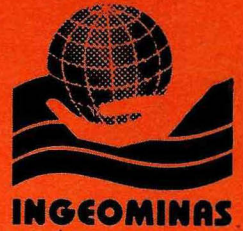


BOLETIN GEOLOGICO



GEOLOGIA, MINERALOGIA Y QUIMICA DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO
ZONADO DEL ALTO CONDOTO (CUZAC)

Rosalba Salinas E., Michael Tistl y Klaus P. Burgath

METODOLOGIA PARA LA CARTOGRAFIA DE ZONAS DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS
DESLIZAMIENTOS A PARTIR DE SENSORES REMOTOS Y S.I.G.

Germán Vargas Cuervo

BENEFICIO DE ROCA FOSFORICA EN LOS MUNICIPIOS DE NUEVO COLON,
TURMEQUE Y VENTAQUEMADA (BOYACA)

Jesus Zambrano P. y Eduardo Romero F.

BOLETIN GEOLOGICO

CONTENIDO GENERAL

R. Salinas E., M. Tistl y K. P. Burgath	Geología, mineralogía y química del Complejo Ultra- máfico Zonado del Alto Condoto (CUZAC).....	5-58
G. Vargas C.	Metodología para la cartografía de zonas de suscep- tibilidad a los deslizamientos a partir de sensores remotos y S.I.G.....	59-116
J. Zambrano P. y E. Romero F.	Beneficio de roca fosfórica en los municipios de Nuevo Colón, Turmequé y Ventaquemada (Boyacá)	117-140

Derechos reservados por:

INGEOMINAS: Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química.
Diagonal 53 No. 34-53, A. A. No. 4865.
Santafé de Bogotá, D. E., Colombia S. A.

El Boletín Geológico se publica en tres (3) números cada año.

Formato de publicación 17 x 24 cm

Editor:

ALBERTO VILLEGAS BETANCOURT

Geólogo

Editado e impreso por INGEOMINAS

IN MEMORIAM:

BENJAMIN ALVARADO BIESTER



1908 - 1993

El 19 de abril de 1993 falleció en Bogotá el Doctor Benjamín Alvarado Biester, quien con sobrados méritos fue llamado el Padre de la geología colombiana.

El Doctor Alvarado nació en Bogotá en 1908. Terminados sus estudios de ingeniería civil, empezó a trabajar en 1928 en el Ministerio de Industrias como ingeniero topógrafo y ayudante de geología de la Comisión Científica Nacional, donde permaneció hasta 1935. En esta importante etapa de su vida profesional, tuvo la suerte de acompañar a Emil Grosse, y más tarde a Enrique Hubach en los grandes trabajos de geología regional que éstos adelantaban entonces. Con Enrique Hubach estableció una colaboración científica plasmada en varios trabajos que

hoy en día son clásicos en la geología colombiana. Al término de ese período, viajó a Estados Unidos a especializarse en geología en la Universidad de Minnesota, obteniendo los títulos de Magister y Doctorado, en 1937 y 1938 respectivamente. En ese último año regresó a Colombia, y fue nombrado primer director del Servicio Geológico Nacional.

Hasta 1945 el Doctor Alvarado dirigió con acierto el Servicio Geológico. Fue un periodo crucial para Colombia en el cual, dada la situación mundial, el país tuvo que enfrentar el reto de autoabastecerse en materias primas, y además dar un gran impulso a la red hidroeléctrica. Los primeros estudios de los yacimientos de hierro y carbón de Paz del Río, dirigidos personalmente por el Doctor Alvarado, fueron el proyecto bandera del Servicio Geológico en esa etapa. En 1945 el Doctor Alvarado se retira y pasa al Instituto de Fomento Industrial donde culmina los estudios de Paz del Río y, creada Acerías Paz del Río, es nombrado Geólogo Jefe y Subgerente Técnico en 1948. Permanece en el cargo hasta 1957. En ese año reemplaza a Enrique Hubach en la dirección del Servicio Geológico, y se retira en 1958. Allí termina su carrera al servicio del gobierno colombiano; a partir de entonces alterna sus actividades entre la consejería técnica a Naciones Unidas y la consultoría geológica. Como consejero de Naciones Unidas tiene sede en Uruguay de 1958 a 1960, donde estudia los yacimientos de hierro del país, y luego en Nueva York entre 1966 y 1973. Hasta 1968 estudia los yacimientos de hierro de Suramérica y prepara el capítulo correspondiente del Estudio de los Recursos Minerales de Hierro del Mundo. Luego dirige proyectos del PNUD relacionados con la minería de varios países de Africa, Suramérica, además de España y Jordania. Es geólogo consultor en Bogotá de 1960 a 1966 y de 1973 hasta su muerte.

La contribución de Benjamín Alvarado al desarrollo geológico y minero de nuestro país es tan extensa que requeriría muchas páginas; para resumirla basémonos en apreciaciones de él mismo, quien consideraba haber obtenido cuatro grandes logros profesionales en su vida: la creación de Paz del Río, la fundación del Servicio Geológico, el estudio de la Concesión De Mares, y sus trabajos para las Naciones Unidas.

La creación de Acerías Paz del Río en 1948, fue solo el último paso de un largo proceso en el cual Benjamín Alvarado fue no solamente el iniciador sino también el ejecutor de todas las etapas. La necesidad de una siderúrgica nacional ya estaba en la mente de muchos colombianos en los años treinta y, apenas fundado el Servicio Geológico en 1940 Benjamín Alvarado toma en manos personalmente el asunto. En su informe como Director del Servicio Geológico en 1940 dice lo siguiente: "Ultimamente el mismo funcionario [B. Alvarado] fue comisionado para estudiar los yacimientos de hierro aledaños a la Sabana de Bogotá, con el objeto de ver las posibilidades que existen para el montaje de una planta siderúrgica en algún lugar de estas regiones. En relación con este estudio se han investigado igualmente los yacimientos que podrían suministrar la caliza y el carbón necesarios para tal fin, y, aunque el estudio no se ha terminado, todo parece indicar que existen condiciones favorables para la instalación a plazo no lejano de un alto horno cuya producción automáticamente haría disminuir la

importación de hierros y aceros que hoy constituyen un renglón muy importante de nuestro comercio exterior."

En los años siguientes el Servicio Geológico con su director a la cabeza explora sistemáticamente las diferentes regiones de Cundinamarca y Boyacá donde existen posibilidades conocidas: Subachoque, La Caldera, Pacho, Guasca, Nemocón, La Calera, Chocontá, Guatavita y Sesquilé. Se van descartando áreas y en septiembre de 1942 el ingeniero Olimpo Gallo lleva al Instituto de Fomento Industrial unas muestras interesantes del área de Paz del Río. Se inicia entonces la exploración y luego los estudios de reservas a cargo del Servicio Geológico, que permitirán, como último paso del proceso, la puesta en marcha de Acerías Paz del Río en 1954. El hallazgo de Paz del Río fue altamente meritorio, ya que no había ningún indicio del yacimiento, ni siquiera pequeña minería, y la región era totalmente desconocida en términos geológicos. El único informe tenía relación con el deslizamiento y posterior traslado de la población de La Paz, hecho por Enrique Hubach y Benjamín Alvarado, precisamente, en 1935. Según el Doctor Alvarado, las dificultades en la gran empresa de Paz del Río fueron inmensas; las mayores radicarón en tener que convencer a la comunidad boyacense de la importancia del yacimiento y vencer la resistencia de grupos antioqueños, "con presidente antioqueño e ingeniero de minas" según sus propias palabras. Con razón él consideraba a Paz del Río como la obra de su vida, justamente recompensada por el gobierno colombiano con la Cruz de Boyacá, la cual le fue otorgada al inaugurarse Acerías Paz del Río.

Estudiar geología en 1935 y fundar un Servicio Geológico con una sola persona fue, según el Doctor Alvarado, otra de sus grandes empresas. En efecto, cuando él regresó de los Estados Unidos en 1938 era prácticamente el único geólogo con que contaba el país. Según él, el Servicio Geológico fue salvado por la Segunda Guerra Mundial: una serie de geólogos europeos fugitivos, por diferentes razones políticas, llegaron a Colombia en ese preciso momento. Entre ellos estaban Victor Oppenheim, Edouard Reymond y José Royo y Gómez, y fueron ellos quienes dieron al Servicio la base científica indispensable para su funcionamiento. "Siete mercenarios salvaron el Servicio Geológico" era la frase del Doctor Alvarado. La solución propuesta rápidamente por el Servicio al gobierno nacional, y acogida por este, fue enviar un grupo de ingenieros colombianos a especializarse en geología en universidades de los Estados Unidos. Algunos de ellos fueron Gilberto Botero, Vicente Suarez, Alejandro del Río, Roberto Sarmiento y Hernán Garcés. Su posterior contribución al desarrollo industrial del país es bien conocida.

En el proceso de revertimiento de la Concesión de Mares está una de las grandes contribuciones hechas al país por el Servicio Geológico, con el Doctor Alvarado a la cabeza. Al terminar el contrato de la primera concesión petrolera, el país debía recibir los pozos en producción y continuar su explotación. Colombia no estaba preparada y la empresa titular no tenía obligación ni interés en preparar el personal local para el revertimiento. Quizás esta página heroica de la historia nacional no haya recibido la atención que merece. Correspondió a un pequeño grupo de geólogos e ingenieros colombianos, liderados por el Doctor

Alvarado, asumir la enorme responsabilidad de asesorar al gobierno para que pudiera nacer una industria petrolera nacional. Como se sabe, de 1958 en adelante el Doctor Alvarado fue alternativamente geólogo consultor y consejero técnico de Naciones Unidas. Durante ese período fue el único suramericano que ocupó ese último cargo, con tan buen éxito que el informe sobre el hierro en el mundo dio crédito a sus autores, caso excepcional en Naciones Unidas.

Con la muerte del Doctor Benjamín Alvarado se cierra una importante página de la historia de la geología y de la industria en Colombia, la de los pioneros, uno de cuyos últimos representantes era él. A sus calidades profesionales y a sus contribuciones académicas e institucionales hay que sumar sus inmensos valores humanos, en especial su benevolencia y su calidez, que hicieron de él no solamente un profesional respetado y admirado sino también un colega y un maestro apreciado y querido por todos quienes tuvimos la fortuna de conocerlo.

ARMANDO ESPINOSA B.

Cali, abril de 1994.



**REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA
INGEOMINAS**

**GEOLOGIA, MINERALOGIA Y QUIMICA DEL
COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO
CONDOTO (CUZAC)**

Por:

ROSALBA SALINAS E., MICHAEL TISTL y KLAUS P. BURGATH

Febrero de 1994

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCION.....	8
1. GEOLOGIA REGIONAL DE LA ZONA DEL RIO CONDOTO.....	8
2. COMPLEJOS ULTRAMAFICOS ZONADOS Y MINERALIZACIONES DE ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO (PGE).....	12
3. EL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO (CUZAC).....	14
3.1. DUNITA.....	17
3.1.1. DESCRIPCION GENERAL DE LAS DUNITAS DEL CUZAC.....	17
3.2. DUNITA CON CLINOPIROXENO Y WEHRLITA.....	20
3.2.1. DESCRIPCION GENERAL.....	22
3.3. CLINOPIROXENITA OLIVINICA.....	24
3.3.1. DESCRIPCION GENERAL.....	24
3.4. UNIDADES DE CARACTER IGNEO METAMORFICO RELACIONA- DAS AL PROCESO DE INTRUSION DEL CUZAC.....	25
3.4.1. CLINOPIROXENITA CON HORNBLENDA Y MAGNETITA.....	25
3.4.2. ROCAS DIORITICO - GABROICAS.....	26
4. METAMORFISMO DE CONTACTO EN ROCAS VOLCANO- SEDIMENTARIAS.....	28
4.1. CORNUBIANITAS DE HORNBLENDA.....	28
5. PETROQUIMICA.....	30
5.1. CALCULO MODIFICADO DE LA NORMA CIPW.....	40
5.2. METODOLOGIA PARA ESTIMAR EL PORCENTAJE DE FeO y Fe ₂ O ₃ DE LAS DUNITAS DEL CUZAC.....	40
5.3. RELACIONES ENTRE Pt Y Cr ₂ O ₃	42
5.4. PGE EN ROCAS NORMALIZADAS RESPECTO A LA CONDRITA.....	44
6. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS EN ROCAS DEL CUZAC Y DEL COMPLEJO DE VIRAVIRA.....	46
6.1. COMPORTAMIENTO DE ISOTOPOS DE NEODIMIO, SAMARIO Y ESTRONCIO.....	46
6.1.1. RESULTADOS.....	46
7. DATACIONES K-Ar.....	52
7.1. RESULTADOS DE LAS DATACIONES.....	52
8. BIBLIOGRAFIA.....	55

FIGURAS

1. Localización de área de trabajo.....	9
2. Geología regional de la zona.....	10
3. Basaltos del Complejo de Viravira en el Diagrama de Cationes de Jensen (1976).....	11
4. Ocurrencia de PGM aluvial y de intrusivos ultramáficos en el NW de Colom- bia.....	13
5. Localización del CUZAC. Cuencas de los ríos San Juan y Condoto con sus aluviones platiníferos (punteados); acceso terrestre más corto al Complejo Ultramáfico del Alto Condoto (CUZAC) por la trocha que sale de El Tabor.....	15

6. Mapa geológico esquematizado del Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto.....	16
7. Aglomeraciones de cristales anhedrales de cromita intersticial en olivino con serpentina en malla (RS 4304, Ancho de foto, ADF= 0,34 cm).	19
8. Dunita con intercrecimientos de magnetita y cromita anhedral (MT 200; ADF 0,32 cm).....	19
9. Distribución de los contenidos de MgO(%) en dunitas del CUZAC.	21
10. Flogopita (Fg) y cromita (Cr) en wehrlita (RS 4374; ADF 0,36 cm).....	23
11. Olivino (Ol) anhedral inestable entre cristales subhedrales de clinopiroxeno (Cpx) en clinopiroxenita olivínica (RS 4357; ADF 0,36 cm).	23
12. Cristales de olivino anhedral (inestable) con alteración en los bordes a goethita (Gh) en clinopiroxenita hornbléndica (RS 4340; ADF 0,36 cm).....	27
13. Inclusiones de espinela (Es) verde en magnetita (Mt), en clinopiroxenita con magnetita y hornblenda (MT 049; ADF 0,25 cm).....	27
14. Incipiente recristalización de mica (Mi) en un sedimento en cornubianita de hornblenda (Protolito sedimentario) (MT 032; ADF 0,48 cm).....	29
15. Formación de hornblenda(Hb) en piroxeno y mica (Mi) en cornubianita de hornblenda (RM 7660; ADF 0,36 cm).....	30
16. Composición de olivino, clinopiroxeno y hornblenda en el CUZAC (Tabla 3)	31
17. Correlación SiO ₂ versus MgO (a) y MgO versus Cr ₂ O ₃ (b) en peridotitas del CUZAC (Tabla 3).....	36
18. Correlación CaO versus Cr ₂ O ₃ (a) y TiO ₂ versus Cr ₂ O ₃ (b) en peridotitas del CUZAC (Tabla 3).....	36
19. Correlación Ni versus Cr (a) y Al ₂ O ₃ (versus Cr ₂ O ₃ ((b) en peridotitas del CUZAC (Tabla 3).....	37
20. Correlación Zn versus Cr en peridotitas del CUZAC (Tabla 3).....	38
21. Diagrama NiO versus Cr ₂ O ₃ en peridotitas del CUZAC (límites según Irvine y Findlay, 1972).....	39
22. Composición normativa de las dunitas del Complejo Ultramáfico Zonado.....	42
23. Diagrama de Pt versus Cr ₂ O ₃ de dunitas del centro del CUZAC.....	43

24. Patrones de PGE normalizados a la condrita en dunita (a) y clinopiroxenita (b) del CUZAC.....	44
25. Patrones de PGE típicos, normalizados respecto a la condrita para Complejos Ofiolíticos (a) y Complejos Zonados (b) (Barnes et al,1985).....	45
26. Patrones de distribución de elementos de las tierras raras (REE) normalizados respecto a la condrita en peridotitas (a) y en rocas diorítico-gabroicas (b) del CUZAC.....	48
27. Localización de muestras analizadas para isótopos de Sm-Nd y Rb-Sr.....	49
28. Relación de isótopos $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rocas ultramáficas y máficas del CUZAC y del Complejo de Viravira.....	51
29. Diagrama $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ de rocas ultramáficas y máficas del CUZAC y del Complejo de Viravira.....	51
30. Localización de muestras con dataciones K-Ar	53
31. Histograma de los resultados de las dataciones K/Ar.....	55

TABLA

1. Composición de una inclusión de clinocanfíbol en cromita; Valores en % por peso, análisis por microsonda.	18
2. Contenidos de MgO(%), Si ₂ O ₃ (%) y FeO(%) de olivino en dunita; análisis por microsonda EDAX, INGEOMINAS, (Figura 9)	22
3. Composición química de peridotitas del Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto; análisis por fluorescencia de rayos X, Lodziak, BGR.....	32
4. Variación de SiO ₂ , MgO y CaO en dunitas, wehrlitas y clinopiroxenitas olivínicas (en % por peso).....	38
5. Comparación de contenidos de FeO analizados y estimados.....	41
6. Contenidos de elementos del grupo del platino (en ppb) y Cr ₂ O ₃ (en % por peso) en rocas del Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto. Análisis por ensaye al fuego (NiS), X-RAL Laboratory, Canadá.....	43
7. Contenidos de elementos de tierras raras (REE) en rocas del Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto; análisis por ICPMS, U. Siewers, BGR.	47
8. Análisis de isótopos de Rb/Sr y Sm/Nd del Complejo Ultramáfico del Alto Condoto y de los Basaltos de Viravira.	50
9. Dataciones de K-Ar en rocas hornbléndicas del Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto; análisis: H. Kreuzer.....	54

INTRODUCCION

El platino, denominado inicialmente "platina", fue encontrado por primera vez en Colombia en la provincia del Chocó, pero la fecha exacta de su descubrimiento se desconoce a pesar de ser divulgada a partir de 1557 (FARABEE, 1921; ESPINOSA, 1980). La extracción minera de los placeres platiníferos del Chocó comenzó en 1778 y hasta 1823 fue la única fuente productora de minerales del grupo del platino (PGM) a nivel mundial, hasta que se descubrieron los aluviones platiníferos en la región de los Urales (RUSIA, 1819).

La cuenca del río Condoto situada en el Dpto del Chocó (Figura 1) ha sido productora de platino y oro aluvial por más de 200 años. Aún siendo una de las zonas más ricas en platino aluvial a nivel mundial, hasta el momento no se disponía de información geológica de esta área, ni se conocía el origen y naturaleza del ambiente primario del platino en esta zona de los ríos San Juan y Condoto.

Los primeros informes técnicos sobre la zona platinífera en la cuenca del río Condoto (Chocó) fueron elaborados por Castillo (1909), Kunz (1918), Duparc & Tikanowitch (1920), Ovalle (1920), Kellner (1925), Hubach (1930) quienes se dedicaron a estudiar los aluviones platiníferos. Duparc & Tikanowitch (1920) reconocieron por primera vez que las serpentinitas del tipo Viravira representaban la roca madre del platino en el río Condoto. Otros trabajos de investigación fueron elaborados por Singewald (1950), Restrepo (1954), Wokittel (1958), Mertie (1969) y Escorce (1971).

En varios de estos estudios se especuló sobre la posible fuente del platino, pero no encontraron "in situ" las rocas que forman el Complejo Ultramáfico Zonado en el Alto Condoto.

En 1987 INGEOMINAS y CODECHOCO realizaron investigaciones geológicas en el

área (SALINAS y ZAPATA, 1991) y en 1988, INGEOMINAS y la BGR iniciaron estudios para buscar la fuente del platino, su distribución y el ambiente geológico imperante. Los resultados de la primera fase de este proyecto se presentan en el informe técnico del INGEOMINAS - BGR (MUÑOZ *et al*, 1990).

1. GEOLOGIA REGIONAL DE LA ZONA DEL RIO CONDOTO

Las rocas más antiguas que afloran en esta parte de la Cordillera Occidental, corresponden a la unidad litológica denominada Complejo de El Paso, compuesta por basaltos y diabasas las cuales muestran afinidades geoquímicas con secuencias tipo MORB (Figura 2) (MUÑOZ *et al*, 1990). Estas rocas aparecen interestratificadas con secuencias sedimentarias (rocas pelíticas y a veces chert).

El Complejo de El Paso se considera que ha sido formado en un ambiente similar al de las rocas consideradas como el basamento de la parte Norte de la Cordillera Occidental y por lo tanto son correlacionables con el denominado Grupo Cañasgordas con una edad Cretáceo-Terciario inferior (DUQUE CARO, 1989).

En la zona intermedia del río Condoto y hacia sus cabeceras, se encuentra otra unidad denominada Complejo de Viravira la cual comprende:

- Basaltos autobrechados con afinidades Komatiíticas.
- Cuerpos de rocas ultramáficas serpentinizadas en contacto tectónico con las rocas volcánicas.
- Rocas sedimentarias de ambiente marino las cuales cubren toda la secuencia volcánica.

Las rocas basálticas se caracterizan por mostrar altos contenidos de MgO (9,02-17,63%), bajos contenidos de SiO₂ (46,00-48,84%), alta relación CaO/Al₂O₃ (0,9) y relativamente bajos contenidos de TiO₂

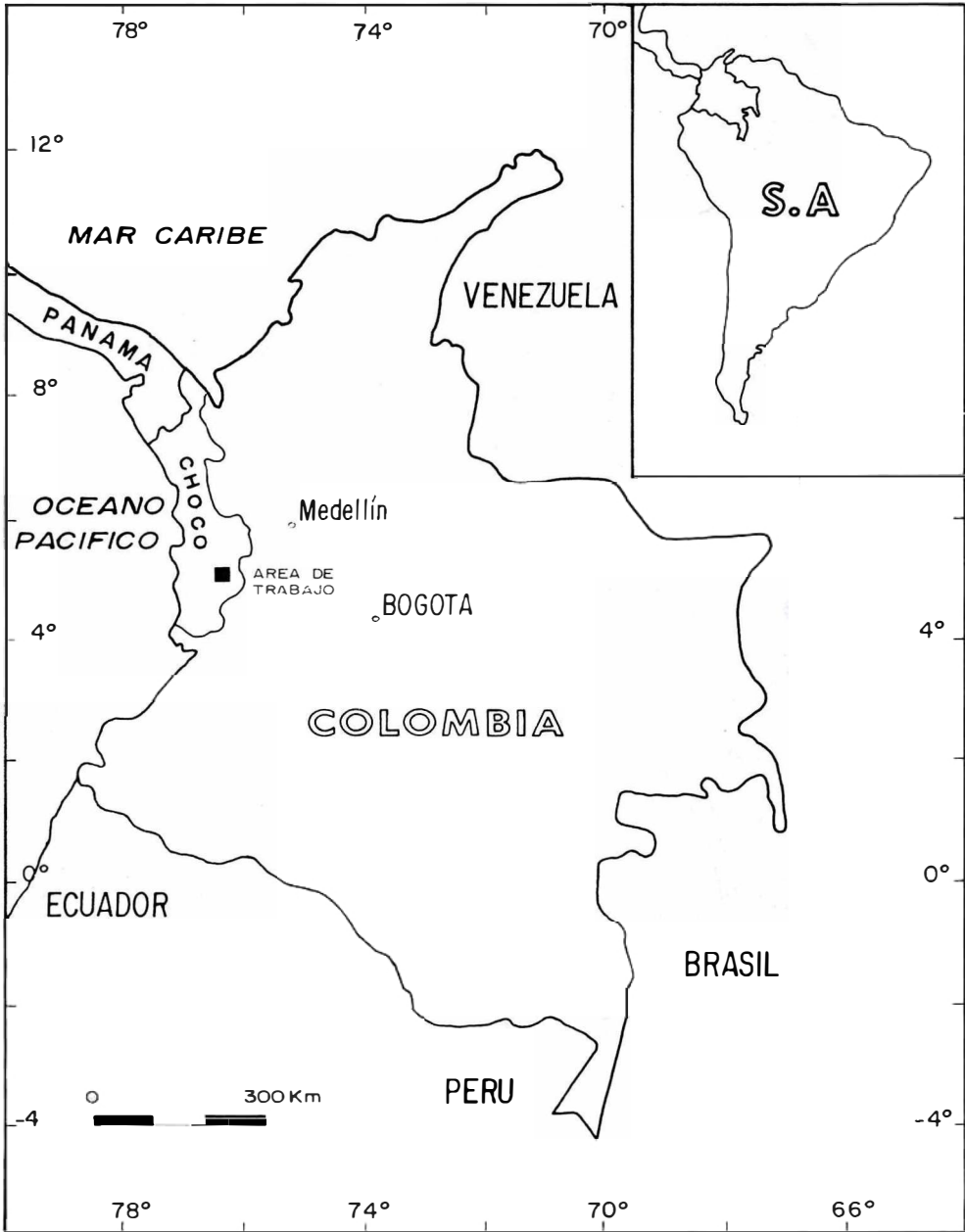


FIGURA 1: LOCALIZACIÓN DE AREA DE TRABAJO.

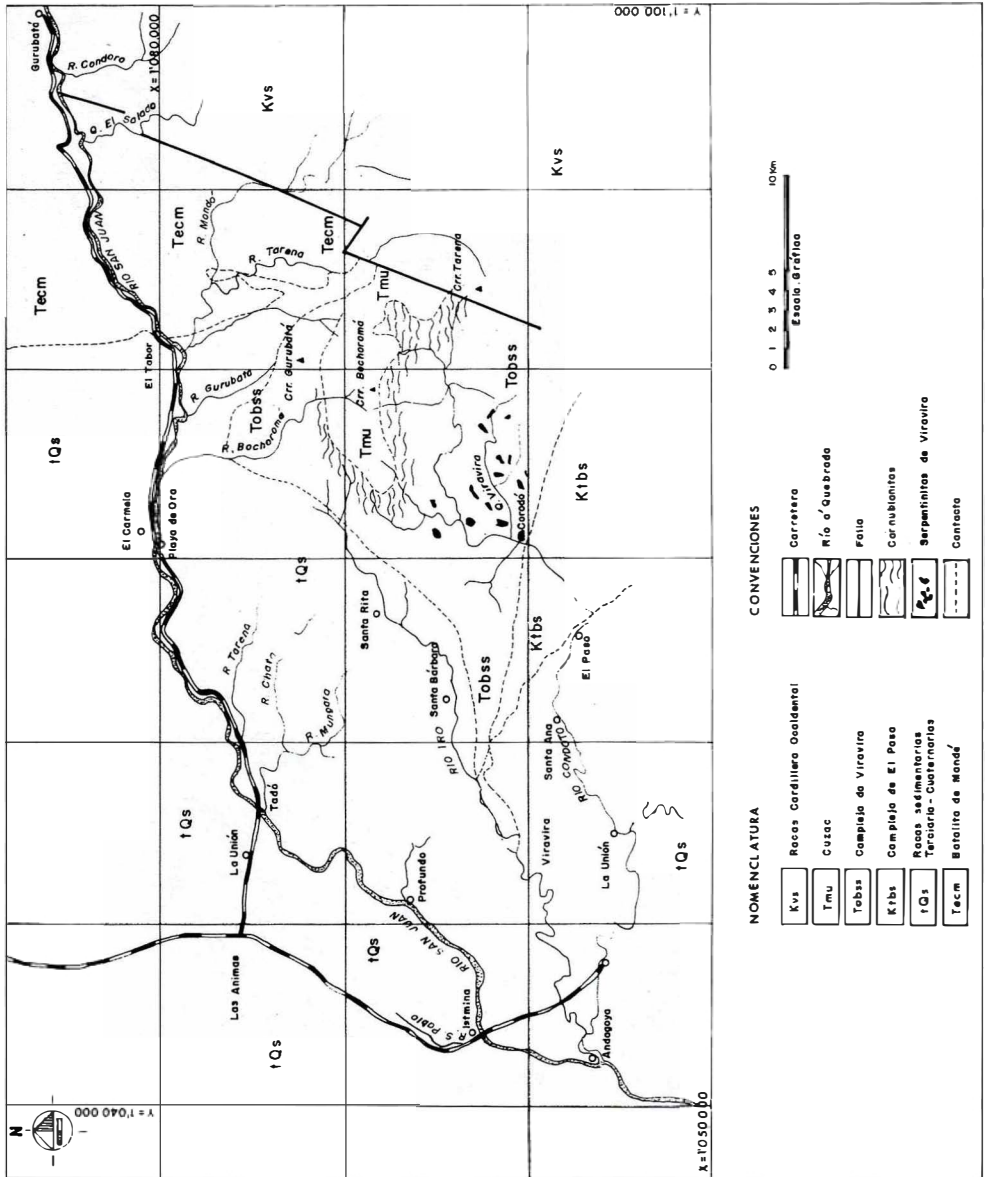


Figura 2 : Geología Regional de la zona.

(0,55-0,91%) (Figura 3). Presentan fenocristales fracturados, frecuentemente euhedrales de los piroxenos augita y pigeonita y rara vez olivino. Fenocristales de Plagioclasa son raros siendo más comunes en la matriz como microlitos. Las rocas ultramáficas serpentinizadas se presentan fracturadas, con formas desde lenticulares a subredondeadas hasta de 500 m de diámetro, en contacto fallado con los basaltos. Aunque estas rocas están casi totalmente serpentinizadas, a veces se alcanzan a diferenciar composiciones primarias del tipo harzburgitas y lherzolitas.

Las rocas sedimentarias corresponden a capas delgadas, con espesores menores de un metro, de areniscas de grano fino, con abundantes fragmentos de cristales de piroxeno y de chert.

Además, se encuentran lodolitas negras, chert calcáreos y rara vez calizas. Fósiles

observados en estas rocas permitieron asignarles una edad comprendida entre el Eoceno superior - Mioceno inferior. (MUÑOZ *et al*, 1990).

Hacia la zona de la desembocadura del río Condoto en el río San Juan, aparece una gruesa secuencia de rocas sedimentarias cuyas edades varían entre el Terciario inferior y el Cuaternario. Hacia la parte superior, esta secuencia adquiere características clásticas, siendo los sedimentos más jóvenes, los portadores del platino que se explota en la zona.

Hacia el Norte del río Condoto y cubierto por rocas sedimentarias aparece el Batolito de Mandé. Hacia las cabeceras del río Condoto aflora el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto, el cual se encuentra en contacto fallado con el Batolito de Mandé al N y, con las rocas del basamento de la Cordillera Occidental al W.

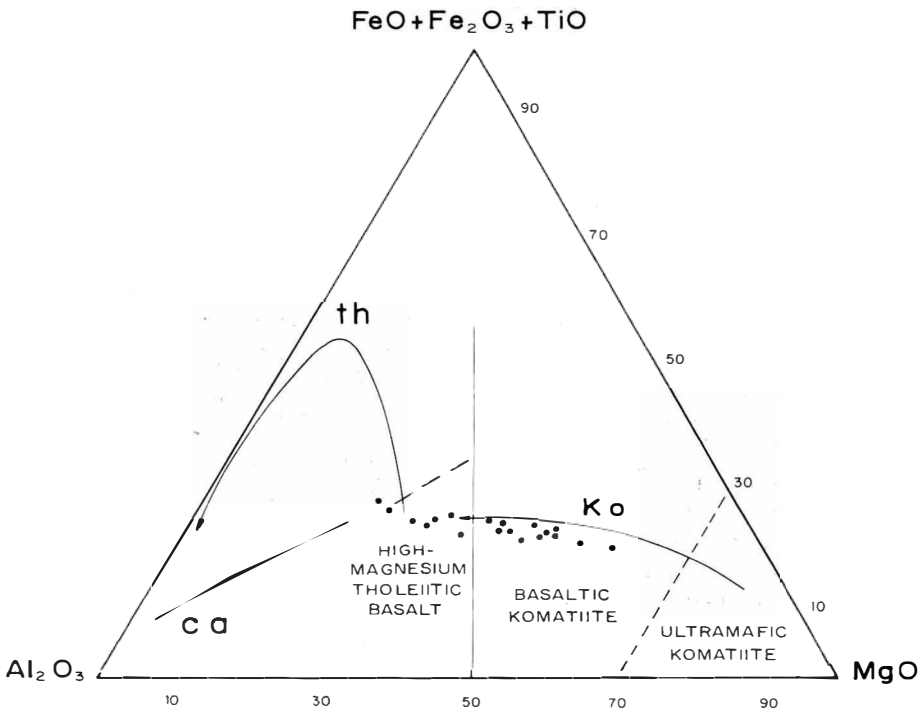


FIGURA 3: BASALTOS DEL COMPLEJO DE VIRAVIRA EN EL DIAGRAMA DE CATIONES DE JENSEN (1976).

