clasifican en los tres grandes grupos siguientes:

(1) De blanco a blanco amarillento y anaranjado

Estos tonos aparecen cerca de las zonas de alteraciones de Los Mogotos. Similares tonos aparecen también alrededor de AA6064 (S28°26', O69°33') y en la parte central de AA6063 (S28°23', O69°33'). Aguas abajo se extiende una zona revestida de similares tonos pero menos brillantes (más opacos), que según la imagen de falso color de la Figura 29 corresponden a taludes y aguas abajo de las zonas de alteración interpretadas de las imágenes de LANDSAT TM. Se deduce que los materiales componentes de las zonas de alteración fueron arrastradas hacia tierras más bajas por los efectos de lluvias y erosión. Esta zona (que se extiende a lo largo de la quebrada, aguas abajo de las zonas de alteración) pierde continuidad de 5 a 10 km más abajo, lo cual se debe probablemente a los efectos de la dilución de los minerales de alteración al mezclarse con los sedimentos provenientes de otras cuencas.

En el caso de aplicar la hipótesis establecida en el apartado 2.6.5 (presencia de siete minerales de alteración en la misma proporción a lo largo de toda la zona de distribución) los minerales representados en estos tonos serían yeso y caolinita.

(2) De blanco azulado a verde azulado

Estos tonos aparecen en la cercanía de El Potro y en la zona de forma de arco a 1 km aprox. al NO de la zona de alteración AA6065 (S28°27' O69°32'). Los tonos van perdiendo intensidad a medida que se va alejando de los afloramientos de la cima de montaña. Este tono aparece también en la parte Norte de los afloramientos de Los Mogotos, mientras que en la parte Sur los tonos varían de blanco a blanco amarillento. Esto indica que una misma zona de alteración está compuesta de diferentes minerales de alteración en las partes Sur y Norte. Los taludes aguas abajo aparecen en tono blanco azulado en la parte Norte y amarillo en la parte Sur, lo cual sugiere que tampoco en esta parte las gravas de ambos lados se mezclan. A juzgar de los tonos, probablemente en esta zona predomina alunita.

(3) De verde azulado oscuro a rojo oscuro

Estos tonos aparecen donde están los sedimentos fluviales que desde El Potro son arrastrados hacia el Este y en los taludes al Este de AA6065. Los tonos son poco intensos y luminosos, lo que hace mucho más difícil deducir los minerales de alteración presentes en estas partes, en comparación con los numerales precedentes (1) y (2). Es decir, la intensidad y luminosidad reducidas sugieren que el espectro de reflectancia es poco singular, lo cual permite hacer dos interpretaciones.

La primera consiste en atribuir el fenómeno a la presencia de los minerales de alteración de baja luminosidad e intensidad en el ratioing. En este caso, los minerales podrían ser limonita, cuarzo, sericita y calcita. La otra sugiere que las zonas están compuestas por la mezcla de minerales de alteración (yeso, alunita y caolinita) con gravas de rocas no alteradas. En este caso, la cuenca alta donde la incidencia de las rocas no alteradas sea menor, los tonos deberían ser más intensos y luminosos, mientras que en la cuenca baja estos valores van perdiendo a medida que aumenta la mezcla de las rocas no alteradas.

En todo caso, no se puede afirmar cual de las dos interpretaciones sea correcta únicamente sobre la base de los datos de las imágenes. Cabe indicar que en el segundo caso, al realizar paralelamente la interpretación visual de las imágenes, probablemente se verifique la mezcla de las rocas no alteradas. Sin embargo, si las zonas de estos tonos están independientes, se hace imposible realizar una interpretación correcta.

2.7 Clasificación de las zonas de alteración

Al someter al "ratioing" las posibles zonas de alteración identificadas, se ha podido representar las características del espectro de reflectancia en diferentes tonos. En esta sección, se describe el método de clasificación de las zonas de alteración sobre la base de esta diferencia de tonos y de los valores de los residuales logarítmicos, así como los resultados de la clasificación.

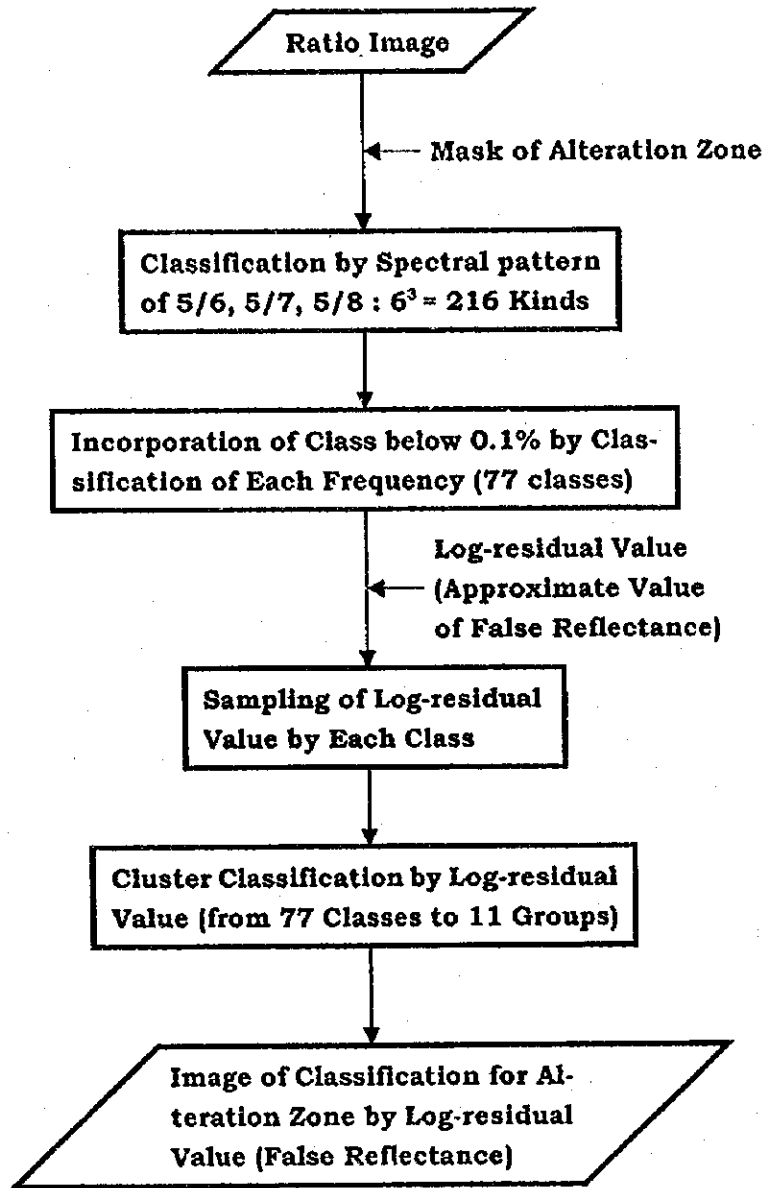
En la Figura 31 se muestra el flujo de los procedimientos de clasificación de las zonas de alteración.

2.7.1 Preparación de categorías

(1) Incompatibilidad de la agrupación

Para la clasificación de las imágenes, normalmente se aplican los métodos del máximo de verosimilitud, agrupación y formación de umbrales. En este análisis, a falta de las informaciones suficientes que sirvan de base para la definición de las

Classification of Alteration Zone



**“ Classification of Alteration Zone with Special Emphasis on Reflectance Spectrum ”
(Rough Estimation of Mineral Assemblages, Relative Quantity Unknown)**

Fig.31 Flow Chart of Classification of Alteration Zone

"áreas supervisoras", se procedió a realizar primero la agrupación. Los datos utilizados en esta fase fueron los tres siguientes: (1) valores de residuales logarítmicos, (2) valores de ratioing para resaltar las zonas de alteración, y (3) la combinación de los dos precedentes.

De las posibles zonas de alteración seleccionadas se tomaron al azar los datos de un total de 4.000 puntos. Para el cálculo de la distancia de "cluster" (grupos), se aplicó la distancia euclídeana de los datos originales, y para el cálculo de la distancia después de la agrupación, se aplicó el método del medio del grupo. El número de clusters con que se trabajó finalmente fue de 20. Para el análisis se utilizaron tres tipos de los datos originales. Sin embargo, se detectó que el método de clasificación no es del todo idóneo puesto que en todos los casos se concentró más del 90% de los datos en un cluster. Los datos de los clusters con la frecuencia de llegada sumamente baja (de los dos clusters que en conjunto reunían el 10% restante), correspondían a los sedimentos de los lagos salados o al retraso de respuesta en el infrarrojo de onda corta. Esto quiere decir que los espectros de reflectancia extraordinarios fueron clasificados como clusters independientes mediante el proceso matemático, y como consecuencia, los datos restantes que debían haber sido clasificados si no hubiesen existido tales valores extraordinarios, quedaron agrupados en un sólo cluster.

(2) Método del máximo de verosimilitud

El método de ratioing para resaltar las zonas de alteración permitió representar en diversos tonos las posibles zonas de alteración. Aprovechando estas diferencias de tonos, se ha procedido a realizar la clasificación aplicando el método del máximo de verosimilitud, cuyos procedimientos se describen a continuación.

(a) Definición y frecuencia de llegada de los supervisores

Normalmente, se define un plural de áreas denominadas "supervisores" que se definen a través del estudio en campo, al momento de aplicar el método del máximo de verosimilitud. Sin embargo, en el caso del presente estudio, frente a la imposibilidad seguir estos procedimientos, se decidió tomar los tonos que aparecen en el proceso de ratioing como supervisores. Como el segundo paso, se realizó la clasificación por el método del máximo de verosimilitud aplicando la distancia euclídeana para analizar la frecuencia de llegada de cada uno de los supervisores.

Para los efectos se utilizaron las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración (AVR= 5/6, 5/7, 5/8). Se definieron seis niveles de brillo estándar (95, 127, 159, 191, 223, 255) de cada banda, y con la combinación de tres bandas se definió un total de 216 ($6^3=216$) clases. Cabe indicar que en esta fase, todos los datos identificados como las zonas de alteración fueron sometidos al proceso de clasificación por el método del máximo verosimilitud. En la Tabla siguiente se

muestra algunos de los resultados obtenidos.

Table 8 Supervisor and Frequency in Arrival (20 in Higher Rank)

Orden	Valores de ratioing para resaltar las zonas de alteración			% de llegada	Frecuencia acumulada
	5/6	5/7	5/8		
1	95	95	95	18.7887	18.7887
2	127	95	95	14.8567	33.6454
3	95	127	127	7.0302	40.6755
4	127	127	127	5.9003	46.5759
5	127	127	95	4.2987	50.8746
6	159	95	95	3.9315	54.8062
7	95	127	95	3.6121	58.4183
8	159	127	95	3.3805	61.7988
9	95	95	127	2.9387	64.7376
10	159	127	127	2.3534	67.0909
11	127	159	159	2.1514	69.2423
12	127	159	127	2.1160	71.3583
13	159	159	127	1.8091	73.1674
14	95	159	159	1.6108	74.7782
15	127	95	127	1.3631	76.1413
16	159	159	159	1.2507	77.3920
17	95	159	127	1.0225	78.4144
18	191	127	95	1.0152	79.4296
19	159	191	159	0.8455	80.2751
20	191	159	127	0.8236	81.0988

En la Tabla 8 se resumen los valores del brillo estándar de los 20 primeros supervisores según la frecuencia de llegada, así como la tasa y la frecuencia acumulada de llegada. Se observa que la frecuencia acumulada de los primeros 20 supervisores supera el 80%. Simultáneamente con la aplicación del método del máximo de verosimilitud, se generaron las imágenes de clasificación de 218 grupos (216 grupos + zonas no alteradas + áreas fuera de las imágenes).

(b) Agrupación según los valores de residuales logarítmicos

Con el método del máximo de verosimilitud se formaron en total 216 clases. Este número es demasiado grande y no es el más idóneo en un método de clasificación. Por otro lado, también se ha decidido descartar los grupos con tasa de llegada de menos de 0,1%, considerando que en este caso, los ruidos de las imágenes son elevados. Al descartar estos, quedaron al final 77 clases de más de 0,1% de tasa de llegada, que en conjunto registran una frecuencia de llegada del 97,8%.

Considerando que 77 sigue siendo un número elevado en el método de

clasificación, se procedió a una re-clasificación. En este estudio, se aplicaron los valores de residuales logarítmicos para que el método refleje también el espectro de reflectancia. Como primer paso, se calculó el valor medio de residuales logarítmicos de cada banda, según las clases, utilizando las imágenes de clasificación generadas en el inciso (a), las imágenes de conversión de brillo y el coeficiente de transformación de residuales logarítmicos. Subsiguientemente, sobre la base de los valores de residuales logarítmicos de las 77 clases, se procedió a una re-agrupación para obtener finalmente un total de 10 "clusters" (que en adelante, se denominarán "grupos"). El cálculo de la distancia de los "clusters", se basó sobre la distancia euclídeana de los datos originales, y para el cálculo de la distancia posterior a la agrupación, se utilizó el método del máximo de verosimilitud.

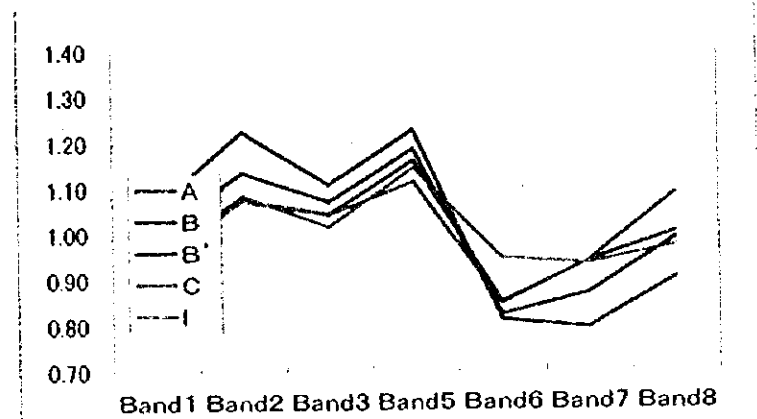
El Grupo 2 fue el que reúne mayor número de clusters (39). Su tasa de llegada es también elevada, con 18%. Este Grupo se caracteriza por la absorción en la Banda 7, cuya intensidad varía considerablemente según clases. Por lo tanto, este grupo fue dividido en dos sub-grupos (B y B') según los valores de residuales logarítmicos de cada clase. Finalmente quedaron en total 11 grupos, como resultado del proceso de clasificación. En la Tabla 9 se indica la frecuencia de llegada de estos 11 grupos, y mientras que en la Figura 32, se indican los valores de residuales logarítmicos de cada uno de ellos.

Table 9 Groups, Their Frequency in Arrival and Logarithmic Residual Processing Value

Grupos	Frecuencia	Número de clusters	Valores medios de residuales logarítmicos							
			Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	
A	1,59	7	1,063	1,226	1,109	1,228	0,812	0,796	0,902	
B	9,44	29	1,009	1,136	1,072	1,186	0,824	0,871	0,989	
B'	8,85	10	0,983	1,077	1,044	1,161	0,851	0,940	1,002	
C	15,0	9	0,953	1,073	1,043	1,114	0,848	0,940	1,087	
D	7,96	8	0,931	1,032	1,001	1,184	0,950	1,002	0,957	
E	5,17	3	1,012	1,060	1,001	1,084	0,944	1,019	0,911	
F	21,72	2	0,962	1,033	1,017	1,059	0,890	1,031	1,039	
G	10,19	2	0,944	1,028	1,000	1,113	0,919	1,009	1,024	
H	16,48	2	0,967	1,011	1,011	1,092	0,909	1,053	0,989	
I	1,26	3	0,949	1,086	1,016	1,145	0,947	0,935	0,972	
J	0,27	2	0,979	0,859	1,128	1,320	0,817	1,026	0,978	
Total	97,9%	77								

Como el siguiente paso, con el fin de conocer la variación de los valores de residuales logarítmicos de los Grupos A a J, se calcularon los valores de las imágenes de procesamiento de residuales logarítmicos a partir de los coeficientes aplicados para generar dichas imágenes. En la Figura 33 se presentan dichos valores según los grupos. Subsiguientemente, de estos gráficos se realizó la

Logarithmic Residuals							
Group	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	1.063	1.226	1.109	1.228	0.812	0.796	0.902
B	1.009	1.136	1.072	1.186	0.824	0.871	0.989
B'	0.983	1.077	1.044	1.161	0.851	0.940	1.002
C	0.953	1.073	1.043	1.114	0.848	0.940	1.087
I	0.949	1.086	1.016	1.145	0.947	0.935	0.972



Logarithmic Residuals							
Group	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D	0.931	1.032	1.001	1.184	0.950	1.002	0.957
E	1.012	1.060	1.001	1.084	0.944	1.019	0.911
F	0.962	1.033	1.017	1.059	0.890	1.031	1.039
G	0.944	1.028	1.000	1.113	0.919	1.009	1.024
H	0.967	1.011	1.011	1.092	0.909	1.053	0.989
J	0.979	0.859	1.128	1.320	0.817	1.026	0.978

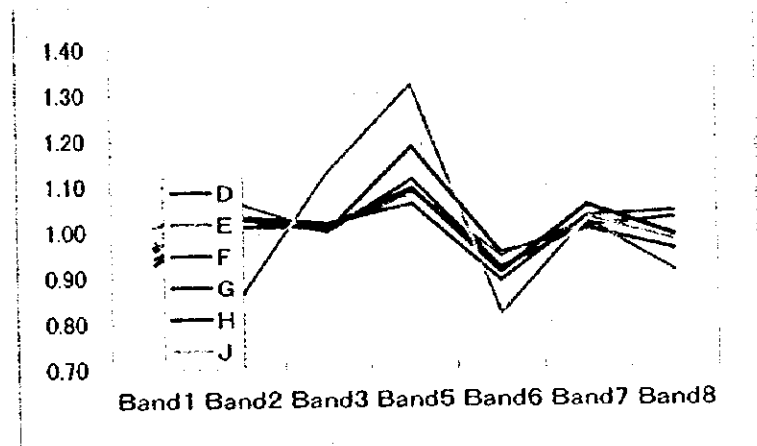
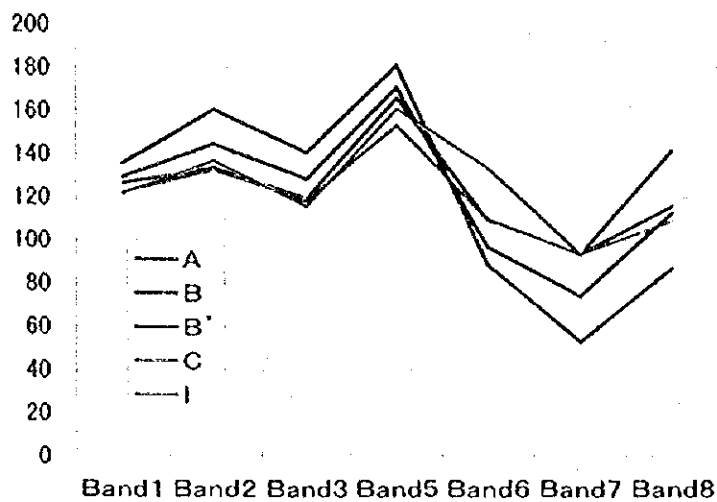


Fig.32 Logarithmic Residual Value of Reclassified Group



Logarithmic Residuals							
Group	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	135.8	160.5	140.7	181.2	89.1	53.3	87.2
B	129.5	144.5	128.7	171.0	97.1	74.4	112.7
B'	126.6	133.4	119.6	166.1	109.7	93.8	115.8
C	122.4	132.7	118.4	153.3	110.1	93.7	141.6
I	121.6	136.8	115.9	161.0	133.9	93.9	108.9



Logarithmic Residuals							
Group	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D	119.6	126.7	109.8	171.4	139.1	112.6	103.9
E	130.2	132.6	112.0	145.3	132.4	118.7	90.4
F	124.1	125.1	109.6	140.1	127.9	118.9	127.1
G	121.5	125.4	107.8	153.5	132.2	113.9	123.7
H	125.0	121.2	107.1	148.9	136.0	125.0	112.5
J	166.3	152.0	111.7	164.5	98.3	76.7	66.7

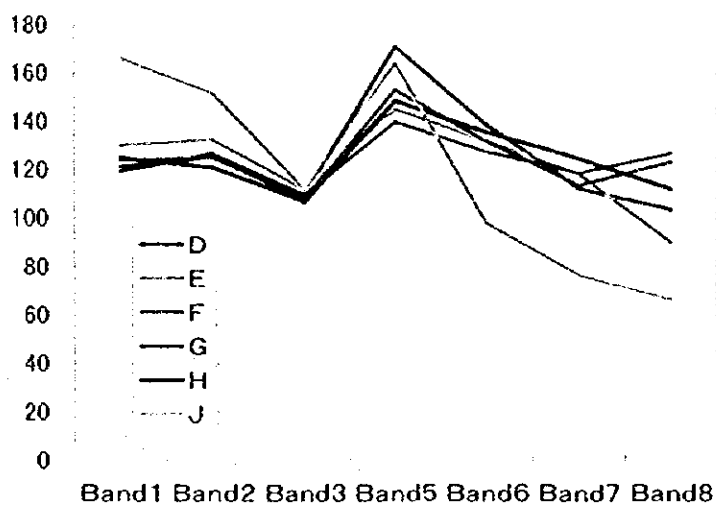


Fig.33 Brightness of Logarithmic Residual Image of Reclassified Group and Reflectance of Alteration Minerals



clasificación en dos tipos (Tipo I y II) según la diferencia de la posición de absorción en el espectro de reflectancia. Los Tipos I y II presentan las siguientes características:

[Tipo I]

Base: Los valores en la Banda 7 son sumamente bajos.