2. COMPLEJOS ULTRAMÁFICOS ZONADOS Y MINERALIZACIONES DE ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO (PGE)

Concentraciones anómalas de elementos del grupo del platino (PGE), están por lo general, asociadas a rocas básicas y ultrabásicas, es decir, a rocas derivadas del manto terrestre. Muy rara vez aparecen enriquecimientos de elementos del grupo del platino (PGE) en un ambiente hidrotermal.

Por lo tanto, complejos estratificados, complejos zonados, intrusiones máficas a ultramáficas aisladas y ofiolitas, constituyen unidades portadoras de PGE. Sin embargo, las diferentes fuentes difieren en su concentración de PGE. Investigando los productos de erosión de algunas de estas unidades se ha comprobado que la relación entre los diferentes PGE sirve para distinguir áreas fuente. Cabri & Harris (1975) introdujeron el concepto de índices de placeres aluviales (placer index) definido como $(Pt/Pt+Ir+Os) \times 100$. Se comprobó que los placeres derivados de complejos ofiolíticos se caracterizan por un predominio de Ir y Os (índices de 20 a 80) mientras complejos estratificados y complejos zonados se caracterizan por poseer índices altos, entre 85 y 95. De la producción de platino aluvial en el área de Andagoya-Istmina Condoto se conocía que esta zona, como todo el Chocó, tiene un predominio del elemento Pt dentro de su composición (SINGEWALD, 1950).

Considerando estos datos y la posición geotectónica general del Chocó, Cabri & Harris (1975) predijeron que la roca madre del platino chocoano debería estar relacionada a complejos ultramáficos zonados, ya que complejos estratificados, los cuales son los productores más importantes de platino, no son típicos para bordes activos de continentes (Figura 4).

Las características de los complejos ultramáficos zonados se pueden resumir así:

Son rocas ultramáficas intrusivas.

Tienen formas concéntricas, con núcleo de dunita con gradación hacia la parte externa a wehrlita y clinopiroxena.

Carecen de ortopiroxeno y plagioclasa.

Poseen olivino alto en magnesio (F₀₇₆-F₀₉₃)

- Poseen clinopiroxeno rico en calcio (diósido).

La cromita aparece asociada a dunita pero cromititas masivas no existen o presentan pequeñas dimensiones.

Poseen enriquecimiento de magnetita en las zonas de clinopiroxena.

Diques de roca diorítico-gabroica son frecuentes en los bordes de los complejos y son muy llamativos por sus texturas pegmatíticas y en peine.

Muchos complejos tienen contactos mostrando efectos de metamorfismo de alta temperatura.

Los PGM relacionados con varios complejos son casi exclusivamente aleaciones de platino y hierro (ferroplatino).

Los complejos zonados clásicos ocurren en el SE de Alaska (Alaskan type intrusions) donde tienen una edad Cretácea inferior (TAYLOR, 1967; TAYLOR & NOBLE, 1969; FINDLAY, 1969; IRVINE, 1974) y en British Columbia, i.e. Tulameen (RAICEVIC & CABRI, 1976; NIXON & RUBLEE, 1987; NIXON *et al*, 1989). Otros complejos ocurren en los Urales donde tienen una edad Devónica-Jurásica (DUPARC & TIKANOWITCH, 1920; RAZIN, 1971) y en Australia (Silúrico-Devónico; SLANSKY *et al*, 1991). También se han reportado algunos complejos en el NW de Suramérica como en N de Venezuela (MURRAY, 1972) y en el Ecuador. En Colombia se conoce un complejo ultramáfico cerca de Bolívar (Valle) de edad Cretácea que también ha sido interpretado como tipo Alaska (BARRERO, 1979).

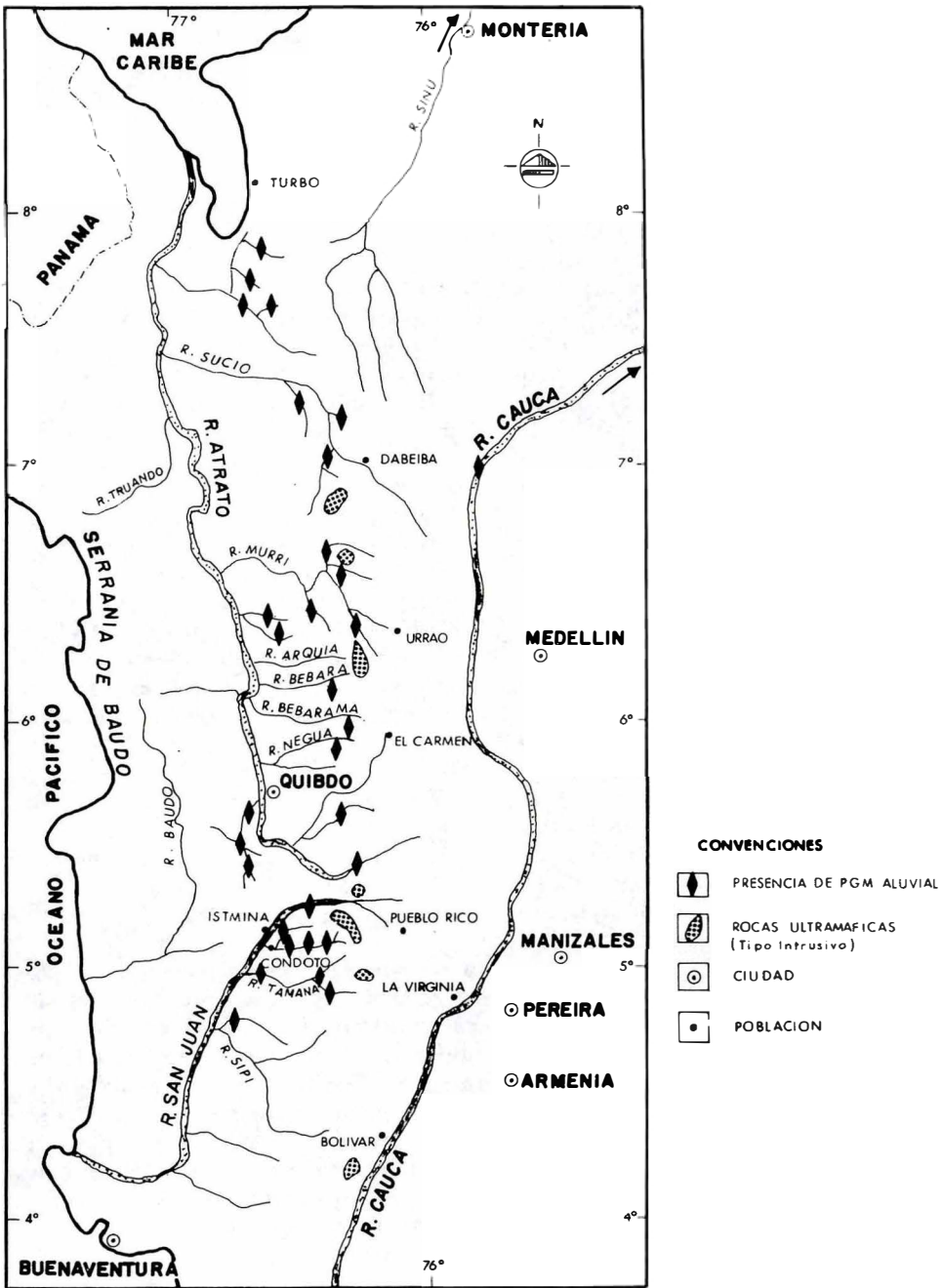


FIGURA 4: OCURRENCIA DE PGM ALUVIAL Y DE INTRUSIVOS ULTRAMAFICOS EN EL NW DE COLOMBIA.

El Complejo Ultramáfico zonado del Alto Condoto, con base en dataciones K-Ar (MUÑOZ *et al*, 1990; TISTIL *et al*, 1992), se considera con una edad cercana a 20 m.a. indicando que en Condoto se encuentra el complejo zonado más joven reportado. Eso significa que en la parte NW de Colombia ocurrió durante el Terciario un régimen geotectónico particular el cual permitió la generación y el ascenso de magma ultramáfico, evento que estuvo asociado además a la formación de basaltos komatiíticos (SALINAS & TISTIL, 1991).

Los complejos ultramáficos zonados han sido interpretados como productos de magmas emplazados a través de "feeder pipes" de volcanes (MURRAY, 1972; SLANSKY *et al*, 1991). Considerando su distribución regional en las diferentes áreas, se observa sin embargo que la presencia de estos complejos está relacionada a cierta posición geotectónica dentro de un ambiente de subducción.

Su frecuente relación con rocas volcánicas ultramáficas indica que la generación de estos magmas requiere unas condiciones de subducción, con fusión parcial del manto y ascenso del magma. Por eso la génesis de complejos zonados parece estar más bien relacionada a condiciones de régimen tectónico particular que a simplemente "feeder pipes" de volcanes como lo interpretaron Murray, 1972 y Slansky *et al*, 1991.

3. EL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO (CUZAC)

Esta unidad se localiza en la línea divisoria de aguas que separa las cuencas hidrográficas de los ríos Condoto, San Juan y Tarena.

El área presenta una topografía abrupta conformada por una serie de picos altos (hasta 1800 m s.n.m.), lechos profundos y

laderas muy escarpadas (Figura 5). En tramos menores de 2 km las corrientes presentan caídas de agua sucesivas y tramos rectos llegando rápido los ríos principales, con desniveles de 800 a 1000 m. El poder de arrastre de material es alto, especialmente luego de aguaceros frecuentes en la zona. La vegetación es primaria con un ambiente de selva tropical densa.

Se ha dado el nombre de Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto a una asociación de rocas ultramáficas a máficas las cuales afloran en las cabeceras de los Ríos Condoto y Tarena, Mpio. de Tadó (Dpto. del Chocó, Figura 6). Según sus características geológico-mineralógicas esta asociación de rocas se constituye en un ejemplo típico de un complejo zonado. Su extensión es de 50 km aproximadamente, con longitud máxima de 9 km y una amplitud máxima de 6 km. Siguiendo la clasificación de Streckeisen (1976) y con las observaciones establecidas en paréntesis para las rocas ultramáficas, se han discriminado las siguientes unidades litodémicas en el CUZAC:

- Dunitas (con trazas de clinopiroxeno hasta 1%).
- Dunitas con clinopiroxeno (1 a 10 % clinopiroxeno) y wehrlitas.
- Clinopiroxenita Olivínica.

La distribución areal de estas litologías corresponde a un patrón zonado, de contactos transicionales, con un núcleo de dunita rodeado sucesivamente por las unidades dunita con clinopiroxeno y wehrlita y clinopiroxenita olivínica (Figura 6). Es característico de este complejo el presentar variaciones en el tamaño de grano, siendo comunes las texturas pegmatíticas especialmente en las clinopiroxenitas.

Las rocas ultramáficas intruyeron un basamento de corteza oceánica y/o arco inmaduro representado por las unidades Complejo de El Paso y Complejo de Viravira (MUÑOZ *et al*, 1990).

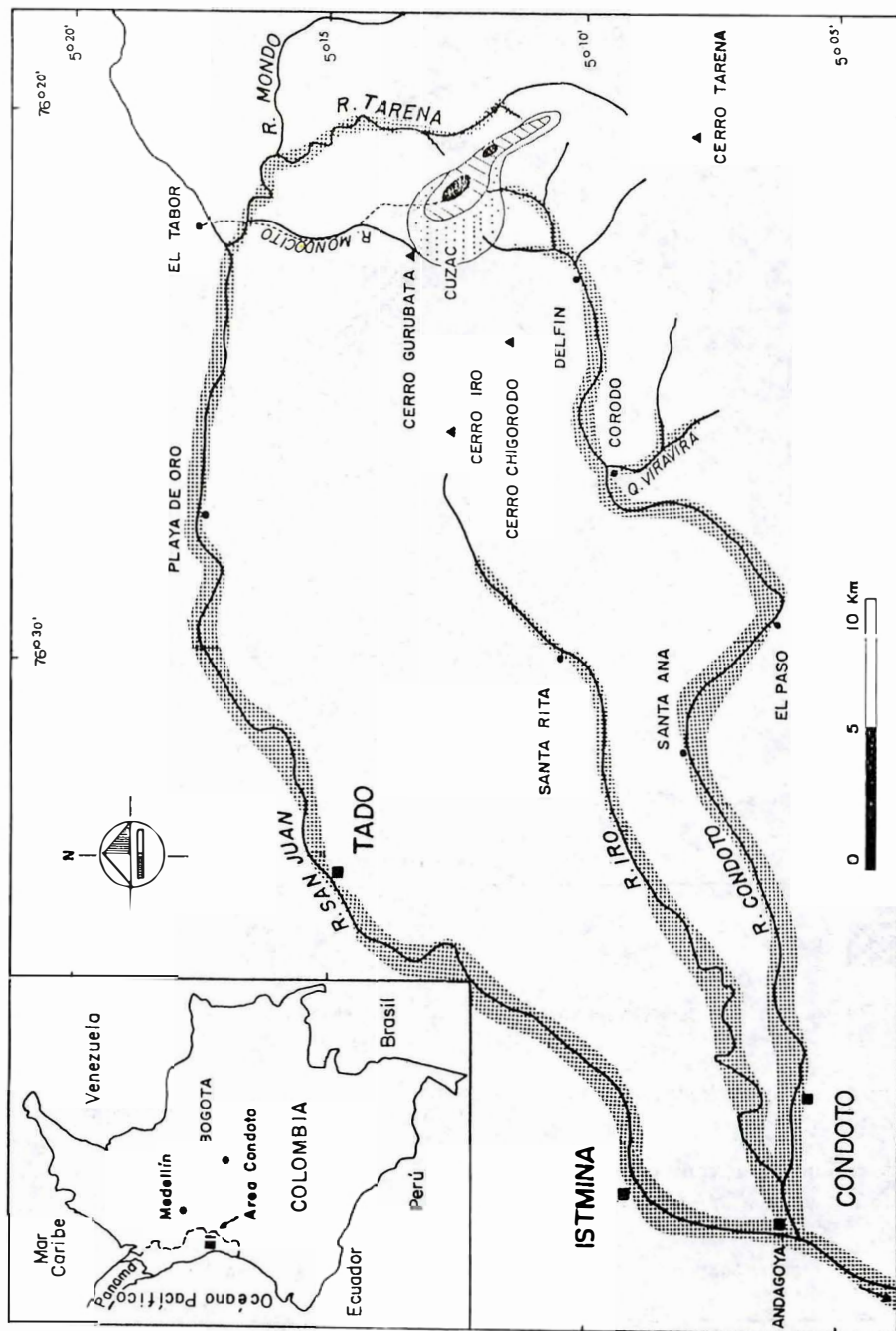


Figura 5 : Localización del CUZAC. Cuencas de los ríos San Juan y Condoto con sus aluviones platiníferos (punteados) ; acceso terrestre más corto al Complejo Ultramáfico del Alto Condoto(CUZAC) por la trocha que sale de El Tabor.

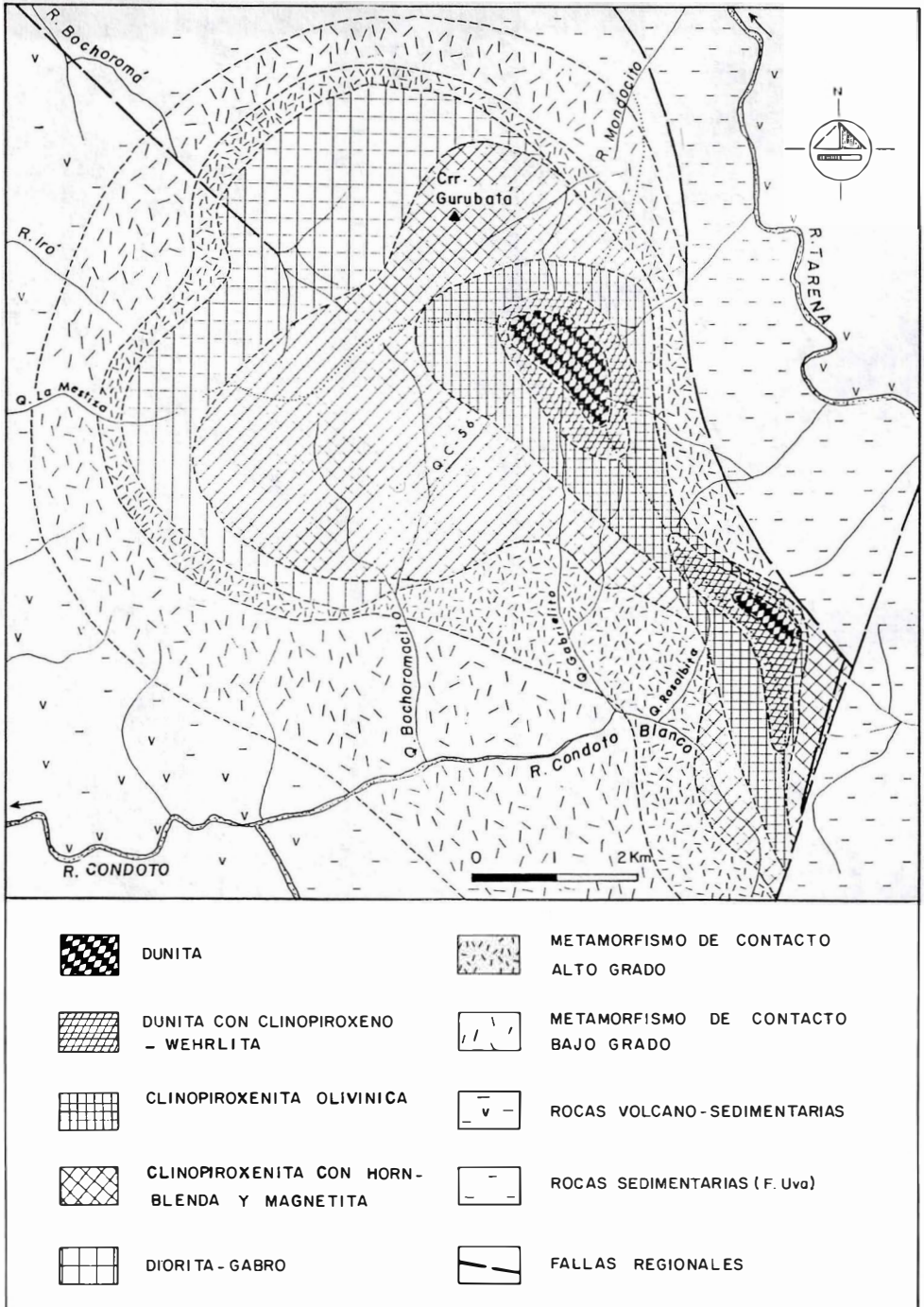


FIGURA 6: MAPA GEOLOGICO ESQUEMATIZADO DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO.

Durante el proceso intrusivo las rocas encajantes fueron sometidas a temperaturas cercanas a los 1000°C o superiores, causando metamorfismo de contacto en las facies cornubiana de piroxeno y cornubiana de hornblenda, anatexis parcial con formación de líquidos dioríticos y asimilación de roca. Cada uno de estos procesos es localmente distinguible pero regionalmente se traslapan y su diferenciación es difícil.

En las zonas exteriores del complejo se han separado cartográficamente las siguientes unidades, que representan los resultados del proceso intrusivo hacia los bordes e incluyen rocas ígneas y/o metamórficas tales como:

Clinopiroxenitas con hornblenda y magnetita. Esta unidad representa la zona de más alta temperatura donde han ocurrido los procesos de asimilación, anatexis parcial y probablemente la facies de metamorfismo de más alta temperatura denominada cornubiana de piroxeno la cual no es cartográficamente diferenciable.

Rocas diorítico-gabroicas, presentes como diques dentro del complejo y como diques o cuerpos con formas y tamaños irregulares en la unidad clinopiroxenitas con hornblenda y magnetita y también en forma aislada en los bordes de la mencionada unidad donde, a veces, son cartografiables, consideradas como producto de anatexis parcial.

Cornubianitas de hornblenda, unidad que representa la facies de más baja temperatura en el metamorfismo de contacto, implica la ocurrencia de una aureola térmica hasta de 3 km de distancia desde el intrusivo. Esta aureola afectó las rocas volcánicas y sedimentarias del Complejo de Viravira.

Fallas transformantes o de rumbo controlan la intrusión hacia el lado E, poniendo

en contacto las rocas ultramáficas con rocas sedimentarias del Terciario inferior.

3.1. DUNITA (SENSU STRICTO)

Dos cuerpos de dunita afloran en la parte más alta de la divisoria de aguas para los ríos Condoto y Tarena (Figura 6).

La dunita más extensa muestra la tendencia general del complejo, es decir, NW. Aflora en un área de 1.4 x 0.6 km. Aparece drenada por afluentes de los ríos Condoto y Tarena. La dunita representa morfológicamente una de las partes más altas de la zona (1780 m s.n.m.), y su parte central es relativamente plana.

Hacia el SE, aflora un cuerpo de dunita más pequeño, el cual comprende un área de 1,0 x 0,3 km. Este se encuentra menos estudiado debido a la escasez de afloramientos y a la pendiente muy abrupta hacia el río Tarena (inclinación de aprox. 45°). En todos los afluentes del Tarena se observa la presencia de cantos rodados de dunita proveniente de sus cabeceras. La dunita aparece en una zona con relieve escarpado con pendientes fuertes inclinadas hacia el río Tarena.

3.1.1. DESCRIPCION GENERAL DE LAS DUNITAS DEL CUZAC.

Las dunitas son rocas de color verde oscuro a negro, masivas y generalmente aparecen frescas. En afloramientos y en cantos rodados se observa cubierta por una costra amarilla de minerales de arcilla, probablemente montmorillonita, y óxidos de hierro (goethita) originada por la meteorización del olivino, hecho que las hace fácilmente reconocibles. La ocurrencia de cantos rodados de esta roca solo se limita a distancias menores de 10 km, debido a que las condiciones de meteorización son extremas en la zona y la roca se desintegra rápidamente.

Ocasionalmente aparecen diques de clinopiroxenita de grano fino dentro de la dunita (espesores centimétricos). Estos

afloran hasta en la parte central de la unidad y presentan a veces texturas pegmatíticas.

En el cuerpo de dunita más extenso se ven lentecillos en formas irregulares como acumulaciones y nidos de cromita. Sus dimensiones son de orden milimétrico y rara vez centimétrico. Su carácter es local pero frecuente y son especialmente observables en las cabeceras de los ríos Tarena y Bochoromacito. En las quebradas que drenan la dunita, cantos rodados de cromita son escasos y rara vez tienen más de un cm de diámetro.

Las dunitas en sección delgada muestran localmente texturas equigranulares en mosaico. Algunos sectores muestran texturas cúmulos (olivino hipidiomorfo con acúmulo de olivino). En su mayoría los granos de olivino son xenomorfos e íntimamente intercrecidos. En muchos casos existen dos generaciones de olivino: granos más grandes (hasta 10 mm) con "kink bands" y 'extinción ondulada y granos de olivino más pequeños sin deformación, los cuales ocurren como "cemento" a lo largo de los bordes de los granos más grandes. Esta observación muestra claramente que las dunitas sufrieron una etapa de deformación de alta temperatura ($T > 1000^{\circ}\text{C}$), que borró parcialmente la textura de mosaico original.

Clinopiroxeno, cromita, clinocanfíbol y flogopita son minerales accesorios en la dunita. El clinopiroxeno es escaso, pero siempre está presente como accesorio en forma de cristales aislados. Estos granos también están deformados. Otro accesorio típico es la cromita la cual varía en forma desde anhedral a euhedral y aparece en las dunitas a manera de inclusiones en olivino o en forma intersticial. Su diámetro es menor de 0,6 mm. La cromita intersticial aparece aislada o en aglomeraciones de

cristales donde incluye olivino subhedral a anhedral. A veces aparece claramente anhedral rellenando espacios entre los cristales de olivino (Figuras 7 y 8).

Estas cromitas muestran también deformación, evidenciada por la formación de apéndices en formas puntiagudas. Estos granos son típicos en dunitas ricas en cromita las cuales han sufrido deformación de alta temperatura más fuerte. Esto se reconoce por la existencia de una segunda generación olivino no deformado a largo de los bordes de granos deformados. Se supone que esta deformación ocurrió durante la intrusión del magma dunítico en estado semiplástico.

Componente accesorio muy raro es el clinocanfíbol que aparece aislado o en asociación con flogopita, en los bordes de granos de olivino. Estos 2 minerales y asociaciones de PGM también aparecen a manera de inclusiones dentro de cromita y olivino (por ejemplo: clinocanfíbol, aleación de Pt-Fe y sulfuro de Ir-Rh-Cu en la muestra RS-4403/3). Por lo anterior se considera el clinocanfíbol y la flogopita como accesorios primarios de las dunitas.

El clinopiroxeno aparece también en forma de "capas" delgadas alrededor de la cromita que ocurre en los bordes de los granos de olivino. Estos contactos entre clinopiroxeno y cromita son parcialmente tajantes y a veces con texturas de intercrecimiento íntimo. Lo anterior indica que la asociación clinopiroxeno-cromita es primaria y que ésta no es un producto de la deformación de alta temperatura. De una inclusión de clinocanfíbol en la muestra RS-4403/3 se obtuvo el resultado que se presenta en la Tabla 1.

Tratándose de una inclusión de solamente 3 micrones de diámetro es posible que el análisis tenga influencias de Cr de la cro-

TABLA 1: COMPOSICION DE UNA INCLUSION DE CLINOANFIBOL EN CROMITA; VALORES EN % POR PESO, ANALISIS POR MICROSONDA.

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	NaO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TOTAL
38,10	0,37	11,00	5,20	18,00	12,40	0,03	3,30	0,04	3,00	91,44

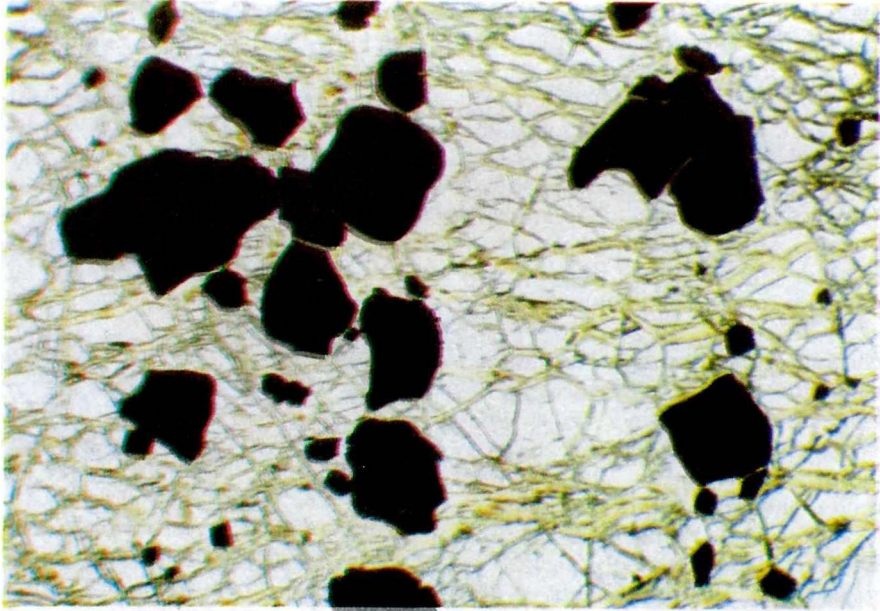


FIGURA 7: AGLOMERACIONES DE CRISTALES ANHEDRALES DE CROMITA INTERSTICIAL EN OLIVINO CON SERPENTINA EN MALLA (RS 4304, ANCHO DE FOTO, ADF= 0,34 CM).

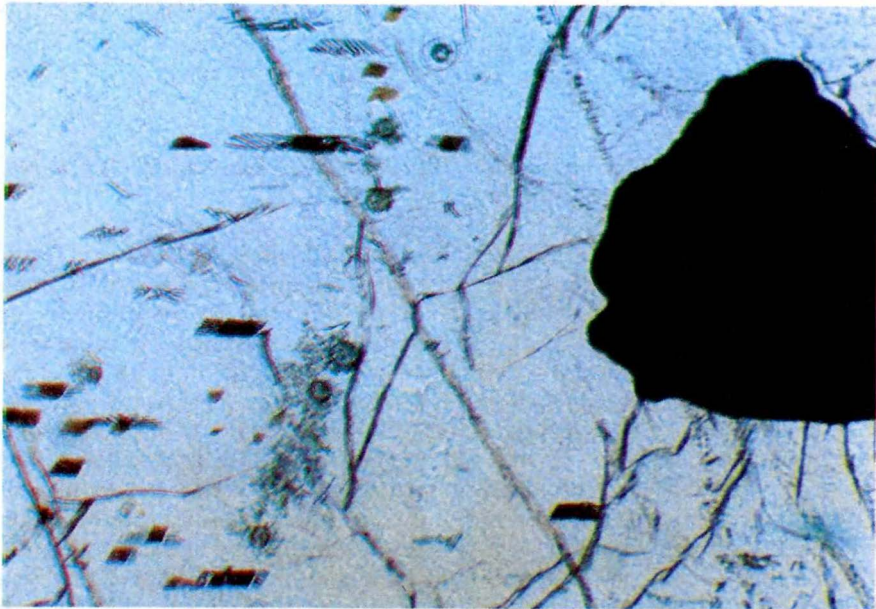


FIGURA 8: DUNITA CON INTERCRECIMIENTOS DE MAGNETITA Y CROMITA ANHEDRAL (MT 200; ADF 0,32 CM).

mita que está alrededor. Debido al porcentaje tan bajo de óxidos, no se calculó la fórmula del anfíbol. Sin embargo, esa composición proyectada al triángulo Ca-Mg-(Fe+Mg) (Muñoz *et al*, 1990, Figura 31) debido a los contenidos de Fe bajos, la ubica cerca al vértice Ca-Mg, comparado con hornblendas de clinopiroxenas olivínicas. También este anfíbol tiene contenidos de Na significativamente más altos. Se supone que se trata de un clinofanfíbol de composición pargasítica.

Las inclusiones primarias de hidrosilicatos (flogopita, clinofanfíbol) que se encuentran dentro de cromita y olivino, las cuales están consideradas como fases primarias "hidratadas", representan obviamente relictos del magma original incluido durante la cristalización. Por lo tanto este magma debe haber poseído elevados porcentajes de elementos alcalinos y de fluidos. Es bueno enfatizar que estas inclusiones se asemejan mucho a inclusiones de pargasita y flogopita en dunitas y cromititas de ofiolitas.

En las secciones delgadas se observa que la dunita ha sufrido un proceso de alteración con la disminución de la temperatura. Esto se evidencia por :

1. Remplazamiento del olivino y del clinopiroxeno por clinofanfíbol verde (local).
2. Formación local de serpentina en malla, formación de magnetita, alteración de los bordes de la cromita hacia ferrocromita.

Además se presenta desmezcla de magnetita en forma de laminillas orientadas de color café con formas esqueléticas, que ocurren en el centro de granos de olivino, también en dunita aparentemente muy fresca. En este caso el proceso corresponde más a oscilación de la temperatura durante la cristalización del olivino (Figura 8).

Cuando la dunita es sometida al proceso de meteorización, ocurren cambios del

color original hacia tonos café oscuros y rojizos, debidos al remplazamiento total o parcial del olivino por una mezcla principalmente de montmorillonita y goethita. En este proceso se sustituyen primero las islas remanentes de olivino entre las mallas de la serpentina y después se reemplaza también la serpentina. En muchos casos la montmorillonita está disuelta de tal manera que queda una estructura de malla porosa de goethita y restos de montmorillonita en la cual se puede reconocer a veces la estructura primaria de la dunita.

Debido a que el CUZAC es un complejo zonado, se trató de demostrar que existe también en el interior del cuerpo de dunita zonación química. Se realizaron 31 análisis por microsonda (INGEOMINAS - Bogotá) en cristales de olivino (Figura 9, Tabla 2). Los datos muestran una tendencia general en la distribución del contenido de MgO en olivino observándose hacia el centro de la masa de dunita los contenidos más altos de MgO y hacia los bordes los contenidos más bajos. Sin embargo, no se trata de una distribución homogénea y por lo tanto la conclusión no es definitiva.

3.2. DUNITA CON CLINOPIROXENO Y WEHRLITA

Esta unidad rodea los cuerpos de dunita aflorando en un área de aproximadamente 2.2 km² (Figura 6). Se definen como dunitas con clinopiroxeno a rocas con porcentajes menores del 10% de clinopiroxeno y wehrlitas a rocas con porcentajes variando entre 10 y 60% de clinopiroxeno (STRECKEISEN, 1976). La diferenciación entre dunita (con trazas de clinopiroxeno) y dunita con clinopiroxeno se hizo por la relación estrecha que existe entre dunita y PGM y para poder definir el núcleo del CUZAC con más precisión. Los contactos, especialmente la delimitación hacia el lado de la dunita (sensu estricto) fue petrográfica y química (contenido de dióxido normativo).

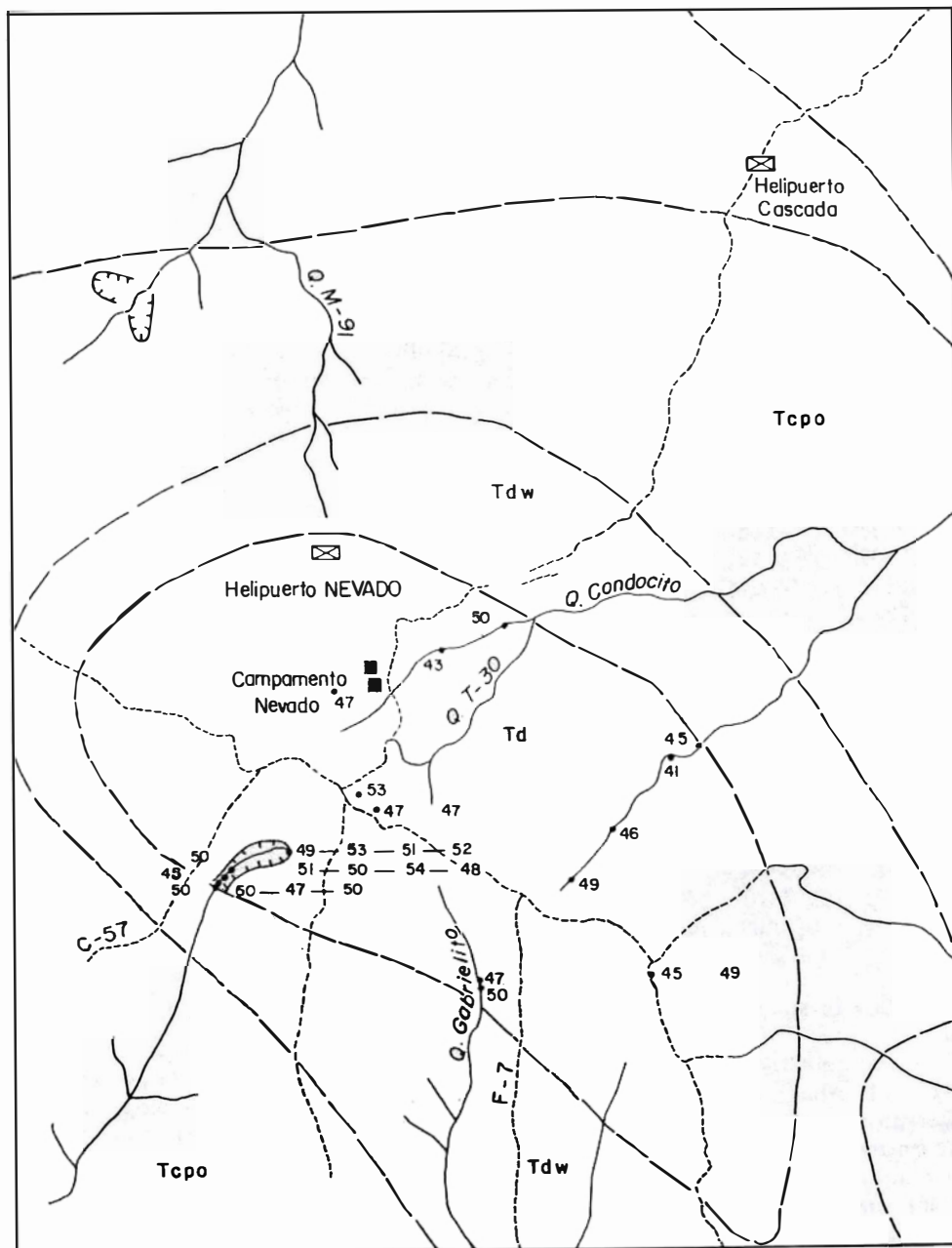


FIGURA 9: DISTRIBUCION DE LOS CONTENIDOS DE MgO(%) EN DUNITAS DEL CUZAC.

TABLA 2.: CONTENIDOS DE MgO(%), SiO₃(%) Y FeO (%) DE OLIVINO EN DUNITA; ANALISIS POR MICROSONDA EDAX, INGEOMINAS (FIGURA 9)

MUESTRA	MgO %	SiO ₂ %	FeO %
MT 064	49.87	44.58	5.54
MT 065	49.70	44.17	6.13
MT 066	47.32	44.17	8.51
MT 067A	49.38	44.50	6.11
MT 067B	49.38	44.50	6.11
MT 068	52.54	45.04	2.43
MT 069	51.06	44.41	4.53
MT 069A	54.30	45.35	0.35
MT 070	51.07	44.58	4.35
MT 070A	48.44	46.38	5.18
MT 071	51.60	45.95	2.37
MT 200A	51.65	44.99	3.36
MT 202	44.82	43.47	11.71
MT 202A	49.39	45.78	4.83
RM 7608	44.88	43.86	11.34
RM 7609	49.92	44.61	5.48
RS 4284	47.32	43.98	8.70
RS 4285	50.56	45.37	4.07
RS 4303	50.60	46.99	2.42
RS 4304	43.81	44.20	11.93
RS 4306	49.30	47.62	3.08
RS 4308C	41.47	43.03	15.50
RS 4311A	45.45	48.69	5.86
RS 4394	49.97	44.61	5.43
RS 4447	47.43	43.65	8.95
RS 4452	49.37	44.56	2.07
RS 4461	53.44	45.28	1.28
RS 4469	46.67	44.85	8.48
RS 4470	47.08	43.75	9.17

3.2.1. DESCRIPCION GENERAL

Las rocas del CUZAC se observan frescas. Excepcionalmente en el área de El Derrumbe, las rocas de esta unidad aparecen parcialmente serpentinizadas. Son rocas masivas de grano grueso, de color negro a gris verdoso, con presencia esporádica de venillas de espesores milimétricos, rellenas con minerales del grupo de la serpentina. De acuerdo al muestreo realizado, se observó que las rocas con la composición de dunita con clinopiroxeno se localizan más hacia los

contactos con la dunita y las rocas con la composición de wehrlita se localizan hacia los contactos con la clinopiroxenita olivínica, mostrando un patrón de distribución del olivino desde el centro del CUZAC hacia los extremos. Es decir que existe una transición secuencial de dunita hacia dunita con clinopiroxeno y hacia wehrlita.

Además de los minerales predominantes aparecen en concentraciones trazas de cromita, anfíbol, flogopita y magnetita (Figura 10).

El olivino aparece con diámetro menor de 1 cm, casi siempre anhedral y mostrando la presencia frecuente de "kink bands", indicando deformación. Incluye cristales aislados de cromita euhedral a anhedral y algunas veces, cromita rodeada o en contacto con clinopiroxeno o anfíbol. Pocas veces la cromita está asociada con los dos silicatos mencionados. También rara vez aparecen inclusiones de magnetita negra esquelética o café en laminillas las cuales siguen direcciones cristalográficas.

El clinopiroxeno es incoloro a ligeramente verdoso (Figura 11). Aparece limpio, como rellenando intersticios (fase intercúmulo) en formas totalmente irregulares localizadas entre cristales de olivino o incluyendo totalmente cristales subhedrales de olivino y a veces cromita.

También aparece clinopiroxeno con inclusiones de cristales anhedrales de anfíbol verde a verde amarillento distribuidos irregularmente por todo el cristal presentando extinción simultánea, es decir, igual orientación cristalográfica. Este reemplazamiento es constante en todas las rocas que contienen clinopiroxeno, siendo más común hacia los bordes del complejo.

Trazas de Cromita aparecen incluidas en olivino o intersticiales, con formas desde euhedrales a anhedrales. Su diámetro es menor de 0,6 mm, comúnmente menor de 0,2 mm.

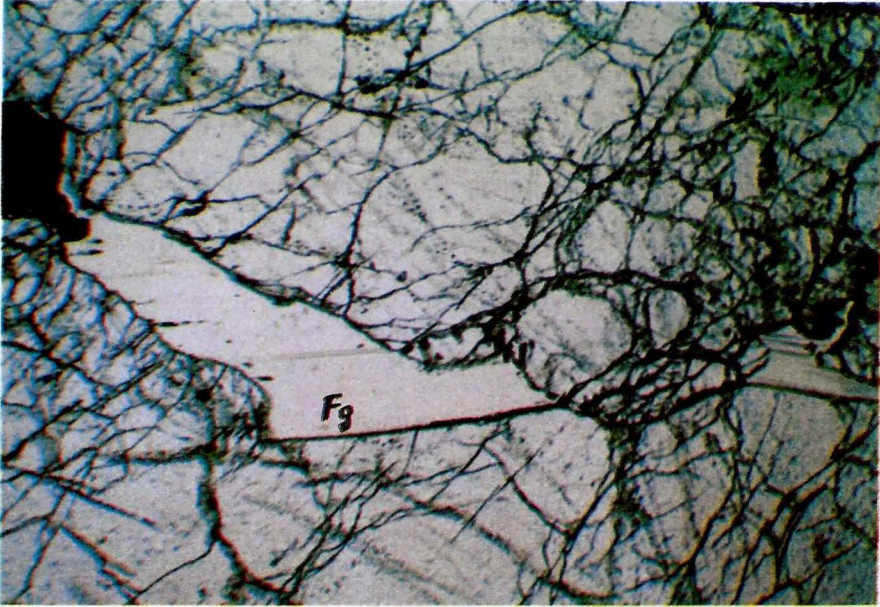


FIGURA 10: FLOGOPITA (Fg) Y CROMITA (Cr) EN WEHLITA (RS 4374; ADF 0,36 CM).

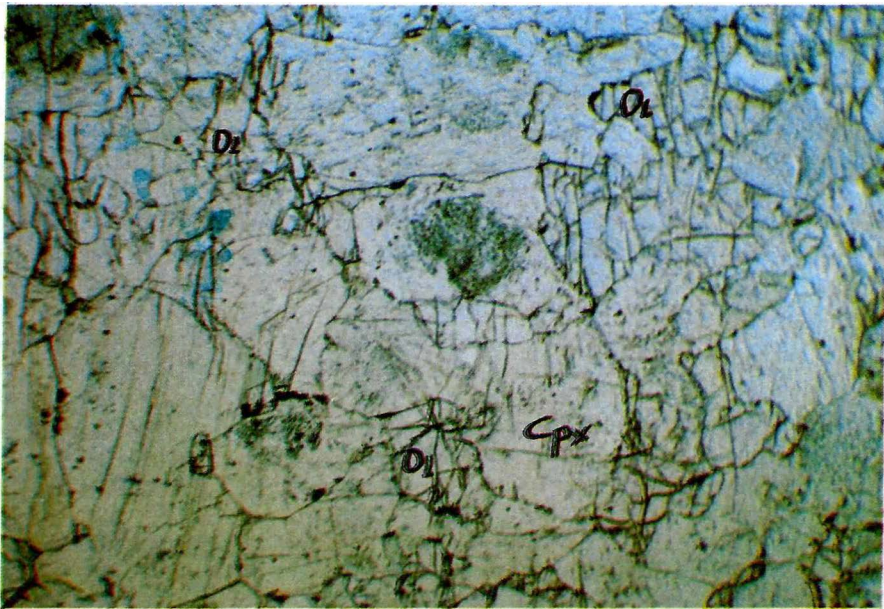


FIGURA 11: OLIVINO (Ol) ANHEDRAL INESTABLE ENTRE CRISTALES SUBHEDRALES DE CLINOPIROXENO (Cpx) EN CLINOPIROXENITA OLIVINICA (RS 4357; ADF 0,36 CM).

3.3. CLINOPIROXENITA OLIVINICA

Alrededor de la unidad de dunita con clinopiroxeno y wehrlita aflora la unidad clinopiroxenita olivínica en un área de aproximadamente 6 km². Sigue la tendencia general del CUZAC, es decir NW, sin embargo, en la parte sur cambia hacia el NE. Frecuentemente aparece afectada por diques y venillas de rocas diorítico-gabroicas en diferentes proporciones. Aparece en contactos transicionales con las unidades circundantes (Figura 6)

3.3.1. DESCRIPCION GENERAL

Son rocas de grano grueso, a veces pegmatíticas. Su color es gris a negro, siendo su composición claramente diferenciable en muestra de mano debido al color oscuro del olivino y a su apariencia algo oxidada de los bordes del cristal. La distribución del olivino no es homogénea ya que a veces aparecen aglomeraciones de cristales de olivino en zonas con predominio de piroxeno y en otras aparece el olivino distribuido homogéneamente dentro de los cristales de clinopiroxeno.

Son rocas compuestas esencialmente de clinopiroxeno y olivino con porcentajes menores del 10% de anfíbol y trazas de minerales opacos y flogopita. Generalmente en esta unidad no se observan concentraciones de cromita (Figura 11).

El olivino aparece anhedral, con "kink bands", y muy frecuentemente alterándose parcialmente a óxidos de hierro (goethita) o arcillas del tipo montmorillonita. Se presenta distribuido en forma irregular, aislado o en aglomeraciones pero siempre rellenando espacios entre cristales de clinopiroxeno o concentrado en algunos sitios en forma de nidos. De esta manera, localmente (en dimensiones de muestras de mano) la roca varía entre clinopiroxenita olivínica y clinopiroxenita pura (de acuerdo con STRECKEISEN, 1976). La forma de distribución del olivino indica inestabilidad de éste, bajo condiciones de

T y P de formación de la clinopiroxenita olivínica. La alteración frecuente del mismo es una característica de las clinopiroxenitas olivínicas. Esta alteración no se ve en dunitas o wehrlitas. En la Tabla 3 se observa que el olivino de las clinopiroxenitas olivínicas es más rico en Fe que el olivino de dunitas y wehrlitas. Lo anterior explica la mayor tendencia a la oxidación del olivino de las clinopiroxenitas olivínicas en comparación con el olivino de las dunitas y wehrlitas, a las mismas condiciones de temperatura y presión en la superficie.

Aunque el olivino se encuentra distribuido en toda la unidad, los mayores contenidos (40%) aparecen hacia el contacto con la dunita con clinopiroxeno-wehrlita. Asociaciones de anfíbol con cromita y piroxeno con cromita aparecen incluidas en olivino.

Los minerales opacos están constituidos por magnetita anhedral a euhedral, ilmenita y otros opacos no identificados. Estos últimos aparecen siempre asociados al olivino en venillas o bordeando el cristal como producto de alteración.

El piroxeno aparece como la fase cúmulo; se observa anhedral con bordes irregulares, algo ondulados, mostrando un buen empaquetamiento de los cristales con olivino como material intersticial. Existe piroxeno libre de inclusiones y también, más frecuentemente, piroxeno con inclusiones de cristales de anfíbol distribuidos irregularmente pero mostrando extinción simultánea, lo cual indica continuidad cristalográfica. Este anfíbol parece ser un producto de alteración metasomática del clinopiroxeno. En diferentes secciones aparecen claramente las diversas fases de este reemplazamiento.

A veces se presenta flogopita incluida en piroxeno o en intersticios. Muy frecuentemente los piroxenos están maclados.

El anfíbol en estas rocas es anhedral, pleocroico de color verde claro a verde amarillento y aparece incluido en

clinopiroxeno o rellenando espacios entre los piroxenos de tal forma que llega a envolver totalmente cristales de olivino o piroxeno. La presencia del anfibol intersticial es más abundante hacia los bordes de la unidad.

Hacia el borde NE, en la Q. Condocito se observó la presencia abundante de opacos intersticiales asociados con olivino.

3.4. UNIDADES DE CARACTER IGNEO METAMORFICO RELACIONADAS AL PROCESO DE INTRUSION DEL CUZAC

Estas unidades están relacionadas al proceso intrusivo del CUZAC, ya sea porque fueron originadas por el mismo proceso magmático o porque su protolito fue afectado por las altas temperaturas transformando las rocas por recristalización total o parcial de sus componentes minerales. Por esto las unidades comprenden tanto rocas magmáticas como rocas metamórficas y mezclas entre las dos. Como unidades litológicas se diferenciaron: clinopiroxenita con hornblenda y magnetita, rocas diorítico-gabroicas, hornblenditas y cornubianitas de hornblenda (Figura 6).

La clinopiroxenita con hornblenda y magnetita es la unidad más interna, es decir, la que se encuentra en contacto con las rocas claramente ígneas. Se supone que esta unidad es principalmente una roca magmática pero se nota una fuerte influencia de un proceso metasomático (reemplazamiento de piroxenos por hornblenda). Además, esta roca ocupa en el proceso de la intrusión la posición que correspondería al rango de temperatura de la facies de cornubiana de piroxeno pero siempre están asociados hornblenda y piroxeno.

Las unidades más externas son rocas predominantemente metamórficas en la facies de cornubiana de hornblenda. En el campo se observan claramente regiones

en las cuales han ocurrido procesos de fusión parcial. Como productos de metamorfismo y anatexis parcial se consideran, por ejemplo, las hornblenditas que son rocas de grano grueso, a veces con restos de plagioclasa intersticial. En sección delgada se pueden observar todas las transiciones, desde cornubianitas de hornblenda hasta hornblenditas, a través del aumento del tamaño de los blastos de hornblenda, los cuales llegan finalmente a constituir toda la roca.

Toda esta zona está cortada por diques e intrusivos de formas lenticulares de una roca diorítico-gabroica. Son diques con estructura en forma de peine, con intercrecimientos entre hornblenda y plagioclasa (totalmente alterada), con espesores de orden centimétrico a métrico.

Esta roca se distingue muy bien en cantos rodados en los ríos que drenan el complejo, aparece muy frecuentemente en el río Condoto, y por lo tanto, puede ser una guía para la búsqueda de otros complejos zonados.

3.4.1. CLINOPIROXENITA CON HORNBLENDA Y MAGNETITA

Esta roca abarca un área de 14 km², rodeando casi totalmente la unidad clinopiroxenita olivínica; aflora en forma más extensa hacia el SW (Figura 6).

El área ocupada por esta unidad corresponde a la zona de interacción entre el magma ultramáfico y las rocas volcano sedimentarias del Complejo de Viravira. En esta unidad se observan rocas de grano grueso, con características claramente de origen ígneo, pero también existen cornubianitas, a manera de núcleos, dentro de las rocas anteriores, distribuidos en forma irregular y esporádica. Además, son comunes rocas como hornblenditas sin orientación o con una clara foliación. Todo lo anterior indica que en esta zona existió contacto directo entre el magma y la roca encajante, ocurriendo procesos tales como asimilación de roca encajante y por lo

tanto anatexis parcial; por esta razón se observan rocas con características ígneas y metamórficas pero predominando el aspecto ígneo. Son frecuentes los diques con hornblenda y plagioclasa, los cuales son considerados como la fase móvil del proceso de fusión parcial. Esta fase se observa asociada a las cornubianitas y es diferenciable claramente en forma masiva o en diques relleno de fracturas.

3.4.1.1. Descripción general.- Comprende rocas tales como clinopiroxenitas, clinopiroxenitas magnetíticas (rocas con porcentaje de magnetita mayor de 10%), clinopiroxenitas hornbléndicas y clinopiroxenitas olivino-hornbléndicas, hornbléndicas (según STRECKEISEN, 1976, Figura 12) y rocas diorítico-gabroicas. La presencia de cornubianitas se interpreta como intercalaciones o bloques de roca encajante en el magma. La magnetita aparece distribuida en lentecillos o diseminada siempre en porcentajes menores del 25% de la composición de la roca. En los rodados se alcanzaron a observar cristales subhedrales de magnetita hasta de 15 cm de diámetro.

Las rocas de esta unidad comprenden, como mineral principal, clinopiroxeno y en diversas proporciones olivino, hornblenda y magnetita. También apatito y flogopita como minerales accesorios o trazas.

Generalmente las clinopiroxenitas se localizan hacia los contactos con clinopiroxenita olivínica y las clinopiroxenitas magnetíticas tienen tendencia a presentarse hacia las zonas de contacto con las rocas dioríticas aunque su distribución está en toda la zona.

En las clinopiroxenitas magnetíticas generalmente no hay olivino y cuando se observa aparece en porcentajes muy bajos, siempre anhedral con diámetro menor de 1 cm. Muestra frecuentemente "kink bands" y generalmente está asociado a minerales opacos y casi siempre alterándose a óxidos. Aparece distribuido en forma de aglomeraciones o diseminado.

El clinopiroxeno varía desde subhedral a anhedral y su contenido en estas rocas alcanza hasta el 60%. Existe piroxeno limpio y también piroxeno con inclusiones de anfíbol en variadas proporciones. Estas inclusiones extinguen simultáneamente mostrando pertenecer a un solo cristal que ha crecido internamente en el piroxeno (reemplazamiento).

El anfíbol, además de aparecer incluido en piroxeno, se encuentra intersticial, a veces con formas subhedrales a anhedrales. El pleocroísmo varía de verde a verde ligeramente amarillento, a diferencia de las unidades anteriores, donde los anfíboles son totalmente anhedrales y con un pleocroísmo verde a verde amarillento. El anfíbol intersticial rodea cristales de olivino y piroxeno.

Los minerales opacos están constituidos predominantemente por magnetita, aparecen en porcentajes variables, hasta alcanzar un 25% de la roca. Asociado con magnetita está siempre espinela verde, rara vez café (Figura 13). Los opacos son generalmente anhedrales, aparecen incluidos en olivino en trazas o generalmente intersticiales a diseminados o lenticulares.

3.4.2. ROCAS DIORITICO-GABROICAS

Se han agrupado así las rocas que presentan, en muestra de mano, la apariencia de rocas graníticas y en las cuales se observa la presencia de anfíbol y plagioclasa como minerales predominantes. Afloran en un área aproximada de 9 km² (Figura 6).

3.4.2.1. Descripción general.- Aparece como cuerpo continuo alrededor del complejo en la zona W, bordeando la clinopiroxenita con hornblenda y magnetita; sin embargo, es común encontrar diques de estas rocas en todas las unidades del CUZAC, aún en dunita, aunque escasos y de espesores de orden milimétrico.

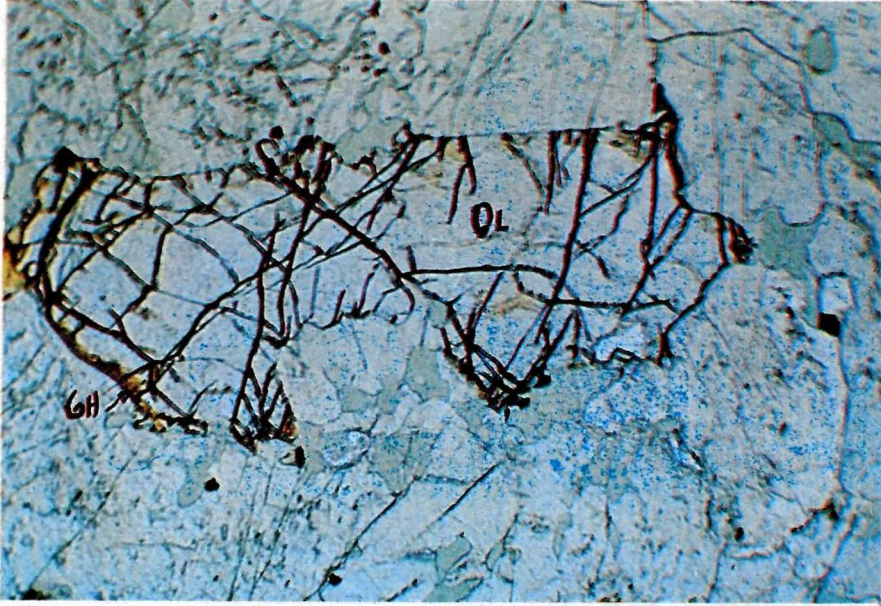


FIGURA 12: CRISTALES DE OLIVINO ANHEDRAL (INESTABLE) CON ALTERACION EN LOS BORDES A GOETHITA (Gh) EN CLINOPROXENITA HORNBLÉNDICA (RS 4340; ADF 0,36 CM).

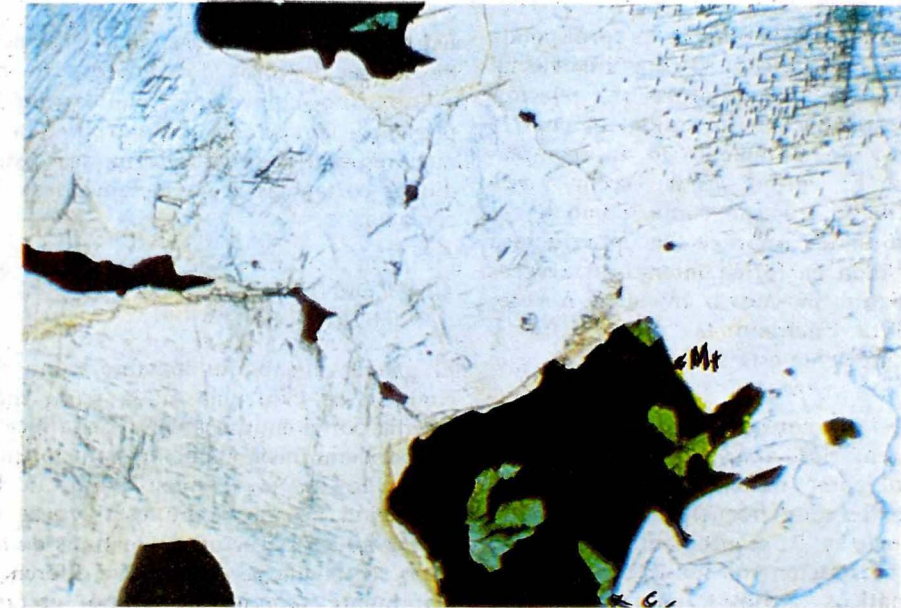


FIGURA 13: INCLUSIONES DE ESPINELA (Es) VERDE EN MAGNETITA (Mt), EN CLINOPROXENITA CON MAGNETITA Y HORNBLENDA (MT 049; ADF 0,25 CM).

Es característica de estas rocas el presentar cristales euhedrales de carácter a veces pegmatítico. También es común encontrar típicas texturas en peine que varían en tamaño hasta adquirir apariencia pegmatítica. Aunque en general estas rocas podrían asimilarse a dioritas por su apariencia macroscópica, presentan grandes variaciones en las proporciones de hornblenda y plagioclasa y de escaso piroxeno, es decir, algunas veces predomina la plagioclasa sobre la hornblenda, pero en general predomina la hornblenda sobre la plagioclasa. Estas variaciones son transicionales o tajantes y dan lugar a clasificaciones de campo tales como hornblenditas, dioritas hornbléndicas, gabros, dioritas gabraicas y aún plagioclasitas.

En los afloramientos se observa que los contactos con las rocas sedimentarias afectadas por el proceso térmico son transicionales. El contacto con la unidad clinopiroxenitas con olivino y magnetita también es transicional.

La mineralogía de estas rocas corresponde a anfíbol, plagioclasa y clinopiroxeno. El piroxeno (5-30%), muestra una relación muy estrecha con el anfíbol el cual lo rodea y aparentemente lo va reemplazando. El anfíbol es de color verde amarillento a verde claro. Como tercer componente aparece la plagioclasa distribuida en forma intersticial a veces con textura mosaico o anhedral. A veces presenta inclusiones de apatito y frecuentemente está saururizada.

Hacia el contacto con las rocas sedimentarias aparecen plagioclasa y anfíbol como minerales principales. El apatito es muy frecuente como mineral accesorio y aparentemente tiene una estrecha relación con hornblenda (fluidos magmáticos tardíos?). En las zonas de contacto con las rocas metamórficas se observan claramente los resultados de la fusión parcial del sedimento y la formación de la roca diorítico-gabraica.

4. METAMORFISMO DE CONTACTO EN ROCAS VOLCANO-SEDIMENTARIAS

La intrusión del CUZAC produjo una aureola térmica que se extiende hasta una distancia máxima de 3 km a lo largo del río Condoto, 1 km arriba del sitio Delfín (Figura 6, Tabla 3). En afloramientos a lo largo de este río se pueden observar los cambios que han sufrido las rocas sedimentarias del Complejo de Viravira. Estas rocas son principalmente productos de la erosión de los basaltos komatiíticos de Viravira y muestran los siguientes tipos de roca:

Grauwacas de grano fino con matriz calcárea o silícea.

Algunos estratos, de solamente varios metros de espesor, son de carácter pelítico como lodolitas y arcillolitas.

- También ocurren estratos delgados de calizas intercaladas con chert.

Esporádicamente se observa la presencia de diques de rocas de color oscuro, de grano fino, los cuales muestran la presencia abundante de hornblenda y menores cantidades de plagioclasa. Estos diques cortan las rocas metamórficas de contacto.