- A: Presenta valores altos en la Banda 5, los cuales caen bruscamente en la Banda 6. Presenta el valor mínimo en la Banda 7, mientras que los valores de las bandas 8 y 6 son similares.
- B: Presenta características similares al "A", con la diferencia de que la caída del valor en la Banda 7 es relativamente suave, y relativamente grande en la Banda 8.
- B': La caída de los valores de la Banda 7 es menor en comparación con el "B". Se diferencia del Grupo II por la presencia o ausencia de curvatura en la Banda 6.
- C: Presenta una curva convexa en la Banda 6, y una caída brusca en la Banda 7.
- I: Presenta un patrón similar al "B", con la diferencia de que el valor de la Banda 5 es relativamente bajo.

[Tipo II]

Base: Los valores se reducen en el siguiente orden: Banda 5 → 6 → 7 → 8.

- D: La reducción de los valores entre las bandas 5 y 8 es lineal.
- E: Se asemeja al "D" con la diferencia de que la reducción de valor en la Banda 8 es brusca.
- F: La Banda 7 presenta el valor mínimo, pero no presenta una curva en la Banda 6 y el incremento en la Banda 8 es poco.
- G: Se asemeja al "F" con la diferencia de que el valor de la Banda 5 es relativamente alto.
- H: Se asemeja al "F" con la diferencia de que los valores de la Banda 5 y subsiguientes son en general altos.
- J: Es un tipo peculiar, en el que los valores de las bandas 1 y 2 son altos, y se reducen a partir de la Banda 5 hasta la Banda 8.

2.7.2 Clasificación de las imágenes según la coincidencia de comportamiento

Para los 11 grupos mencionados anteriormente, se efectuó la clasificación de las imágenes correspondientes a las Imagen U e Imagen L. Como supervisores que sirvieron de referencia para esta labor, se utilizaron los valores de residuales logarítmicos de las 77 clases. Esto es porque del comportamiento de los residuales logarítmicos clasificados, se quiere identificar los minerales de alteración. Por lo tanto, se preparó una tabla resumiendo los residuales logarítmicos de las 77 clases,

y de los 11 grupos resultantes de la "re-clasificación" de las 77 clases.

La clasificación se realizó con las Imágenes U y L de conversión de brillo y de máscara para la identificación de las zonas de alteración. Se calcularon los residuales logarítmicos de todos los píxeles de las zonas de alteración identificadas, cuyos resultados fueron comparados con la Tabla de Supervisores. El grupo que incluía la clase que arrojó la suma del cuadrado de la diferencia de los residuales logarítmicos de cada banda fue considerada como el resultado de la clasificación. En las Figuras 34 y 35 se muestran los resultados.

Sobre la base de las imágenes clasificadas, se distinguen, a grosso modo, tres zonas siguientes.

(1) Zonas con predominio del Tipo I

Estas zonas se extienden en el Oeste de la Imagen U y en el eje central de la Imagen L, y corresponden a las zonas donde predominan los grupos A, B, B' y C. Estas zonas aparecen con bordes claros en la Imagen U, y se caracterizan por ser grandes en tamaño. Las zonas de similar característica se ubican en el Norte de la Imagen L, pero sus bordes no son claros y son reducidos de tamaño. El grupo A corresponde al sector blanco amarillento de las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración, mientras que los Grupos B y B' a las partes de color blanco azulado. El Grupo C corresponde a los sectores de color blanco azulado relativamente oscuro. Dentro de las zonas con predominio del Tipo I, existen las zonas con predominio del Tipo II. Estas se extienden a lo largo del río que discurre con rumbo Este desde El Potro, en la parte Oeste de la Imagen U.

(2) Zona con predominio del Tipo II

Las zonas con predominio del Tipo II se extienden en el Este de la Imagen U y en el Este de la Imagen L. De estas, las zonas representadas con color rojo oscuro en las ratioing para resaltar las zonas de alteración descritas en el apartado 2.6.3 (probablemente afloramientos de granitos no alterados), predomina el Grupo E. Este grupo es muy peculiar, puesto que no se encuentra en otras zonas. Con excepto a esta zona, la parte Este de las Imágenes U y L está constituida por los Grupos D, F, G y H. En el SE de la Imagen L, se identifican las zonas del Tipo I de los Grupos B y B'.

(3) Zonas con predominio del Grupo F

La parte SO de la Imagen L (zona de distribución de las rocas volcánicas del Cretáceo a Terciario) constituye una zona peculiar donde predomina solamente el Grupo F del Tipo II. Esta zona aparece con color violeta rojizo a rosado en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración. Estos tonos sólo

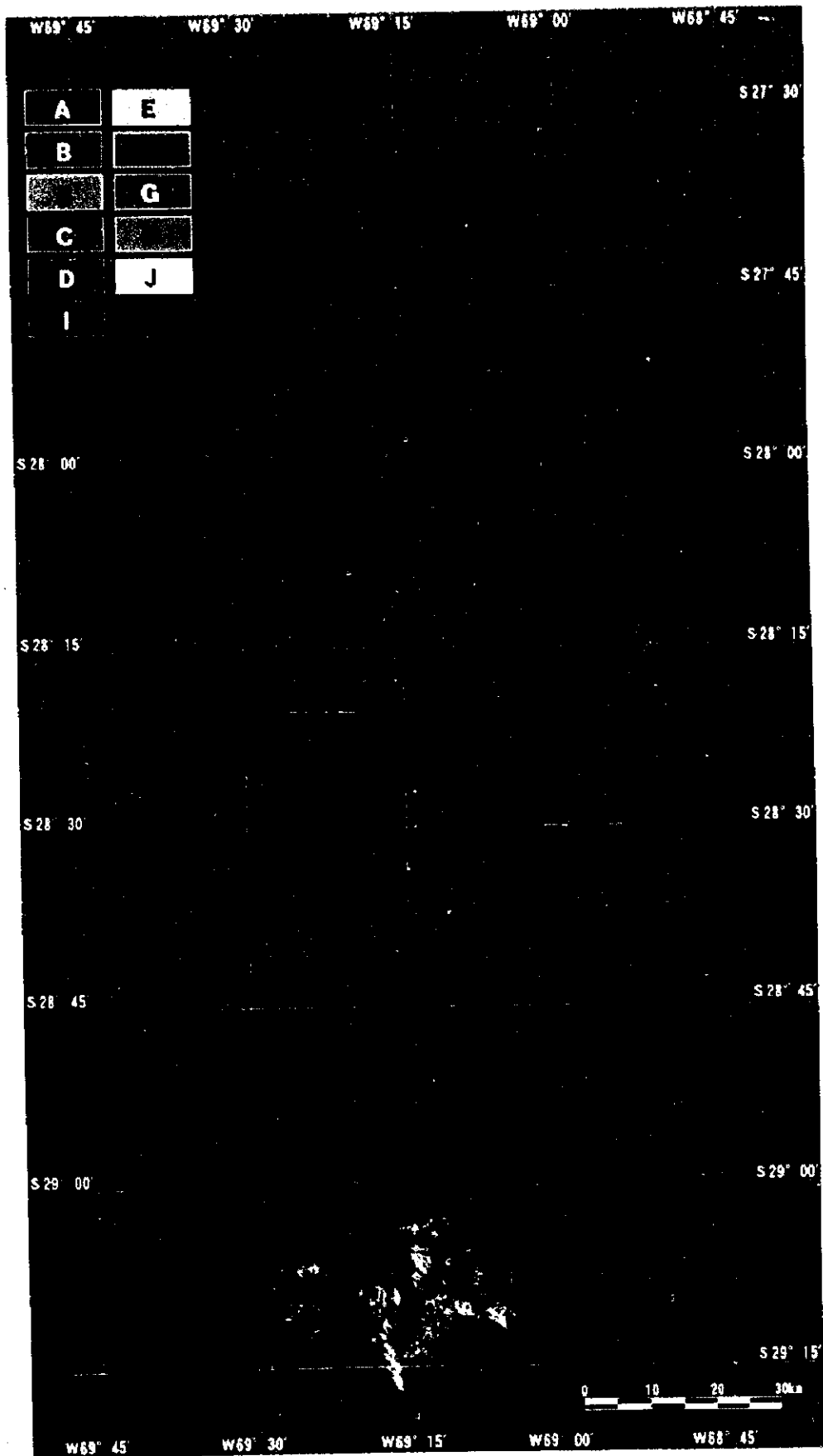
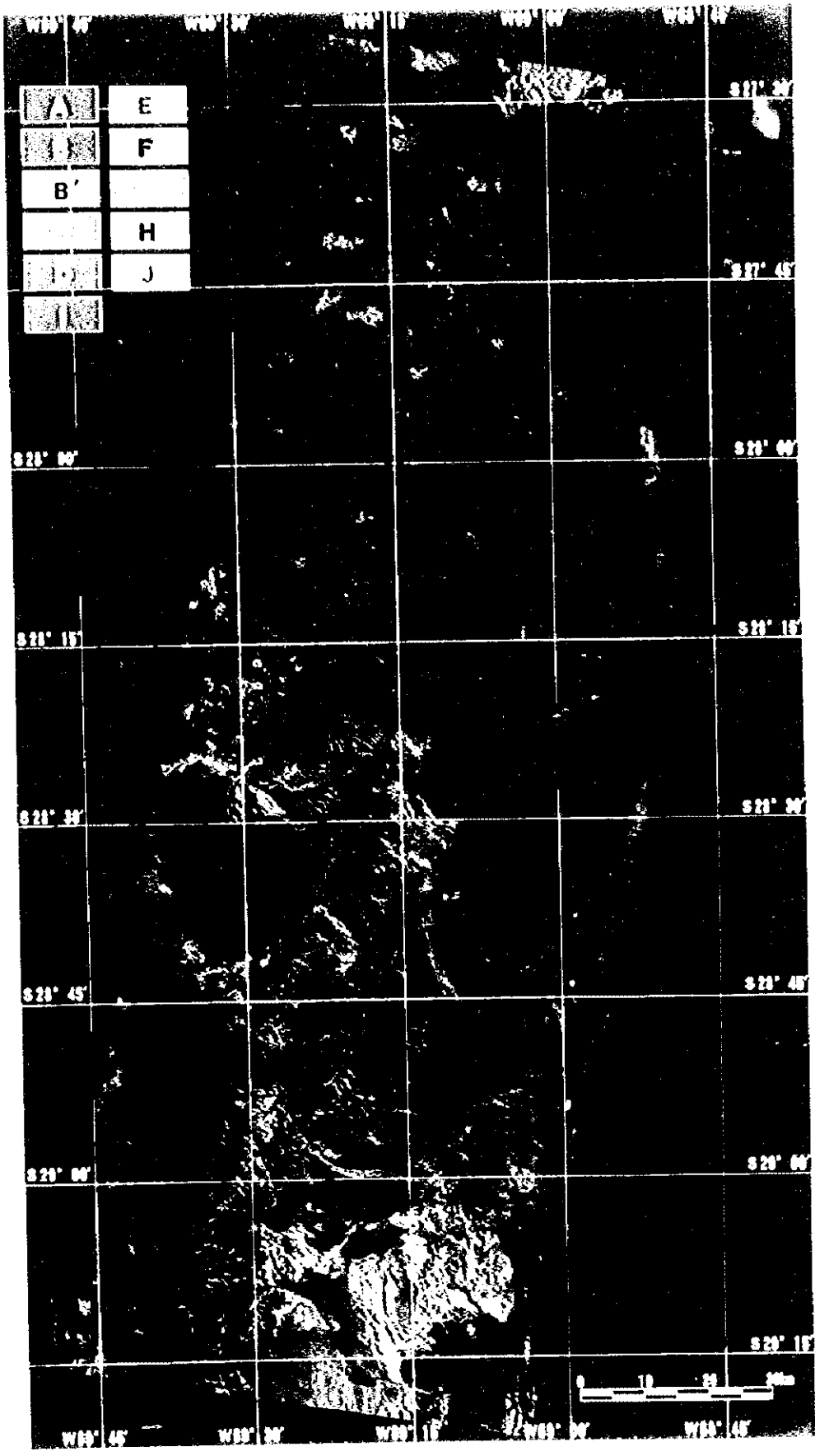
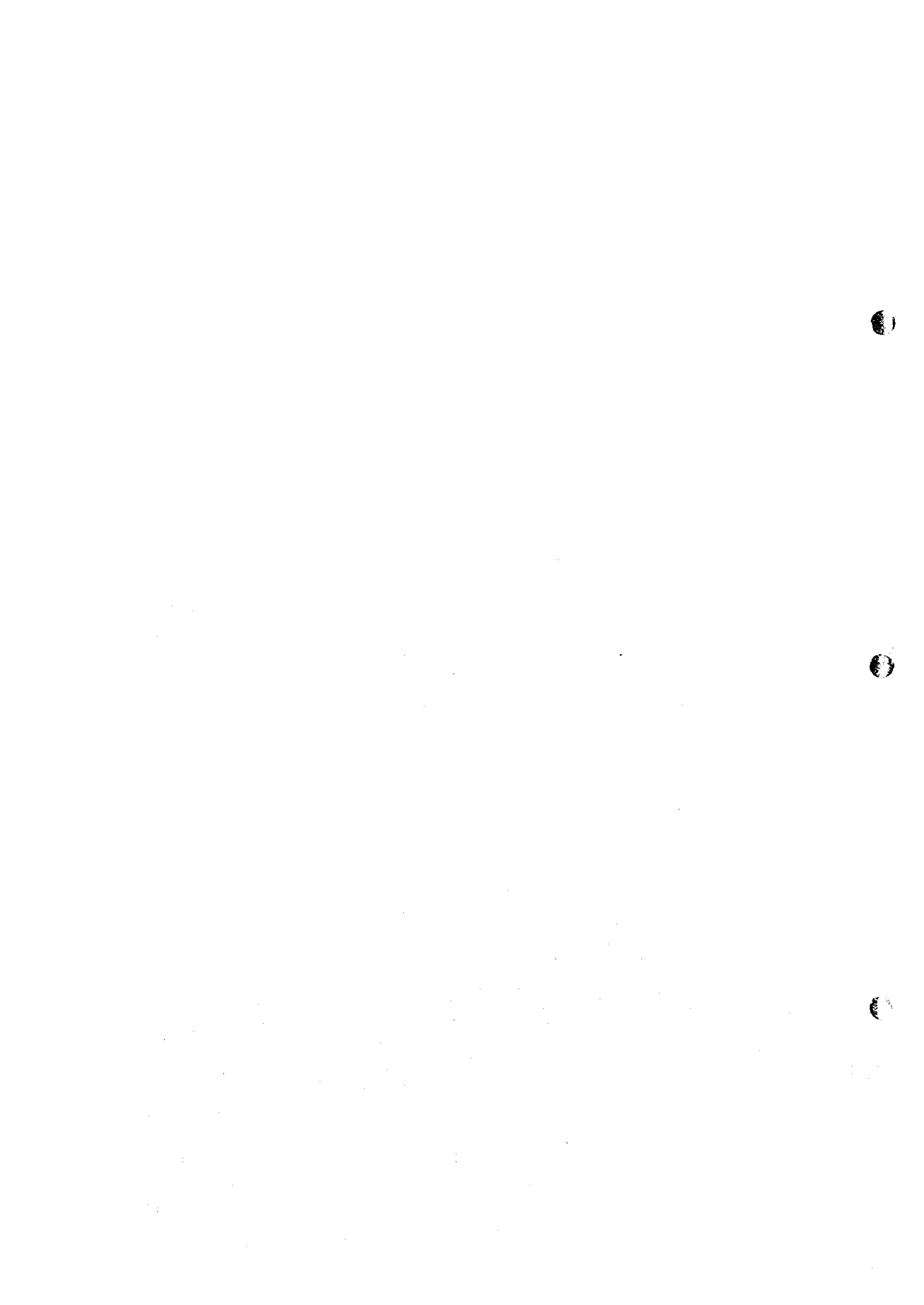


Fig.31 Classification of Alteration Zone in the U-Image Area





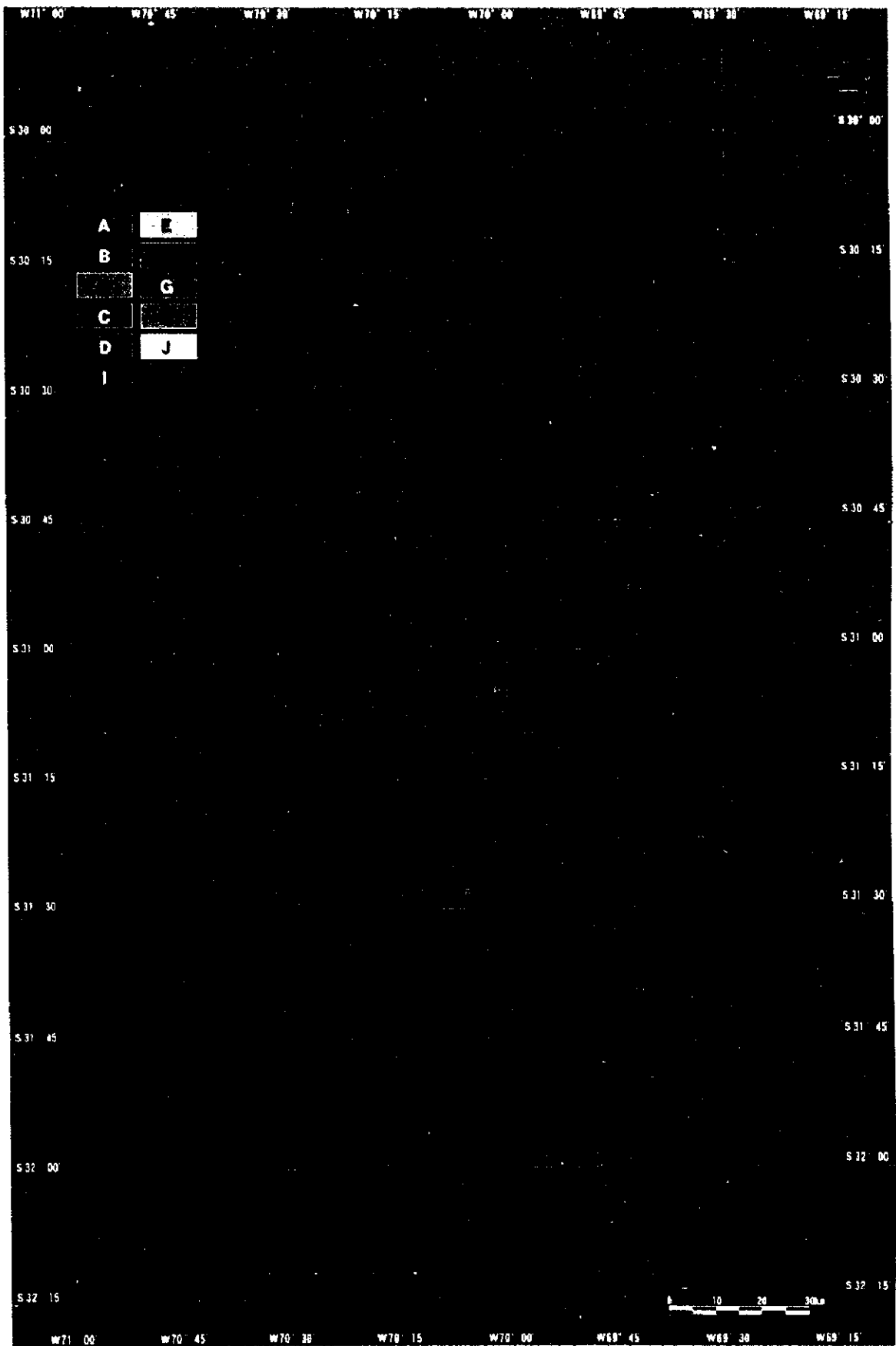
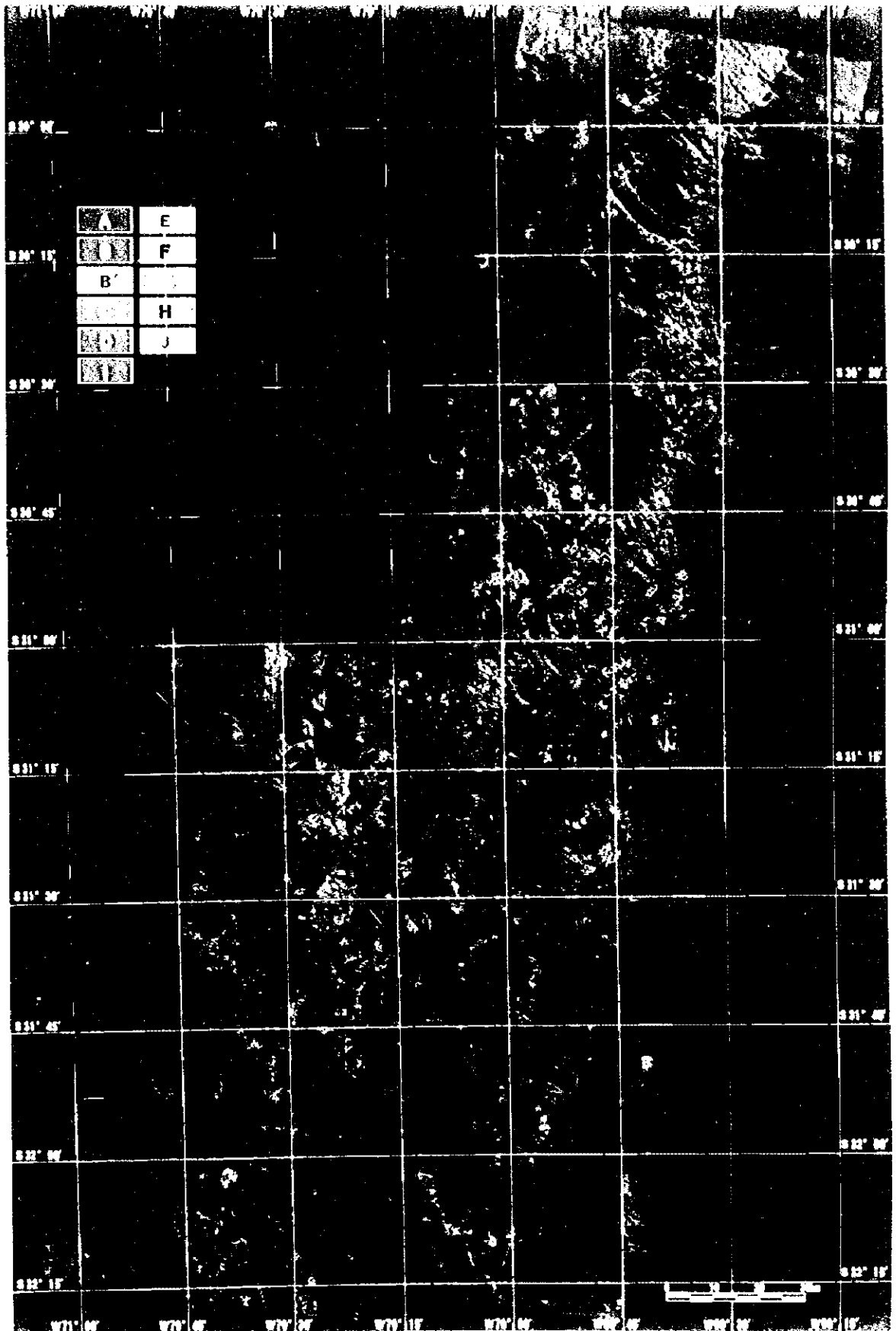


Fig.35 Classification of Alteration Zone in the L-Image Area





aparecen aquí en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración. Sin embargo, el Grupo F según la clasificación de las zonas de alteración puede ser identificado en otras zonas; en este caso, el Grupo no refleja los tonos característicos como los que aparecen en las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración. Este fenómeno ocurre porque para la re-clasificación se utilizaron los residuales logarítmicos y no las imágenes de ratioing para resaltar las zonas de alteración. Cabe recordar que el Grupo F es el que menos características tiene en cuanto al espectro de reflectancia.

2.7.3 Identificación de los minerales de alteración según grupos

Las zonas de alteración fueron clasificadas en 11 grupos, según las características de los residuales logarítmicos. El análisis incluía además la identificación de los minerales de alteración que componen las zonas de alteración clasificadas.

Como el principio básico del procesamiento de residuales logarítmicos, se supuso que los residuales logarítmicos se aproximan a los valores del espectro de reflectancia, con la hipótesis de que la reflectancia media del área de estudio no presenta valores característicos de espectro.

En la Figura 33 se muestra una comparación de los residuales logarítmicos según grupos y los valores del espectro de reflectancia de los siete minerales de alteración. Si las condiciones de los residuales logarítmicos estuvieran cumplidas, y si las zonas de alteración estuvieran constituidas por los mismos minerales de alteración, los residuales logarítmicos y los valores del espectro de reflectancia de los minerales de alteración deberían ser semejantes, lo cual no ocurre en la Figura 33: el patrón de los residuales logarítmicos según los grupos, no se asemejan al patrón del espectro de reflectancia de los siete minerales de alteración. Se deducen cuatro posibles causas de este fenómeno:

- (1) Los minerales de alteración que en realidad conforman las zonas de alteración son diferentes a los que se tomaron en cuenta en el análisis.
- (2) Las zonas de alteración no están compuestas por minerales de alteración homogéneos.
- (3) La hipótesis de los residuales logarítmicos no es válida.
- (4) Características de la sensibilidad de los sensores OPS (la gama dinámica es limitada)

En cuanto al punto (1), los siete minerales de alteración utilizados en el análisis fueron alunita, caolinita, sericita, calcita, cuarzo, limonita y yeso. Estos son minerales más comunes que componen las zonas de alteración. Además, en el estudio de campo se comprobó la presencia del yeso, caolinita y sericita. Por lo tanto, se concluye que esto no podría ser la causa directa.

En cuanto al punto (2), al mezclar dos diferentes tipos de minerales, el espectro de reflectancia arroja diferentes valores según la tasa de mezcla. Sin embargo, el extremo de la variación está definido por el miembro final de los minerales mezclados, y por lo tanto, no puede arrojar el espectro de reflectancia que se diferencia exageradamente del patrón del miembro final. Por lo tanto, esto tampoco explicaría el comportamiento tan diferente del espectro de reflectancia como el que se observa en la Figura 33.

En cuanto al punto (3), el área utilizada para definir el factor de residuales logarítmicos no es una área bajo condiciones peculiares (con presencia de nieve, nubes, los sedimentos de los lagos salados, vegetación y/o zona de alteración) que pudiera arrojar valores extraordinarios del espectro de reflectancia. Sin embargo, al suponer que en los afloramientos de la zona predominaran las rocas con espectro de reflectancia peculiar, el promedio de brillo de los afloramientos ya no estaría cumpliendo las condiciones del procesamiento de residuales logarítmicos.

Por último, en cuanto al punto (4), cabe recordar que las imágenes de nivel 0 de JERS-1 OPS han sido cuantificadas con 6 bytes (64 tonos). Las imágenes tomadas con sensibilidad estándar, por lo general, tienen valores de dispersión de brillo reducidos, con una desviación estándar del orden de 2 ó 3. La dispersión se reduce aún más en las sombras. Por lo tanto, los datos necesariamente incluyen un determinado nivel de error.

En la Figura 33, todos los grupos presentan absorción en la Banda 3, con excepción del Grupo J. Al considerar que los minerales de alteración ordinarios no muestran absorción en esta gama de ondas, se deduce que la conversión de pseudo reflectancia en la Banda 3 no es correcta. (En los afloramientos reales, el espectro de reflectancia de la Banda 3 es más alto que en otras bandas.) Por otro lado, se deduce que tampoco en la Banda 7, la conversión es correcta, porque en esta banda se observan pequeños picos de reflectancia para todos los grupos del Tipo II, pese a la ausencia de los minerales de alteración que presentan estas características. (En los afloramientos reales, el espectro de reflectancia de la Banda 7 es más bajo que en otras bandas.)

Lo anterior pone de manifiesto que los valores de residuales logarítmicos y de pseudo reflectancia no se asemejan en este análisis, y por lo tanto, es difícil identificar directamente los minerales sobre la base de los residuales logarítmicos. Como un segundo intento, se calcularon los residuales logarítmicos corregidos que se asemejen a los valores de pseudo reflectancia. Sin embargo, cabe recordar que tampoco en este caso los resultados son los más idóneos porque no se puede verificar la validez de la hipótesis.

De las zonas de alteración identificadas, se calcula el promedio de los grupos de D a H que no muestran evidentes características en los residuales logarítmicos. Subsiguientemente, se supone que este promedio corresponde al espectro de

reflectancia típico de calcita, cuarzo, sericita y limonita que son minerales que presentan espectro de reflectancia menos característico (aunque la validez de esta hipótesis no puede ser verificada). Ambos valores son convertidos en coseno direccional, y de este modo, se calcula el factor de corrección de residuales logarítmicos para que coincidan ambos datos. En la Figura 36 se muestran los residuales logarítmicos de los grupos convertidos de este modo. Los grupos del Tipo I siguen mostrando la absorción en la Banda 3, pero en el Tipo II, los valores muestran un comportamiento semejante al espectro de reflectancia real. De ser válida la hipótesis, se puede deducir lo siguiente:

(a) Los grupos del Tipo I presentan absorción en la Banda 7. Los minerales de alteración que presentan estas características son caolinita y alunita. La diferencia del espectro de reflectancia entre estos dos minerales aparece en la Banda 6, y en la variación que ocurre en la transición entre las Bandas 7 y 8: en el caso de alunita, entre las Bandas 5 y 6, la reflectancia tiene una caída brusca; presenta absorción en la Banda 7, y los valores entre las Bandas 6 y 8 son casi iguales. Mientras tanto, en el caso de caolinita, la caída de los valores entre las Bandas 5 y 6 no es tan brusca como en alunita, y los valores son similares entre las Bandas 7 y 8. Por otro lado, el mineral de alteración que presenta baja reflectancia en las Bandas 6, 7 y 8 es el yeso. Este último se caracteriza por los valores en las Bandas 1, 2, 3 altos, los cuales se reducen en forma lineal a partir de la Banda 5. De todo lo anterior, se deduce que el Tipo I está constituido predominantemente por alunita que está presente en las zonas de alteración ácida. Sin embargo, si la reflectancia sufre una reducción sensible en la Banda 8 por los efectos de la corrección, podría confundirse con las características de caolinita. Por lo tanto, sería más prudente interpretar que el Tipo I está constituido por alunita y/o caolinita.

(b) Los grupos del Tipo II, excepto el Grupo J, se caracterizan por la reflectancia que se va reduciendo hacia el lado de las ondas largas después de alcanzar el pico en la Banda 5. Los minerales de alteración que presentan estas características son sericita o calcita. también, la montmorillonita presenta un comportamiento que es comparable con sericita. De esto, se deduce que los grupos del Tipo II reflejan los minerales de alteración asociados a las actividades hidrotermales ácidas a neutras. Sin embargo, tal como se indicó anteriormente, también cabe la posibilidad de que se trate de un espectro de reflectancia correspondiente a la combinación de las rocas no alteradas con los grupos del Tipo I. Además, la diferencia del comportamiento entre los grupos es insignificante, por lo que sería arriesgado especificar los minerales de alteración de estos grupos basándose sobre esta diferencia.

Por otro lado, la clorita identificada en la alteración neutra se caracteriza por la alta reflectancia en las Bandas 6 a 8, en comparación con la Banda 5. Sin embargo,

dado que las combinaciones de las bandas utilizadas en el ratioing fueron 5/6, 5/7 y 5/8, y se consideraron como las posibles zonas de alteración a las zonas que arrojaron altos valores en estas combinaciones, en este análisis no se puede especificar la presencia de clorita.

2.8. Identificación de los minerales sobre la base de la coincidencia del comportamiento

Las inconveniencias en la identificación de los minerales de alteración sobre la base de las características de los residuales logarítmicos consisten en la dificultad de determinar específicamente los minerales de alteración, de deducir los minerales cuando estos están combinados, y de estimar la relación de volumen. Con el fin de resolver estas dificultades, en este análisis se intentó desarrollar un método denominado "análisis semicuantitativa" de los minerales de alteración, con aplicación de los métodos de coincidencia de comportamiento y de la composición de pseudo espectro de reflectancia basado sobre el modelo de "isograin" (Hiroi et al., 1985, Hiroi y Takeda, 1989, Hiroi y Pieters, 1992). Este método ha sido aplicado en LANDSAT TM con anterioridad, pero no en JERS-1 OPS. La clave de su aplicación está en el desarrollo de un método de conversión adecuada y correcta del brillo a pseudo reflectancia. A continuación se describe en qué consisten el modelo de "isograin", el método de conversión de pseudo reflectancia y el método de coincidencia de comportamiento, así como los resultados del análisis. En la Figura 37 es el flujograma de clasificación de los minerales de alteración.

2.8.1 Principios del modelo de "isograin"

Normalmente las materias meteorizadas están compuestas por varios minerales, y el espectro de reflectancia del conjunto es el resultado de la composición de los espectros específicos de los minerales componentes. El espectro de reflectancia de cada mineral y el de las materias meteorizadas tienen una relación no lineal. El modelo de "isograin" es un método que esclarece la relación entre ambos.

En el modelo de "isograin", la reflexión de las partículas es considerada como una interacción de una serie de luces entre las partículas. En este modelo los constantes ópticos (índice de refracción y coeficiente de absorción) son combinados con dos parámetros (ω_1 , ω_2) que determinan las capacidades de difusión y absorción en sentidos vertical y horizontal. La forma y el tamaño de las partículas inciden fuertemente a la precisión de los resultados del cálculo; no obstante, al aplicar el concepto del "tamaño efectivo de las partículas", se hace posible establecer un modelo matemático.