4.1. CORNUBIANITAS DE HORNBLENDA

El primer efecto del metamorfismo de contacto se evidencia en la parte más externa por el endurecimiento de la roca y la aparición, inicialmente, muy incipiente, de brillo en la misma, debido a la formación de micas. En estas rocas se preservan las estructuras y texturas de las rocas sedimentarias es decir, se diferencia claramente tamaño de grano, estratificación, laminación y presencia de lentes, etc. Minerales típicos del metamorfismo de bajo grado son cuarzo, calcita, biotita, epidota y tremolita (Figura 14).

tabla 3

TABLA 3. COMPOSICION QUIMICA Y NORMA CIPW DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO

MUESTRA TIPO ROCA	RS 3731 5	RS 3777 5	RM 7066 5	RS 3892 5	RM 7081 5	RS 3900 5	RS 3748 5	RM 7428 5	RS3922 5	RS 3891 5	RS 3873 5	RS 3899 8	RS 3791 8
OXIDOS(%)													
SiO2	48.79	49.35	48.66	47.41	48.27	48.61	47.22	44.73	46.45	47.32	47.95	51.61	51.30
TiO2	0.22	0.15	0.12	0.26	0.15	0.18	0.32	0.20	0.39	0.28	0.25	0.13	0.14
Al2O3	2.30	1.42	1.33	3.19	1.74	1.75	3.24	2.07	3.43	3.76	2.48	1.48	1.19
FeO	2.22	2.99	2.71	2.43	1.64	4.96	2.79	3.00	4.85	2.45	5.01	0.48	1.04
Fe2O3	4.68	2.94	3.29	5.09	4.66	2.65	5.78	6.48	4.89	4.58	3.62	3.07	3.32
MnO	18.94	20.76	21.58	19.18	21.55	19.50	18.17	22.18	18.47	19.00	18.69	17.06	17.49
MgO	20.66	19.73	19.19	19.36	18.54	19.26	19.66	15.36	18.15	19.28	18.84	23.09	22.29
CaO	0.70	0.76	0.75	0.91	1.52	0.75	1.06	0.82	0.91	0.83	1.02	1.70	1.22
Na2O	0.02	0.03	0.03	0.04	0.09	0.02	0.06	0.02	0.11	0.07	0.09	0.06	0.02
K2O	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.08	0.04	0.04
P2O5	0.12	0.20	0.32	0.13	0.35	0.13	0.13	0.20	0.12	0.14	0.07	0.14	0.28
Cr2O3	0.48	0.66	0.95	0.91	0.74	1.15	0.69	4.06	0.89	0.96	0.86	0.58	0.85
LOI	99.31	99.17	99.31	99.10	99.43	99.17	99.31	99.35	98.88	98.85	99.13	99.54	99.30
TOTAL													
ELEMENTOS TRAZAS (ppm)													
Co	51	41	83	60	65	65	43	73	84	68	60	31	41
Cu	77	64	67	24	87	20	77	17	28	58	22	47	30
Ni	139	209	271	280	278	177	178	322	164	277	132	157	116
Sc	79	76	48	92	48	79	91	68	90	85	88	72	62
Sr	47	60	53	42	67	47	55	50	69	39	88	58	57
V	111	91	73	144	86	123	181	75	208	154	132	86	99
Zn	25	24	24	29	36	28	32	41	40	29	29	16	16
NORMA CIPW**													
Ap	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.10	0.07	0.07	0.13	0.07	0.07
Il	0.31	0.21	0.17	0.38	0.21	0.26	0.46	0.31	0.57	0.40	0.36	0.18	0.20
Ct	0.09	0.15	0.24	0.10	0.26	0.10	0.10	0.16	0.09	0.15	0.05	0.10	0.21
Qt													
Ab													
An	3.73	1.11	3.26	1.71	4.15	5.26	1.58						
Ac													
Di	80.74	78.56	76.54	74.89	53.52	76.88	76.29	49.77	71.30	72.99	75.30	75.40	86.76
Ne	2.76	2.72	3.41	2.76	3.99	3.33	3.44	3.12	3.80	2.61			
Lc	0.07	0.22	0.80	0.41									
Fo	9.98	13.63	16.39	13.19	25.23	12.46	10.71	33.09	13.42	13.57	11.76	2.21	4.48
Fa													
Cs													
Per													
Mt	3.35	2.07	2.31	3.69	2.34	1.89	4.21	5.09	3.58	3.63	2.61	0.63	1.43
TOTAL	101.10	100.00	99.98	100.00	99.98	100.25	100.01	100.71	99.99	99.98	99.98	100.08	99.97

** Norma CIPW modificada

* Recalculado de la Norma CIP

8 = CLINOPIROXENITA

2 = DUNITA 3 = WEHLITA 5 = CLINOPIROXENITA OLIVINICA

tabla 3

TABLA 3: COMPOSICION QUIMICA Y NORMA CIPW DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO (Continuación)

MUESTRA TIPO ROCA	RM7129	RS 3871	RS 3870	RS 3666	RS 3935	RM7172	RM7092	RS 3930	RS 3975	RS 3967	RS 3936	RS 3929	RM 7180	RS 3856
OXIDO (%)	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SiO ₂	3875	44.66	39.42	47.95	47.64	47.54	49.43	46.77	48.49	47.09	46.79	46.92	49.92	48.17
TiO ₂	0.05	0.09	0.06	0.23	0.22	0.19	0.09	0.34	0.23	0.23	0.17	0.17	0.14	0.09
Al ₂ O ₃	0.38	1.24	0.80	2.12	2.34	2.07	0.85	3.46	2.66	2.45	2.47	1.76	1.58	1.04
FeO	4.71	2.68	3.85	2.20	3.02	3.47	0.92	1.29	2.36	2.68	2.34	6.10	2.70	1.27
Fe ₂ O ₃	7.31	6.19	7.08	5.63	3.91	4.37	4.18	3.79	4.52	5.33	5.09	1.98	3.42	3.83
MnO	41.94	30.71	40.81	0.15	0.15	0.16	0.12	0.15	0.13	0.15	0.15	0.17	0.14	0.11
MgO	2.46	11.76	3.33	18.92	18.49	20.74	21.38	18.82	18.76	21.32	22.58	23.41	19.80	25.82
CaO	0.61	0.81	1.01	1.63	0.59	0.71	1.46	0.84	0.82	0.92	1.30	0.54	20.13	16.63
Na ₂ O	0.02	0.02	0.06	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.07	0.04	0.06	0.04	0.02	0.02
K ₂ O	0.04	0.04	0.09	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.04	0.08	0.04	0.04	0.05
P ₂ O ₅	0.47	0.16	0.31	0.12	0.18	0.23	0.42	0.42	0.20	0.23	0.09	0.07	0.20	0.20
Cr ₂ O ₃	1.91	0.66	1.88	0.84	1.09	1.13	0.81	0.76	0.69	0.70	0.89	1.41	1.09	1.28
LOI	98.85	99.16	98.91	99.35	99.08	99.27	99.58	96.30	99.17	99.25	99.42	98.78	99.31	99.57
TOTAL														
ELEMENTOS TRAZAS (ppm)														
Co	167	122	136	17	70	72	63	72	665	94	82	76	75	82
Cu	75	37	13	67	76	25	13	63	15	17	18	52	40	62
Ni	995	570	1313	204	313	194	244	203	224	275	328	249	178	410
Sc	14	46	15	83	59	63	50	109	78	76	80	66	72	46
Sr	8	16	31	43	40	51	46	40	68	41	40	43	58	32
V	35	52	40	146	145	104	60	180	132	127	116	115	80	57
Zn	68	41	63	28	36	27	20	30	27	32	27	38	28	23
NORMA CIPW**														
Al ^{IV}	0.07	0.07	0.15	0.09	0.07	0.07	0.07	0.05	0.10	0.07	0.14	0.07	0.07	0.08
IL	0.07	0.12	0.08	0.33	0.31	0.27	0.12	0.62	0.33	0.33	0.24	0.24	0.20	0.12
Gr	0.33	0.11	0.22	0.09	0.13	0.17	0.31	0.07	0.15	0.17	0.07	0.020	.15	0.14
Cr	0.09	0.09	0.27	0.19	0.14	0.23	0.10	0.09	0.34	0.44	0.29	0.09		
Ab	1.51	5.25			2.42	7.28	6.28							
An			3.00	1.94	4.60	2.78	1.99	0.58	1.82	1.81	2.52	0.29	0.13	
Ac	2.05	0.38	2.95	2.07	5.25	2.37	2.87	4.63	2.82					
Di	9.23	45.75	12.34	77.38	71.78	73.56	67.40	76.37	79.63	71.33	67.07	62.81	79.51	62.66
Ne			1.55	4.69	2.17	2.62	1.80	3.15	3.05	3.39	4.76	1.96	2.20	2.59
Lc				0.97	0.11	0.26	0.14	0.22	0.14	0.07	0.11	0.11	0.15	0.32
Ro	80.39	41.09	77.14	10.06	18.33	16.47	19.31	8.72	10.25	18.50	22.45	25.40	12.01	29.51
Fa	2.03		1.54	1.34	1.65	0.19	0.26	0.10	1.29	1.85	1.31	4.41	2.96	3.95
Gs			0.41	0.86	0.95	0.27	0.39	0.88	0.68	0.65	0.65			
Per		3.03		1.73	2.16	0.46	6.64	1.30						
Mt	4.23	4.13	3.79	3.37	2.79	3.13	1.19	4.11	3.25	3.81	3.61	1.39	2.43	
TOTAL	100.00	100.02	100.03	100.03	99.99	99.99	100.00	99.98	99.99	99.99	100.00	99.70	99.97	99.50

2 = DUNITA 3 = WEHLITA 5 = CLINOPIROXENITA OLIVINICA 8 = CLINOPIROXENITA * Recalculado de la Norma CIP ** Norma CIPW modificada

tabla 3

TABLA 3: COMPOSICION QUIMICA Y NORMA CIPW DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO (Continuación)

MUESTRA TIPO ROCA	RM 7609	RM 7778	RM 7791	RM	7790	MT 62	MT 68	MT 76	MT 90	MT 94	MT 97	MT 99	MT 100	RS 4283
OXIDOS (%)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SiO2	39.06	40.21	39.51	38.90	40.38	38.91	39.66	39.65	39.22	39.71	36.64	36.98	40.15	39.76
TiO2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.02
Al2O3	0.17	0.26	0.06	0.11	0.22	0.13	0.14	0.39	0.23	0.61	0.31	0.63	0.62	0.14
FeO														
Fe2O3	14.66	11.99	14.52	16.57	12.59	14.96	12.64	14.37	14.34	14.23	10.70	12.30	11.02	11.06
MnO	0.23	0.23	0.23	0.23	0.21	0.22	0.21	0.23	0.22	0.20	0.17	0.18	0.18	0.18
MgO	43.46	44.68	44.36	40.44	45.32	43.62	45.08	42.45	42.49	43.70	40.06	39.34	43.91	46.27
CaO	0.50	0.76	0.32	0.71	0.61	0.40	0.34	1.23	1.07	0.59	0.65	0.57	1.46	0.43
Na2O	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
K2O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01
P2O5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Cr2O3	0.38	0.41	0.17	0.26	0.17	0.28	0.44	0.42	0.27	0.27	0.29	0.70	0.61	0.24
LOI	1.08	0.29	0.76	2.51	0.37	1.37	1.29	1.03	1.87	0.32	10.85	8.74	1.72	1.80
TOTAL	99.86	99.90	100.02	99.83	99.97	99.99	99.89	99.88	99.81	99.78	99.77	99.55	99.80	99.96
ELEMENTOS TRAZAS (ppm)														
Co	164	160	164	299	159	159	170	168	158	158	134	139	130	156
Cu	29	10	10	63	10	10	42	60	10	10	17	10	74	10
Ni	1147	1171	993	1244	1020	989	905	895	974	1294	1373	1326	1562	1270
Sc	8	8	6	9	6	7	5	10	9	6	7	9	8	2
Sr	5	9	5	7	16	5	5	17	7	25	8	8	10	11
V	10	19	10	10	10	10	10	15	15	16	11	31	22	10
Zn	66	62	67	113	50	70	57	67	66	66	56	68	54	53
MUESTRA	RS 4303	RS 4306	RS 4310	RS 4311	RS 4316	RS 4375	RS 4378	RS 4380	RS 4396	RS 4399	RS 4407	RS 4406	RS 4413	RS 4414
SiO2	39.67	39.20	38.90	38.99	38.36	39.11	39.30	38.76	39.42	39.41	39.32	40.11	38.99	39.37
TiO2	0.05	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.06	0.03
Al2O3	0.36	0.11	0.15	0.25	0.27	0.16	0.23	0.36	0.33	0.19	0.33	0.28	0.36	0.22
FeO														
Fe2O3	14.53	12.79	16.71	12.69	13.31	15.57	12.59	14.65	14.68	12.55	12.25	11.98	15.99	14.69
MnO	0.22	0.20	0.25	0.21	0.21	0.24	0.20	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.25	0.23
MgO	42.30	44.37	41.52	44.86	43.47	43.64	44.26	42.97	42.01	44.97	43.84	43.81	41.73	43.26
CaO	1.48	0.34	0.08	0.30	0.48	0.47	0.34	0.60	1.50	0.54	0.96	1.37	0.94	0.69
Na2O	0.16	0.07	0.05	0.05	0.06	0.05	0.21	0.05	0.05	0.16	0.09	0.13	0.05	0.05
K2O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
P2O5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr2O3	0.59	0.23	0.24	0.80	0.45	0.35	0.43	0.76	0.26	0.28	0.25	0.26	0.50	0.36
LOI	0.48	0.48	0.96	1.66	3.07	2.41	2.28	1.30	1.33	1.35	2.55	1.68	1.04	0.93
TOTAL	99.86	99.76	99.74	99.87	99.73	99.89	99.74	99.87	99.71	99.91	99.81	99.88	99.93	99.85
ELEMENTOS TRAZAS (ppm)														
Co	147	149	174	158	167	171	166	165	155	165	155	145	175	147
Cu	52	10	10	12	30	10	10	24	10	41	50	10	10	10
Ni	873	1130	894	1058	942	952	799	1008	1032	946	920	852	948	966
Sc	11	5	5	5	6	6	5	8	12	7	8	9	7	8
Sr	5	5	5	5	5	14	13	9	9	8	16	13	13	12
V	32	10	23	20	19	17	13	36	25	10	29	10	31	19
Zn	74	58	80	64	62	72	63	76	60	58	51	58	75	66

** Norma CIPW modificada

* Recalculado de la Norma CIP

8 = CLINOPHROXENITA

5 = WEHRLITA

3 = DUNITA

tabla 3

TABLA 3: COMPOSICION QUIMICA Y NORMA CIPW DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO (Continuación)

MUESTRA TIPOROCA	RM 7137	RM 7142	RM 7143	RM 7196	CS 3132RM	7146	RM 7130	RM 7144	RM 7128	RM 7127	CZ 2842	GZ 2857	RM 7119	RM 7118	MT 1644
OXIDOS (%)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SiO2	38.36	37.72	37.50	39.17	37.85	38.32	38.35	37.36	38.35	36.70	38.40	38.26	38.27	38.15	38.77
TiO2	0.05	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.06	0.05	0.02	0.02	0.02	0.06	0.05
Al2O3	0.38	0.18	0.44	0.24	0.37	0.63	0.44	0.13	0.41	0.64	0.40	0.13	0.29	0.61	0.54
FeO	6.80	7.36	4.12	6.34	4.24	4.65	8.01	5.22	10.91	4.24	4.09	8.44	6.66	9.19	3.96
Fe2O3	5.33	5.27	8.35	5.80	7.99	4.71	4.57	7.52	2.78	7.36	7.13	4.42	5.23	6.09	7.87
MnO	0.22	0.23	0.22	0.23	0.24	0.18	0.25	0.22	0.24	0.20	0.19	0.22	0.22	0.25	0.20
MgO	43.72	46.18	45.48	44.08	43.80	45.68	43.40	45.20	42.00	45.65	46.31	44.67	45.83	41.27	42.82
CaO	2.00	0.31	0.36	1.55	1.39	0.50	1.44	0.27	1.86	0.43	0.40	0.37	0.59	1.60	2.36
Na2O	0.12	0.14	0.63	0.48	0.56	0.45	0.20	0.54	0.00	0.77	0.59	0.36	0.27	0.36	0.56
K2O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02
P2O5	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
Cr2O3	0.28	0.49	1.05	0.49	0.68	0.73	0.18	0.29	0.64	2.35	0.19	0.19	0.60	0.37	0.38
LOI	1.55	0.80	0.56	0.39	1.95	2.96	1.55	2.11	0.84	0.46	0.91	1.33	0.86	0.28	1.15
TOTAL	98.86	98.74	98.79	98.83	98.74	98.90	98.47	98.94	98.14	98.91	98.69	98.46	98.88	98.30	98.72
ELEMENTOS															
TRAZAS (ppm)															
Ce	151	201	167	156	138	140	160	166	177	176	135	164	174	170	141
Ga	19	22	13	70	17	81	43	81	99	113	57	57	63	63	65
Ni	1088	970	1298	1082	927	1974	956	1094	873	1396	1953	984	937	1357	1465
Sc	16	5	6	7	10	6	10	5	14	5	5	5	3	12	17
Sr	7	5	6	8	10	5	14	5	6	5	5	5	5	10	7
V	43	28	32	24	41	41	32	19	47	48	31	26	22	38	34
Zn	65	62	72	63	76	73	66	65	72	76	56	67	71	74	68
NORMA CIPW**															
AP	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
IL	0.07	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.08	0.06	0.26	0.03	0.03	0.08	0.07
Gr	0.19	0.33	0.73	0.34	0.48	0.51	0.12	0.21	0.44	1.60	0.35	0.13	0.41	0.26	0.27
Or	0.05	0.04	0.05	0.04	0.09	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.09	0.04	0.04	0.13	0.90
Ab	0.82	0.69	1.78	0.94	1.46	2.52	1.26	1.26	0.45	2.56	1.55	0.49	1.14	2.42	2.17
An	0.40	0.09	1.89	1.73	1.80	0.20	0.83	0.20	0.83	1.99	1.83	1.46	0.51	0.05	1.27
Ac	6.97	1.00	1.21	5.63	5.10	1.68	5.02	0.82	5.98	1.42	1.29	1.19	2.04	5.89	8.78
Ne									1.29						
Lc									0.06						
Fo	83.08	88.87	88.82	83.55	85.16	89.02	83.19	88.99	80.21	87.36	89.41	86.63	87.84	79.80	81.69
Fa	4.89	5.43	0.53	4.49	1.05	2.68	7.14	2.72	10.51	0.46	1.30	7.55	4.71	7.23	0.77
Gs															
Per															
Mt	3.52	3.37	4.89	3.22	4.74	2.97	3.02	4.18	1.84	4.10	4.05	2.41	3.23	4.06	4.83
TOTAL	100.05	99.91	100.00	100.02	99.98	99.99	100.10	99.99	100.00	100.97	100.19	99.99	100.00	99.98	100.00

* Recalculado de la Norma CIP ** Norma CIPW modificada

2 = DUNITA 3 = WEHLITA 5 = CLINOPROXENTA OLIVINICA 8 = CLINOPROXENTA



FIGURA 14: INCIPIENTE RECRISTALIZACION DE MICA (Mi) EN UN SEDIMENTO EN CORNUBIANITA DE HORNBLENDA (PROTOLITO SEDIMENTARIO) (MT 032; ADF 0,48 CM).

Con el aumento del grado de metamorfismo las rocas pierden paulatinamente sus características sedimentarias, y van adquiriendo las de rocas masivas, típicas para cornubianitas (facies de más alto grado). Los minerales en esta fase del metamorfismo corresponden a hornblenda (Figura 15), biotita (a veces en reacción con hornblenda), calcita, epidota, y plagioclasa. Rara vez, andalucita, escapolita, diópsido y granate. Estos dos últimos minerales ocurren en la zona directa de contacto. En esta zona, debido a la presencia de asociaciones como calcita, diópsido y granate, podría pensarse que empieza la aparición de la facies cornubiana de piroxeno; sin embargo, siempre está presente la asociación piroxeno-hornblenda en casi todas las muestras. Un estudio detallado del metamorfismo de

contacto causado por la intrusión del CUZAC, definirá si posterior a este evento ocurrió un proceso metasomático, el cual borró las características típicas de la facies cornubiana de piroxeno.

En la zona inmediata de contacto aparece también, frecuentemente, la roca diorítico-gabroica asociada a la parte de más alto grado. Las estructuras sedimentarias ya no son tan claras, pues aparece una foliación irregular, recta o con replegamientos, definida por la orientación de la hornblenda. En la facies de cornubiana de más alto grado se diferencia la estratificación (S_0) de una foliación (S_1) casi coincidente con (S_0). En la zona más cercana al contacto no es posible establecer esta diferenciación, observándose foliación pero con direcciones irregulares.

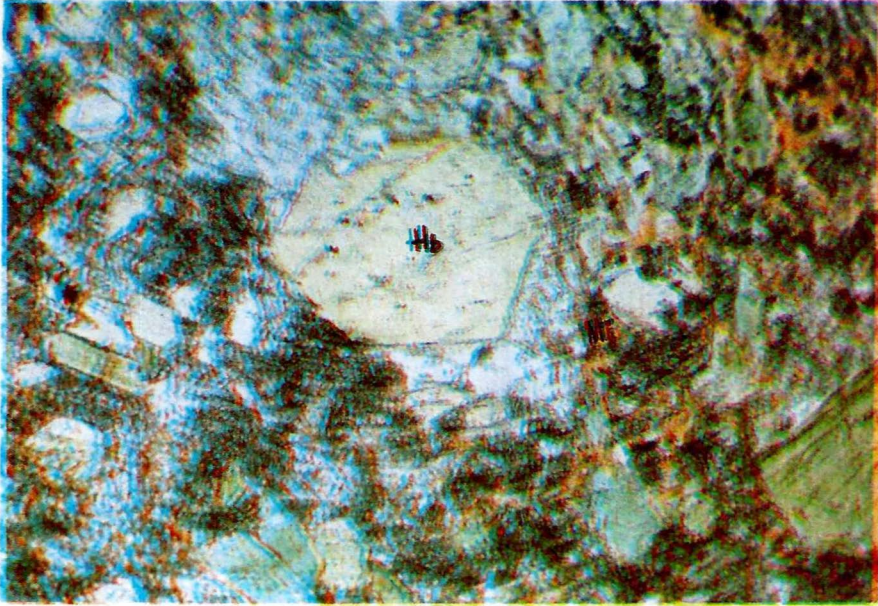


FIGURA 15: FORMACION DE HORNBLENDA (Hb) EN PIROXENO Y MICA (Mi) EN CORNUBIANITA DE HORNBLENDA (RM 7660; ADF 0,36 CM).

5. PETROQUIMICA

El CUZAC presenta una composición predominante de dos minerales principales: olivino del tipo forsterita y piroxeno del tipo diópsido (Figura 16). El contenido de forsterita (Fo) decrece de 89% en wehrlitas hasta 77% en clinopiroxenitas olivínicas.

La hornblenda, mineral subordinado en el CUZAC, también fue analizada. Su composición es edenítica en clinopiroxenita y pargasítica en hornblenditas. De los demás minerales accesorios el más importante desde el punto de vista económico es el platino (aleación de platino y hierro) el cual muestra una composición predominante de isoferroplatino.

Con base en el contenido de los minerales principales se han separado los litódemas

dunita, dunita con clinopiroxeno - wehrlita y clinopiroxenita olivínica como las unidades claramente de origen ígneo. La composición química de éstas se muestra en la Tabla 3.

Estableciendo relaciones entre los diferentes componentes de estas rocas se deduce que existe una cierta homogeneidad en la composición química de las unidades de tal forma que se pueden asociar en dos grupos: dunita y dunita con clinopiroxeno/wehrlita como un grupo y por otra parte clinopiroxenita olivínica.

Así por ejemplo, la relación SiO_2 versus MgO (Figura 17a) muestra claramente la separación entre dos grupos, no existiendo una tendencia de diferenciación entre ellos. El vacío existente entre estos grupos no es explicable por carencia de muestreo, debido a que existen muestras RS 3870

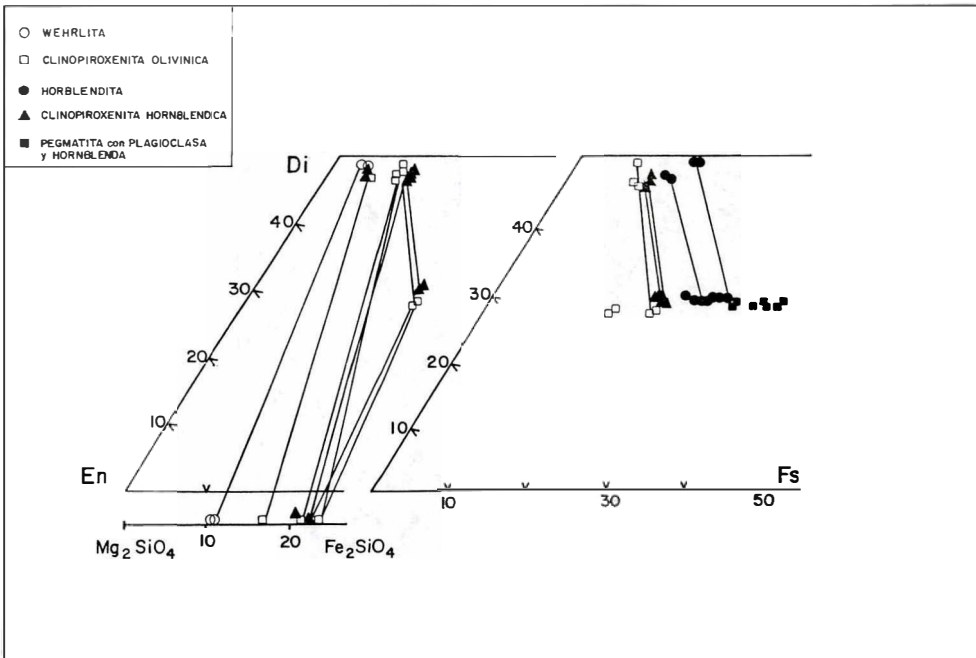


FIGURA 16: COMPOSICION DE OLIVINO, CLINOPIROXENO Y HORNBLENDA EN EL CUZAC.

(wehrlita) y RS 3873 (clinopiroxena olivínica) que se localizan en los bordes de las respectivas unidades y no muestran transición; igual ocurre con las muestras RS 4299 (clinopiroxena olivínica) y RS 4311 (dunita).

En el diagrama TiO_2 versus Cr_2O_3 (Figura 18b) se observa un comportamiento casi constante de la concentración del TiO_2 respecto a Cr_2O_3 en dunitas-wehrlitas y al contrario, en las clinopiroxenas olivínicas es casi constante la concentración del Cr_2O_3 respecto al TiO_2 , es decir que la relación de comportamiento de estos dos óxidos es totalmente independiente en los dos grupos. En la relación Ni versus Cr (Figura 19a), la distribución de la concentración en los dos grupos es errática en el interior de cada uno.

El diagrama que muestra la relación de Al_2O_3 y Cr_2O_3 (Figura 19b), indica que el Al_2O_3 se comporta totalmente independiente en los dos grupos. En la dunita-wehrlita aparece con valores muy bajos y se nota una ligera correlación entre Al_2O_3 respecto al Cr_2O_3 .

En las clinopiroxenas olivínicas aumenta su valor independiente de la concentración de Cr_2O_3 . El Zn y Cr tienen en la dunita-wehrlita cierta correlación, tal vez indicando un reemplazamiento de Mg por Zn en el olivino (Figura 20). En la clinopiroxena-wehrlita esta tendencia desaparece y es reemplazada por un comportamiento errático.

El diagrama que se presenta en la Figura 21, fue elaborado para diferenciar peridotitas cúmulo de tectonitas en rocas ofiolíticas del Canadá (IRVINE y FINDLAY, 1972).

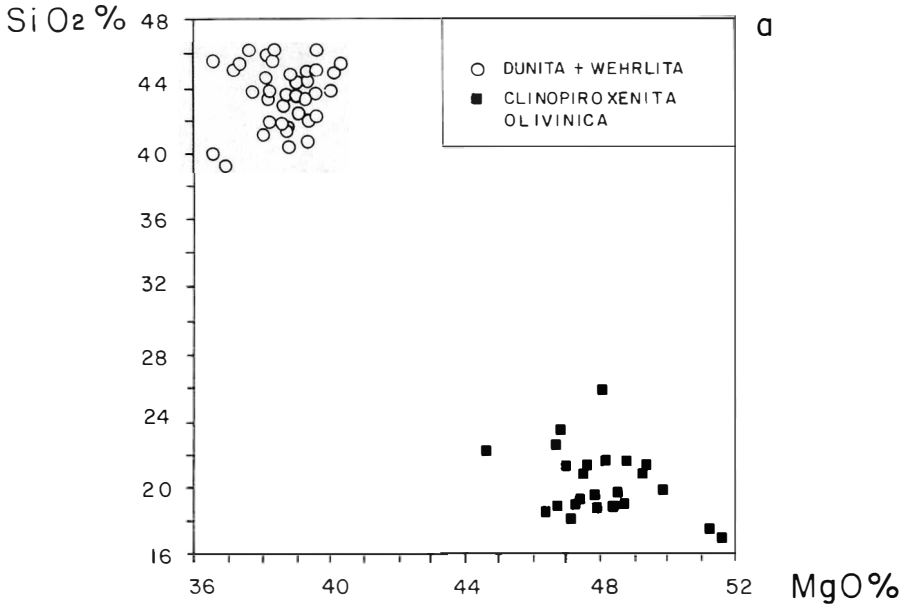


FIGURA 17: CORRELACION SiO₂ VERSUS MgO (a) y MgO VERSUS Cr₂O₃ (b) EN PERIDOTTAS DEL CUZAC.

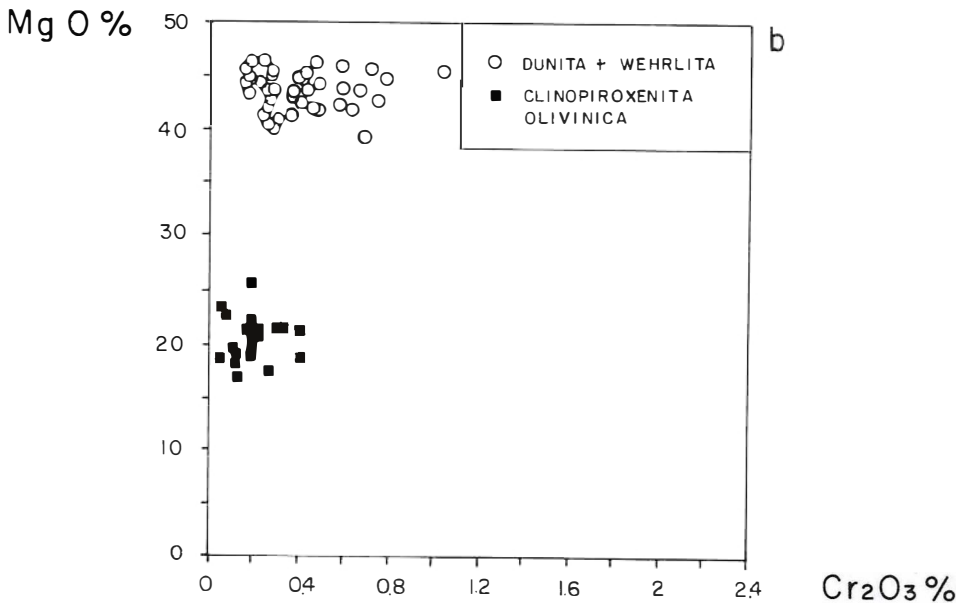


FIGURA 18: CORRELACION CaO VERSUS Cr₂O₃ (a) Y TiO₂ VERSUS Cr₂O₃ (b) EN PERIDOTTAS DEL CUZAC.