Como se muestra en la Figura 38, el modelo de "isograin" se asienta sobre la

Logarithmic Residuals							
	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D-H Mean	0.963	1.033	1.006	1.106	0.922	1.023	0.984
Direction Cosine	36.16	38.77	37.77	41.54	34.62	38.40	36.94

Reflectance(%)							
	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
Ser	40.58	41.04	40.69	43.15	41.94	37.33	38.24
Qtz	39.97	40.27	40.69	41.19	41.48	41.31	41.41
Goe	13.95	17.77	21.68	53.58	55.42	55.47	52.26
Cal	40.24	40.42	40.54	41.83	42.87	38.93	25.23
Mean	33.68	34.87	35.90	44.94	45.43	43.28	39.29
Direction Cosine	31.92	33.05	34.02	42.58	43.05	40.99	37.22

Assumption: Direction cosines are identical in D-H mean and Ser+Qtz mean							
	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D-H Mean	36.16	38.77	37.77	41.54	34.62	38.40	36.94
Mean	31.92	33.05	34.02	42.58	43.05	40.99	37.22
Correction Factor	0.883	0.852	0.901	1.025	1.243	1.068	1.008

Direction Cosine							
Group	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
A	35.17	39.14	37.43	47.17	37.83	31.83	34.07
B	33.54	36.47	36.36	45.82	38.58	35.02	37.53
B'	32.69	34.59	35.45	44.84	39.86	37.83	38.05
C	31.67	34.45	35.38	43.02	39.70	37.81	41.25
I	31.39	34.69	34.32	44.00	44.14	37.40	36.74

Direction Cosine							
Group	Band1	Band2	Band3	Band5	Band6	Band7	Band8
D	30.61	32.76	33.61	45.23	43.99	39.85	35.93
E	33.61	33.99	33.90	41.80	44.16	40.94	34.53
F	32.00	33.18	34.51	40.89	41.69	41.46	39.44
G	31.25	32.87	33.80	42.81	42.84	40.41	38.73
H	32.06	32.36	34.21	42.06	42.44	42.23	37.43
J	31.87	27.01	37.47	49.92	37.47	40.40	36.36

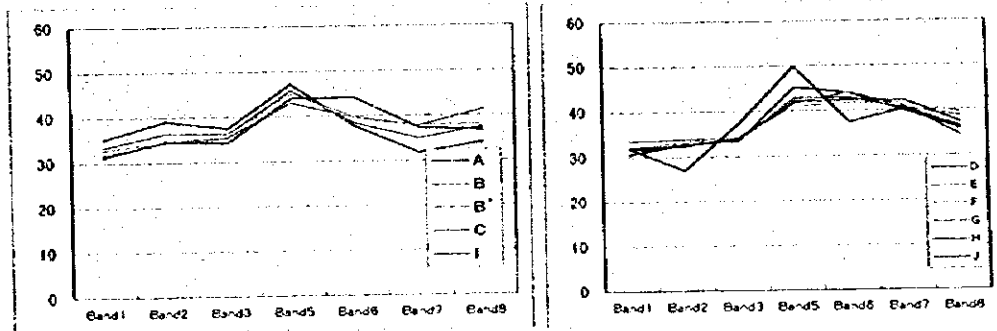
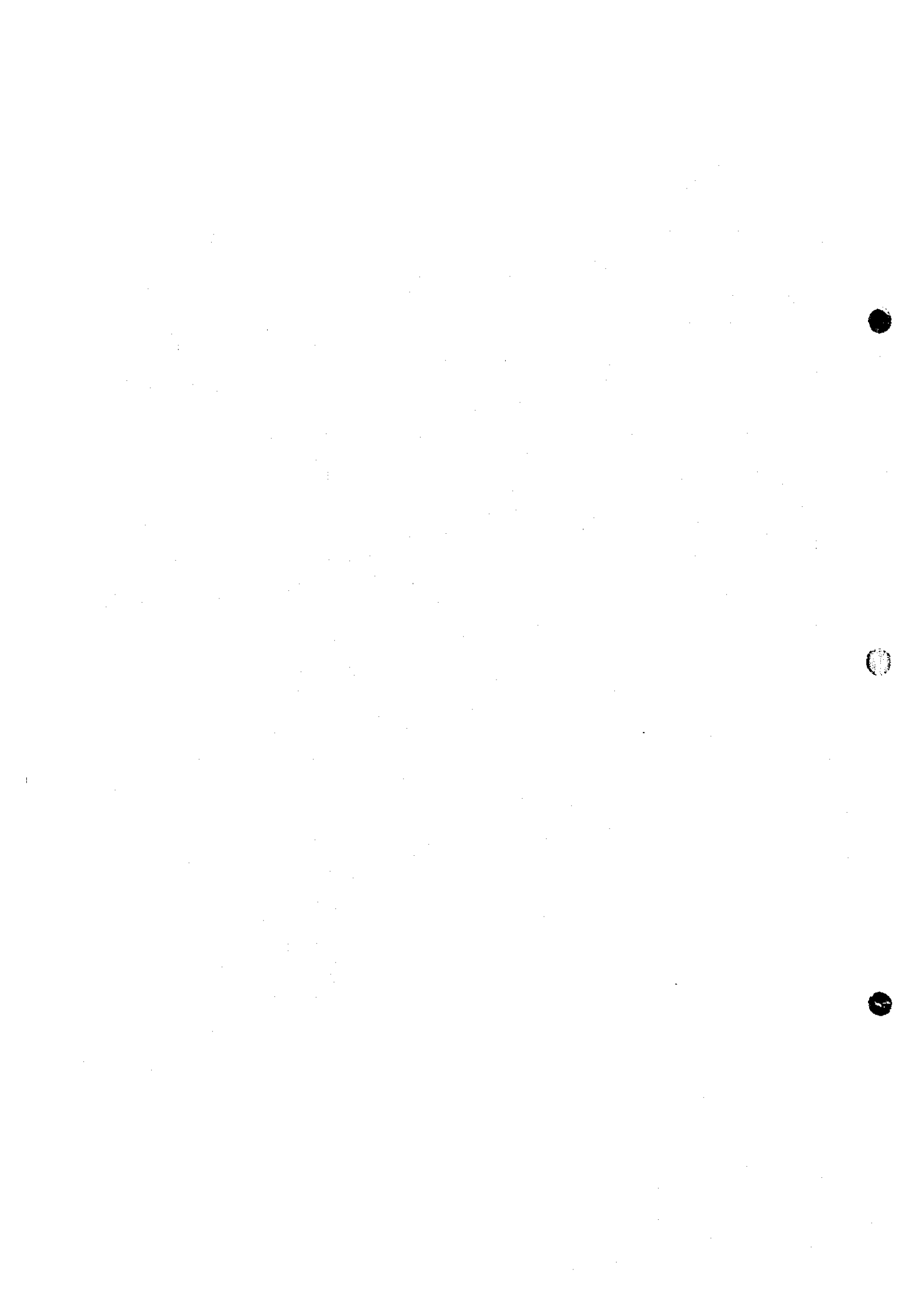


Fig.36 Logarithmic Residual Value of Each Group after Correction of Samples



Identification of Alteration Minerals

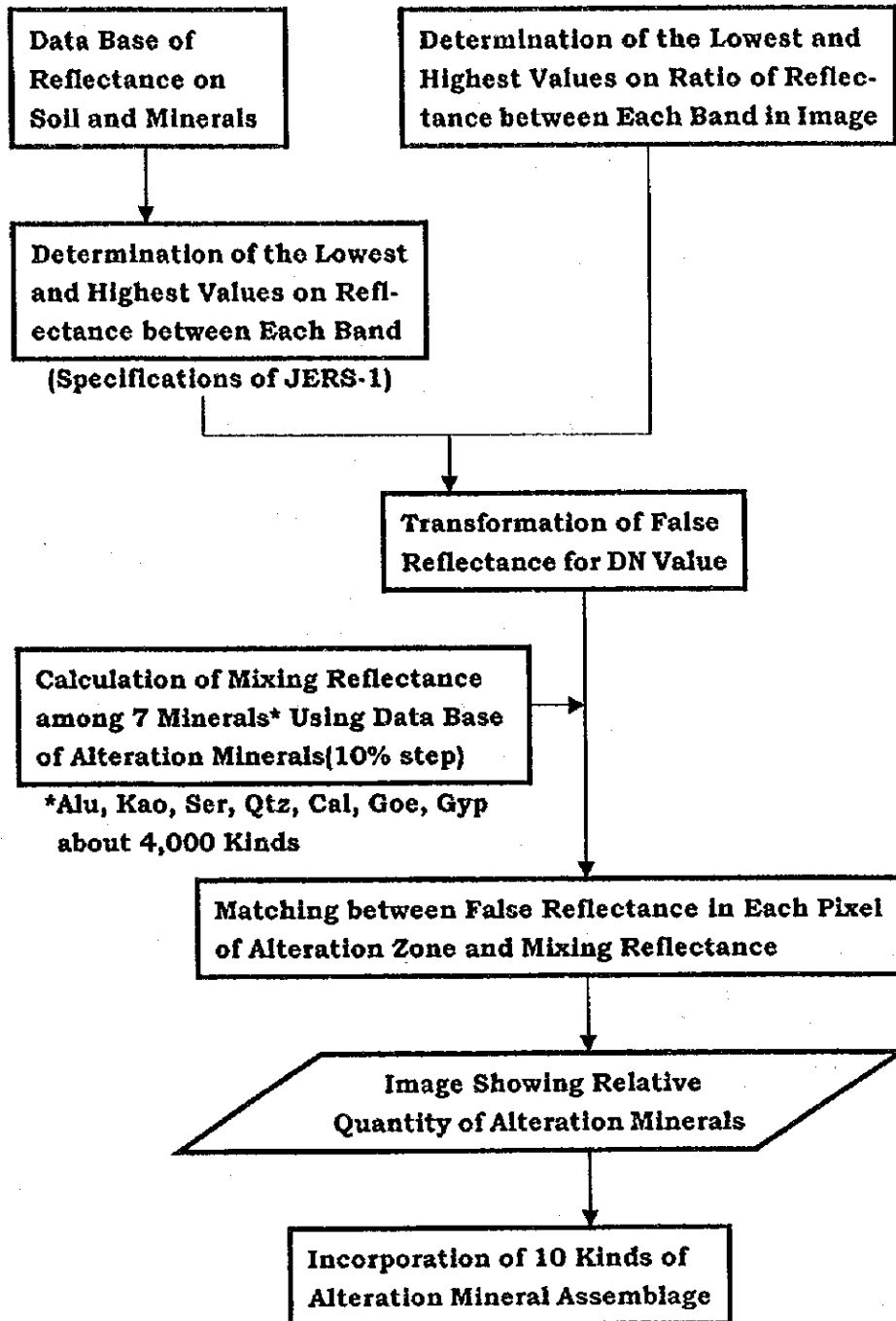


Fig.37 Flow Chart of Identification of Alteration Minerals

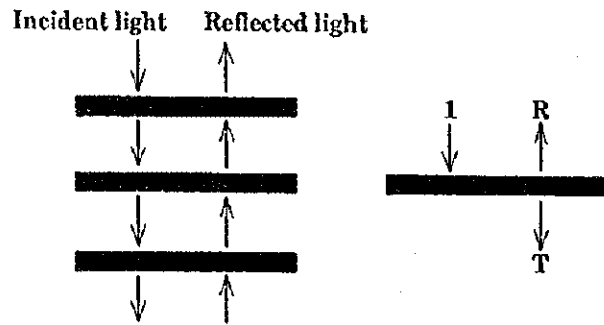


Fig.38 Multi-layer Structure of the Isograin Model

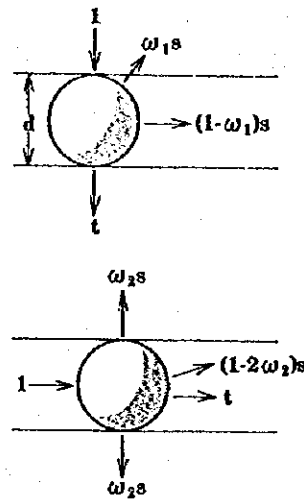


Fig.39 Optical Parameters of Single Grain

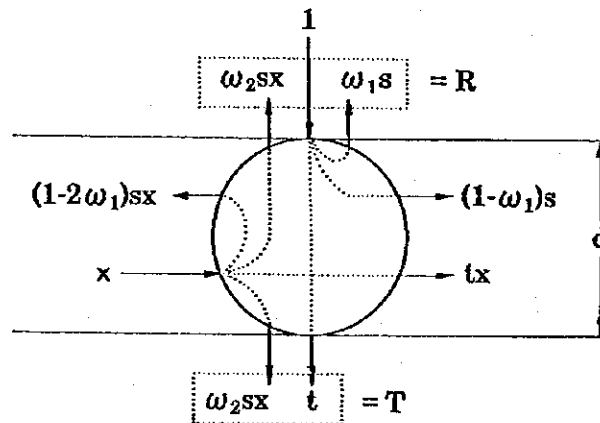


Fig.40 Relationship between Scattering Activity (s), Transmitting Activity (t) of Single Grain and Reflectance (R), Transmittance (T) of Single Layer

hipótesis de que las muestras en polvo están constituidas por un infinito número de capas equivalentes. La reflectancia multicapa " R_{∞} " es representada por la reflectancia de cada capa " R " y la transmisividad " T ".

$$R = R_{\infty}/(B+(B^2 - R^2)^{1/2}), B = (1+R^2 - T^2)/2 \quad (8-1)$$

En la Figura 39 se muestran los parámetros de cada una de las partículas utilizadas en el modelo de "isograin". En este caso, " d " es el tamaño medio de las todas las partículas de una capa, " s " es la capacidad de difusión y " t " es la transmisividad de cada una de las partículas. La capacidad de difusión y la transmisividad obedecen a las propiedades ópticas de las materias. El rayo incidente unitario proveniente de la capa superior llega a la capa inferior por el valor correspondiente al " t ". El rayo se difunde hacia la capa superior por " $\omega_1 s$ ", y dentro de la misma capa por " $(1-\omega_1)s$ ". De la misma manera, el radio incidente unitario del interior de la capa es infiltrado hacia el interior de la capa por el valor de " t "; es disipado en las capas superior e inferior por el valor de " $\omega_2 s$ " y es disipado dentro de la misma capa por el valor de " $(1 - 2\omega_2)s$ ". Se supone que " ω_1 " y " ω_2 " toman valores constantes según las partículas, y que " s " y " t " son variables que constituyen la función de la longitud de onda.

En la Figura 40, se describe el procedimiento del cálculo de la reflectancia " R " y de la transmisividad " T " a partir de los valores de " s " y " t " de una partícula. Suponiendo que la intensidad del rayo horizontal " x " entre las partículas es constante dentro de una capa, debe de haber un equilibrio entre la intensidad de todos los rayos horizontales que entran y salen. Por lo tanto, se puede establecer la siguiente expresión:

$$(1-\omega_1)s+tx+(1-2\omega_2)sx = x$$

En este caso, el valor " x " puede ser calculado de la siguiente manera:

$$X=(1-\omega_1)s/[1-t-(1-2\omega_2)s] \quad (8-2)$$

Por lo tanto,

$$R=\omega_1 S + \omega_2 s x \quad (8-3)$$

$$T=t + \omega_2 s x \quad (8-4)$$

En la Figura 41 se muestra la relación entre reflectancia de Fresnel, coeficiente de absorción " α ", " s " y " t ". Es posible calcular el tamaño efectivo de las partículas " d_e ", calculando el promedio del espesor de las partículas vistas desde diferentes ángulos. Los valores " s " y " t " son calculados en función de la placa isotrópica del espesor " d_e ". La reflectancia externa " r_E " y la reflectancia interna " r_I " en función de la radiación isotrópica (radiation) que se dirige hacia el límite

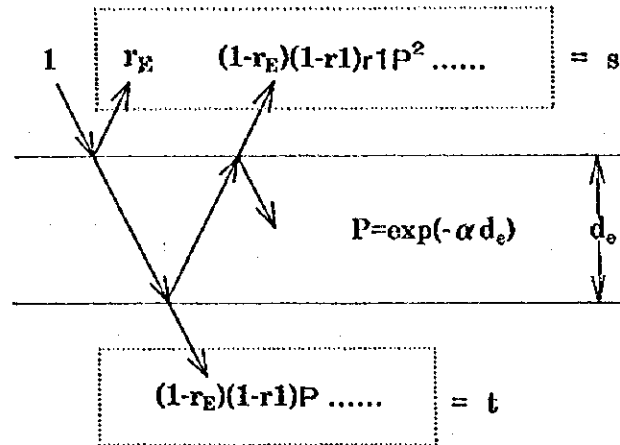


Fig.41 Relationship between Boundary Reflectivity, Absorption Coefficient and Scattering Activity – Transmitting Activity

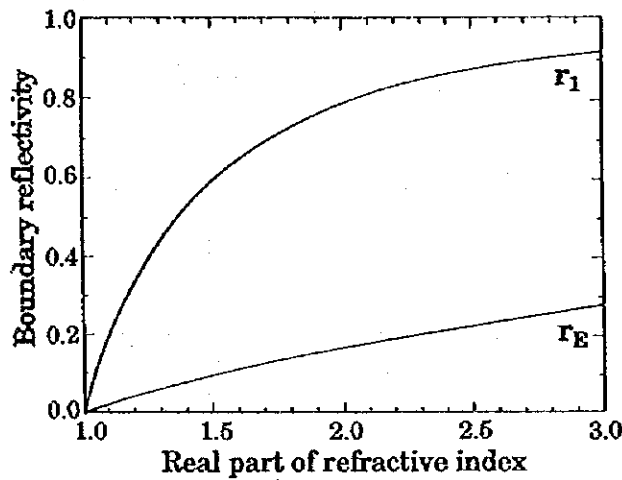


Fig.42 Relationship between Boundary Reflectivity and Refractive Index

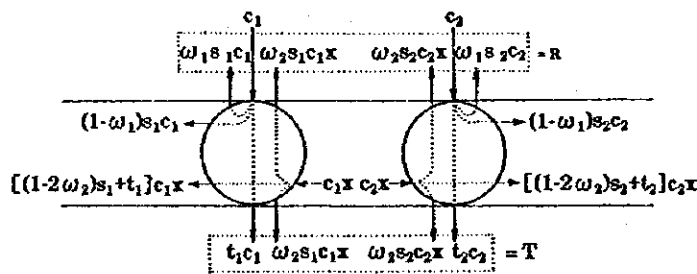


Fig.43 Mixing of Two Components with Different Optical Properties

entre materias, son calculadas a partir del índice de refracción "n" aplicando la teoría de Fresnel. En la Figura 42 se muestra la relación entre "n" y los valores isotrópicos de "r_E" y "r_I". Al suponer que la luz incidente a la superficie de una capa (polvo) y la luz dentro de cada partícula son isotrópicas, los valores "s" y "t" pueden ser calculados por la suma de la serie geométrica infinito.

$$s = r_E + (1 - r_E)(1 - r_I)r_I p^2 / (1 - r_I^2 p^2) \quad (8-5)$$

$$t = (1 - r_E)(1 - r_I)p / (1 - r_I^2 p^2) \quad (8-6)$$

$$p = \exp(-\alpha d_e) \quad (8-7)$$

De las fórmulas del (8-1) al (8-7) se tiene que el espectro de reflectancia de los polvos minerales puede ser expresado por dos variables ("n" y "α") y tres constantes ("ω₁", "ω₂" y "d_e"). Mientras tanto, los minerales opacos pueden ser calculados mediante un variable ("s") y dos constantes ("ω₁" y "ω₂"), dado que "t = 0".

Este modelo estándar puede ser ampliado fácilmente para aplicarse a la mezcla de partículas con diferentes propiedades ópticas. La Figura 43 muestra la mezcla de dos minerales con capacidad de difusión "s₁" y "s₂", transmisividad "t₁" y "t₂", y con la relación de mezcla de "c₁" y "c₂" (c₁ + c₂ = 1). La relación de mezcla es la medida de la sección eficaz de difusión relativa (measurement of relative scattering cross section) de los minerales, y es proporcional a la relación del volumen si el tamaño y la forma de las partículas son iguales.

A partir de las fórmulas del (8-1) al (8-4) se derivan las siguientes fórmulas:

$$X = (1 - \omega_1)S_M / [1 - t_M - (1 - 2\omega_2)S_M] \quad (8-8)$$

$$R = \omega_1 S_M + \omega_2 S_M X \quad (8-9)$$

$$T = t_M + \omega_2 S_M X \quad (8-10)$$

Además,

$$S_M = C_1 S_1 + C_2 S_2 \quad (8-11)$$

$$t_M = C_1 t_1 + C_2 t_2 \quad (8-12)$$

Donde, "s_M" y "t_M" son la capacidad de difusión y la transmisividad, respectivamente. Al comparar las fórmulas del (8-2) al (8-4) y del (8-8) al (8-12), se observa que "s" y "t" son lineales en proporción a la relación de mezcla.

2.8.2 Preparación del índice de espectros de reflectancia

En el modelo de "isograin", cuando se conocen la relación de reflectancia superficial y absorción de cada gama de onda en un conjunto de minerales, se puede expresar la reflectancia calculada en cada longitud de onda, mediante una función de la relación del volumen y el tamaño de las partículas de los minerales.

La expresión matemática en este caso es la siguiente:

$$X_{\lambda} = f_{\lambda}(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n, d_1, d_2, d_3, \dots, d_n) \quad (8-13)$$

Donde, " X_{λ} " es la reflectancia calculada en la longitud de onda " λ ", " $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ " son la relación de volumen de cada mineral, y " $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ " son el tamaño de las partículas de los minerales. Al suponer el tamaño de las partículas, es posible calcular la relación de volumen de " n " número de minerales mediante la fórmula del número de longitud de ondas para " n " número de longitudes de ondas observadas. Sin embargo, este método no es del todo eficaz puesto que el cálculo para todos los pixeles requeriría de mucho tiempo. Por lo tanto, en este análisis, se ha preparado previamente un índice (base de datos) de pseudo reflectancia para las diferentes combinaciones de relación de volumen de los minerales, para posteriormente hacer una comparación de los valores de este índice con pseudo reflectancia de cada pixel, y de esta manera, realizar la evaluación de los minerales.

Las ventajas de este método consisten en el tiempo relativamente breve para la búsqueda de los datos, y la posibilidad de definir el número de los minerales sin ajustarse a la limitación del número de longitudes de ondas, puesto que no es necesario aplicar la ecuación. Sin embargo, considerando que al atribuir como variable, un mayor número de minerales a un determinado número de longitudes de ondas, se reducirá la confiabilidad de los resultados la búsqueda, en este análisis, se decidió atribuir siete minerales de alteración para siete longitudes de ondas. Los parámetros utilizados en el cálculo son los siguientes:

Table 10 Optical Parameters Used for Isograin Modelo

Minerales	Tamaño efectivo de las partículas (μ)	Capacidades de difusión y de absorción		Índice de refracción como una función lineal	
		$\omega 1$	$\omega 2$	Inclinación	Segmento interceptado
Alunita	195,0	0,33	0,33	-0,050600	1,722170
Caolinita	5,7	0,40	0,10	-0,050600	1,704170
Yeso	131,0	0,33	0,33	-0,050600	1,665090
Sericita	5,6	0,40	0,10	-0,050600	1,727170
Cuarzo	186,0	0,33	0,33	-0,050190	1,689630
Calcita	166,0	0,33	0,33	-0,051000	1,716310
Limonita	25,0	0,22	0,22	-0,050190	1,689630

Además de lo anterior, es necesario atribuir la reflectancia superficial y la relación de absorción de cada gama de onda.

Al establecer la relación de mezcla de los minerales a cada intervalo de 20%,

finalmente se logró preparar un índice del espectro de reflectancia de las diferentes combinaciones de minerales de alteración que reunía un total de 6.000 datos aprox.

2.8.3 Variación del espectro de reflectancia en las combinaciones en dos fases

Tal como se describió anteriormente, el espectro de reflectancia de la combinación de dos minerales de alteración varía en forma no lineal en función de la relación de volumen. Las Figuras 44 y 45 muestran la variación del espectro de reflectancia para las diferentes combinaciones; de los siete minerales de alteración, se fueron combinando de a dos, con una variación de la tasa de mezcla de cada 20%. Las combinaciones que muestran una variación lineal del espectro son: sericita-limonita, caolinita-limonita y alunita-yeso. Mientras tanto, en los casos de caolinita-yeso y caolinita-alunita, el comportamiento del espectro de reflectancia cuando se mezcla una pequeña cantidad de caolinita, se asemeja a cuando es caolinita al 100%. Lo mismo ocurre con alunita-limonita; con la mezcla de una pequeña cantidad de limonita, el espectro de reflectancia cambia y su comportamiento se asemeja a cuando es limonita al 100%.

La alunita es un mineral que junto con caolinita, yeso o limonita conforman las zonas de alteración. De los resultados mostrados en las Figuras 44 y 45, se concluye que el yeso el único mineral de alteración que no provoca gran cambio en el espectro de reflectancia de alunita cuando se mezcla con ésta. Por lo tanto, las zonas que presentan el espectro de reflectancia peculiar de alunita no son muchas. Sin embargo, de los residuales logarítmicos indicados en el apartado 2.7.3, se observa que muchos valores del espectro de reflectancia del Tipo I se asemejan al comportamiento de alunita. Esto implica que en el proceso de conversión de residuales logarítmicos, la transformación de pseudo reflectancia en la Banda 7 no es correcta, por lo que es muy arriesgado deducir el tipo de minerales basándose solamente sobre los residuales logarítmicos.

2.8.4 Método de conversión de pseudo reflectancia

La conversión del brillo en pseudo reflectancia constituye un proceso de suma importancia para identificar los minerales o para realizar el análisis semicuantitativo. Sin embargo, cuando no se disponen de los datos reales del espectro de reflectancia como es el caso de este estudio, es necesario buscar alguna forma que permita realizar esta conversión utilizando solamente las imágenes. En este apartado, se describe el método de conversión de pseudo reflectancia basado sobre el comportamiento del espectro de reflectancia en los suelos y afloramientos.

(1) Líneas de suelo

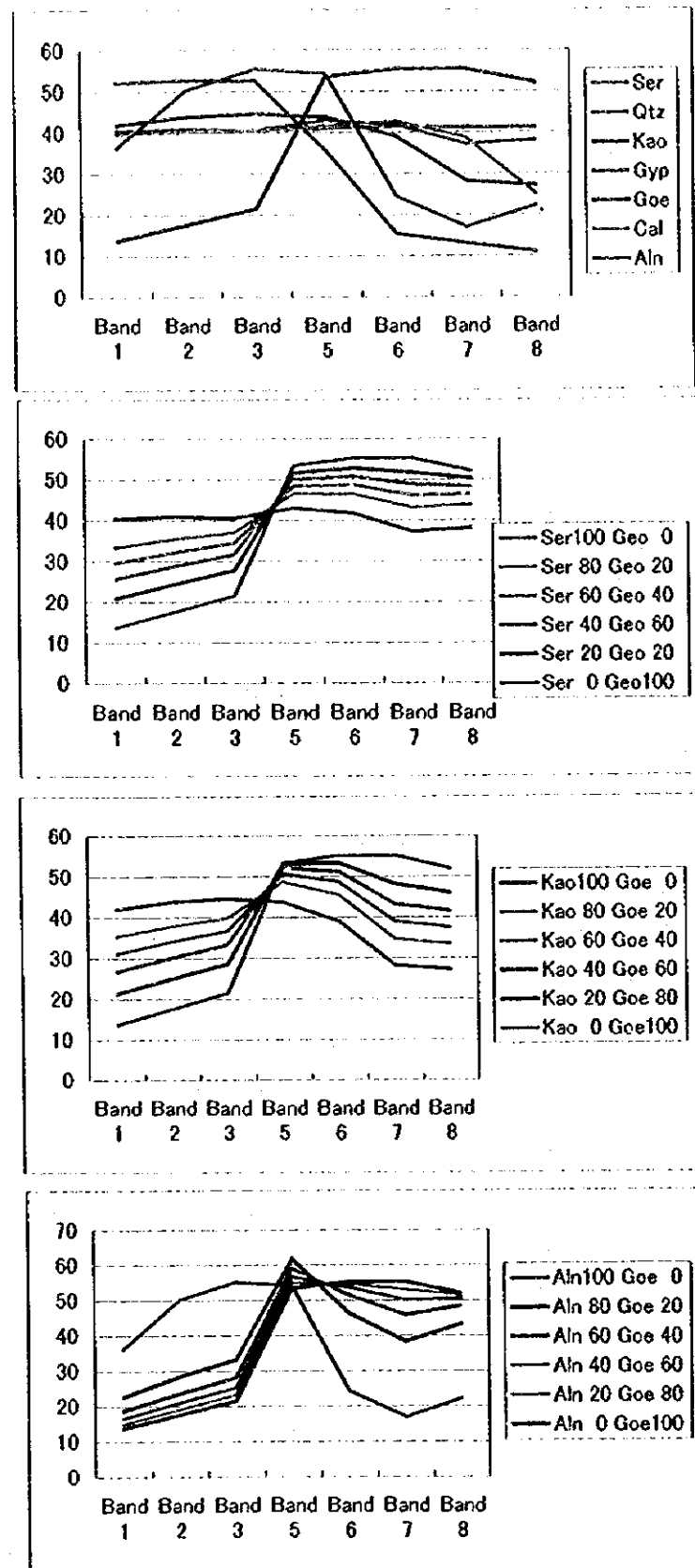
La reflectancia de la mayoría de los suelos y rocas muestran una inclinación suave de reflectancia espectral entre la gama del rojo visible (Banda 2 de JERS-1 OPS) y la gama de infrarrojo cercano (Banda 3 de JERS-1 OPS). Al trazar el gráfico de dispersión de estas dos bandas, la vegetación es restituida hacia el lado de la gama del infrarrojo cercano por la presencia del borde rojo (cambio brusco de reflectancia en la gama $0.68 - 0.75\mu$). Mientras tanto, los suelos y las rocas se concentran en la línea de regresión cuya inclinación es 1, puesto que la correlación entre las dos bandas es sumamente alta. El comportamiento lineal de los suelos y rocas, se denomina "la línea de suelo". La reflectancia de los suelos y de las rocas muestra una inclinación suave también en otras bandas (que no sean 2 y 3) de JERS-1 OPS, lo cual permite trazar una línea de suelo semejante al gráfico de dispersión entre bandas. Sin embargo, en este caso la línea no es tan recta como en el caso de la línea de suelo de las bandas 3 y 4, puesto que la correlación es menos alta. El método de las líneas de suelo es un nuevo método de conversión de pseudo reflectancia basado sobre las características de los suelos y de las rocas descritas anteriormente (Saitoh y otros, 1998). Si bien es cierto que el método ha sido desarrollado para convertir los datos de LANDSAT TM al pseudo reflectancia, se intentó aplicar a los datos de JERS-1 OPS considerando que ambos se asientan sobre un mismo principio.

Se recogieron los datos reales de reflectancia de los suelos y de las rocas meteorizadas tomados en el análisis espectroquímico en laboratorio (de unas 200 muestras), y se calcularon los valores medios de reflectancia en la gama de ondas coherente con los atributos de las ondas observadas de JERS-1 OPS. Como el segundo paso, sobre la base de estos datos, se prepararon los gráficos de dispersión de reflectancia entre dos bandas.

De las combinaciones de estas dos bandas, en el gráfico de dispersión de la combinación en que las ondas observadas son relativamente próximas, se puede identificar claramente zona de distribución de los puntos restituidos, según los límites inferior o superior que pasan por el punto de origen, como se muestra en la Figura 46.

(2) Relación de brillo entre bandas y el factor de conversión de la intensidad de reflexión de los suelos y afloramientos en las imágenes

Los mismos procedimientos se realizaron para los datos de las imágenes. Se prepararon los gráficos de dispersión (Figura 47 y 48) de la relación entre bandas, utilizando los píxeles de las imágenes, después de eliminar las nieves, nubes, zonas de alteración y vegetación. Cabe recordar que para la preparación de estas figuras, se utilizaron los datos de las imágenes con poca influencia de cobertura de nieve, y que no contenían evidentes zonas de alteración. En los gráficos de



Spectral Reflectance of Supervisor Minerals

Aln	Cal	Goe	Gyp	Kao	Qtz	Ser	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	
0	0	0	0	0	0	100	Ser	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
0	0	0	0	0	100	0	Qtz	40.0	40.3	40.7	41.2	41.5	41.3	41.4
0	0	0	0	100	0	0	Kao	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
0	0	0	100	0	0	0	Gyp	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2
0	0	100	0	0	0	0	Goe	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3
0	100	0	0	0	0	0	Cal	40.2	40.4	40.5	41.8	42.9	38.9	25.2
100	0	0	0	0	0	0	Aln	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4

Mixture of Sericite and Goethite

Ser	Geo	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
0	100	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
0	80	33.5	35.6	37.2	46.7	46.6	43.3	43.9
0	60	29.7	32.3	34.6	48.5	48.8	46.3	46.4
0	40	25.8	28.9	31.8	50.1	50.8	49.0	48.4
0	20	21.0	24.6	28.0	51.8	52.9	51.9	50.4
0	0	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3

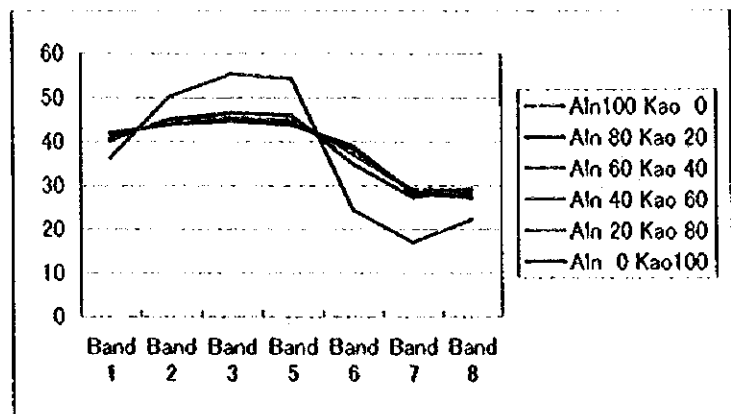
Mixture of Kaolinite and Goethite

Kao	Goe	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
0	100	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
0	80	35.5	38.0	40.0	48.9	45.7	34.9	33.6
0	60	31.2	34.2	36.8	50.8	48.8	39.1	37.7
0	40	26.9	30.3	33.4	52.3	51.3	43.4	41.7
0	20	21.6	25.3	28.9	53.4	53.6	48.4	46.3
0	0	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3

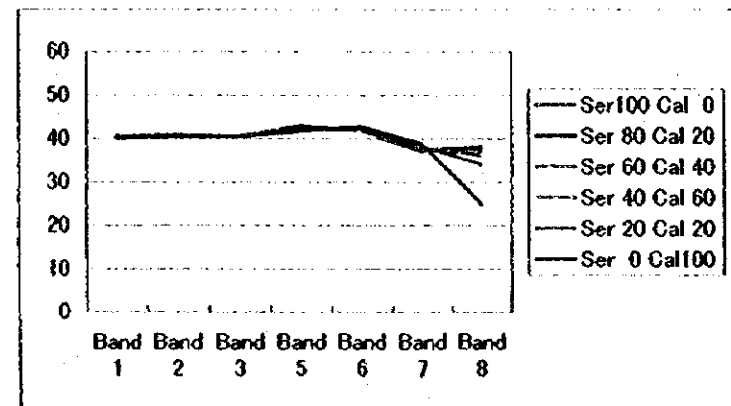
Mixture of Alunite and Goethite

Aln	Goe	Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
0	100	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4
80	20	23.0	28.7	33.5	62.1	46.7	38.6	43.6
60	40	18.9	23.7	28.2	59.1	51.7	46.0	48.6
40	60	16.7	21.1	25.3	56.8	53.8	50.2	50.7
20	80	15.2	19.2	23.3	55.0	54.8	53.1	51.7
0	100	13.9	17.8	21.7	53.6	55.4	55.5	52.3

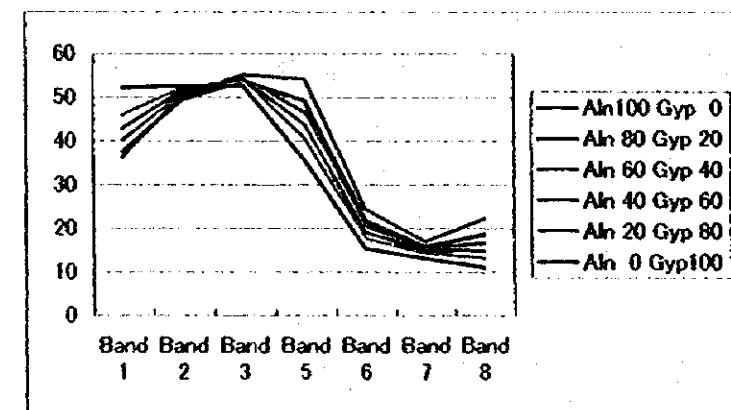
Fig.44 Changes of Spectral Reflectance in Two-Phase Mixture System--1
(End Member : Sericite-Goethite, Kaolinite-Goethite, Alunite-Goethite)



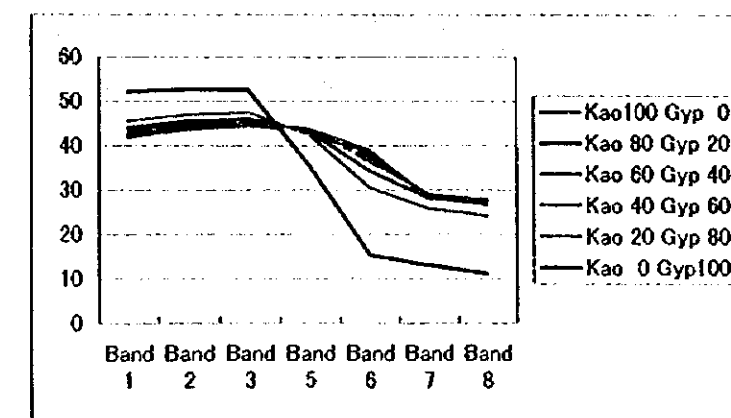
Mixture of Alunite and Kaolinite						Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	
100	0	0	0	0	0	Aln100 Kao 0	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4
80	0	0	0	20	0	Aln 80 Kao 20	40.5	45.2	46.8	46.1	35.2	27.6	29.0
60	0	0	0	40	0	Aln 60 Kao 40	41.3	44.5	45.5	44.9	37.2	29.0	29.3
40	0	0	0	60	0	Aln 40 Kao 60	41.7	44.2	45.0	44.3	38.2	29.3	29.0
20	0	0	0	80	0	Aln 20 Kao 80	41.9	44.0	44.8	44.0	38.9	29.1	28.4
0	0	0	0	100	0	Aln 0 Kao100	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3



Mixture of Sericite and Calcite						Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	
0	0	0	0	0	100	Ser100 Cal 0	40.6	41.0	40.7	43.1	41.9	37.3	38.2
0	20	0	0	0	80	Ser 80 Cal 20	40.6	41.0	40.7	42.9	41.9	37.7	37.9
0	40	0	0	0	60	Ser 60 Cal 40	40.7	41.0	40.8	42.7	41.8	37.8	37.2
0	60	0	0	0	40	Ser 40 Cal 60	40.7	41.0	40.8	42.5	41.9	38.0	38.2
0	80	0	0	0	20	Ser 20 Cal 80	40.7	41.0	40.8	42.3	42.0	38.1	34.3
0	100	0	0	0	0	Ser 0 Cal100	40.2	40.4	40.5	41.8	42.9	38.9	25.2