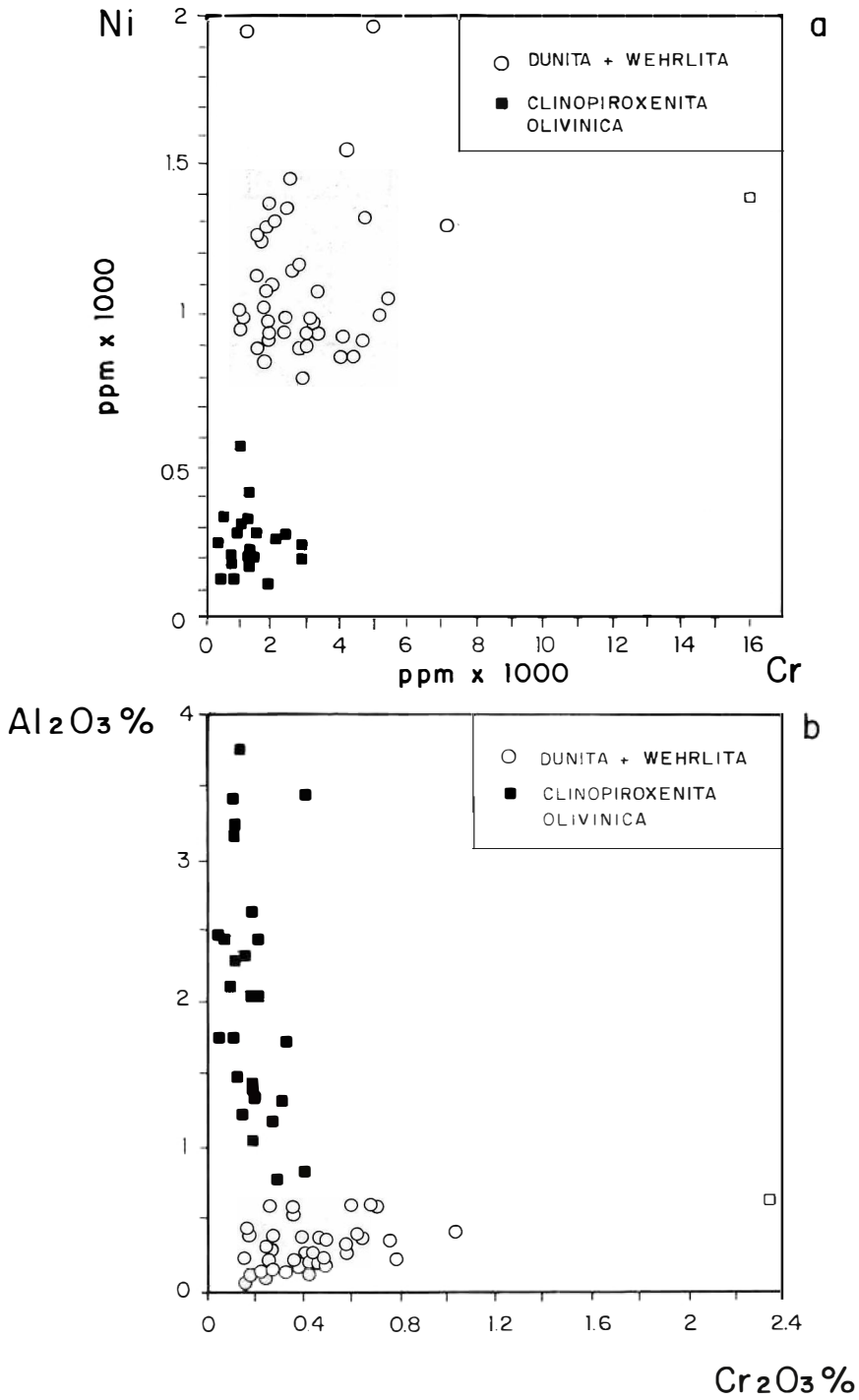


FIGURA 19: CORRELACION Ni VERSUS Cr (a) Y AL₂O₃ VERSUS Cr₂O₃ (b) EN PERIDOTTAS DEL CUZAC (TABLA 3).

TABLA 4: VARIACION DE SiO_2 , MgO Y CaO EN DUNITAS, WEHLITAS Y CLINOPIROXENITAS OLIVINICAS (EN % POR PESO)

Oxido	Dunitas		Wehrlitas		Clinopiroxenitas olivínicas	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta
SiO_2	36,64	40,11	38,75	44,66	46,77	49,92
MgO	39,4	46,93	40,00	43,78	18,17	23,41
CaO	0,26	2,36	2,83	4,14	15,36	20,66

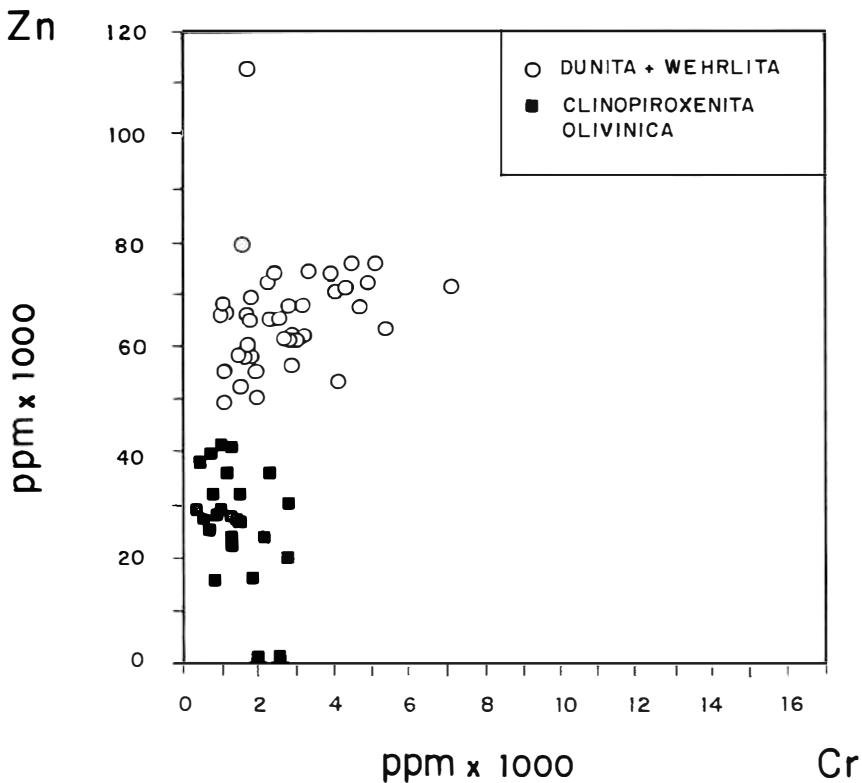


FIGURA 20: CORRELACION Zn VERSUS Cr EN PERIDOTITAS DEL CUZAC (TABLA 3).

La peridotita tectónica se ubica en un campo muy estrecho definido por $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 0,5\%$ por peso, considerando sólo rocas con cromita accesoria y $\text{NiO} > 0,2\%$ por peso. Este diagrama ha sido utilizado para ubicar peridotitas tectónicas, incluyendo dunitas, en ofiolitas de otros continentes.

La zona crítica representa el límite entre las peridotitas tectónicas y las peridotitas tipo cúmulo que es la zona de transición en la región del Moho. Las peridotitas tipo cúmulo son rocas con contenidos bajos de Cr_2O_3 pero claramente con contenidos más bajos de Ni que las ofiolitas.

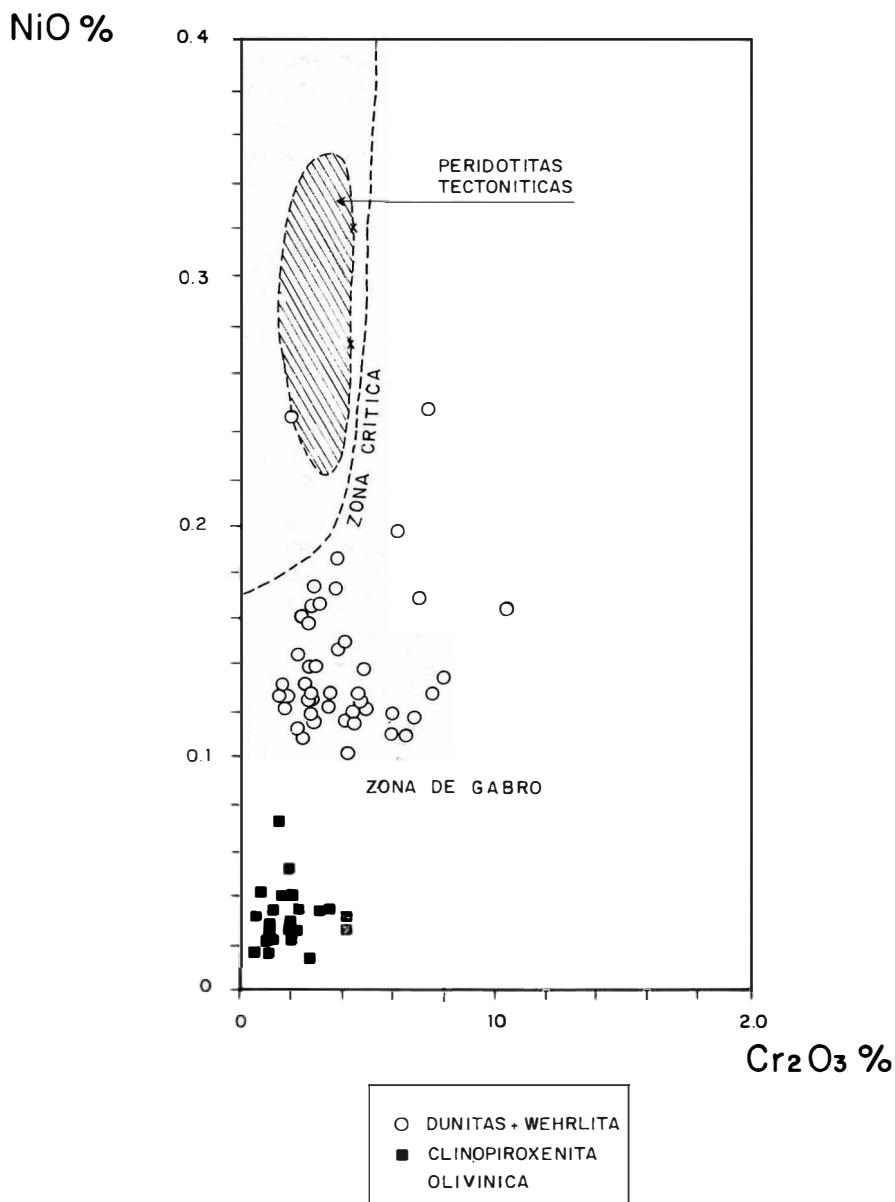


FIGURA 21: DIAGRAMA NIO VERSUS Cr₂O₃ EN PERIDOTITAS DEL CUZAC (LÍMITES SEGUN IRVINE Y FINDLAY, 1972).

Las dunitas, wehrlitas y clinopiroxenas olivínicas del CUZAC se ubican por fuera del campo definido para las peridotitas tectónicas con porcentajes muy bajos de NiO (<0.2%). Esto comprueba la clara diferencia que existe entre las rocas del CUZAC y las ofiolitas, es decir, que el CUZAC no es una ofiolita. Además, las rocas del CUZAC son más comparables con las series litológicas de carácter cíclico compuesta de rocas con olivino (sin ortopiroxeno) y contenidos variables de clinopiroxeno es decir, una secuencia como dunita (con o sin clinopiroxeno), clinopiroxenita, dunita (con o sin clinopiroxeno) y clinopiroxenita.

5.1. CALCULO MODIFICADO DE LA NORMA CIPW

Utilizando los datos de la Tabla 3 se calculó la norma CIPW construyendo los minerales en el orden: Ap, Il, Cr, Or, Ab, Ac, An, Di, Fo, Fa y Mt. Con este método estandar las "dunitas" del Alto Condoto mostraron contenidos bajos de fayalita y muy altos de magnetita con relaciones de Fe_2O_3/FeO muy altas. Además resultaron contenidos de clinopiroxeno y en algunos casos también contenidos significativos de hiperstena (Hy) y hematita (Hem) normativos. Al dibujar estos datos en el diagrama de Streckeisen (1976), gran parte de las rocas se ubicaron fuera del campo de dunitas, es decir en el campo de harzburgita y lherzolita (Figura 22a). Dichas rocas son típicas para asociaciones del tipo alpino, con dunita-lherzolita/harzburgita, incluyendo ofiolitas, las cuales están caracterizadas por la ocurrencia de ortopiroxeno. En cambio, el ortopiroxeno es un mineral muy raro o ausente en intrusiones del tipo Alaska, donde las rocas ultramáficas típicas son dunitas con variables contenidos de clinopiroxeno. La composición modal en estas dunitas se presenta característicamente por la asociación olivino + clinopiroxeno + cromita/magnetita y además por la ausencia de ortopiroxeno y hematita. Esta composición es también típica para el CUZAC.

Para tratar de establecer una concordancia entre los resultados normativos y la petrografía se realizó nuevamente el cálculo de la norma CIPW. En lugar de Ab y Ac se hizo el cálculo con otros minerales de Na. De esta forma se disminuye el contenido de Mt y se aumenta el de Fa, es decir, sube el % de FeO respecto a Fe_2O_3 . Este aumento se logra con el siguiente orden de cálculo: $Ab + Ac \rightarrow Jd + Ac \rightarrow Ne + Ac \rightarrow MgCr_2O_4 + Ne + Ac$. Estas variaciones deducidas de la norma coinciden mejor con la composición modal de las dunitas, las cuales no contienen feldespatos, pero poseen acmita y jadeíta, como componentes del clinopiroxeno y escasa nefelina (Figura 22b).

5.2. METODOLOGIA PARA ESTIMAR EL PORCENTAJE DE FeO y Fe_2O_3 DE LAS DUNITAS DEL CUZAC

Por lo general, los análisis de Fluorescencia de Rayos X (RFA) indican el contenido de Fe en forma de Fe_2O_3 (como hierro total). Con estos datos se calcula la norma CIPW. A través de los minerales ferríferos normativos se pueden estimar las proporciones de FeO y Fe_2O_3 , las cuales son un índice de la presión parcial del oxígeno en el momento de la formación de las dunitas. La metodología para realizar este cálculo es la siguiente:

1. Cálculo de la norma CIPW como se describió.
2. Cálculo del porcentaje por peso de la cantidad de FeO usado para la construcción de minerales normativos que contienen Fe^{+2} Como ilmenita (Il), cromita (Cr) y fayalita (Fa):

$$\% FeO = (\text{suma de } Fe^{+2} \text{ usado en } Il+Cr+Fa)/104 \times \text{peso molecular de FeO}$$
3. Cálculo del porcentaje por peso de Fe_2O_3 , usado para la construcción de minerales normativos que contienen Fe^{+3} como acmita (Ac):

% Fe_2O_3 , = (suma de Fe^{+3} usado en Ac)/104 x peso mol. de Fe_2O_3 ,

4. Utilizando los numerales 2 y 3 se calcula el Fe (como Fe_2O_3) disponible para calcular magnetita (Mt) normativa:

$A = Fe$ (como Fe_2O_3) = Fe (como Fe_2O_3 , tomado del análisis) - 1,11x (% de FeO)- % de Fe_2O_3

5. Fe (calculado como Fe_2O_3) = A = Mt, se conoce a partir de la composición de la magnetita (Mt):

$A = Fe_3O_4 = Mt = 1 Fe_2O_3 + 1 FeO$, es decir,
 $A = Mt = 1 Fe_2O_3 + 1,11 FeO$

6. Por otra parte se conoce la siguiente relación :

$Fe_2O_3/159,69 = FeO/71,85$ es decir $FeO = 0,4499 Fe_2O_3$

7. Reemplazando (6) en (5), se tiene:

$A = 1 Fe_2O_3 + 1,11 \times 0,4499 Fe_2O_3 = 1 Fe_2O_3 + 0,4994 Fe_2O_3$
 $A = 1,4494 Fe_2O_3$

% Fe_2O_3 , = $A/1,4494 = 0,6669 A$ y % FeO = $0,3000 A$

Para el control se debe cumplir que :

$$0,6669 A + 1,11 \times 0,3000 A = A$$

Con los datos obtenidos se va a la Tabla 3 y se agrega la magnetita = $1 Fe_2O_3 + 1 FeO$

En la columna de los datos de óxidos mayores donde aparece el contenido de Fe como Fe_2O_3 , se pueden reemplazar los valores de % de FeO y el % de Fe_2O_3 y se compara con el valor de Fe total (dado como Fe_2O_3) = % Fe_2O_3 + 1,11 % FeO.

La comparación de datos de FeO, analíticamente determinado con los valores estimados (datos de BURGATH y MUSSALLAM, comunicación escrita, 1989) se muestra en la Tabla 5. La comparación de los óxidos de Fe calculados de esta forma, con el hierro obtenido por métodos analíticos indica que el método ofrece

resultados confiables al menos en roca con contenidos bajos de Na_2O .

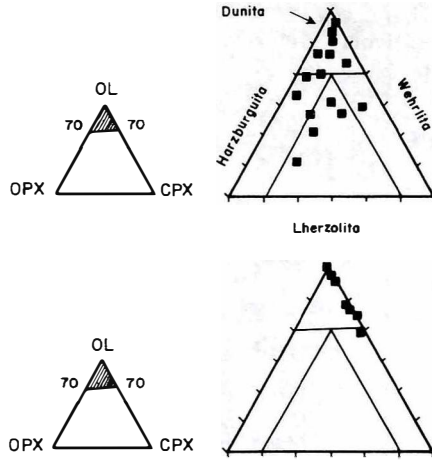
TABLA 5: COMPARACION DE CONTENIDOS DE FeO ANALIZADOS Y ESTIMADOS.

	(MU 47 Dunita) % por peso de FeO	(MU 54 Dunita) % por peso de FeO
Datos analíticos	6,54	7,17
Datos calculados	6,46	7,68
% por peso de Fe_2O_3		
Datos analíticos	0,81	1,06
Datos calculados	0,89	0,50
Magnetita normativa (%)	0,40	0,00

Los contenidos de Fa normativa y de FeO de las dunitas muestran una correlación positiva excelente. La línea de regresión es $y = 0,7x + 3,41$ (Figura 22c). Utilizando este diagrama, después del cálculo de Fa normativa, se puede estimar el contenido de FeO (mínimo) a partir de un contenido de fayalita normativa conocido y así disminuir los pasos del cálculo.

El porcentaje calculado de Fa normativa y los contenidos de FeO de las diferentes posibilidades del cálculo (Ab+Ac; Jd+Ac; Ne+Ac; $MgCr_2O_4$ +Ne+Ac) en muestras individuales y en la suma total de muestras están correlacionando también, aún con una línea de regresión con menor pendiente ($y = 0,46x + 4,29$). Esta línea puede ser utilizada en el caso de contenidos altos de Na_2O .

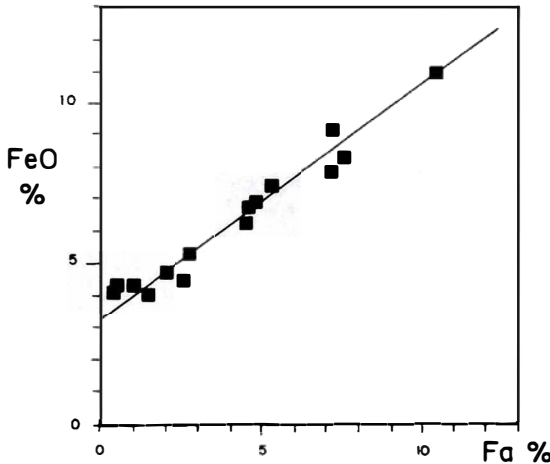
A través del valor de Fa (calculado con el método $MgCr_2O_4 + Ne+Ac$) y la línea de regresión se puede estimar aproximadamente el valor de FeO y con éste el grado de oxidación (fugacidad de oxígeno). En las dunitas del Condoto, se debe formar Ac y Mt (mínimo 1.8 % normativos) en todas las muestras, también en las que tienen bajos contenidos de Na_2O . Esto significa que durante la formación de las dunitas, la relación de Fe_2O_3/FeO y por lo tanto la fugacidad del oxígeno, fue relativamente alta.



A. Cálculo estandar de la norma. CIPW.

B. Cálculo modificado

13x14



C. Cálculo de FeO a partir del contenido normativo de fayalita.

FIGURA 22. COMPOSICION NORMATIVA DE LAS DUNITAS DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO.

5.3. RELACIONES ENTRE Pt Y Cr₂O₃ EN DUNITA

La relación genética que puede existir entre Pt y cromita ha sido una sospecha muy común en la literatura sobre PGM. Tanto los resultados obtenidos al estudiar secciones pulidas de cromititas del Alto Condoto como la observación detallada de la concentración selectiva (in situ) de cromititas en los afloramientos, los datos

de la Tabla 6 y la correlación Pt versus Cr₂O₃ (Figura 23), demuestran que no existe ninguna relación sistemática entre la ocurrencia de Pt-Fe y cromita, fuera de la ocurrencia de los dos minerales como accesorios en la misma roca. Muestras con concentraciones altas de cromita tienen valores de Pt muy bajos (10 ppb) y viceversa, muestras con valores altos en Pt tienen contenidos de Cr₂O₃ muy bajos (0,4 %, lo que es normal para la dunita, Tabla 3).

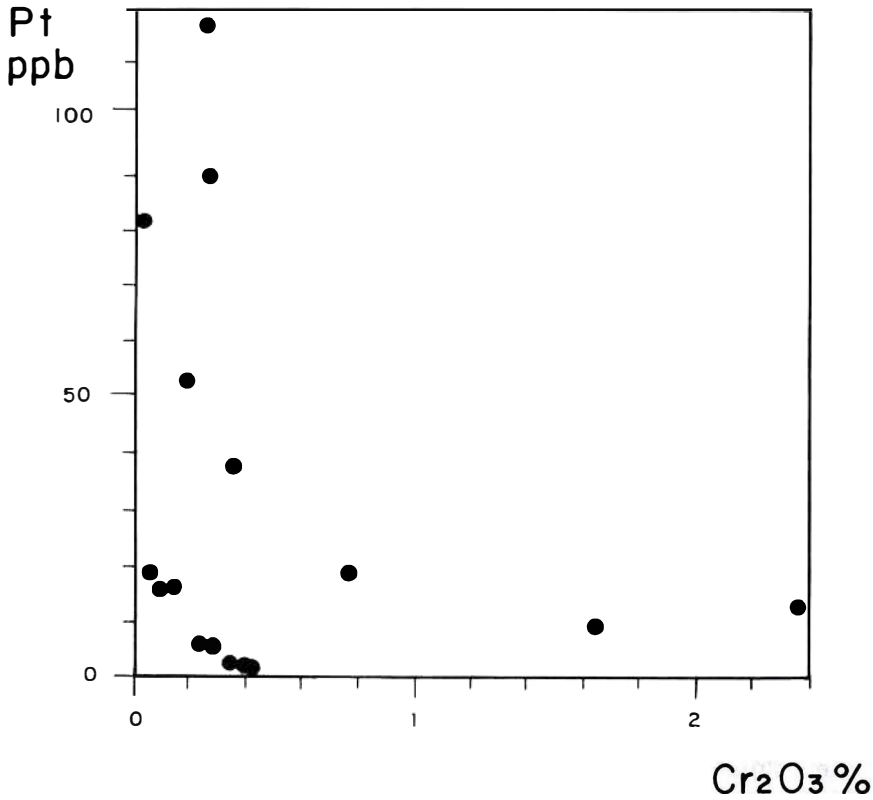


FIGURA 23. DIAGRAMA DE Pt VERSUS Cr₂O₃ DE DUNITAS DEL CENTRO DEL CUZAC.

TABLA 6: CONTENIDOS DE ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO (EN PPB) Y CR₂O₃ (EN % POR PESO) EN ROCAS DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO. ANALISIS POR ENSAYE AL FUEGO (NIS), X-RAL LABORATORY, CANADA.

MUESTRA	TIPO	Au	Ru	Rh	Pd	Re	Os	Ir	Pt	Cr ₂ O ₃
RM 7778	2	< 1	< 1	1	1	< 1	< 3	1.1	2	0.41
RM 7790A	2	< 1	< 1	3	2	< 1	< 3	4.3	117	0.26
RS 4380	2	< 1	2	2	1	< 1	< 3	2.9	19	0.76
RS 4450	2	1	1	< 1	1	< 1	< 3	2.2	2	0.39
RS 4375	2	1	3	2	2	< 1	< 3	2.9	38	0.35
RS 4322	2	< 1	4	< 1	84	< 1	< 3	0.3	82	0.01
RS 4379	2	< 1	4	2	1	< 1	< 3	2.6	6	0.28
RM 7127	2	4	11	6	5	< 1	< 3	3.4	12	2.36
RM 7137	2	7	8	2	2	< 1	< 3	2.2	90	0.27
GZ 2857	2	1	9	2	1	< 1	< 3	2.7	53	0.19
MT 1649	3	< 1	10	4	7	< 1	< 3	2.1	9	1.64
RM 7081	5	3	9	< 1	4	< 1	< 3	0.2	3	0.35
RM 7177	5	2	8	< 1	7	< 1	< 3	0.2	6	0.24
RS 3748	5	2	8	< 1	19	< 1	< 3	0.2	16	0.13
GZ 2848	5	1	7	< 1	22	< 1	< 3	0.2	16	0.09
RS 3774	5	2	8	2	54	< 1	< 3	0.2	19	0.06
KOL-90/5	12	1	1	< 1	3	1	< 3	< .1	2	n.d.

2 = DUNITA 3 = WEHLITA 5 = CLINOPIROXENITA OLIVINICA 12 = PEGMATITA HORNBLENDO-PLAGIOCLASICA

5.4. PGE EN ROCAS NORMALIZADOS RESPECTO A LA CONDRITA

Los PGE son elementos siderófilos. Si estos elementos se normalizan respecto a la condrita y se dibujan en orden descendente de su punto de fusión (Osmio, Os; Iridio, Ir; Rutenio, Ru; Rodio, Rh; Platino, Pt y Paladio, Pd) se puede desarrollar una metodología de análisis similar a la utilizada con los elementos de las tierras raras (REE) pero a diferencia de ellas, el orden de fraccionamiento no es controlado por su posición en la tabla periódica como en los REE (NALDRETT *et al*, 1979). Se diferencian dos grupos de acuerdo a su comportamiento (BARNES *et al*, 1985): el grupo del Ir (Os, Ir y Ru) y el grupo del Pd (Rh, Pt y Pd).

Al normalizar los contenidos de PGE del CUZAC se observa que los patrones para las dunitas cubren rangos entre 0,001 y 0,1 veces la condrita (Figura 24a). Como constante se observa la tendencia al enriquecimiento relativo en Ir, Rh y Pt y al empobrecimiento en Os y Pd. El Ru no muestra un comportamiento definido. La presencia o ausencia de Ru (con osmio ?) en las dunitas se puede deber a su cristalización simultánea con la cromita debido a que según Barnes (1985), la cromita crece sobre las aleaciones de Os-Ir-Ru, separándolas del fundido y empobreciéndolo por lo tanto, en estos elementos. No obstante una relación directa entre los contenidos de cromita y de Ru(Os-Ir) aparentemente no existe, con excepción de la muestra RM-7127. En cambio, la aleación de Pt-Fe parece funcionar como recolector de diferentes aleaciones de Os-Ir (Ru), las cuales habrían cristalizado más temprano, probablemente a temperaturas más altas para aparecer después como inclusiones dentro del Pt-Fe. Otra interpretación es que en la aleación del Pt-Fe se disuelve, bajo temperaturas altas, más osmio e iridio, el cual se desmezcla a temperaturas más bajas, como en el caso de Viravira.

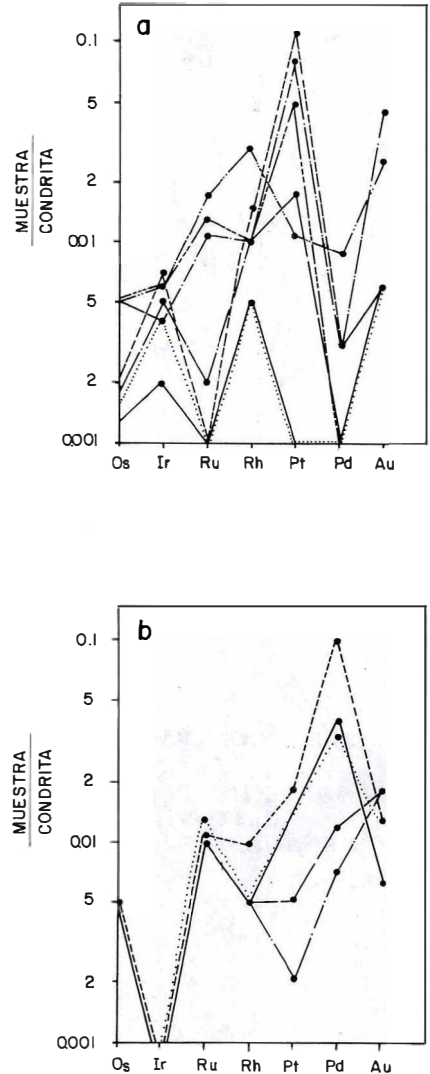


FIGURA 24: PATRONES DE PGE NORMALIZADOS A LA CONDRITA EN DUNITA (a) Y CLINOPIROXENITA (b) DEL CUZAC.

Una característica de la dunita es la ausencia de Pd que puede deberse a que desde el comienzo el magma estaba empobrecido en paladio o que éste fue fraccionado en la fase de sulfuros. Al normalizar las clinopiroxenitas olivínicas del CUZAC respecto a la condrita se muestra que aquellas poseen valores de PGE entre 0,001 y 0,1 veces la condrita. En la Figura 24b se observa que el relativo empobrecimiento en Ir, Rh y Pt y enriquecimiento en Ru y Pd está indicando que estos elementos minerales se movilizaron en el magma probablemente en fase de sulfuros y se precipitaron en esta fase.

Al comparar los patrones de las dunitas del CUZAC con peridotitas de los complejos alpinos de tectonitas y ofiolitas (Iherzolitas; harzburguitas y dunitas (Figura 25 a) se observa que:

1. La curva de las peridotitas en las ofiolitas es muy plana.

2. La curva de las peridotitas en ofiolitas comienza con valores superiores de Os.
3. La curva de las peridotitas en ofiolitas tiene una tendencia al enriquecimiento de Pd.
4. La curva de las dunitas en el CUZAC muestra una disminución en la concentración relativa que es más fuerte que la de las peridotitas en ofiolitas.

El comportamiento de una muestra de los complejos tipo Alaska se presenta en la Figura 25b, donde se observa gran similitud con el comportamiento de las clinopiroxenitas olivínicas del CUZAC.

Una conclusión que resulta de esta comparación con la condrita es que el magma de la fase dunítica fue enriquecido en Pt y empobrecido en Pd y que el comportamiento de los PGE en el CUZAC, comparado con el de las ofiolitas, es muy diferente.

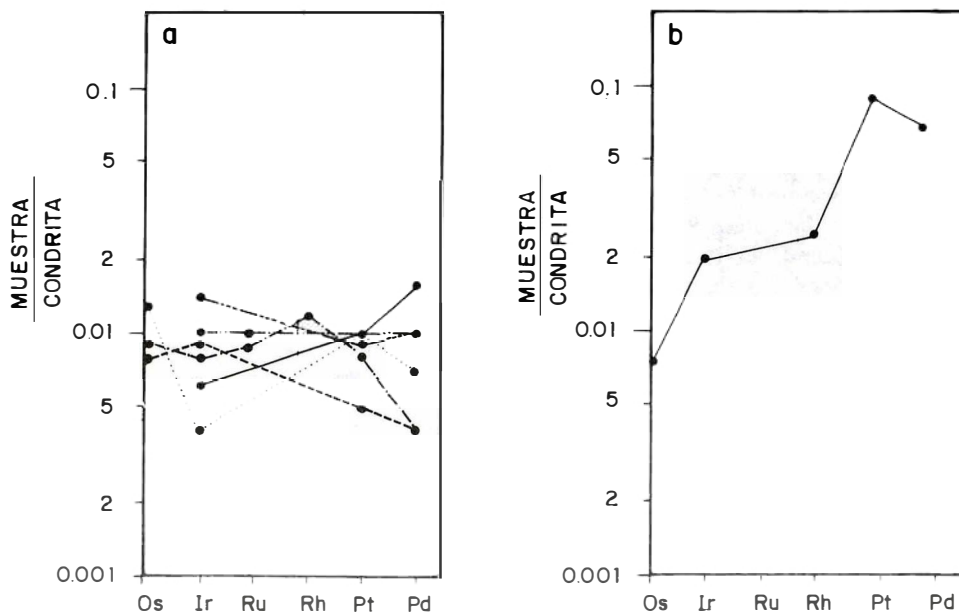


FIGURA 25.: PATRONES DE PGE TÍPICOS, NORMALIZADOS RESPECTO A LA CONDRIITA PARA COMPLEJOS OFIOLÍTICOS (a) Y COMPLEJOS ZONADOS (b) (BARNES *et al*, 1985).

6. DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS EN ROCAS DEL CUZAC Y DEL COMPLEJO DE VIRAVIRA

Se analizaron 20 muestras para conocer el contenido de elementos de tierras raras (Rare Earth Elements, REE). Once muestras pertenecen al CUZAC y 9 son basaltos y peridotitas serpentinizadas del Complejo de Viravira. Los resultados analíticos y las relaciones $\text{La}_{cn}/\text{Yb}_{cn}$ y $\text{La}_{cn}/\text{Ce}_{cn}$ (cn =normalizado a la condrita) están resumidos en Tabla 7.