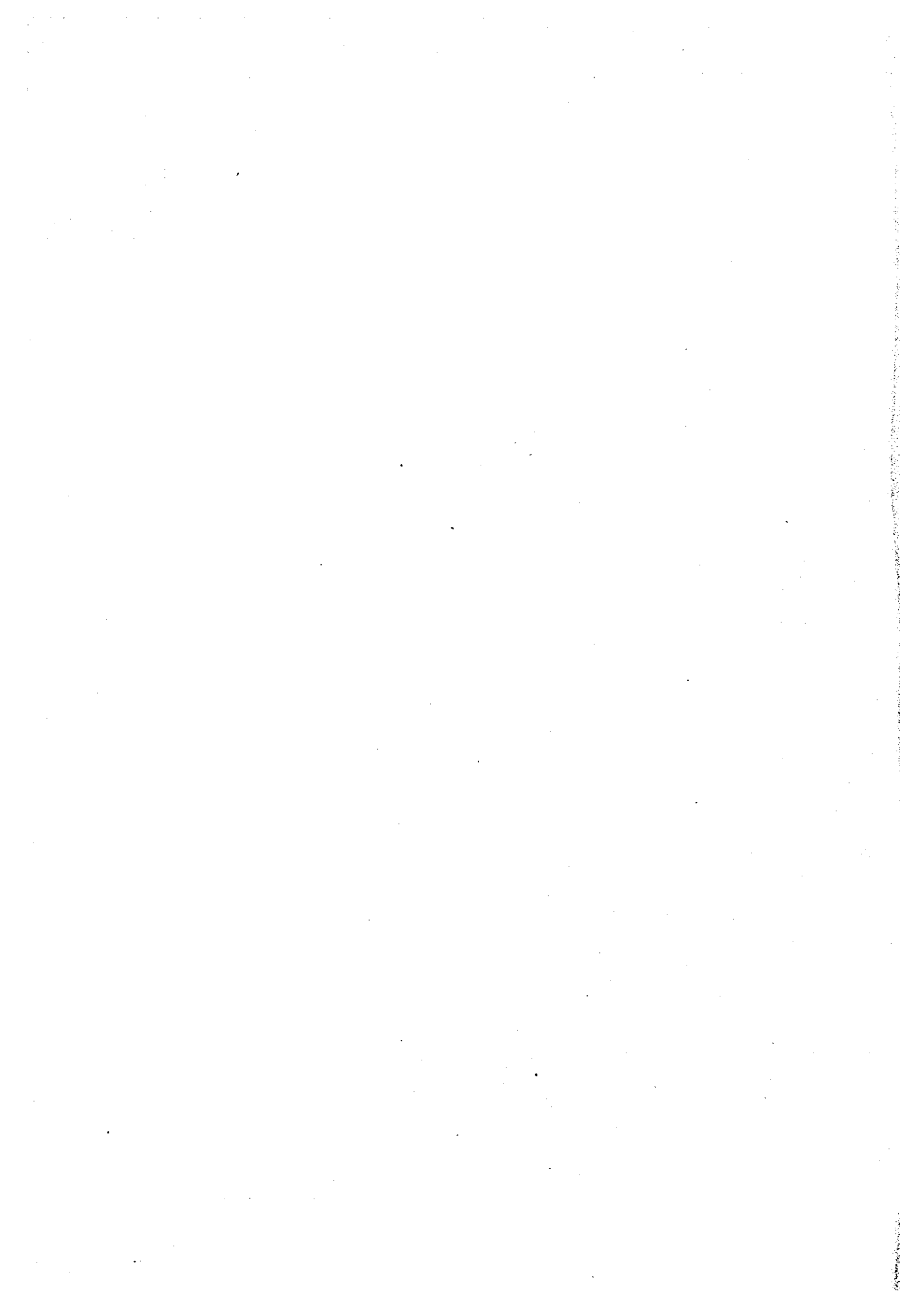


Mixture of Alunite and Gypsum						Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	
100	0	0	0	0	0	Aln100 Gyp 0	36.6	50.5	55.5	54.4	24.6	17.3	22.4
80	0	0	20	0	0	Aln 80 Gyp 20	37.8	49.8	54.0	49.5	22.0	16.0	18.8
60	0	0	40	0	0	Aln 60 Gyp 40	40.3	50.8	54.3	46.7	20.5	15.5	16.7
40	0	0	60	0	0	Aln 40 Gyp 60	43.0	51.6	54.4	44.0	19.2	15.1	14.9
20	0	0	80	0	0	Aln 20 Gyp 80	46.2	52.3	54.2	40.9	17.7	14.5	13.3
0	0	0	100	0	0	Aln 0 Gyp100	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2



Mixture of Kaolinite and Gypsum						Band 1	Band 2	Band 3	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	
0	0	0	0	100	0	Kao100 Gyp 0	42.2	44.0	44.8	43.9	39.2	28.4	27.3
0	0	0	20	80	0	Kao 80 Gyp 20	42.7	44.3	45.0	43.7	38.0	29.0	27.9
0	0	0	40	60	0	Kao 60 Gyp 40	43.2	44.8	45.4	43.5	36.5	28.9	27.7
0	0	0	60	40	0	Kao 40 Gyp 60	44.1	45.5	46.1	43.3	34.5	28.2	26.8
0	0	0	80	20	0	Kao 20 Gyp 80	45.7	47.1	47.6	42.6	30.7	25.9	24.2
0	0	0	100	0	0	Kao 0 Gyp100	52.4	52.8	52.7	35.7	15.5	13.2	11.2

Fig.45 Changes of Spectral Reflectance in Two-Phase Mixture System-2
(End Member : Alunite-Kaolinite, Sericite-Calcite, Alunite-Gypsum, Kaolinite-Gypsum)



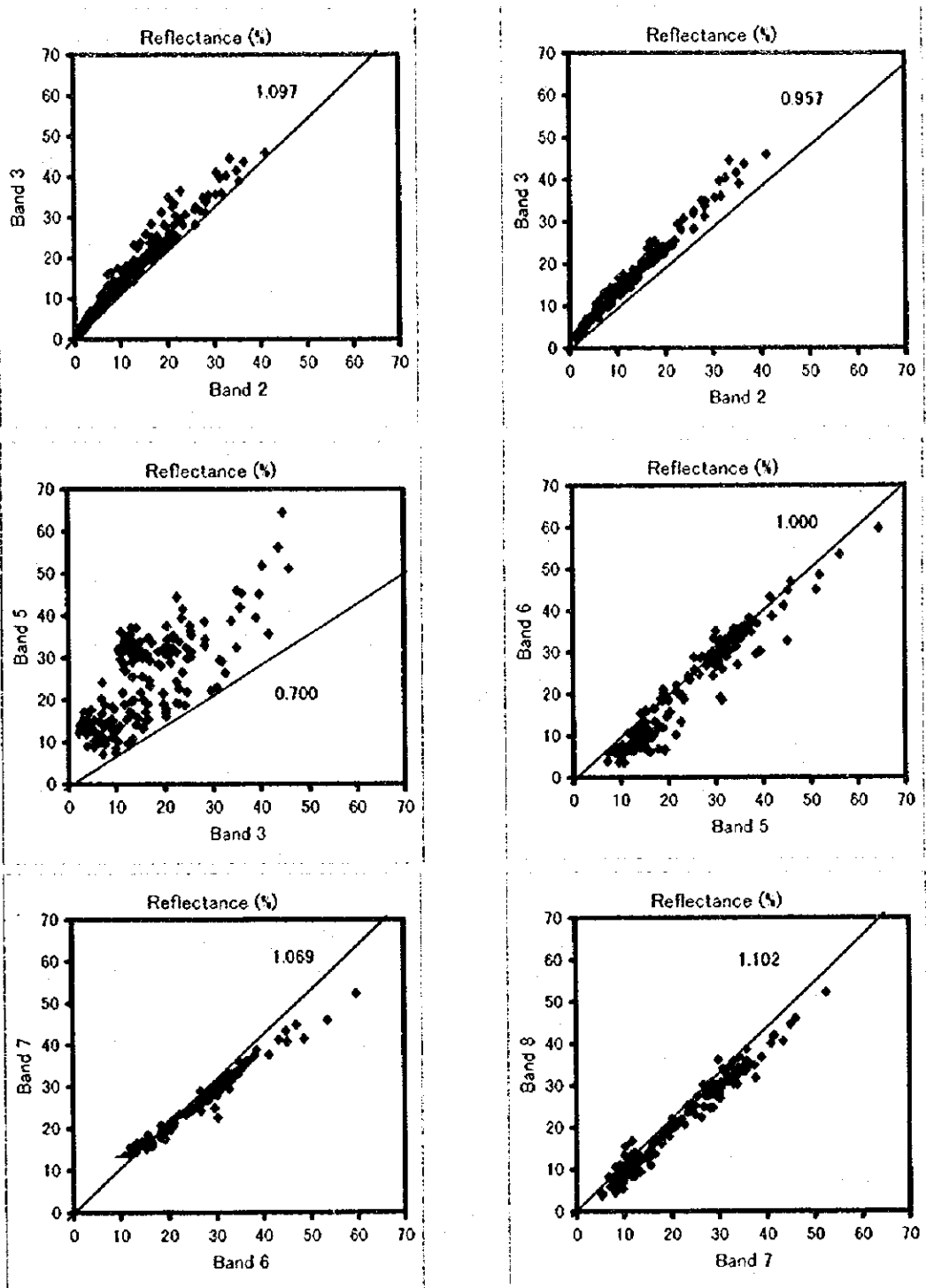


Fig.46 Bivariate Plot of Reflectance on Soil and Weathered Rock



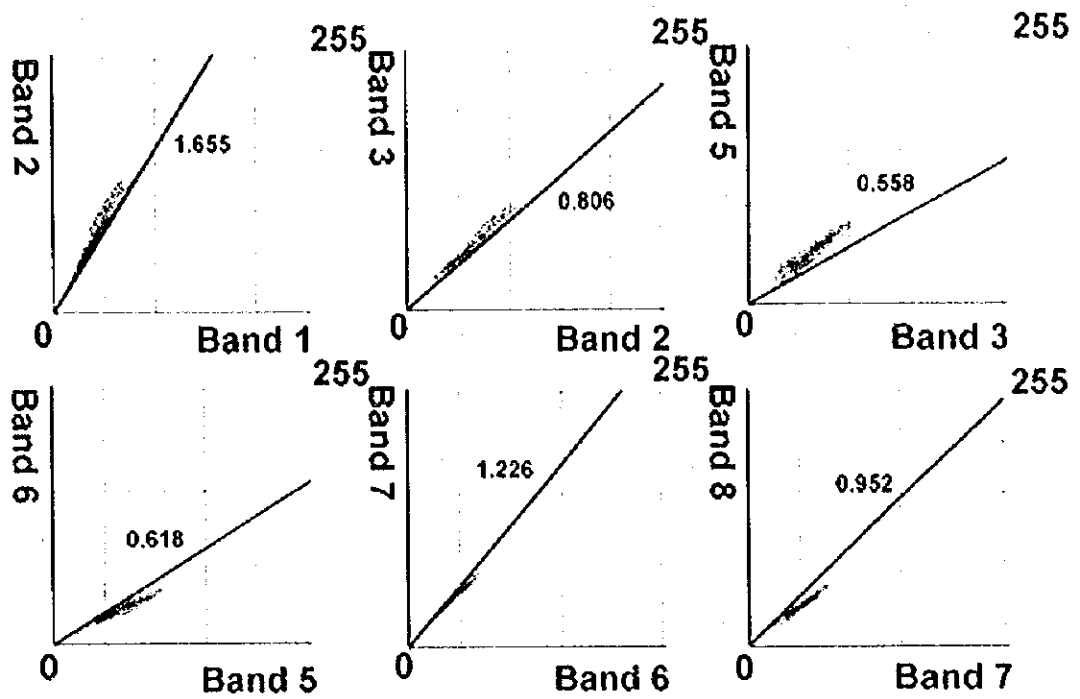


Fig.47 Ratio of Observing Brightness in Two Bands from U-Image Data

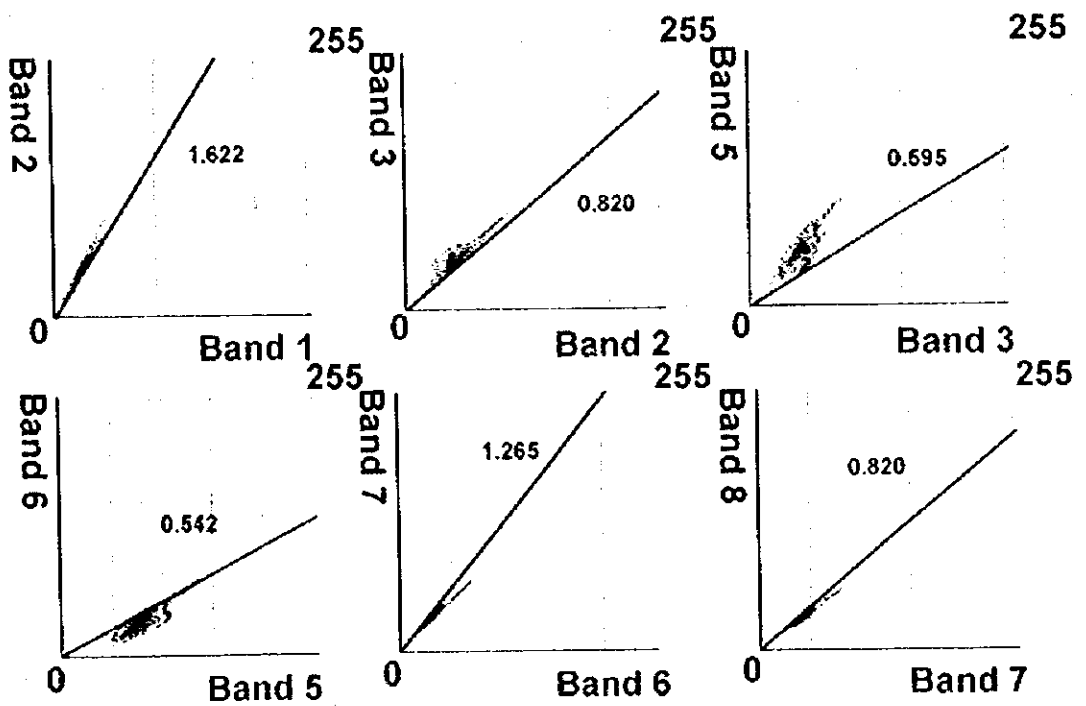
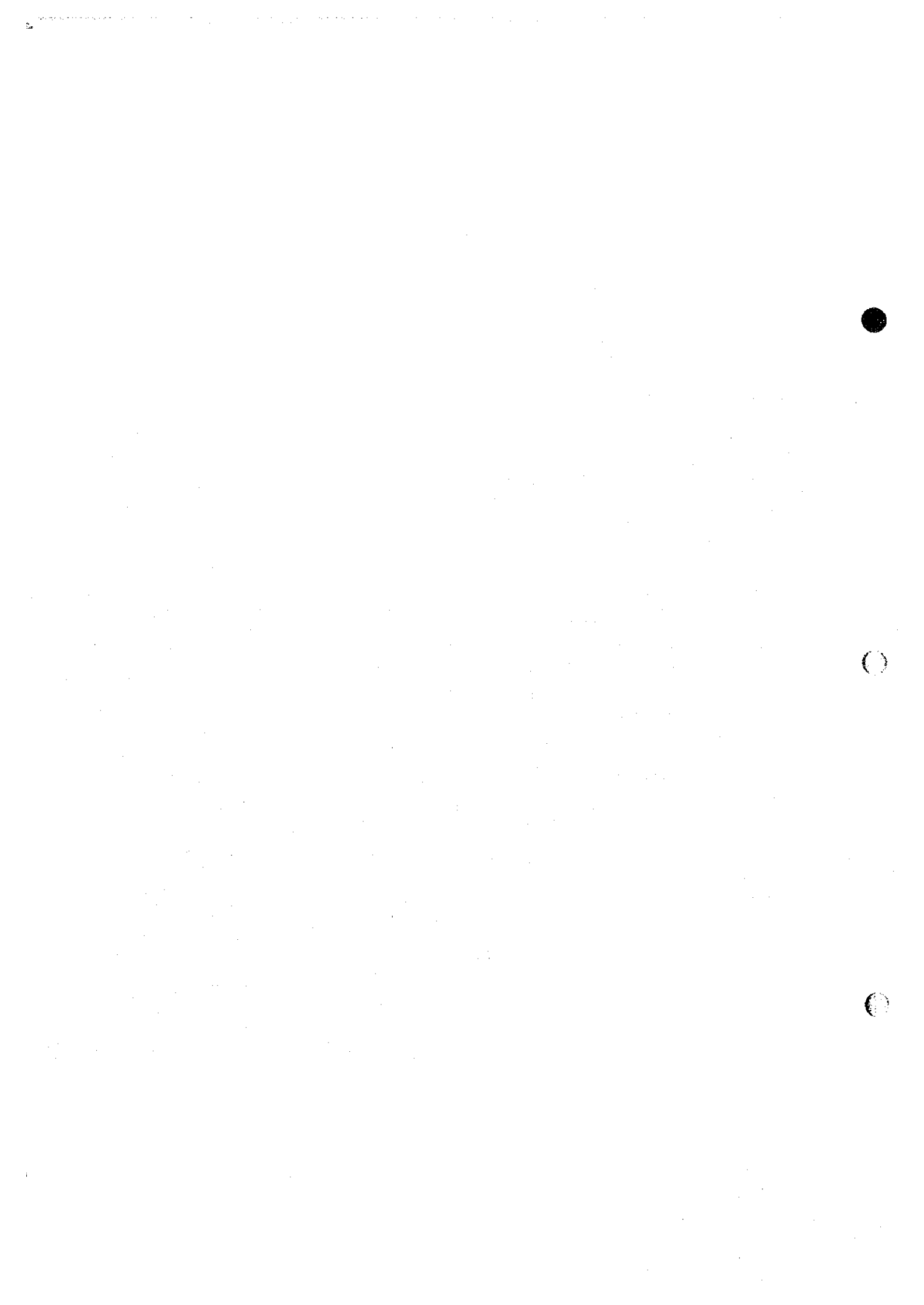


Fig.48 Ratio of Observing Brightness in Two Bands from L-Image Data



dispersión de brillo permiten identificar también en el gráfico de dispersión de brillo de JERS-1 OPS los límites superior o inferior correspondientes a los de la Figura 46.

Al suponer que los límites superior e inferior de los factores de reflectancia entre banda calculados para las diferentes rocas (suelos y afloramientos) y los límites superior e inferior de la relación de brillo entre bandas, se podría convertir el brillo en la relación de pseudo reflectancia al hacer coincidir la inclinación de ambos gráficos de dispersión. Para ello, se define lo siguiente:

Factor de conversión = factor de reflectancia entre bandas / relación de brillo entre bandas

Sin embargo, es un trabajo difícil calcular correctamente estos límites superior e inferior, a partir de los gráficos de dispersión de la relación de brillo entre bandas. En particular, se vería obligado a trazar el límite inferior de la relación de bandas 3 y 5 (de las Figuras 47 y 48) guiándose por normas sumamente inciertas, lo cual constituye la gran limitación de este método.

Table 11 Gradient Coefficient of Bivariate Plot in Two Bands

Coeficiente de gradiente del gráfico de dispersión entre dos bandas						
Relación de bandas	2/1	3/2	5/3	6/5	7/6	8/7
Valores reales	1,097	0,957	0,700	1,000	1,069	1,102
Imagen U	1,655	0,806	0,558	0,618	1,226	0,952
Imagen L	1,622	0,820	0,595	0,542	1,265	0,820

Table 12 Pseudo Reflectance Conversion Coefficiente

Coeficiente de conversión de pseudo reflectancia							
Banda	1	2	3	5	6	7	8
Imagen U	1,000	0,663	0,787	0,987	1,598	1,394	1,685
Imagen L	1,000	0,676	0,789	0,929	1,713	1,448	1,946

Todos los factores de conversión fueron definidos teniendo como referencia a la Banda 1.