La suma de los contenidos de REE es muy baja en dunitas (0,5 ppm) y varios elementos están cerca o por debajo del límite de detección. Las clinopiroxenitas tienen sumas entre 2,7 y 7,4 ppm, las hornblenditas 22,4 y 49,4 y las pegmatitas diorítico-gabroicas tienen sumas de 33 y 52 ppm.

Los patrones de los valores normalizados a la condrita (Figura 26) tienen formas convexas hacia arriba y muestran un empobrecimiento claro de los elementos livianos de las tierras raras (light rare earth elements, LREE) con relaciones de $(\text{La})_{cn}/(\text{Ce})_{cn}$ de 1,14 y 1,52 en dunitas; entre 0,75 y 1 en clinopiroxenita; 0,83 y 0,87 en hornblendita y 1,2 y 1,36 en las pegmatitas diorítico-gabroicas. Las relaciones $(\text{La})_{cn}/(\text{Yb})_{cn}$ son de 0,26 y 0,35 en dunitas; entre 0,36 y 0,93 en clinopiroxenitas, 0,83 y 1,18 en hornblenditas y 2,14 y 2,33 en pegmatitas diorítico-gabroicas.

Dunitas de complejos ofiolíticos tienen valores muy similares a la dunita del CUZAC, pero están caracterizadas, en lo general, por un ascenso fuerte en los elementos pesados de las tierras raras (heavy rare earth elements, HREE) y por patrones en forma de U. Vale anotar que los patrones de las hornblenditas son muy similares (o paralelos) a las de las clinopiroxenitas, con la diferencia que la suma es 3 a 7 veces más alta que la de las clinopiroxenitas. Considerando a la hornblendita como producto de metamorfismo de alta temperatura (anatexis parcial) hay que suponer

una influencia metasomática muy fuerte que afectó el sistema de tierras raras en las hornblenditas.

Los patrones de las pegmatitas diorítico-gabroicas se distinguen claramente de los demás por su enriquecimiento en LREE la cual se debe muy probablemente al fraccionamiento de los REE en plagioclasa con un enriquecimiento relativo de los LREE.

6.1. COMPORTAMIENTO DE ISOTOPOS DE NEODIMIO, SAMARIO Y ESTRONCIO

Para el estudio de los isótopos de Nd y Sr se escogieron diez muestras del CUZAC, tres muestras de la zona de metamorfismo de contacto, cinco basaltos komatiíticos del Complejo de Viravira y cuatro peridotitas del mismo (Figura 27). El objeto de este estudio fue establecer una posible relación genética entre los dos complejos (MUÑOZ *et al.*, 1990).

El Sr fue separado a través de la técnica de Columna de intercambio de Iones y los análisis fueron hechos con un equipo Finnigan MAT 261 espectrómetro de masas de la BGR (Hannover). Las relaciones isotópicas del Sr fueron normalizadas a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8,3752$; el estándar isotópico NBS 987 ha sido analizado a $0,71022 \pm 0,00008$. Sm y Nd se separaron por el método combinado descrito por Richard *et al.* (1976). Las relaciones isotópicas de Nd fueron normalizadas $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0,511878 \pm 0,000023$.

Los valores de $\epsilon\text{Nd}(t)$ y $\epsilon\text{Sr}(t)$ fueron calculados aplicando los parámetros del modelo del día actual (present day model) que son: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{chur}}$ (Chondritic Uniform Reservoir) = 0,512638; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{chur}}$ = 0,1967 y $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{chur}}$ = 0,0827.

6.1.1. RESULTADOS

Las relaciones isotópicas de las muestras analizadas se presentan en el diagrama de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Figura 28). Las muestras del CUZAC tienen una composición isotópica de Nd y Sr muy homogénea. Los valores de $\epsilon\text{Nd}(t)$ varían entre +7,1 y +8,9 (una sola muestra tiene +11,4)

TABLA 7: CONTENIDOS DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE) EN ROCAS DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO; ANALISIS POR ICPMS, U. SIEWERS, BGR.

ELEMENTOS	RM	RM	RS	RS	RS	RS	RM	RM	RM	RS	GZ	CON-
	7127	7143	3899	3900	3777	3975	7082	7057	7195	3902	3018	DRITA*
LITOLOGIA	2	2	8	8	5	5	5	11	11	12	12	
Y	0.20	0.02	1.90	3.20	2.30	3.70	1.40	11.80	20.80	19.00	12.40	
La	0.04	0.03	0.26	0.23	0.33	0.55	0.13	1.50	4.10	7.30	4.60	0.33
Ce	0.07	0.07	0.70	0.82	0.88	1.50	0.43	4.60	13.10	14.30	10.20	0.88
Pt	0.07	0.02	0.14	0.18	0.18	0.26	0.10	0.86	2.30	2.30	1.40	0.11
Nd	0.01	0.08	0.79	1.10	0.96	1.50	0.56	4.70	11.80	10.90	6.50	0.60
Sm	0.09	0.04	0.29	0.52	0.44	0.74	0.24	1.90	3.70	3.40	1.90	0.18
Eu	0.01	0.02	0.15	0.21	0.16	0.25	0.11	0.76	0.16	1.42	0.73	0.07
Gd	0.03	0.06	0.40	0.53	0.47	0.72	0.26	2.30	4.40	3.70	2.20	0.25
Tb	< 01	0.01	0.07	0.11	0.10	0.13	0.07	0.38	0.75	0.65	0.42	0.05
Dy	0.06	0.05	0.40	0.65	0.47	0.70	0.31	2.40	3.80	3.50	2.00	0.30
Ho	0.02	0.01	0.08	0.13	0.10	0.16	0.07	0.51	0.80	0.71	0.45	0.07
Er	0.04	0.04	0.17	0.30	0.21	0.34	0.15	1.10	1.80	1.80	1.20	0.20
Tm	0.01	0.01	0.04	0.06	0.06	0.05	0.04	0.15	0.29	0.21	0.16	0.03
Yb	0.07	0.07	0.17	0.39	0.25	0.41	0.21	1.10	2.10	1.90	1.30	0.20
Lu	0.01	< .01	0.04	0.05	0.04	0.07	0.02	0.16	0.31	0.34	0.23	0.03
Suma REE	0.50	0.51	3.70	5.28	4.65	7.38	2.70	22.42	49.41	52.43	33.29	3.30
Lacn/Ybcn		0.35	0.26	0.93	0.36	0.80	0.81	0.38	0.83	1.18	2.33	2.14
Lacn/Cecn		1.52	1.14	0.99	0.75	1.00	0.98	0.81	0.87	0.83	1.36	1.20

* HASKIN *et al.*, 1968 - 2 = DUNITA - 5 = CLINOPIROXENITA OLIVINICA - 8 = CLINOPIROXENITA - 11 = HORNBLENDITA - 12 = PEGMATITA HORNBLENDO-PLAGIOCLASICA

y los valores del $\epsilon\text{Sr}(t)$ son principalmente en el intervalo de -18,7 y -13,9 (dos muestras están cerca de -8). Las relaciones isotópicas de los basaltos komatiíticos y las peridotitas del Complejo de Viravira están dentro del mismo rango (Tabla 8). Todas estas rocas se ubican cerca al campo del "mantle array" (HAWKESWORTH *et al.*, 1979c) y sus características isotópicas demuestran su derivación de un manto empobrecido (depleted mantle). En la Figura 29, las peridotitas del CUZAC tienen relaciones de Sm/Nd que son más altas que los valores modelo del manto empobrecido (DM). Esta tendencia de empobrecimiento se debe al bajo coeficiente de distribución de Sm y Nd en olivino y clinopiroxeno; cuando estos minerales se forman a través de cristalización fraccionada de un magma, los minerales tienen relaciones de Sm/Nd más altas que el mismo magma (FAURE, 1987). La tendencia de enriquecimiento (Figura 29) muestra cómo desciende la relación de Sm/Nd en los basaltos komatiíticos y en las rocas diorítico-gabroicas con el aumento de la diferenciación. De acuerdo con esto, se puede suponer que el mag-

ma generador de los complejos ultramáficos tenía una composición isotópica cerca al valor modelo del manto empobrecido (Depleted Mantle, DM). Es interesante anotar que dos cornubianitas también tienen relaciones isotópicas de Nd similares a las de los basaltos y peridotitas; solamente sus valores de $\epsilon\text{Sr}(t)$ son ligeramente más altos. Este dato refuerza la observación de campo según la cual los sedimentos premetamórficos son productos de erosión de los basaltos del Complejo de Viravira. Solamente la muestra RM-7034 que es más rica en carbonato muestra signos de contaminación cortical.

Las características isotópicas de Nd y las relaciones de Sm/Nd en los basaltos de El Paso también su derivación del manto. Sin embargo, los valores de $\epsilon\text{Sr}(t)$ son significativamente más altos (+22 en dos muestras) que en las demás muestras. Este aumento en las relaciones isotópicas de Sr puede explicarse por la interacción de la roca en el agua marina durante su efusión. En este proceso la roca incorpora el Sr del agua con Sr de +64.

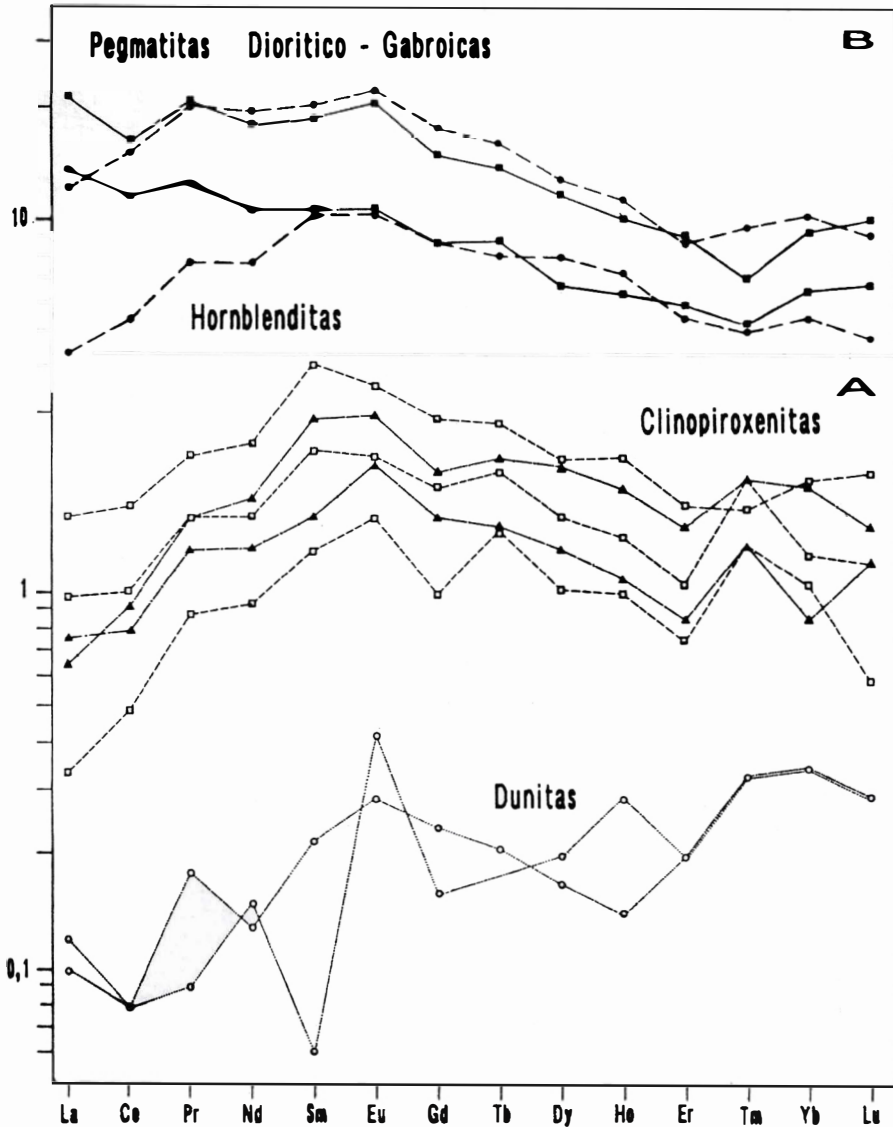


FIGURA 26: PATRONES DE DISTRIBUCION DE ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS (REE) NORMALIZADOS RESPECTO A LA CONDrita EN PERIDOTITAS (a) Y EN ROCAS DIORITICO-GABROICAS (b) DEL CUZAC.

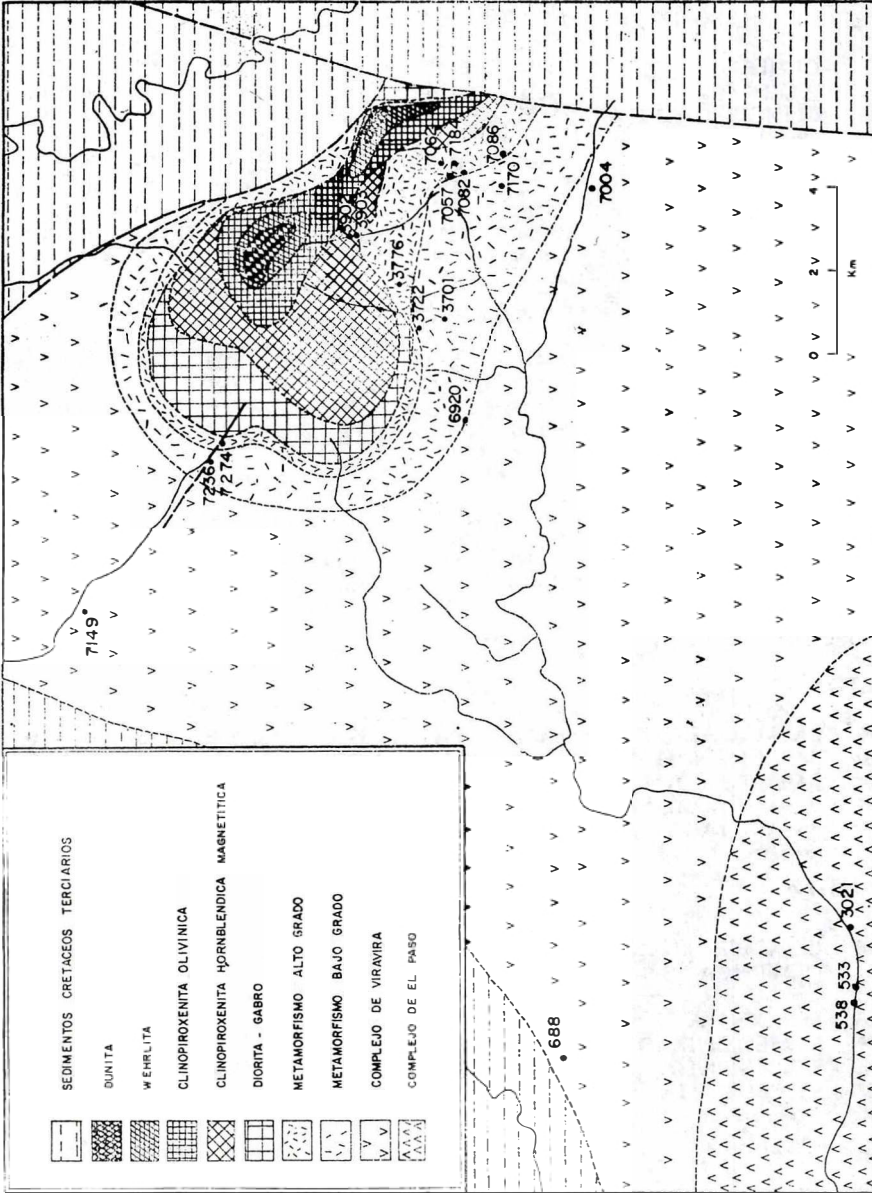


Figura 27: Localización de muestras analizadas para isótopos de Sm - Nd y Rb - Sr.

TABLA 8: ANALISIS DE ISOTOPOS DE Pb/Sr y Sm/Nd DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO, COMPLEJO DE VIRAVIRA Y COMPLEJO DEL PASO. ANALISIS EN BGR (HANNOVER, HOHNDRF).

Muestra	Tipo Roca	^{147}Sm (ppm)	^{144}Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/$ ^{144}Nd	$^{143}\text{Sm}/$ ^{144}Nd	$\text{E}(t)\text{Nd}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\text{E}(t)\text{Sr}$
COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO								
RM 7137	DUNITA	0.0144	(0.0657)	0.2540	0.513010	(+7.1)	0.70335	-16.0
RS 3870	WERHLITA	0.0241	0.0125	0.1886	0.513034	+7.7	0.70326	-17.3
RS 3866	CLINOPIROXENITA OLIVINICA	0.1626	0.6270	0.2540	0.513073	+8.3	0.70348	-14.2
RS 3891	CLINOPIROXENITA	0.2480	1.0345	0.2348	0.513032	+7.6	0.70340	-15.3
RS 3894	CLINOPIROXENITA MAGNETITICA	0.1934	0.7292	0.2598	0.513041	+7.7	0.70350	-13.9
RS 3873	CLINOPIROXENITA OLIVINICO HORNBLENDICA	0.0954	0.4220	0.2213	0.513079	+8.5	0.70392	-7.9

ROCAS CON HORNBLENDITA Y PLAGIOCLASA

RM 7195	HORNBLENDITA	0.6562	3.6030	0.1784	0.513043	+7.9	0.70316	-18.7
RM 7170	DIORITA PERMATITICA	0.6152	3.5830	0.1682	0.513091	+8.9	0.70337	-15.7
RS 3902	DIORITA	0.5710	3.1640	0.1768	0.512986	+8.8	0.70390	-8.2
RS 3960	DIORITA	0.1486	0.6580	0.2213	0.513225	+11.4	0.70338	-15.6

ROCAS METAMORFICAS DE CONTACTO

RM 7039	CORNUBIANITA	0.4436	2.5240	0.1721	0.513042	+7.9	0.70395	-7.5
RS 3888	CORNUBIANITA	0.4972	2.9560	0.1648	0.513088	+8.9	0.70391	-8.1
RM 7034	CORNUBINITA	0.8154	6.5220	0.1224	0.512514	-2.2	0.70434	-2.0

COMPLEJO DE VIRAVIRA

BASALTOS

RS 3564	BASALTO ALTO EN Mg	0.4833	2.7270	0.1736	0.513072	+8.5	0.70346	-14.5
RM 7382	BASALTO ALTO EN Mg	0.3226	1.7040	1.1855	0.513078	+8.6	0.70353	-13.5
MJ 0688	BASALTO ALTO EN Mg	0.3005	1.7180	0.1713	0.513102	+9.1	0.70345	-14.6
RS 3346	BASALTO ALTO EN Mg	0.3096	1.7090	0.1775	0.513143	+9.9	0.70339	-15.4
RM 7009	BASALTO ALTO EN Mg	0.2875	1.6250	0.1733	0.513139	+9.8	0.70342	-15.0

PERIDOTITAS

RM 7428	CLINOPIROXENITA OLIVINICA	0.0713	0.3038	0.2300	0.513073	+8.4	0.70340	-15.3
RM 7463	PERIDOTITA SERPENTINIZADA	0.0473	0.1892	0.2448	0.513069	+8.3	0.70351	-13.8
MJ 0708	SERPENTINITA	0.0026	0.0185	0.1367	0.512958	+6.4	0.70345	-14.6
RM 6633	SERPENTINITA	0.0049	0.0252	0.1899	0.513023	+7.5	0.70331	-16.6

COMPLEJO DE EL PASO

BASALTOS

RS 3023	BASALTO	0.3090	1.3870	0.2183	0.513107	+9.1	0.70601	+21.7
MJ 0533	BASALTO	0.4443	2.1600	0.2015	0.513066	+8.3	0.70402	+22.2
MJ 0588	BASALTO	0.5154	2.3460	0.2152	0.513069	+8.4	0.70604	-6.5

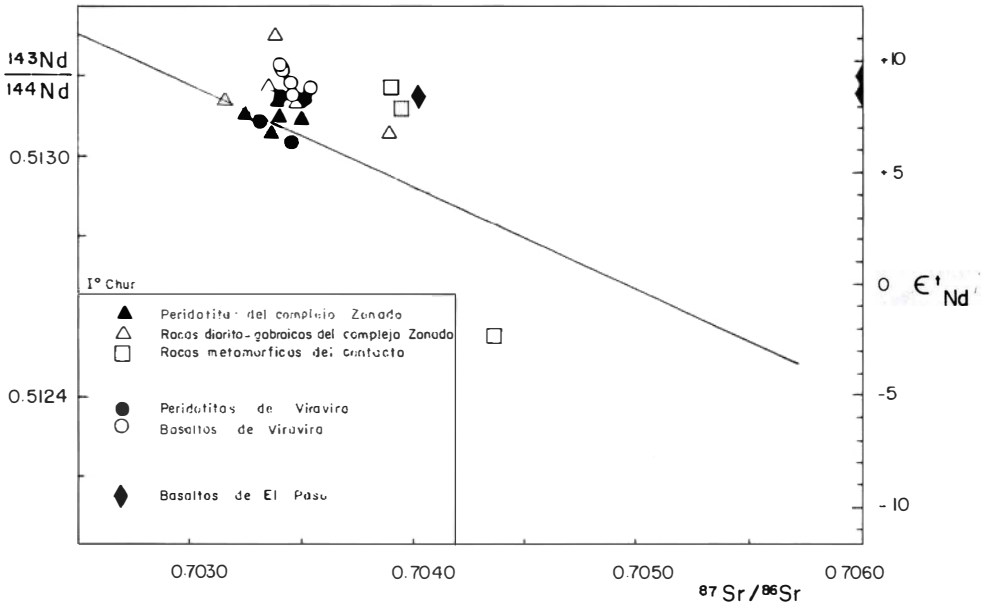


FIGURA 28: RELACION DE ISOTOPOS $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ DE ROCAS ULTRAMAFICAS Y MAFICAS DEL CUZAC COMPLEJO DE VIRAVIRA.

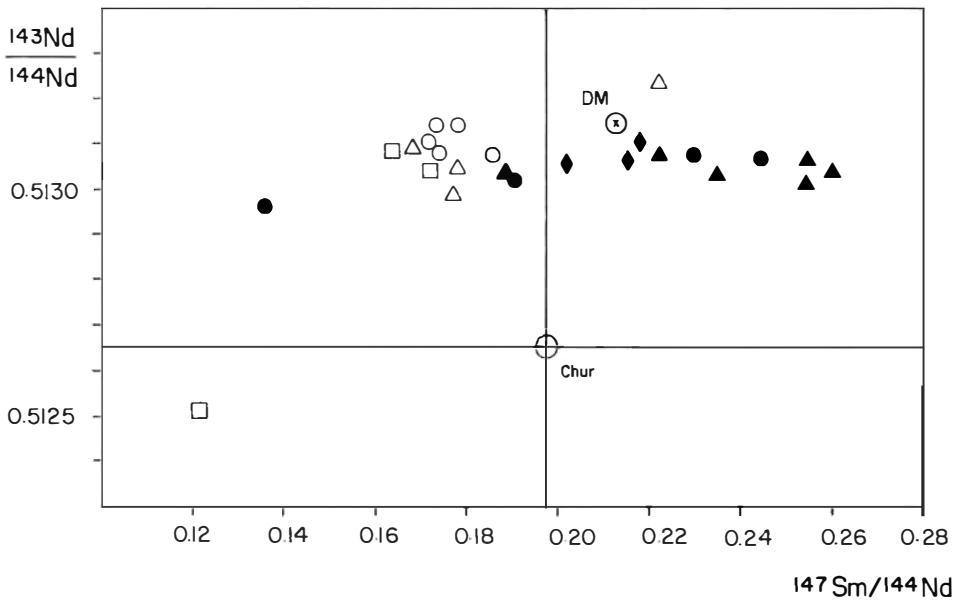


FIGURA 29: DIAGRAMA $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Y VERSUS $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ DE ROCAS ULTRAMAFICAS Y MAFICAS DEL CUZAC Y DEL COMPLEJO DE VIRAVIRA.

7. DATAIONES K-Ar

Para establecer la edad de las rocas del CUZAC fueron utilizadas rocas con contenidos altos de hornblenda aflorando al borde de la intrusión. Aunque estas rocas son, en gran parte, un producto del metamorfismo, su datación dá información sobre la edad de la intrusión ya que la diferencia en tiempo geológico entre intrusión y metamorfismo es mínima (TISL *et al*, 1992, en prep.).

Se analizaron 14 concentrados de hornblenda de rocas magmáticas y cuatro concentrados de hornblendas metamórficas de la facies cornubiana de hornblenda por el método convencional de K-Ar, roca total (Figura 30, Tabla 9). La descripción detallada de este método se encuentra en Seidel *et al*. (1982).

Las hornblendas, por lo general, están frescas y tienen solamente, en casos excepcionales, alteraciones a biotita, clorita o ambas. Parcialmente están intercrecidas con piroxeno de tal manera que su separación completa no es posible. La composición de los anfíboles es edenítica en clinopiroxenita con olivino y hornblenda y cambia hacia variedades más ricas en Fe en clinopiroxenitas hornbléndicas, hornblenditas clinopiroxénicas y rocas diorítico-gabroicas. Solo una muestra (RS-3701) corresponde a una actinolita fibrolítica. La hornblenda posee contenidos de K_2O cerca de 1% y Na_2O mayor a 2% (por peso) siendo relativamente ricas en elementos alcalinos.

Todos los concentrados fueron observados bajo el microscopio para evitar incluir en los análisis muestras con intercrecimientos o alteraciones. La localización de las muestras se da en la Figura 30.

7.1. RESULTADOS DE LAS DATAIONES

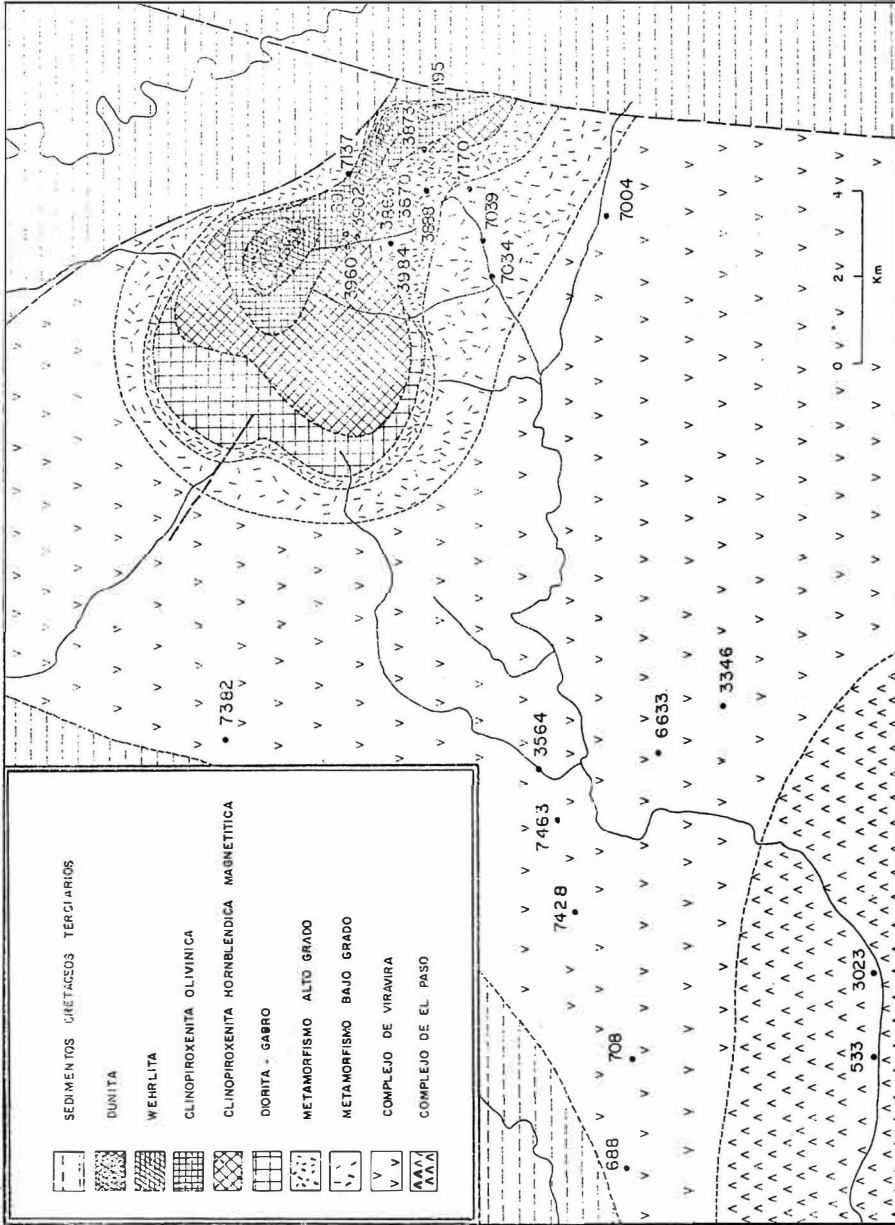
La Figura 31 muestra que los datos se pueden separar en dos grupos:

Un grupo relativamente estrecho (con la tercera parte de los datos) presenta una edad de $20,7 \pm 0,15$ ma. Seis de estos datos tienen una desviación estándar de 0,1 ma que es todavía menos que la incertidumbre analítica asumida. Tres muestras corresponden a clinopiroxenitas hornbléndicas, dos a pegmatitas hornbléndicas y una a diorita.

El otro grupo (con otra tercera parte de los datos) tiene datos de $19,6 \pm 0,15$ ma, variando entre 19,4 y 19,8 ma, que están justamente dentro de la incertidumbre analítica asumida. Estas muestras pertenecen tanto a hornblendas magmáticas como metamórficas.

Las observaciones de campo sugieren una intrusión casi contemporánea de todas las rocas magmáticas del CUZAC y por lo tanto, también un rango definido del tiempo de enfriamiento. Sin embargo, no se puede olvidar que el rango de datos varía entre 21 y 18 ma (Figura 31) el cual corresponde a diez veces la incertidumbre analítica. Se obtuvieron datos diferentes hasta en muestras de la misma localización y en diferentes fracciones de una misma muestra. Por ejemplo, la muestra RS-3903 (cornubianita de hornblenda) tiene $18,6 \pm 0,3$ ma en la fracción de malla 120-100, $20,2 \pm 0,7$ ma en la fracción 100-80 y $19,1 \pm 0,6$ ma para el concentrado total. Por lo anterior, no se puede asumir una historia de enfriamiento simple. Por lo menos una parte de las muestras tiene un sistema de argón perturbado debido a la diferencia observada en los valores.

Como un primer intento para explicar este rango tan amplio de los datos se puede asumir exceso en argón dentro de piroxenos, los cuales están presentes, a veces, en los núcleos o corazones de la hornblenda en algunas muestras. Por esa razón se analizó una fracción de una hornblendita (RM-7057) que tenía un 60% de piroxeno adicional.



F igura 30 Localización de muestras con dataciones

TABLA 9. DATACIONES DE K-AR EN ROCAS HORNBLÉNDICAS DEL COMPLEJO ULTRAMAFICO ZONADO DEL ALTO CONDOTO; ANALISIS: H. KREUZER, BGR

MUESTRA Nº	MINERAL FRACCION	EDAD K/Ar ± 2S (m.a.)	K % POR PESO	ARGON ± 2S	
				ARGON Radiogénico	ARGON Atmosférico (NL/g) STP
HORNBLÉNDITA CLINOPIROXENITA					
PS 3754	>98% Hb, Cz, ICCZ	19.7 ± 0.3	1.184 14	0.911 8	0.242 6
CLINOPIROXENITA HORNBLÉNDITA					
RM 7082	Hb	20.7 ± 0.4	0.670 9	0.542 8	0.335 12
HORNBLÉNDITAS, DIORITA E INYECCIONES DIORITICO PEGMATITICAS					
RM 6920	> 99 % HB Hb II, Cz, EP	20.7 ± 0.3	0.781 10	0.632 7	0.381 8
RM 7057	Hb ± ICPX	21.3 ± 0.3	0.906 10	0.753 7	0.345 6
RM 7057	40% Hb + 60 % Px	28.9 ± 0.5	0.367 6	0.415 4	0.358 4
RM 7082	Hb	19.8 ± 0.3	0.776 10	0.601 5	0.144 3
RM 7066	Hb	20.7 ± 0.3	0.896 11	0.724 6	0.228 4
RM 7170	70% Hb 30% ICCL, EP, PL	20.7 ± 0.3	0.942 11	0.763 7	0.158 5
RM 7184	Hb	19.4 ± 0.3	1.232 14	0.933 9	0.237 8
RM 7195	Hb	19.0 ± 0.3	0.983 10	0.728 5	0.200 6
RM 7236	Hb	21.2 ± 0.3	0.881 11	0.729 7	0.268 5
RM 7274	Hb	20.6 ± 0.3	0.824 10	0.663 7	0.278 7
RS 3776	Hb	19.6 ± 0.3	0.725 9	0.556 5	0.291 4
RS 3902	Hb	19.8 ± 0.3	0.779 10	0.603 6	0.357 5
CORNUBIANITAS DE HORNBLÉNDITA					
RS 3701	50% FIB ICCZ, EP 40-50% Hb ± Cz/EP, BI, CI	18.2 ± 0.4	0.276 5	0.197 3	0.310 4
RS 3722	Hb	19.5 ± 0.4	0.723 9	0.552 9	0.1519 15
RS 3903	(120-100)	18.6 ± 0.3	0.610 8	0.444 5	0.289 6
RS3903	>98% PRS ± OPACOS, BI (80-100)	20.2 ± 0.7	0.621 8	0.490 17	0.174 30
RS 3903	> 98% PRS ± FEH, bl RT, 80% Hb ICQZ, PL 20% Gr, OPACOS, BI, EP, PL	19.1 ± 0.6	0.552 8	0.411 11	0.279 19

Constantes recomendadas por IUGS (STEIGER & JAGER, 1977); Estimaciones del error a un nivel del 95%. Los últimos dígitos corresponden al error analítico. Abreviaturas: anf. = anfíbol; cl = clorita; Cz = clinzoisita; ep = epidota; feh = fe hidróxido; fib = fibrolita; Gr = granate; Hb = hornblenda; lc = anfíbol intercrecido con o reemplazado por los minerales que preceden (por ejemplo: lccl, ep, pl = intercrecido con clorita y epidota, granos de plagioclasa en menor proporción); pl = plagioclasa, prs = anfíbol prismático, principalmente actinolita; cz = cuarzo; px = piroxeno; Bi = biotita; RT = roca total. * Los valores del error se refieren a los últimos decimales.

A esta muestra se le determinó una edad de 28,9 ma. A la misma muestra, pero analizando solo la hornblenda se le determinó una edad de 21,3 m.a. El resultado de 28,9 ma demuestra que realmente el exceso de argón puede ser una explicación para, por lo menos, una parte de la desviación de los datos. Si se asume un exceso de argón como el factor perturbador más importante, entonces los datos más jóvenes serían los menos afec-

tados y en este caso las cifras alrededor 19,6 ma, serían la más probable estimación de la edad de la intrusión. Sin embargo, quedan tres datos en otras muestra, significativamente más jóvenes que los arriba mencionados y todos corresponden a cornubianitas de hornblenda como RS-3903 con una edad de 19,1 m.a, la fracción de malla 120-100 de la misma muestra con 18,6 ± 0,3 ma y una hornblenda fibrolítica (RS-3701) con 18,2 ± 0,4 ma.

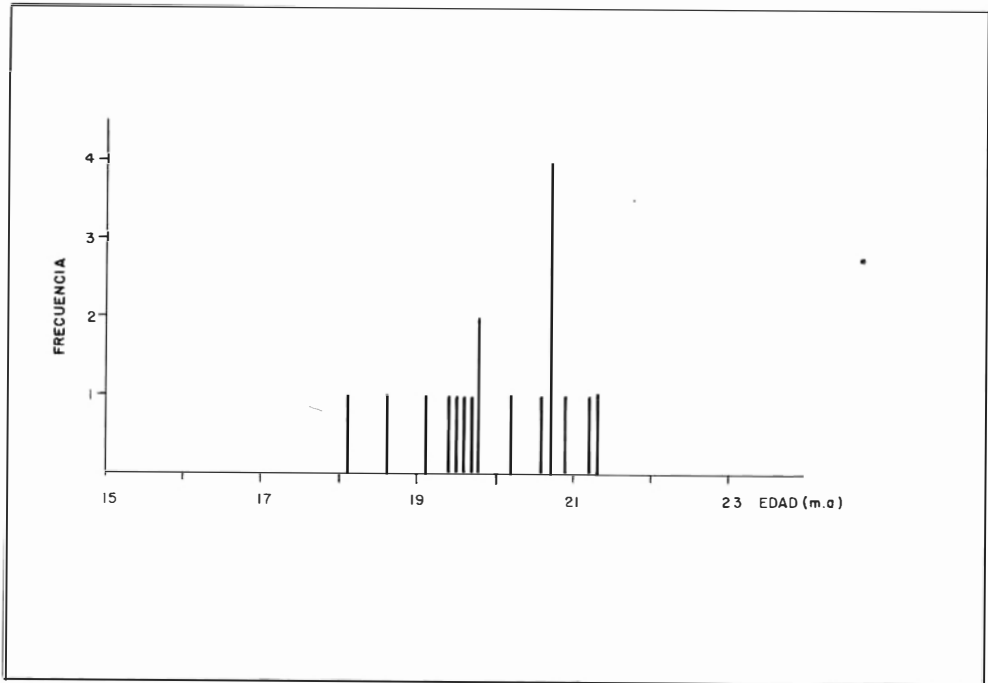


FIGURA 31: HISTOGRAMA DE LOS RESULTADOS DE LAS DATAIONES K/Ar.

Es decir, se tiene el problema de explicar tanto datos demasiado jóvenes como demasiado antiguos. La muestra RS-3701 es una roca milonitizada y la única muestra con hornblenda actinolítica. Por lo tanto, esta muestra no es típica para el complejo y podría indicar un movimiento tectónico posterior. La muestra RS-3903 corresponde a una muestra con dos generaciones de hornblenda con cristales grandes de hornblenda dentro de una matriz de cristales de hornblenda de grano fino. Estos datos más jóvenes podrían indicar un evento térmico posterior a la intrusión. Por otra parte se sabe que hornblendas metamórficas pueden tener un sistema de Ar perturbado debido a exsoluciones. En conclusión, aunque la variación de los datos es mayor que la incertidumbre analítica, tenemos que asumir un evento térmico fuerte con una edad de 20 ma el cual coincide con la intrusión del CUZAC.

8. BIBLIOGRAFIA

- BARNES, S., NALDRET, A.J. & GORTON, M.P. 1985.- *The origin of the fractionation of Platinum - group elements in terrestrial magmas*. Chem. Geol., 53, p. 303 - 323, Amsterdam.
- BARRERO LOZANO D. 1979.- *Geology of the Central western Cordillera, west of Roldanillo, Colombia*. Publ. Geol. Esp. Ingeominas, V.4, 75p.
- BURGATH, K.P., & MOHR, M. 1986.- *Chromitites and Platinum-group Minerals in the Meratus - Bobaris Ophiolite Zone, Southeast Borneo*. In: Proc. Conf. of Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks. Inst. Min. Metal., p. 333-349, London.

- BURGATH, K.P. 1988.- *Platinum - group minerals in ophiolitic chromitites and alluvial placer deposits, Meratus - Bobaris area, southeast Kalimantan.* - In: PRICHARD, H.M., POTTS, P.J., BOWLES, J.F.W. & CRIBB, S.J (Eds) . *Geo-Platinum 87*, p. 383 - 403, Elsevier App. Sc., London.
- CABRI, L.J. & HARRIS, J.C. 1975.- *Zoning in Os-Ir alloys and the relations of the geological and tectonic environments of the source rocks of the bulk Pt: Pt+Os+Ir ratio for placers.* *Can. Min. V.13* pag. 266-274.
- CALLE, B. & SALINAS, R. 1986.- *Geología y geoquímica de la Plancha 165 (Carmen de Atrato).* *Ingeominas, Inf. Téc.*, 140 p. Medellín.
- CASTILLO, J., 1909.- *Geology of the Platinum Deposits of Colombia.* *Min. and Sci.Press.*, 98, N° 24, p. 826-828.
- DUPARC, L. & TIKANOWITCH, M. N. 1920.- *Le Platine et les Gites Platinifères.* *Soc. An. Ed. Sonor, Geneve.*
- DUPARC, L. 1925.- *Les Gites Platinifères de l'Oural en relación avec ceux du Transvaal.* - *Schweiz. Min. Petrol. Mitt.*, 5, p. 147-172, Zürich.
- DUQUE CARO, H., 1989.- *El Arco de Dabeiba: Nuevas aportaciones al conocimiento del Noroccidente de la Cordillera Occidental.* *V Cong. Col. Geol. Mem. Tomo I*, 108-126. Bucaramanga.
- ESCORCE, E. 1971.- *Ocurrencias Minerales en el Departamento del Chocó.* *Ingeominas, Inf. Téc.* 49 p., Medellín.
- ESPINOSA A. 1980.- *Sur les roches basiques et ultrabasiques du bassin du Patía (Cordillere Occidentale des Andes Colombiennes: Etude Géologique et Pétrographique.* *These 1970, Université de Genève.* 241p.
- FARABEE, W.C. 1921.- *A golden heard from Ecuador.* *Pennsylvania, Uni. Mus. Jour.*, 12, p.43-52, Pennsylvania.
- FAURE, G. 1987.- *Principles of isotope geochemistry.* 2nd Ed., 589p., John Wiley & Sons, New York.
- FINDLAY, D.C . 1969.- *Origin of the Tulameen Ultramafic Gabro Complex, Southern British Columbia.* *Can. Jour. Earth Sci.*, 6, p.339-425, Ottawa.
- HAGEN, D., WEISER, TH. & HTAY,T. 1990.- *Platinum - Group Minerals in Quaternary Gold Placers in the Upper Chindwin Area of Northern Burma.* *Mineral. & Petrol.*, 42, p. 265 - 286, Berlin.
- HASKIN, L.A., HASKIN, M.A., FREY, F.A. & WILDEMAN, T.R . 1968.- *Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths.*- In: AHRENS, L.H. (Ed.): *Origin and distribution of the elements.*- 1, pag. 889 - 911, Oxford.
- HAWKESWORTH, C.J., NORRY, M.J., RODDICK, J.C., BAKER, P.E., FRANCIS, P.W. & THORPE, R.S. 1979c.- *$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and incompatible element variations in calcalkaline andesites and plateau lavas from South America.*- *Earth Planet. Sci. Letters*, 42, 45 - 57.
- HUBACH, E. 1930.- *Anotaciones sobre la estructura de la Cordillera Occidental y sobre el estudio del Platino.* *Bol. Minas y Petrol.*, IV, 121 - 22, p. 328 - 335, Bogotá.
- IRVINE, T.N. & FINDLAY, D.C. 1972.- *Alpine - type peridotite with particular reference to the Bay of Islands Igneous Complex.* *Publ. Earth Phys. Branch Dep., Energy and Mines Res. Can.*, 42, p. 97 - 128, Ottawa.

- DIRVINE, T.N. 1974.- *Petrology of the Duque Island Ultramafic Complex, Southeastern Alaska*. Geol. Soc. Can., Mem. 138, 240p., Ottawa.
- JENSEN, L. J. 1976.- *A new cation plot for classifying subalkalic*. Ministry of Natural resources. Ontario. Division Of Mines. 22p.
- KELLNER, G. 1925.- *Los yacimientos de platino de la República de Colombia*. Ingeominas, Inf. Téc., Bogotá.
- KUNZ, G. 1918.- *Platinum with Special reference to Latin America*. Bull. Panam. Univ. ,45, N° 5, p. 606 - 626.
- LEHMANN, J. 1981.- *Equilibrage en subdolitus du couple olivine - spinelle*. Application aux chromitite du Nouvelle Calédonie. These ENSM, Paris.
- MERTIE, J.B. 1969.- *Economic Geology of the Platinum Metals*. Geol. Surv. Prof. Pap. 630, p. 63-69, Washington.
- MURRAY, C.G. 1972.- *Zoned Ultramafic Complex of the Alaska type: Feeder pipes of Andesitic volcanoes*.- Geol. Soc. Am., Mem. 132, p.313-334, Princeton.
- MUÑOZ, R., SALINAS, R., JAMES, M., BERGMANN, H. & TISTL, M. 1990.- *Mineralizaciones Primarias de Minerales del Grupo del Platino y oro en la cuenca de los ríos Condoto e Iró (Chocó, Colombia)*. Convenio Colombo - Alemán, Proyecto Condoto, Fase 1, Ingeominas, Inf. Téc. 304 p., Medellín.
- MUSALLAM, K., JUNG, D. & BURGATH, K.P. 1981.- *Textural Features and Chemical Characteristics of Chromites in Ultramafic Rocks, Chalkidiki Complex (Northeastern Greece)*. TPM Tschermaks Min. Petr. Mitt. 29, p. 75 - 101, Berlín.
- NALDRETT, A.J., HOFFMANN, E.L., GREEN, A.H., CHEN - LIN CHOU & NALDRETT, S.R. 1979.- *The composition of Ni - sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au*. Can. Mineral., 17, p. 403 - 415.
- NIXON, G.T. CABRI, L.J. and LAFLAMME, J.H.G. 1989.- *The origin of the platinum nuggets in Tulameen Placers: A mineral chemistry approach with potential for exploration*. Explo. in B.C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum. B83-B89.
- NIXON, G.T. & RUBLEE, V.J. 1987.- *Alaskan - type Ultramafic Rocks in British Columbia: New concepts of the structure of the Tulameen Complex*. B.C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Geological Fieldwork 1987, paper 1988 - 1, p. 281 - 294.
- RAICEVIC, D. & CABRI, L.J. 1976.- *Mineralogy and Concentration of Au and Pt - Bearing Placers from the Tulameen River Area in British Columbia*. Can. Inst. Min. Metal., CIM Bull., p. 111-119, Ottawa.
- RAZIN, L.V. 1971.- *Problem of the origin of platinum metallization of forsterite dunites*. Internat. Geol. Rev., 13, No 5, p. 776 - 788, Moscow.
- _____, 1976.- *Geologic and Genetic Features of Forsterite Dunites and their Platinum Group Mineralization*. Econ. Geol., 71, p. 1371 - 1376, Lancaster.
- _____, 1954b.- *Exploración del río Tarena, Municipio de Tadó, Depto del Chocó*. Inst. Geol. Nal., Inf. Téc., 15 p., Bogotá.
- OVALLE, J. 1920.- *Platinum in Colombia*. Eng. Min. Journ. V.110, 19, Pag. 907-908.

- RESTREPO A. 1954(a).- *Contribución al estudio de los Yacimientos primarios de platino del río Condoto, Dpto del Chocó*. Inst. Geol. Nal. Inf. Téc. 12p. Bogotá.
- RESTREPO A. 1954(b).- *Exploración del río Tarena. Mpio de Tadó, Chocó*. Inst. Geol. Nal. Inf. Téc. 15p. Bogotá.
- RICHARD, P., SHIMIZU, N. & ALLEGRE, C.J. 1976.- *143 Nd/146 Nd, a natural tracer: an application to oceanic basalts*.- Earth Planet. Sci. Lett., 31, p. 269 - 278.
- SALINAS, R. & ZAPATA, G. 1991.- *Estudio de evaluación preliminar de algunas ocurrencias minerales en los ríos Condoto y Alto San Juan*. Inf. Téc. Ingeominas, 53 p., Medellín.
- SALINAS, R & TISTL, M., 1991.- *A Tertiary Zoned Ultramafic Complex and Komatiitic Basalts from Condoto, Chocó, NW Colombia*. Zbl. Geol. Paleont., Teil 1. (6), p. 1659 - 1676, Stuttgart.
- STRECKEISEN, A., 1976.- *To each plutonic rock its proper name*. Earth Sci. Rev. 1-3, 12p. Amsterdam.
- SEIDEL, E., KREUZER, H. & HARRE, W., 1982.- *A late Oligocene/early Miocene high pressure belt in the External Hellenides*. Geol. Jb., E 23, 165 - 296.
- SINGEWALD, Q.D., 1950.- *Mineral Resources of Colombia (Other than Petroleum)*. Geol. Surv. Bull., 964 - B, p. 169 - 175, Washington.
- SLANSKY, E. JOHAN, Z., OHNENSTETTER, M., BARRON, L.M. & SUPPEL, B. 1991.- *Platinum Mineralization in the alaskanc-type Intrusive Complexes Near Fifield, N.S.W., Australia*. Part 2: Platinum - Group Minerals in Placer Deposits at Fifield.- Min. and Petrol., 43, p. 161 - 180, Berlín.
- STEIGER, R.H. & JAGER, E., 1977.- *Subcommission on Geochronology*. Convention on the Use of Decay Constants in Geo - and Cosmochronology. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359 - 362.
- TAYLOR, H.P., 1967.- *The zoned ultramafic complexes of Southeastern Alaska*. In WILLIE, P.J. (Ed): *Ultramafic and Related rocks*.- John Wiley and Sons, p. 97 - 121, New York.
- TAYLOR, H.P., Jr & NOBLE, J.A., 1969.- *Origin of the Ultramafic Complexes in Southeastern Alaska*. 21 st. Internat. Geol. Congr., Proc. Nº 2, Sec. 13, p. 175 - 187, Copenhagen.
- TISTL, M., BURGATH, K.P., HOEHN-DORF, A., KREUZER, H., MUÑOZ, R. & SALINAS, R., 1992.- *K/AR Dating, Sm-Nd and Rb-Sr Systematics of Tertiary Ultramafic Complexes at Condoto, Chocó, NW Colombia*. (En prep.).

PERSONAL RESPONSABLE DE LOS CONCEPTOS EMITIDOS EN ESTE TRABAJO:

- PERSONAL DE INGEOMINAS: Ingeniera Geóloga Rosalba Salinas Echeverri: Capítulos 1, 2, 3, 4, 5, 5.4.
- PERSONAL DE LA BGR: Michael Tistl: Capítulos 6 y 7.
Klaus P. Burgath: Capítulos 5, 5.1, 5.2, 5.3.

**REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA**

**INVESTIGACION PARA LA PREVENCIÓN DE DESASTRES
POR DESLIZAMIENTOS**

**"METODOLOGIA PARA LA CARTOGRAFIA DE ZONAS
DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS A
PARTIR DE SENSORES REMOTOS Y S.I.G."**

Por:

GERMAN VARGAS CUERVO*
Geólogo M.Sc Sensores Remotos

Febrero de 1994

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	63
ABSTRACT.....	63
1. INTRODUCCION.....	63
1.1. DEFINICIONES Y REFERENCIAS.....	64
1.2. AREA DE ESTUDIO.....	65
2. METODOS Y TECNICAS.....	65
2.1. PRODUCTOS NUMERICOS DE BASE.....	69
2.2. PROCESAMIENTO DE IMAGENES.....	69
2.3. ANALISIS ESTADISTICO.....	74
3. ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL TERRENO.....	75
3.1. DESLIZAMIENTOS.....	76
3.2. USO Y OCUPACION DEL SUELO.....	78
3.3. GEOLOGIA.....	83
3.4. GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	87
3.5. MAPAS DERIVADOS DEL MODELO NUMERICO DE TERRENO.....	89
3.5.1. ALTITUD RELATIVA.....	90
3.5.2. INCLINACION DE PENDIENTES.....	90
3.5.3. ORIENTACION DE LA PENDIENTE.....	92
3.5.4. DRENAJE Y MICROCUCENCAS.....	93
4. ELABORACION DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	96
4.1. VALIDACION DEL METODO.....	104
4.2. DISCUSION DE RESULTADOS.....	109
4.3. PERSPECTIVAS.....	111
5. AGRADECIMIENTOS.....	111
6. CONCLUSIONES.....	111
7. REFERENCIAS.....	112

FIGURAS

1 Localización del área de Estudio.....	66
2 Organigrama del método de trabajo.....	67
3 Imagen SOPT-XS.....	70
4 Imagen LANDSAT-TM.....	71
5 Modelo Numérico de Terreno.....	72
6 Ortoimagen Spot en falso color del área de estudio.....	73
7 Ortoimagen Spot con realce espectral "color natural" índices físicos y análisis en componentes principales.....	74
8 Esquema de análisis estadístico de mapa-imágenes sobre un SIG.....	76
9 Vistas tridimensionales de los deslizamientos del Salitre y la Chapa.....	79

10	Imagen-mapa de coronas de deslizamientos.....	80
11	Imagen-Mapa de densidad de coronas de deslizamientos.....	81
12	Imagen-mapa de ocupación y uso actual del suelo.....	82
13	Imagen-mapa geológico estructural.....	84
14	Mapa geológico estructural superpuesto a la ortoimagen Spot.....	85
15	Diagramas rosa de lineamientos.....	88
16	Imagen-mapa de densidad de lineamientos.....	89
17	Imágenes-mapas morfométricos derivados del MNT.	91
18	Mapa hidrográfico derivado del MNT de red de drenaje y microcuencas.....	94
19	Mapa de densidad de red de drenaje.....	95
20	Imágenes-mapas de susceptibilidad geológica a los deslizamientos.....	97
21	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la ocupación y uso del suelo a los deslizamientos.....	98
22	Imágenes-mapa de susceptibilidad de la inclinación de la pendiente a los deslizamientos.....	99
23	Imágenes-mapas de susceptibilidad de densidad de lineamientos a los deslizamientos.....	100
24	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la altitud relativa a los deslizamientos.....	101
25	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la densidad de drenaje a los deslizamientos.....	102
26	Imágenes-mapas de susceptibilidad de la orientación de las pendientes a los deslizamientos.....	103
27	Esquema de superposición digital de imágenes sobre un SIG para la elaboración de mapas de susceptibilidad del terreno hacia los deslizamientos.....	104
28	Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de tipo 1.....	105
29	Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de tipo 2.....	106

30	Susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de tipo 3.....	107
31	Susceptibilidad del terreno hacia los deslizamientos en general.....	108

TABLAS

1	Cálculo estadístico del peso de las unidades de uso y ocupación del suelo hacia los deslizamientos.....	83
2	Cálculo estadístico del peso de las unidades geológicas hacia los deslizamientos.....	86
3	Cálculo estadístico del peso de las unidades de densidad de lineamientos hacia los deslizamientos.....	90
4	Cálculo estadístico del peso de las unidades de altitud relativa hacia los deslizamientos.....	92
5	Cálculo estadístico del peso de las unidades de inclinación de pendiente hacia los deslizamientos.....	92
6	Cálculo estadístico del peso de las unidades de orientación de pendientes hacia los deslizamientos.....	93
7	Cálculo estadístico del peso de las unidades de densidad de drenaje hacia los deslizamientos.....	95
8	Intervalos de susceptibilidad.....	96

RESUMEN

Sistemas de Información Geográfica (GIS) y mapas digitales obtenidos de imágenes SPOT-XS y LANDSAT-TM y un Modelo Digital de Terreno (MNT), han facilitado desarrollar un nuevo método de correlación para obtener diferentes mapas de susceptibilidad del terreno a los deslizamientos. Este método, basado sobre un análisis estadístico, determina cuantitativamente el peso o grado de susceptibilidad de cada unidad de terreno hacia tres tipos de deslizamientos, clasificados por su edad, actividad y dimensiones: mayor activo, menor activo y antiguo inactivo.

Siete factores de terreno han sido considerados en este estudio: litología, estructural (densidad de lineamientos), uso y ocupación del suelo, inclinación de pendientes, orientación de pendientes, y densidad de drenaje.

Este estudio también demuestra que en áreas de frecuente nubosidad donde es difícil obtener imágenes estereoscópicas Spot, la combinación de SPOT-XS y LANDSAT-TM por correlación automática permitió obtener la estereoscopía y un MNT, el cual fue de gran utilidad en la cartografía de los mapas de susceptibilidad.

El área piloto se localiza en la cordillera oriental de los Andes Colombianos sobre el valle alto del río Chicamocha, la cual representa un laboratorio natural para la aplicación del método aquí desarrollado.

ABSTRACT

Geographical Information Systems (GIS) and digital maps obtained from SPOT and LANDSAT image data and a Digital Elevation Model (DTM), have allowed the development of a new method of "correlation" to obtain different maps of

landslides terrain susceptibility. This method based on a statistical analysis quantitatively provides the weight or grade of susceptibility for each terrain unit with regard to three landslides types classification taken in account their age, activity and size (mayor active, minor active and ancient inactive).

Seven terrain factors have been considered in this study: lithology, structure (lineament density), landuse, slope degree, slope aspect and drainage density.

This study also shows that, where it was possible to obtain stereopair from Spot images in this frequently cloud covered area, combination of Spot-XS and Landsat-TM data by autocorrelation provide a DTM, which is useful for landslide susceptibility mapping.

The pilot area is located in the Chicamocha Valley in the Eastern Cordillera of Colombian Andes, which provide a natural laboratory for the application of the method developed here.

1. INTRODUCCION

En los Andes Colombianos, entre las catástrofes naturales los movimientos en masa son los fenómenos mas frecuentes y ampliamente distribuidos.

Hasta hace una época reciente el estudio e inventario de los movimientos de terreno fue basado en interpretación de fotografías aéreas en combinación con levantamientos de campo (RITCHIE, 1958).

La alta resolución espacial de las fotografías aéreas y su capacidad de análisis estereoscópico, las hacen de hecho una herramienta de gran utilidad. Sin embargo, su uso en estudios regionales muestra limitantes en cuanto a la disposición de vuelos, la diversidad de

escalas, la densidad de interpretación, y su carácter de análisis cualitativo, lo cual hace de la teledetección satelital y los sistemas de información geográfica (SIG) una herramienta de mayor capacidad.

Las imágenes de satélite (Spot, Landsat, etc.) presentan grandes ventajas en la identificación y cartografía de elementos del terreno. En especial por: la alta resolución espectral determinada por varias bandas (planos imagen) de diferente longitud de onda, la facilidad de interpretación digital a varias escalas (resolución espacial por pixel de 10-20 m en imágenes Spot y de 30 m en imágenes Landsat TM), la capacidad de producir múltiples planos-imagen por procesamiento digital y el carácter numérico de su información, entre otras.

Un SIG permite la entrada y el manejo ordenado y preciso de la información en cualquiera de sus formas (datos, mapas, etc.) para su análisis, modelamiento, actualización y presentación.

Esta investigación tiene por objeto principal establecer una metodología para la cartografía de mapas de susceptibilidad a los movimientos de terreno, determinando cuantitativamente el "peso" de cada parámetro o unidad de terreno.

La posición fisiográfica de la región y la diversidad de factores geológicos, estructurales y geomorfológicos hacen del área un laboratorio natural para el estudio de los fenómenos de remoción en masa.

Los resultados aquí presentados hacen parte del trabajo de tesis de grado presentado a la Universidad de París 6 (VARGAS, 1991) y se enmarca dentro del programa "GARS" (Geological Applications of Remote Sensing) en Colombia, desarrollado bajo el auspicio de la IUGS y UNESCO y la participación de INGEOMINAS, BRGM (Francia) UNIVERSIDAD DE PARÍS 6 (Francia), y el ITC de Holanda.

1.1. DEFINICIONES Y REFERENCIAS

El término "zonación" (Varnes, 1984) se aplica en sentido general a una división de la superficie terrestre en áreas que representan diferentes grados de amenaza (hazard) potencial o actual hacia deslizamientos u otros movimientos en masa.

La zonación o zonificación sobre áreas de actividad humana, involucra tres términos principales: amenaza, riesgo y vulnerabilidad. Los conceptos y criterios que involucran estos términos más aceptados a nivel mundial son los propuestos por la UNDRO (Office of the United Disaster) y la UNESCO:

Amenaza natural (Hazard) determina la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dañino potencial dentro de un lapso específico y en un área determinada.

Vulnerabilidad (V) determina el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos bajo riesgo como resultado de un fenómeno natural de una cierta magnitud. Es expresado sobre una escala de "no daño" a "pérdida total".

Riesgo específico (RS) determina los daños esperados debido a la ocurrencia de un fenómeno natural. Puede ser expresado por el producto de la amenaza (H) y la vulnerabilidad (V)

Elementos en riesgo (E) determina la población, propiedades, actividades económicas, incluyendo servicios públicos, etc. en riesgo en un área dada.

Riesgo total (RT) determina el número de personas afectadas, daños en propiedades o interrupción de actividades económicas, esperadas debido a un fenómeno natural. Es el producto de riesgo específico (RS) y elementos en riesgo (E).

$$RT = (E)(RS) = (E)(HxV)$$

El término de susceptibilidad a los deslizamientos (Hazard susceptibility) ha sido considerado por varios autores (HANSEN, 1984) como un "riesgo" relativo y probabilístico en el cual se compara una situación con otra, bajo la existencia de eventos de amenaza en un tiempo pasado.

Aquí se considera el término "susceptibilidad" como el grado de probabilidad de ocurrencia o reactivación de un movimiento de terreno específico, en un área determinada y en un lapso relativo.

Evelyn *et al.* (1978) introducen la cartografía computarizada (en una estructura de celdas) de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos a partir de dos factores de análisis: geología e inclinación de pendientes.

Gupta y Joshi (1990); Scanvic y Girault (1989); Van Westen, (1989); Scanvic y Notti (1990); Scanvic *et al.* (1990); Carrara *et al.* (1991); Vargas, (1991); Leroi *et al.* (1992); Pachauri y Pant (1992); Rengers *et al.* (1992) y otros autores han perfeccionado la cartografía de estos mapas a través de análisis estadísticos a partir de técnicas de sensores remotos y SIG.

En esta investigación se dan nuevos aportes en este campo, especialmente en la utilización de las imágenes de satélite Spot y Landsat, modelos de terreno y SIG para la cartografía temática de los diferentes parámetros de terreno, y en la determinación cuantitativa del "peso" o susceptibilidad de cada parámetro y unidad de terreno hacia los movimientos en masa, agrupados en tres categorías. Esto ha permitido obtener una serie de mapas temáticos de susceptibilidad, confiables para estudios regionales.

1.2. AREA DE ESTUDIO

El área de este estudio se localiza sobre los Andes Orientales Colombianos en la cuenca alta del río Chicamocha, en

jurisdicción del departamento de Boyacá. Su extensión es de 110 km² (Figura 1).

Paz de Río, principal población del área, registra 4.300 habitantes en su casco urbano y 4.800 en la zona rural. Geográficamente esta población se localiza en las siguientes coordenadas respecto al meridiano de Greenwich:

Latitud 5°59' Norte
Longitud 72°45' Oeste

La altitud en el área varía entre 2200 m s.n.m. en la parte septentrional del valle del río Chicamocha y 3600 m.s.n.m en la zona de la Chapa.

Cuatro unidades microclimáticas se registran en la zona (IGAC, 1984):

Frío seco: precipitación anual entre 500 y 1000 mm, altitudes entre los 2000 y 3000 m, y temperaturas de 11 a 18°C.

Frío húmedo: precipitación anual entre 1000 y 2000 mm, altitudes entre los 2000 y 3000 m, y temperaturas de 11 a 18°C.

Muy frío húmedo (páramo bajo): precipitación anual entre 500 y 1000 mm, altitud entre los 3000 y 3600 m, y temperaturas de 8 a 11°C.

Muy frío (páramo alto): precipitación anual entre los 1000 y 2000 mm, altitudes entre los 3600 y 4200 m, temperaturas menores de 8°C.

2. METODOS Y TECNICAS

La metodología aquí desarrollada, se fundamenta en la utilización de imágenes de satélite, modelos numéricos de terreno (MNT) y sistemas de información geográfica (SIG) para el estudio y zonificación de fenómenos de remoción en masa. (Figura 2).