2.8.5 Análisis semicuantitativo de los minerales de alteración mediante el método de coincidencia de comportamientos

Los factores de conversión obtenidos en el apartado anterior sirven para corregir la relación de brillo entre dos bandas, y no fueron determinados para la

conversión a la reflectancia absoluta. Es decir, el brillo convertido indica solamente la relación relativa en función del brillo de la Banda 1. El brillo observado puede variar en una misma materia, según los relieves topográficos, porque de estos dependen el volumen de la luz incidente a la superficie terrestre. Por lo tanto, no se puede hacer una comparación con el índice directo aunque se aplique el factor al brillo. Tomando en cuenta estas limitaciones, se realizó la conversión a pseudo reflectancia, mediante la conversión de la relación de pseudo reflectancia al coseno direccional. La conversión a pseudo reflectancia puede realizarse aplicando la siguiente fórmula:

$$R \lambda_m = (I \lambda_m^2 / \sum (I \lambda_n^2))^{1/2} \quad (8-14)$$

Donde,

$R \lambda_m$: pseudo reflectancia de la longitud de onda (m)

$I \lambda_m$: intensidad de reflectancia en la longitud de onda (m)

Los valores de pseudo reflectancia convertidos de esta manera pueden ser directamente comparados con los valores de pseudo reflectancia calculados en el apartado 2.8.2 para las diferentes combinaciones de los minerales de alteración.

Se tomó el brillo de un determinado pixel para convertirlo en pseudo reflectancia, y se comparó con el espectro de reflectancia preparado sobre la base de las diferentes combinaciones de los minerales de alteración. De esta comparación, se identificaron los datos cuya suma del cuadrado del error de cada banda sea la mínima, y se consideró a este valor como el "espectro de coincidencia". Subsiguientemente, se imprimieron los datos binarios del contenido de los minerales de alteración (%) calculada tomando en cuenta este espectro de reflectancia. La Figura 49A es el mapa de distribución de los minerales de alteración según su concentración en Los Mogotes (los datos del contenido de los minerales de alteración convertidos en los datos binarios). Cuanto más blanco sea el tono en la figura, mayor contenido de los minerales de alteración existe en la zona. En la parte inferior derecha, se muestran los resultados de la clasificación según los residuales logarítmicos, a modo de referencia. Por otro lado, la Figura 49B es un mapa de minerales según su contenido, donde alunita aparece en rojo, caolinita en azul, y calcita y sericita están representadas conjuntamente. De acuerdo con esta Figura, en el distrito de Los Mogotes predomina alunita, y en la parte Sur, predomina caolinita. De esta Figura se observa que alrededor de esta zona de alteración se extiende otra zona de alteración con predominio de calcita o sericita.

Sin embargo, esta evaluación se asienta sobre la hipótesis de que la zona de alteración identificada está compuesta únicamente de los siete minerales de alteración seleccionados. Por lo tanto, en el caso de mezclarse las rocas no alteradas o cuando predominan otros minerales de alteración, los resultados de la

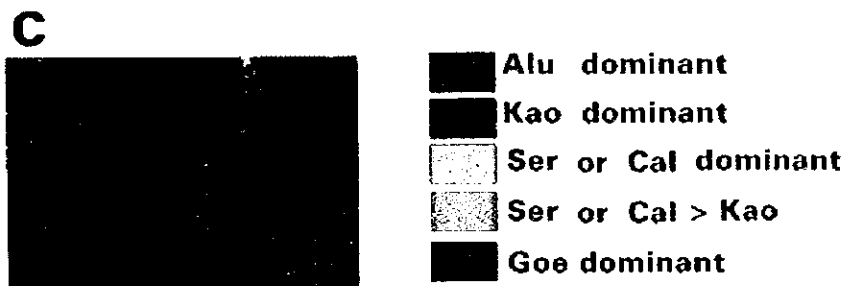
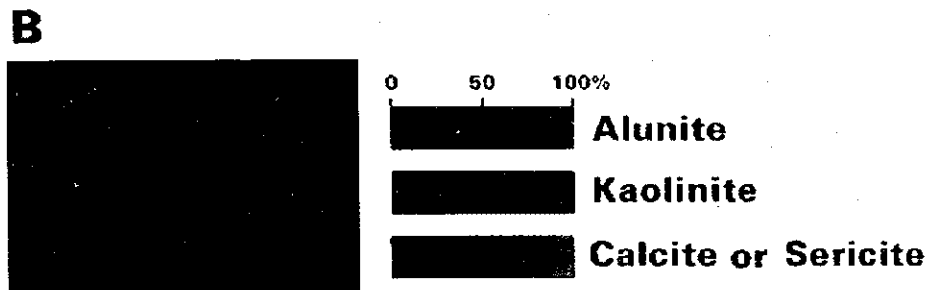
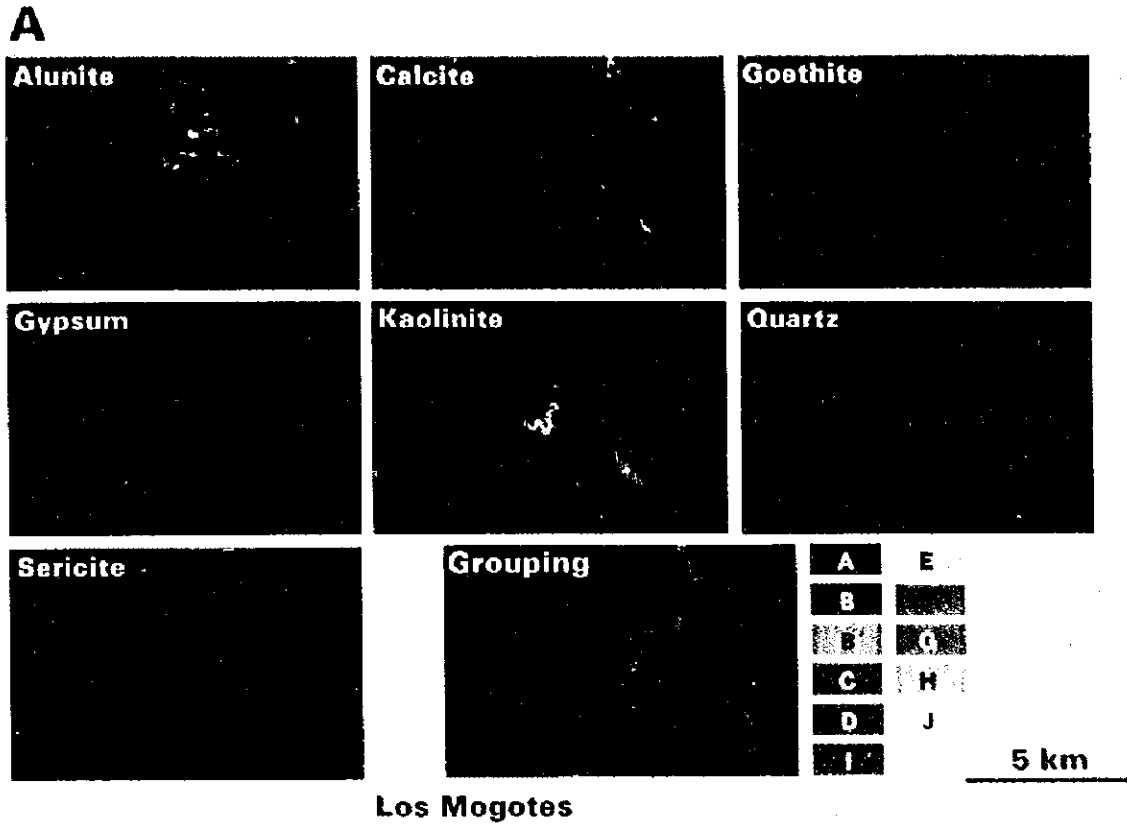


Fig.49 Map Showing Alteration Mineral Content from U-Image Data

the following: (1) the number of employees; (2) the number of employees who are members of the union; (3) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's pension plan; (4) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's health plan; (5) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's dental plan; (6) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's life insurance plan; (7) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's disability plan; (8) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's long-term care plan; (9) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's other benefit plan; and (10) the number of employees who are members of the union and are also members of the company's other benefit plan.

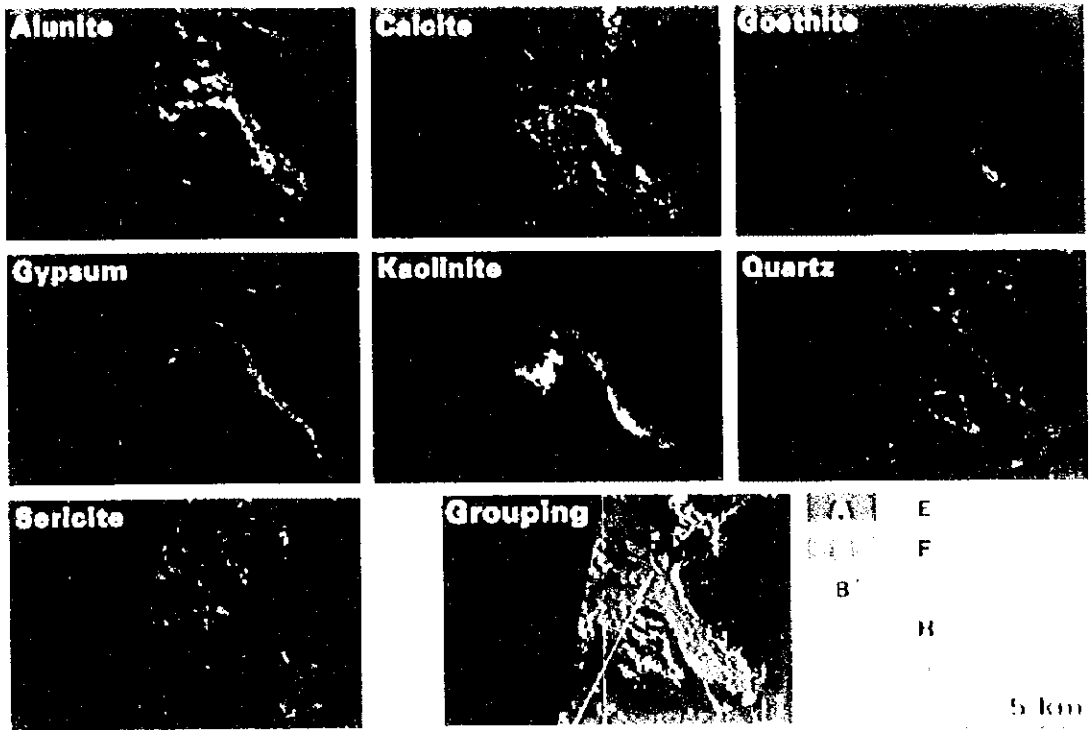
The following table shows the number of employees who are members of the union and are also members of the company's pension plan, health plan, dental plan, life insurance plan, disability plan, long-term care plan, other benefit plan, and other benefit plan.

Benefit Plan	Number of Employees
Pension Plan	100
Health Plan	100
Dental Plan	100
Life Insurance Plan	100
Disability Plan	100
Long-term Care Plan	100
Other Benefit Plan	100
Other Benefit Plan	100

The following table shows the number of employees who are members of the union and are also members of the company's pension plan, health plan, dental plan, life insurance plan, disability plan, long-term care plan, other benefit plan, and other benefit plan.

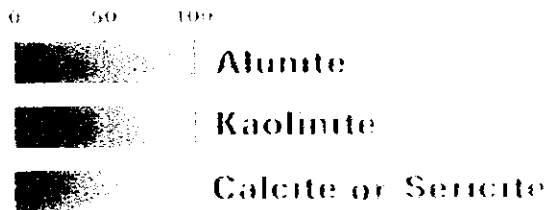
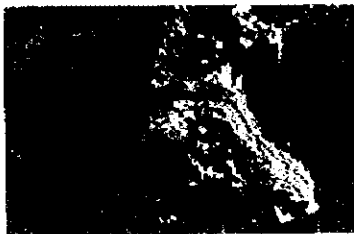
Benefit Plan	Number of Employees
Pension Plan	100
Health Plan	100
Dental Plan	100
Life Insurance Plan	100
Disability Plan	100
Long-term Care Plan	100
Other Benefit Plan	100
Other Benefit Plan	100

A

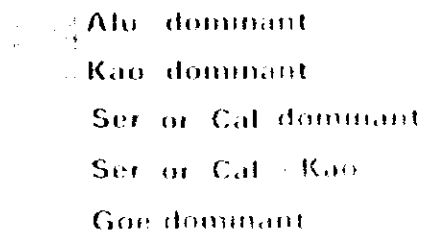


Los Mogotes

B



C



evaluación no siempre son correctos. Es importante tener en cuenta que se trata de representar la combinación de los minerales de alteración donde la pseudo reflectancia y el espectro de reflectancia muestren mayor coincidencia.

2.8.6 Mapas de clasificación de los minerales de las zonas de alteración

Con el mapa de distribución de los siete minerales de alteración según el contenido descrito en el apartado 2.8.5 solamente, no es posible conocer claramente las características de las zonas de alteración por el elevado número de los elementos. Por lo tanto, se procedió a preparar los mapas de clasificación de las zonas de alteración de las Imágenes U y L sobre la base de las diferentes combinaciones y la concentración de los minerales de alteración (Figuras 50 y 51).

Para la preparación de los mapas de clasificación de alteración se definieron los siguientes criterios:

- (1) Zona con predominio de alunita
Zona donde el contenido de alunita y caolinita en conjunto represente más de 50%, y que presenta mayor predominio de alunita que caolinita.
- (2) Zona con predominio de caolinita
Zona donde el contenido de alunita y caolinita en conjunto represente más del 50%, y que presenta mayor predominio de caolinita que alunita.
- (3) Zona de sericita/calcita > caolinita
Zona donde el contenido de sericita, calcita y cuarzo en conjunto represente más de 50%, y que el contenido total de caolinita o alunita represente más de 20%.
- (4) Zona con predominio de limonita
Zona donde el contenido de limonita represente más de 50%.
- (5) Zona con predominio de sericita
Zona que no satisfacen ninguna de las condiciones descritas en los numerales anteriores.

La Figura 49C es el mapa de clasificación de las zonas de alteración preparadas aplicando los criterios anteriormente descritos. Es posible preparar un mapa de clasificación de las zonas de alteración, similar al mapa de distribución de alunita, caolinita, calcita/sericita (Figura 49B). Las zonas con predominio de alunita en este mapa de clasificación, se extienden en el borde Norte de la zona de alteración de Los Mogotes, y las zonas con predominio de caolinita, en el borde Sur de la misma. Alrededor de la zona con predominio de caolinita se extiende la zona con predominio de sericita/calcita que contiene, y en el borde de la zona de alteración, se extiende la zona con predominio de sericita/calcita. En las zonas de alteración relativamente pequeñas que se ubican en el Sur o en el Norte de Los

Mogotes, se pueden distinguir las zonas con predominio de sericita/calcita, así como de sericita/calcita + limonita. Esta distribución de alunita, caolinita y sericita/calcita puede ser distinguida en la Figura 49B. Sin embargo, en un mapa de distribución de los minerales de alteración según su concentración de RVA tiene la desventaja de que sólo puede representar tres elementos.

2.8.7 Comparación con el mapa de clasificación de las zonas de alteración según los residuales logarítmicos

En el apartado 2.7 se clasificaron las zonas de alteración en 11 grupos según el comportamiento del espectro de pseudo reflectancia. En este apartado se hace una comparación entre el mapa de distribución de los minerales de alteración según su concentración y el mapa de clasificación de los minerales de alteración.

En la parte inferior derecha de la Figura 49A se muestra un mapa de clasificación de las zonas de alteración según los residuales logarítmicos (comportamiento de pseudo reflectancia). Al comparar la Figura 49B con la Figura 49C, se observa que la concentración y combinación de los minerales de alteración no coinciden con los grupos. Por ejemplo, la zona con predominio de alunita y caolinita en la cercanía de Los Mogotes, corresponde a grandes rasgos con el Grupo A, pero los minerales en ambos casos no han podido ser clasificados. De la misma manera, la distribución de las zonas aguas abajo también es diferente entre ambas figuras. En la Figura 49A, sólo aparece el Grupo B. Además, en las Figuras 49B y C, las combinaciones de los minerales de alteración que conforman las zonas de alteración se distribuyen desde el centro hacia afuera en el siguiente orden:

alunita, caolinita → sericita/calcita + caolinita → sericita/calcita

Los grupos muestran cierta tendencia a concentrarse. Mientras tanto en la Figura 49A, no se observa tal orden de disposición, además que la distribución de los grupos es menos concentrada que en las otras dos figuras.

De lo anterior, se deduce que el método semicuantitativo de los minerales de alteración es válido si lograrse realizar correctamente la conversión del brillo a pseudo reflectancia.

2.8.8 Confiabilidad de los resultados de la interpretación de minerales

En la interpretación de los minerales, se compararon la pseudo reflectancia de las muestras en cada banda (valores del coseno direccional) y la pseudo reflectancia de las imágenes (valores del coseno direccional), y como el resultado de la interpretación de los minerales se tomó el que presentaba menor valor de la suma del cuadrado de la diferencia entre ambos valores. Con el fin de comprobar la

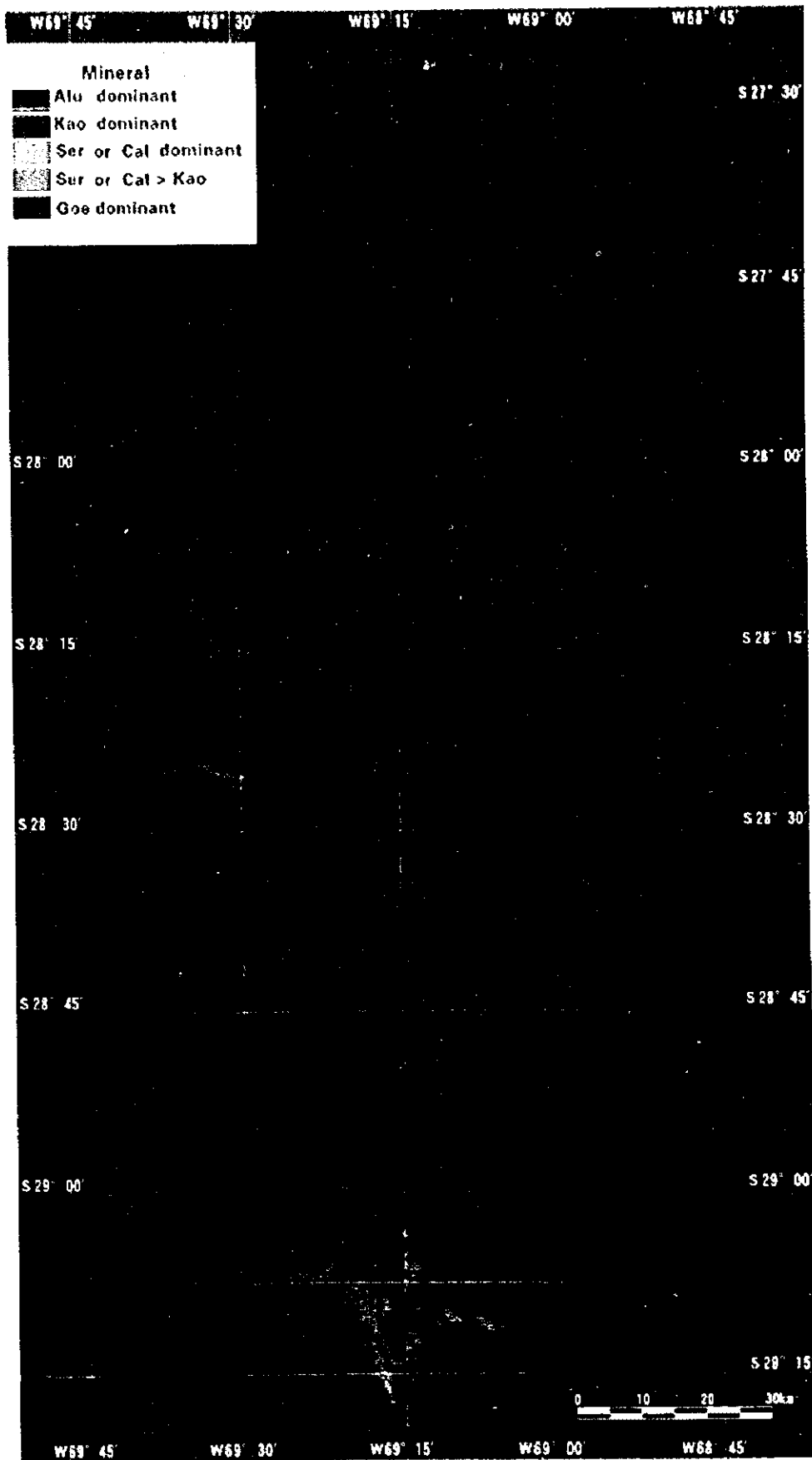
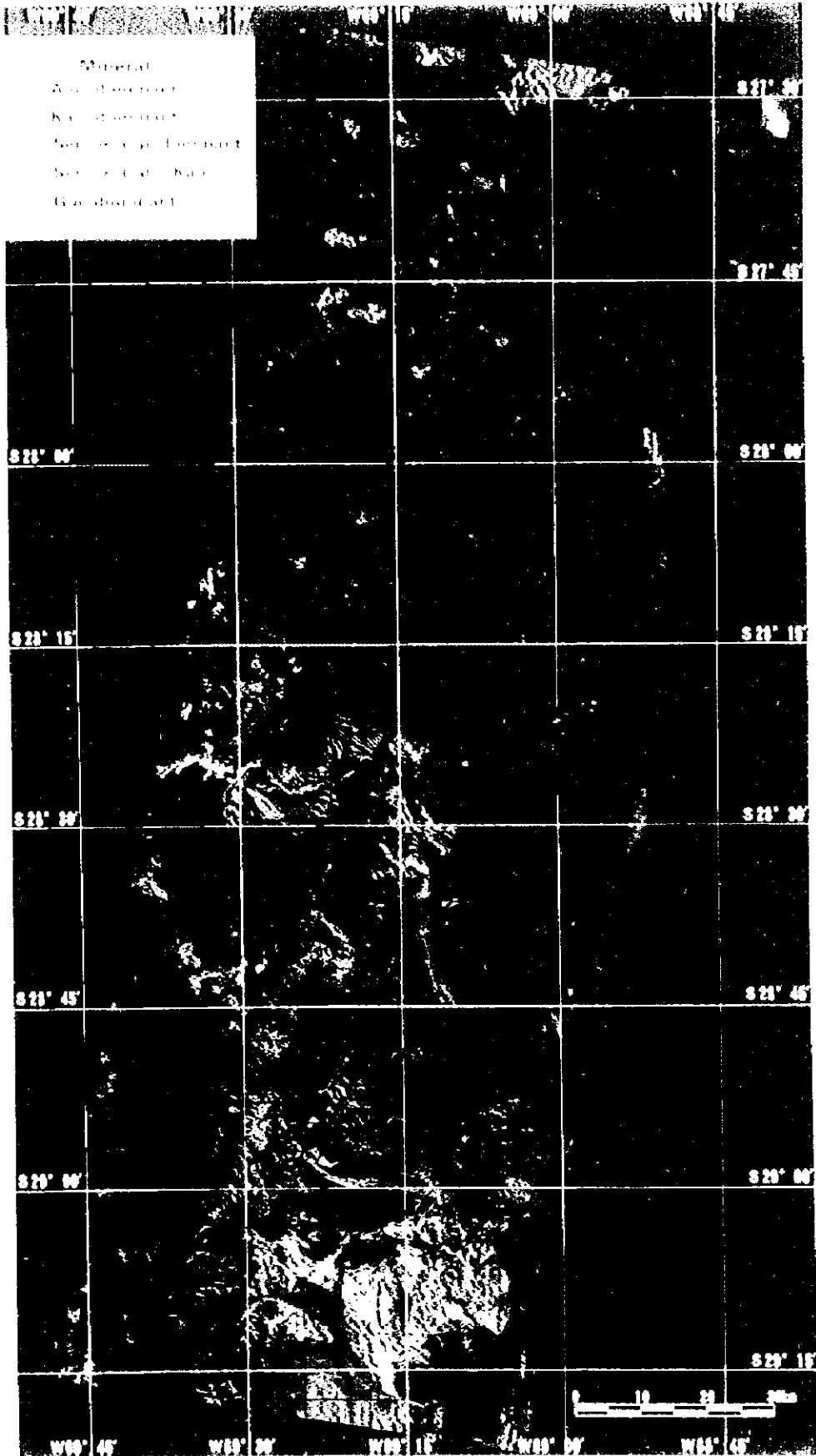


Fig.50 Identification of Alteration Minerals in the U-Image Area



()

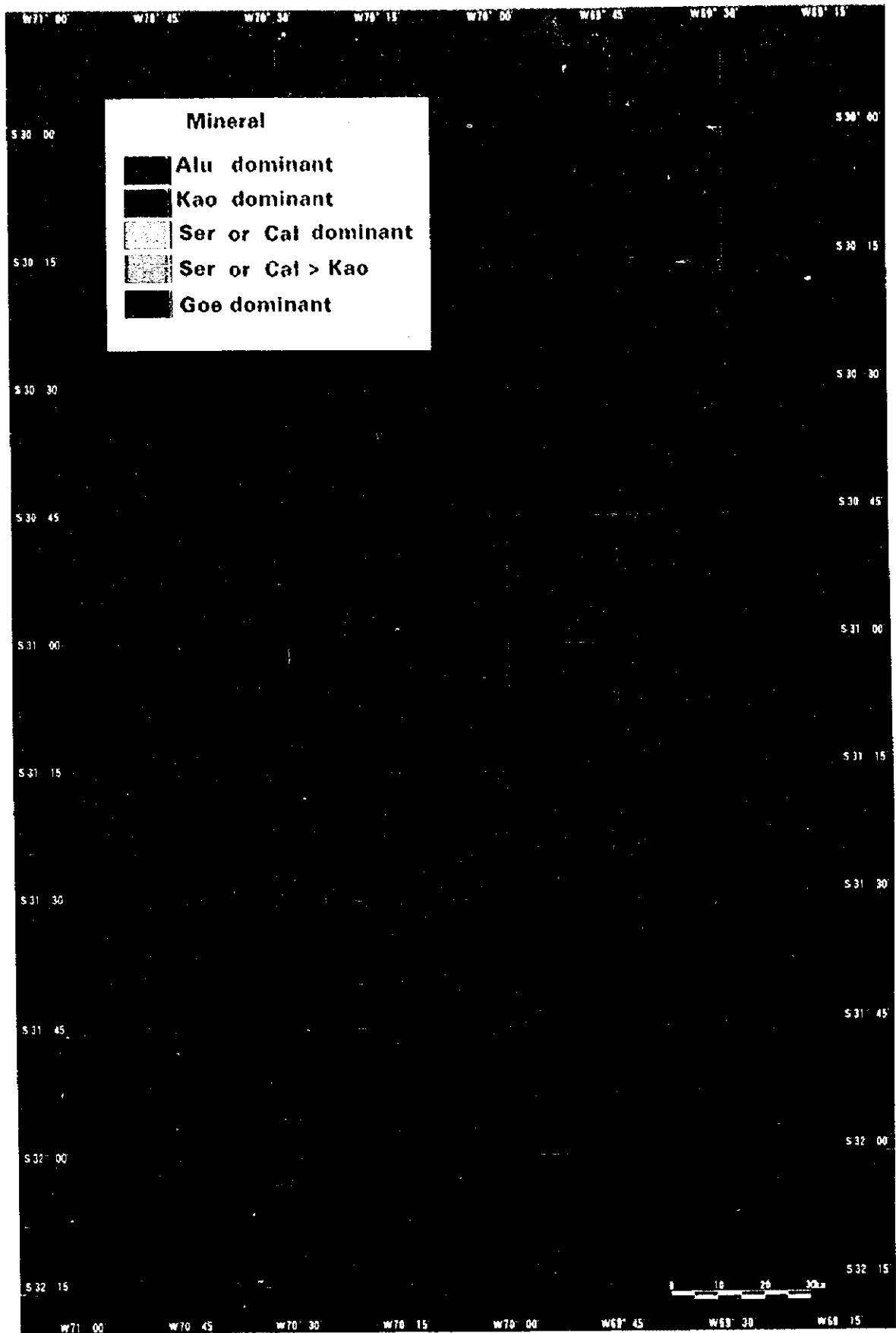
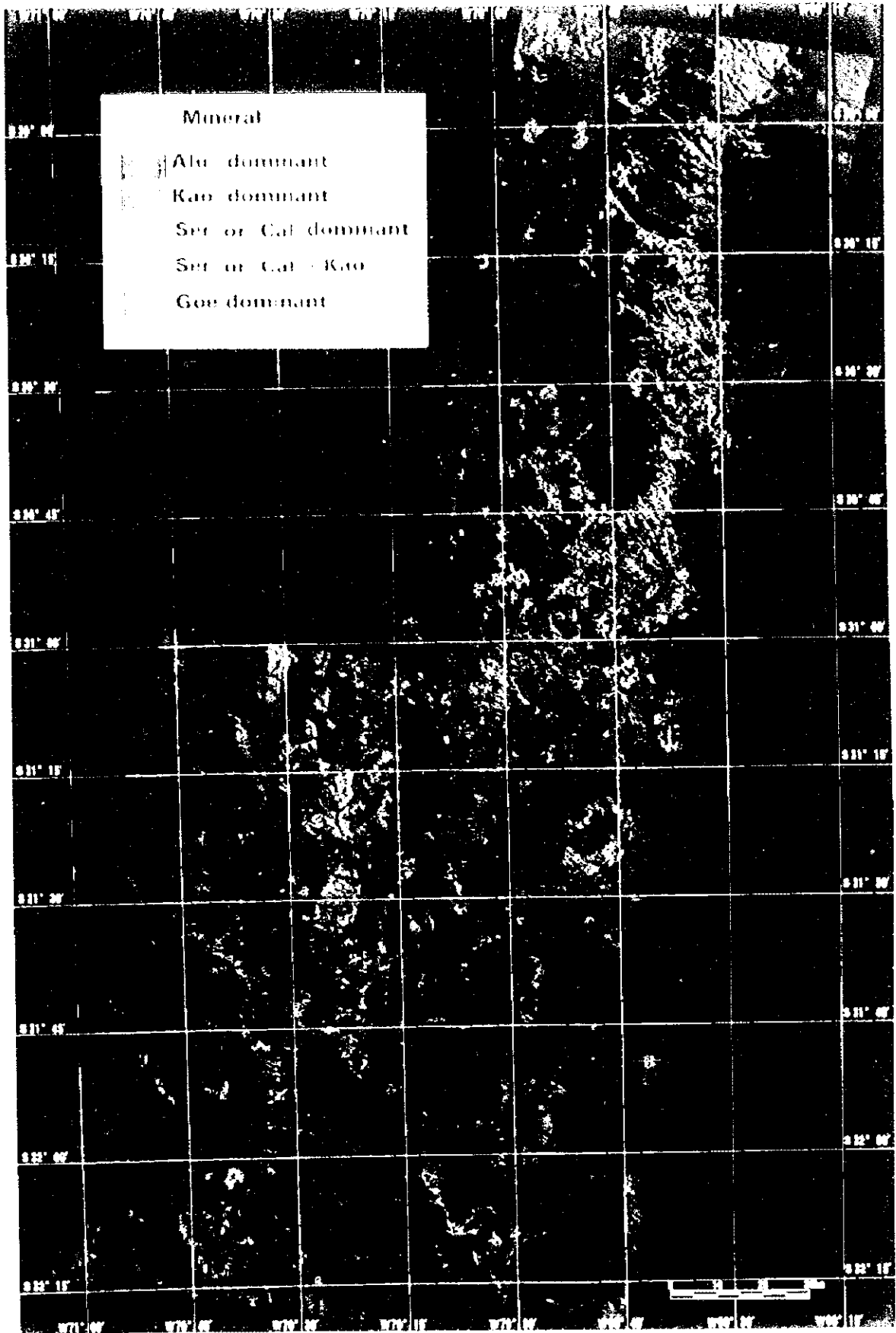
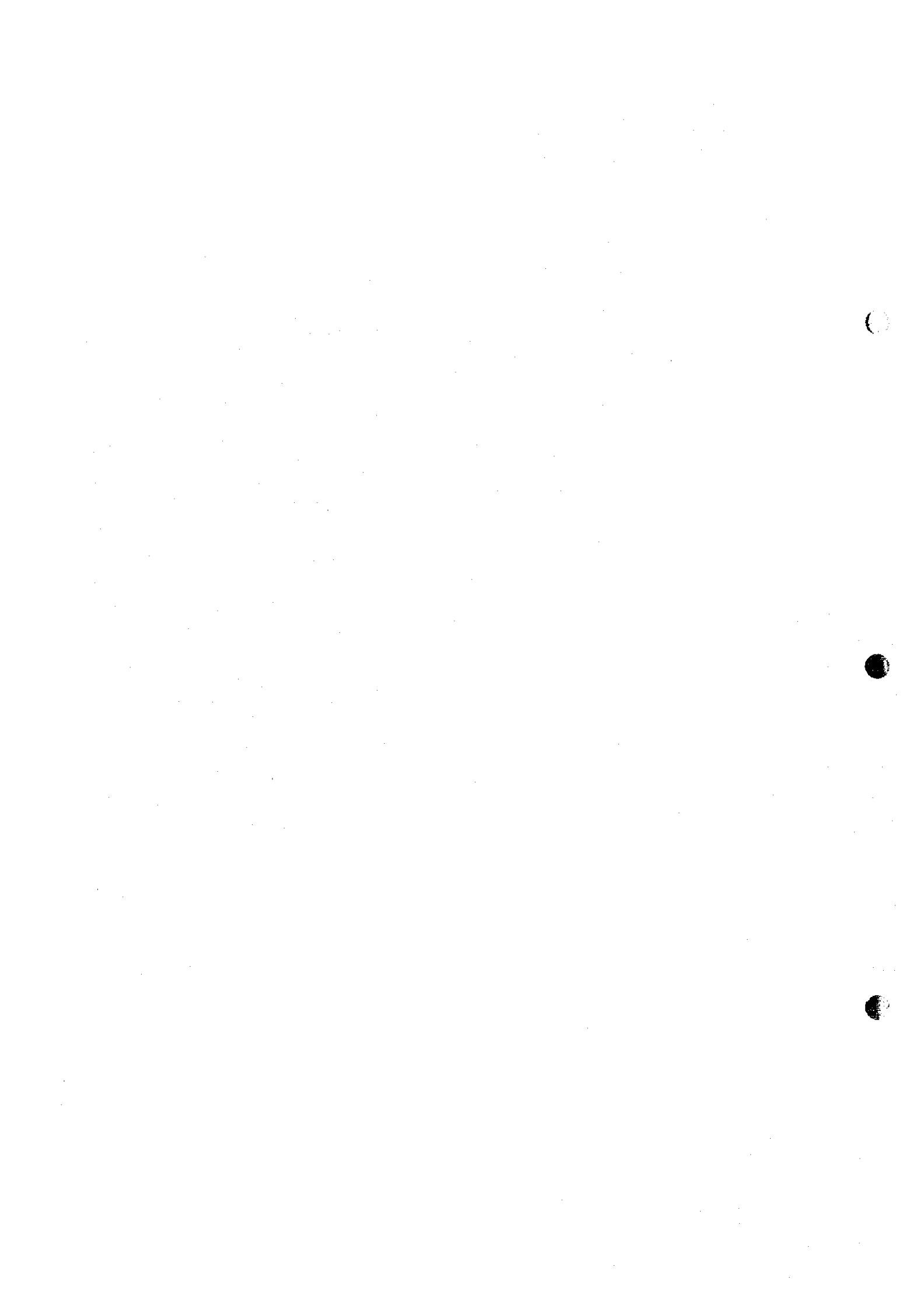


Fig.51 Identification of Alteration Minerals in the L-Image Area





confiabilidad de estos resultados, se analizó la variación de la combinación de los diez primeros minerales de alteración que presentan menor error de los datos de las imágenes y pseudo reflectancia. Suponiendo que existe una gran variedad de combinaciones de los diez primeros minerales de alteración, con errores muy similares. En este caso, una pequeña diferencia del brillo puede alterar drásticamente los resultados de la interpretación de los minerales. En otras palabras, la confiabilidad de dichos resultados es sumamente baja. Por el contrario, si los errores son grandes, o si los errores son similares sólo cuando la combinación de los minerales es similar, entonces, la confiabilidad de dichos resultados es relativamente alta.

En la Figura 52 se muestran los valores de pseudo reflectancia de los píxeles interpretados como zonas con predominancia de alunita y los valores de pseudo reflectancia de las combinaciones de los diez primeros minerales de alteración que se asemejan a los primeros. Si bien es cierto que el comportamiento de la pseudo reflectancia de los primeros diez minerales y la de los píxeles no coincide, muestra una evolución casi paralela. Aunque el error es muy sensible, y los resultados de la interpretación muestran una diferencia en el contenido de alunita y caolinita, se deduce que los resultados de la interpretación serían similares aunque existiese el error de brillo, puesto que no hay una gran variación en el contenido de los demás minerales de alteración. En las Figuras 53 y 54 se muestran los resultados de la interpretación de los diez primeros minerales correspondientes a los píxeles considerados como la zona con predominancia de caolinita y como la zona con predominio de sericita/calcita. En ambos casos, el error es sumamente pequeño, de 0,03 entre los diez primeros minerales. Sin embargo, no hay grandes variaciones en la combinación de los minerales, y por lo tanto, se concluye que los resultados de la interpretación son relativamente confiables. En la Figura 55 se muestran los valores de pseudo reflectancia de los píxeles clasificados en las ocho categorías (del 1 al 8) descritas en el apartado 2.8.6. Se observa que existe una diferencia evidente en la reflectancia y en el comportamiento de la reflectancia en las bandas 5 a 8. De todo esto se afirma que si el proceso de conversión a la pseudo reflectancia, así como la combinación de los minerales de alteración en la preparación del índice son correctos, el método resulta ser práctico para la interpretación de los minerales a través de las imágenes de JERS-1 OPS.

Para la preparación del índice de los minerales de alteración, se determinó la pseudo reflectancia combinando los siete minerales de alteración, con una variación de la tasa de mezcla por cada 10%. Hubiera sido conveniente limitar las combinaciones de los minerales de alteración con una visión realista, tomando en cuenta las condiciones de formación de los minerales. Sin embargo, dado que es la primera vez que se aplica este método de análisis a los datos de JERS-1, se optó por seguir un procedimiento más mecánico en combinar los minerales de alteración, a modo de eliminar todo factor artificial previo.