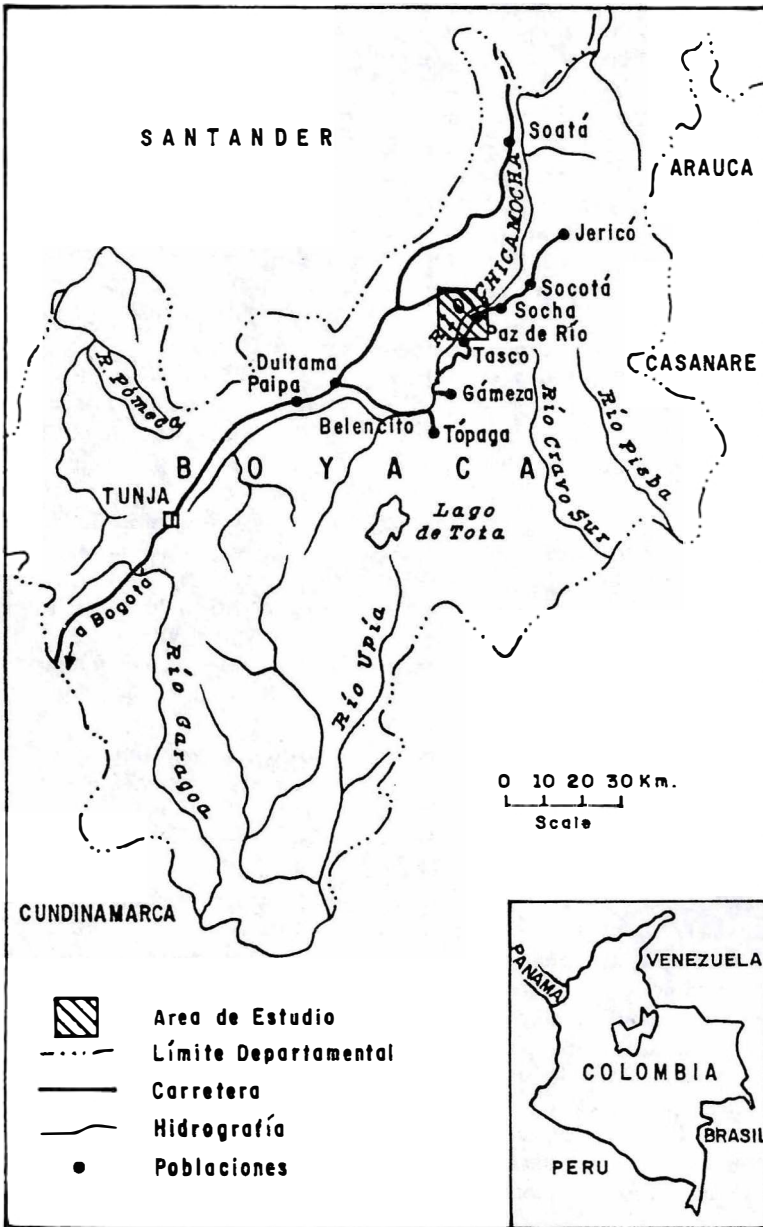


FIGURA 1: LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

METODO DE TRABAJO

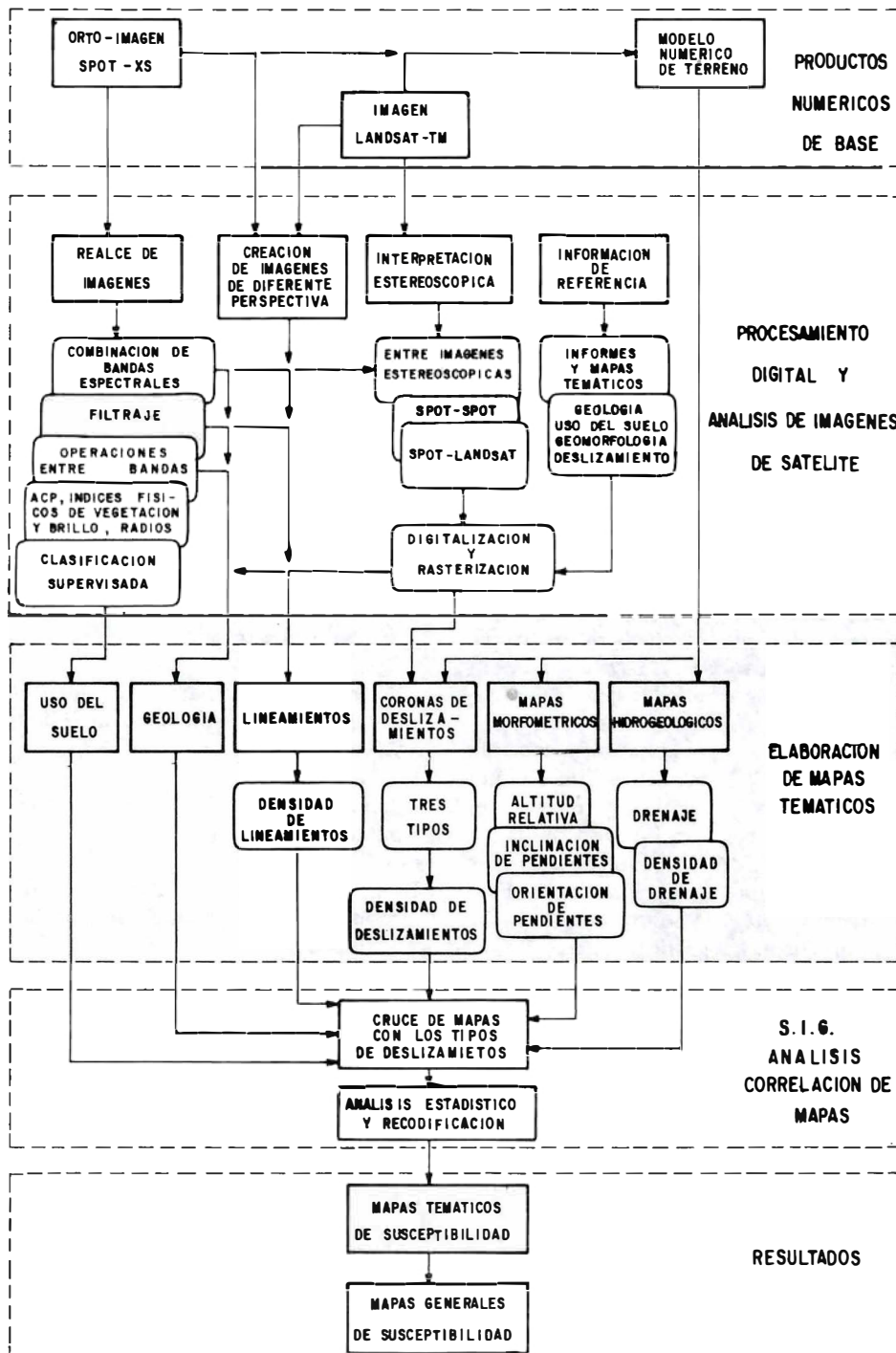


FIGURA 2: ORGANIGRAMA DEL METODO DE TRABAJO.

La elaboración de mapas de susceptibilidad por estas técnicas, comprende cuatro fases principales:

En la primera fase se indican diferentes técnicas de procesamiento digital para el realce del contraste de imágenes de satélite con el objeto de resaltar e identificar los rasgos geológicos, geomorfológicos y forestales.

También aquí se presentan técnicas de combinación de productos digitales (imágenes y MNT) para la obtención de productos estereoscópicos y vistas tridimensionales, utilizando el programa VVUE-3D de Istar.

En la segunda fase se presentan diferentes procesos de cartografía digital para la obtención de los diferentes mapas temáticos (geología, ocupación del suelo, deslizamientos, pendientes, etc.) a partir de imágenes Spot XS, Landsat-TM y un modelo numérico de terreno.

La tercera fase presenta un método de análisis digital estadístico que permite determinar cuantitativamente el "peso" o la relación de cada unidad o parámetro de terreno sobre tres diferentes tipos de deslizamientos. Este proceso se realiza sobre un sistema de información geográfica.

Finalmente se obtienen los diferentes mapas digitales que representan la susceptibilidad de una unidad o parámetro del terreno hacia cada deslizamiento clasificado (tres tipos), o del terreno en general recodificando las imágenes-mapas base en términos de susceptibilidad.

Un sistema de información geográfica (SIG), es un sistema computarizado que permite la entrada, almacenamiento, representación y salida eficiente de datos espaciales (mapas) y atributos (descriptivos) de acuerdo con especificaciones y requerimientos concretos.

Los SIG son sistemas diseñados para trabajar con datos, mapas e imágenes referenciados por coordenadas geográficas o imágenes de igual tamaño (filas y columnas) y la misma resolución espacial (píxeles) o múltiplo de ésta.

La superposición manual de mapas o datos utilizando diferentes instrumentos (mesas de luz, planímetros, etc) constituye un procedimiento semejante al de un SIG digital; sin embargo, los programas digitales presentan grandes ventajas en los siguientes aspectos (VAN WESTEN, 1989).

Los datos o archivos almacenados en forma digital pueden ser fácilmente consultados, modificados y recuperados.

La información espacial y no espacial puede ser analizada simultáneamente en una forma relacional.

Permite determinar rápidamente la evolución de un fenómeno en el tiempo y el espacio.

Son de gran utilidad en la creación de modelos cartográficos.

Los modelos conceptuales pueden ser probados rápidamente facilitando su evaluación.

Permite analizar y producir información a diversas escalas cartográficas.

Permite la transformación de datos con estructura vectorial a raster y viceversa.

Por otra parte el almacenamiento de datos espaciales en un formato digital se puede realizar bajo dos modelos de estructuras de datos geográficos principales: estructuras vectoriales o de segmentos y estructuras raster o de celdas. La diferencia entre éstos dos tipos de modelos es que la estructura vectorial asume un espacio geométrico, mientras que el modelo raster divide el espacio geográfico en elementos

o celdas independientes con un valor que representa un atributo.

2.1. PRODUCTOS NUMERICOS DE BASE

A continuación se describen las principales características de los productos numéricos utilizados en este estudio.

Una escena Spot "HRV2" (alta resolución en el visible) de referencia geográfica K 649/ J 338, registrada el 16 de febrero de 1989, con vista oblicua de 26.5° en dirección Este, con un tamaño de 4500 por 3600 pixeles en columna y fila y un nivel de corrección geométrica y radiométrica inicial 1B, resolución espacial al suelo de 20 m modo multibanda o XS. (Figura 3).

Una escena Landsat-Tm (Thematic mapper) de referencia Path 007/Row 56 del 11 de enero de 1988. Esta imagen tomada en vista vertical tiene una resolución espacial por pixel de 30 m. Este producto fue útil para la generación del modelo digital del terreno y para las interpretaciones visuales estereoscópicas como producto fotográfico. (Figura 4).

Un modelo numérico de terreno generado por la Sociedad Istar de Francia, por el método de correlación automática entre las imágenes Spot-XS y Landsat-TM y puntos de control sobre un mapa topográfico escala 1:100.000. Posee una resolución de 40 m en X-Y, y de 20 m en Z. (Figura 5).

La técnica de correlación automática sobre dos imágenes estereoscópicas se basa en la determinación de la altitud entre dos puntos homólogos de cada imagen (PANTON, 1978; MASSON D'AUTUME, 1978; DOUFOUR y ABGRALL, 1983; MASSON D'AUTUME, 1984; PERTL, 1985; DUBAYAH *et al*, 1986; JULIEN, 1987; CAPELLINI *et al*, 1991). Hasta el momento la correlación automática de imágenes numéricas para la obtención de modelos numéricos de

terreno se há aplicado principalmente a imágenes Spot (DUPERET, 1990) y fotografías aéreas digitales. Sobre imágenes Landsat MSS y TM, Simard and Krishna, 1983; Simard *et al.*, 1984; Enhlers y Welch, (1987), han aplicado esta técnica utilizando la zona de traslape de imágenes registradas en órbitas adyacentes.

Un primer ensayo de obtener MNT por correlación de imágenes Spot-XS y Landsat TM ha sido realizado por la Sociedad Istar de Francia en el marco de esta investigación.

2.2. PROCESAMIENTO DE IMAGENES

El procesamiento digital de los productos digitales se desarrolló en el Departamento de Teledetección del B.R.G.M. de Francia, utilizando los programas IIS System 600 versión 4.0 (USA) y ARBORECENCE y VUE-3D de ISTAR (Francia). Las restituciones a color fueron generadas sobre una impresora térmica VERSATEC modelo C2766).

Una vez visualizada el área de interés sobre la ortoimagen Spot de 3600 x 4500 pixeles en línea y columna, se seleccionó una imagen de 512 x 512 pixeles, que tiene como centro la población de Paz de Río. De igual forma se extrajo el modelo digital de terreno para esta área de aplicación. Dado que este producto está codificado sobre 16 bits el tamaño de esta ventana es de 256 x 256 pixeles.

Sobre la subimagen Spot de trabajo se aplicó un stretching de tipo lineal y un realce de bordes mediante la aplicación de filtros de alta frecuencia (Figura 6). Para el realce espectral de la imagen SPOT se generaron dos índices físicos: de vegetación (IV) y brillo (IB). El primero permite establecer claras diferencias entre los diversos tipos de vegetación y el segundo discrimina suelos y rocas desnudos y resalta rasgos de algunas formas de terreno asociadas a fenómenos morfo-dinámicos. A partir de estos dos índices como imágenes en monocanal se realizó

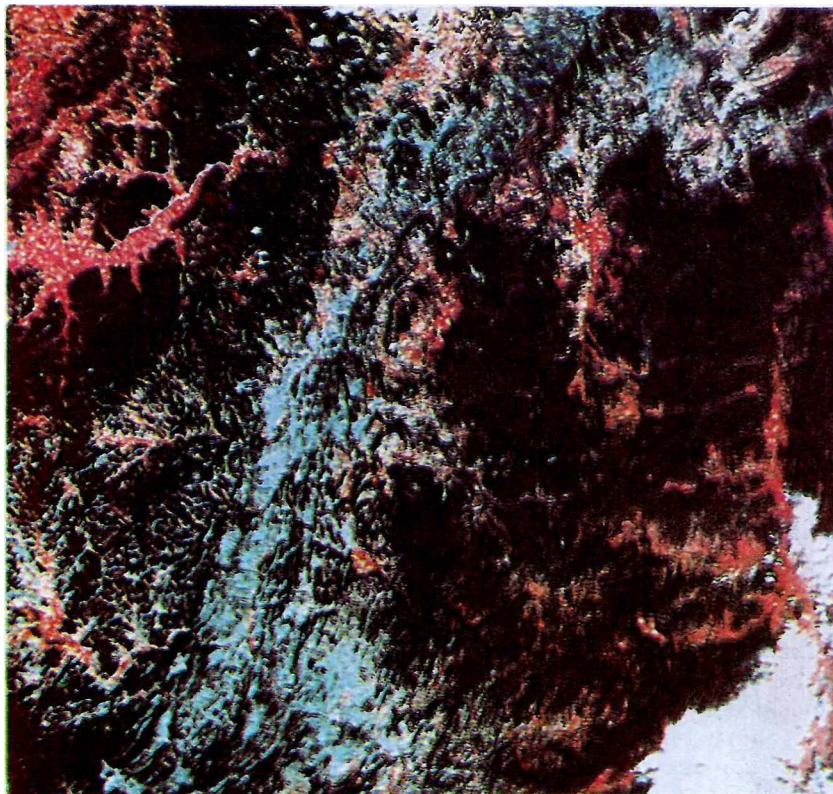


FIGURA 3: ESCENA SPOT-XS "HRV2" K 649 / J 338, 16-02-1989, 4500 X 3600 PÍXELES EN COLUMNA Y FILA, NIVEL 1B, BANDAS 3,2,1 (R,V,A)



FIGURA 4: CUADRANTE NW DE LA ESCENA LANDSAT-TM. PHAT 007/ROW 56, 11-01-1988, 2983 X 4220
PIXELES EN FILA POR COLUMNA. BANDAS 4,5,3 (R,V,A)



FIGURA 5 MODELO NUMERICO DE TERRENO EN NIVELES DE GRIS OBTENIDO POR CORRELACION AUTOMATICA ENTRE IMAGENES SPOT-XS Y LANDSAT-TM. 2250 X 1800 PIXELES EN COLUMNAS POR FILAS.

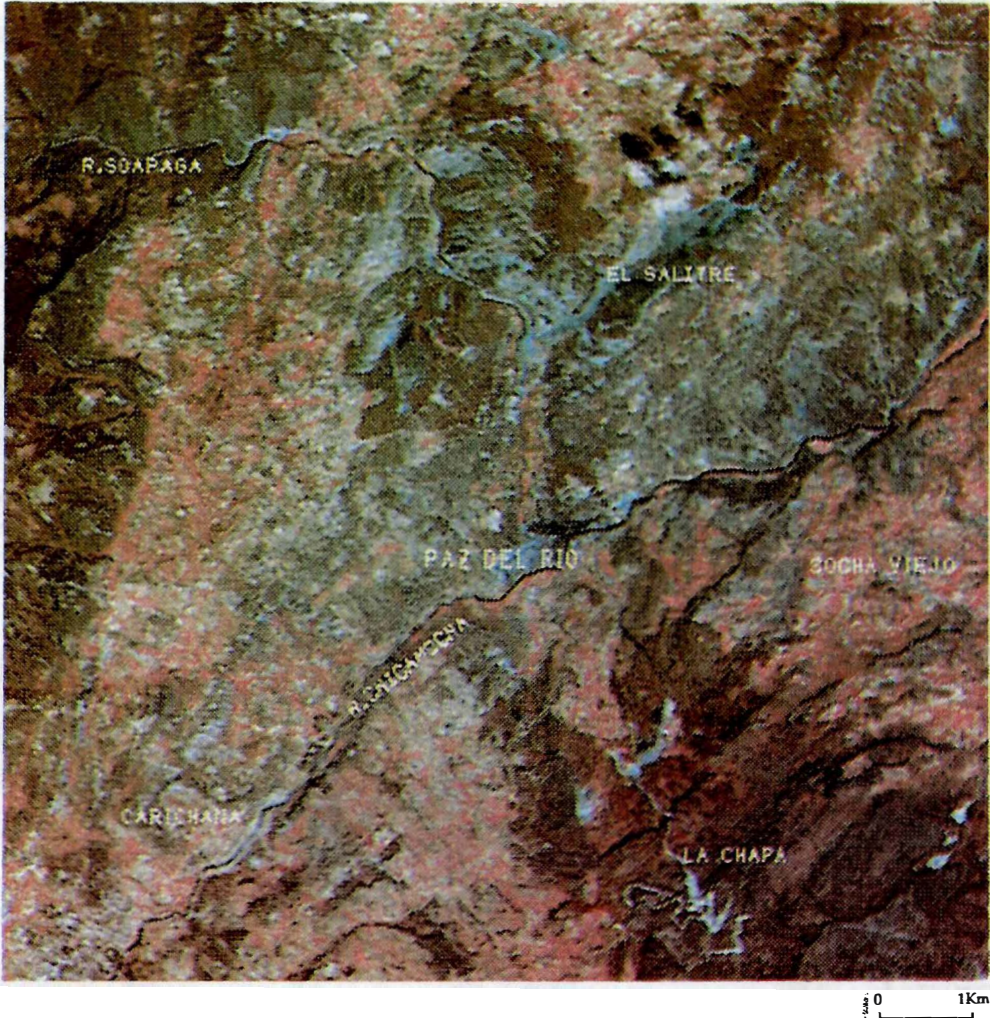


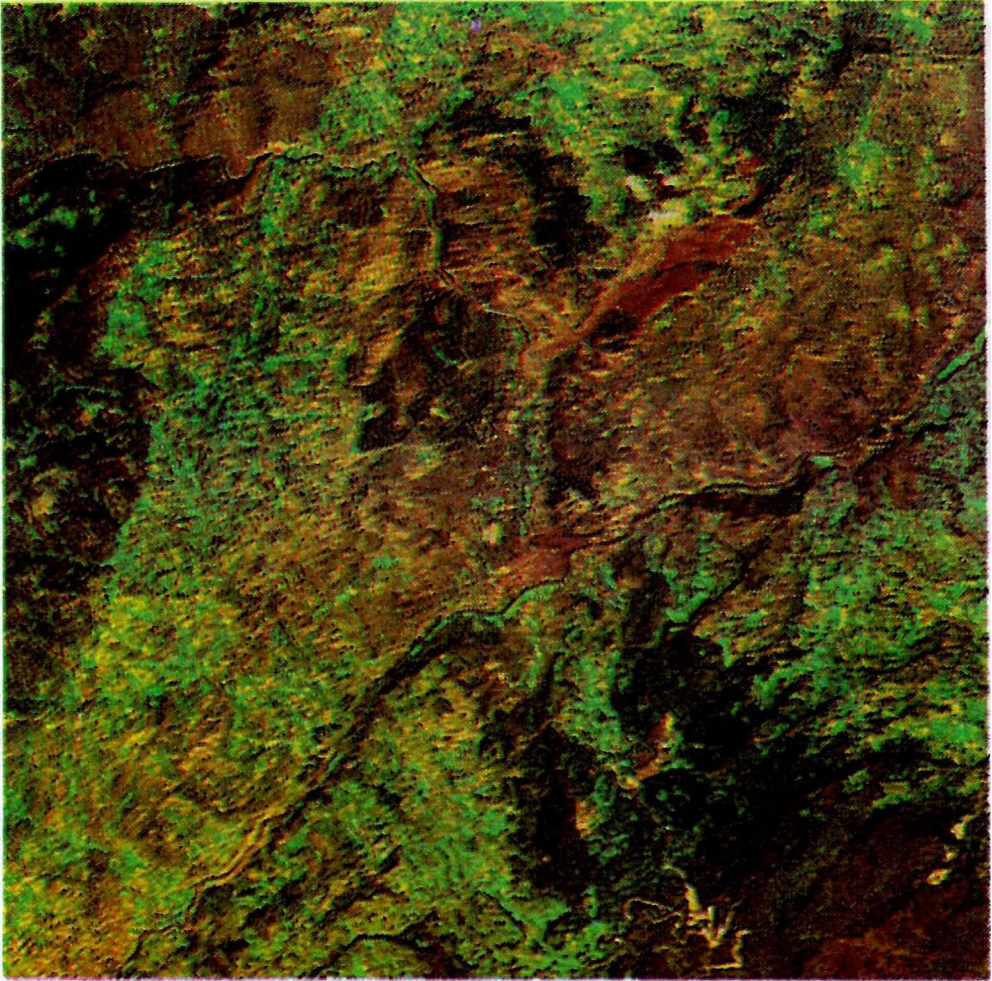
FIGURA 6: ORTOIMAGEN SPOT-XS EN FALSO COLOR DEL AREA DE ESTUDIO BANDAS 3,2,1 (R,V,A) 512 X 512 PÍXELES

una composición en falso color con la banda XS3 o infrarroja de la imagen de referencia así: XS3,IV,IB (R,B,A).

Otro de los procesos digitales de mejoramiento espectral de imágenes es el análisis de componentes principales (ACP). Como resultado de la aplicación de este proceso a la imagen realizada mediante los índices físicos se obtuvo una imagen en color "natural" que resalta claramente los diferentes tipos de vegetación, suelos desnudos, afloramientos

rocosos, zonas afectadas recientemente por procesos de erosión y remoción en masa y los yacimientos y depósitos superficiales de hierro (Figura 7). Sobre las diferentes imágenes procesadas se aplicaron filtros numéricos de tipo "paso alto y paso medio" para realzar bordes.

Dentro de las técnicas de procesamiento digital se realizaron investigaciones para la obtención de imágenes con diferente perspectiva con el fin de obtener imágenes estereoscópicas.



0 1Km

FIGURA 7: ORTOIMAGEN SPOT CON REALCE ESPECTRAL "COLOR NATURAL" INDICES FISICOS Y ANALISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES 512 X 512 PIXELES

Con este objetivo se utilizó el programa VUE3D (ISTAR, 1990) que combina la ortoimagen y el modelo numérico de terreno.

Este programa realiza un proceso comparable a la toma aerotransportada de fotografías aéreas, en el cual se determinan los siguientes parámetros: acimut, ángulo de vista, altura de vuelo, apertura focal, exageración vertical y la inclinación de la plataforma del captor o aparato de toma.

El mejor plano imagen obtenido para conformar la estereoscopia con la ortoimagen Spot XS se obtuvo con los .siguien-

tes parámetros: acimut 70°, altura de vuelo 400 km, ángulo de plataforma 0°, focal 2000 mm, exageración vertical 15. Mediante esta misma técnica, disminuyendo la altura de vuelo, la focal y la exageración vertical se obtuvieron vistas tridimensionales de zonas inestables que permitieron resaltar las características geomorfológicas de algunas zonas de interés.

2.3. ANALISIS ESTADISTICO

Para la determinación del "peso" (que representa la susceptibilidad de los factores o unidades de terreno en su

formación de deslizamientos) se han postulado y utilizado muchos métodos de carácter cualitativo y cuantitativo. El método más usual es el de la superposición manual de los diferentes mapas de análisis con un mapa morfodinámico, seleccionando cualitativamente zonas donde se presentan estos movimientos de acuerdo con su extensión areal y distribución.

Otros métodos semicuantitativos establecen el "peso" de los factores, asignándoles valores que son determinados de acuerdo con ciertos parámetros o características "críticas" del terreno, ej: pendientes fuertes, materiales arcillosos, distancia a zona de falla etc. (CENDERO *et al.*, 1990; ANBALAGAN, 1992; PACHAURI y PANT, 1992).

En general, la mayoría de métodos fundamentan su análisis en alguno de estos dos procesos determinísticos: densidad de deslizamientos por unidad de terreno o densidad de deslizamientos por kilómetro cuadrado. Aquí se ha considerado el primer criterio como factor de análisis.

Las coronas de deslizamientos que constituyen el elemento de análisis están representadas cartográficamente en tres imágenes-mapas (raster) diferentes, de acuerdo con su tipo (1, 2 ó 3). Sobre cada imagen, estos rasgos morfodinámicos (coronas) presentan una disposición cartográfica de un pixel de ancho y una longitud de acuerdo con su extensión en el terreno; los pixeles que contienen ésta información presentan un mismo valor numérico.

En esta investigación la determinación cuantitativa del "peso" (W) de las unidades o parámetros de terreno, se fundamenta en un análisis estadístico digital sencillo, que determina la densidad de coronas de deslizamiento sobre cada unidad de terreno.

El procedimiento se inicia con la superposición digital (sobre un SIG) de cada mapa temático con las coronas de deslizamiento (de un movimiento). Poste-

riormente se realiza un análisis estadístico de la imagen resultante que determina: el número de pixeles acumulado que ocupa cada unidad de terreno y el número de pixeles acumulado de deslizamientos que hay sobre cada una de éstas unidades de terreno (DZX). (Ver Figura 8).

Este mismo procedimiento se realiza para todos los parámetros de terreno y sobre cada tipo de movimiento clasificado.

A partir de los datos estadísticos obtenidos se determina el "peso" o susceptibilidad de cada unidad de terreno mediante la siguiente ecuación (VARGAS, 1991).

$$W\% = \frac{DZX * 100}{S} \text{ de donde:}$$

W Es el valor en porcentaje del "peso" o susceptibilidad de la unidad de terreno respecto al movimiento de análisis.

DZX = Representa el área cubierta por las coronas de deslizamientos (número acumulado de pixeles) que hay sobre la unidad de terreno. X determina el tipo de movimiento (DZ1, DZ2 o DZ3).

S Es el área total de la unidad de terreno expresada en número acumulado de pixeles.

A partir de los resultados obtenidos de los análisis estadísticos que determinaron el peso "W" de las diferentes unidades de terreno en la formación de movimientos en masa se realizan los mapas temáticos de susceptibilidad.

3. ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL TERRENO

En este aparte se presentan diversos métodos de análisis de imágenes numéricas para la obtención cartográfica de los diferentes parámetros del terreno y la determinación del "peso" o susceptibilidad de sus unidades respecto a los deslizamientos a partir del anterior análisis.

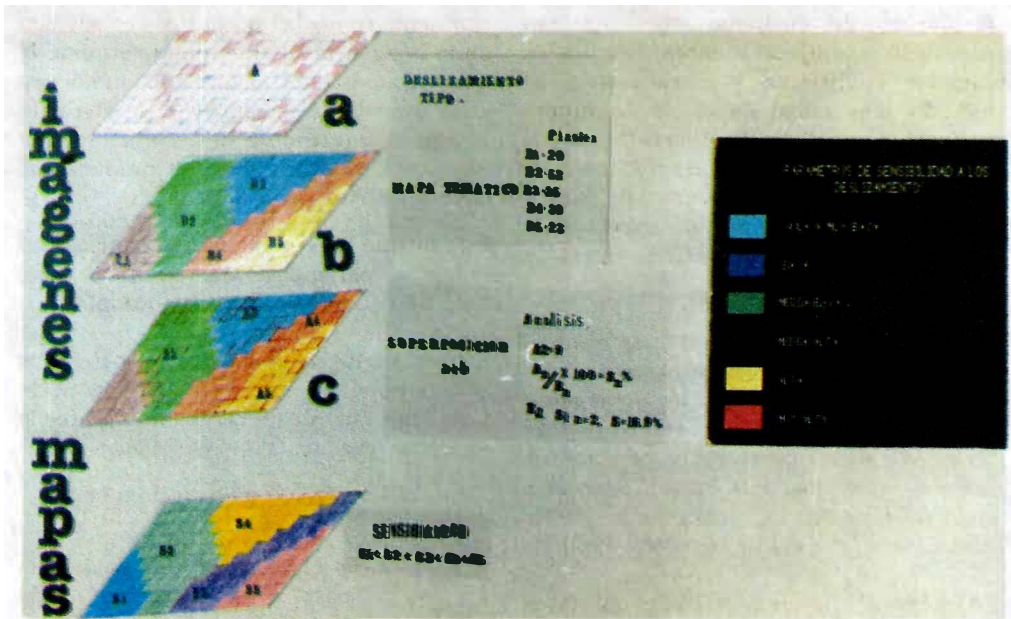


FIGURA 8: ESQUEMA DE ANALISIS ESTADISTICO DE MAPA-IMAGENES EN UN S.I.G. PARA LA DETERMINACION DEL "PESO" DE LOS FACTORES EN LA FORMACION DE UN DESLIZAMIENTO.

Los métodos cartográficos aquí utilizados incluyen: técnicas de clasificación automática y supervisada de imágenes de satélite; cartografía automática supervisada de rasgos morfométricos (pendientes, etc) e hidrológicos (drenaje) a partir del modelo numérico de terreno; interpretaciones visuales estereoscópicas, digitalización y rasterización de la información interpretada (litología, estructural, deslizamientos), y técnicas de procesamiento digital mediante la aplicación de filtros numéricos para degradación de la información lineal hasta mapas de densidad con información espacial en polígonos.

3.1. DESLIZAMIENTOS

Sobre la cuenca del río Chicamocha se registra un gran número de movimientos antiguos y recientes de tipo: flujos de rocas, flujos de lodos y tierra, derrumbes, caídas, movimientos lentos de reptación y soliflucción, etc, que modelan en gran parte el relieve en el área.

Sobre la región de estudio se cuenta con un buen registro histórico de los movimientos a nivel local (HUBACH Y ALVARADO, 1933; ALVARADO, 1955; ORDOÑES, 1962; PACHECO, 1971; SARMIENTO, 1973; REYES, 1971, 1983, 1987A, 1987B; RODRIGUEZ, 1987; LOBO-GUERRERO y RODRIGUEZ, 1978; LLINAS Y PRECIADO, 1988, 1989); inventarios regionales y estudios de zonificación por remoción en masa (CARDENAS y VARGAS, 1989; VARGAS, 1989). Esta información constituyó un material bibliográfico de gran importancia para el seguimiento morfodinámico de la región.

Muchos de estos deslizamientos han repercutido sobre los centros poblados y zonas rurales de interés, con notables daños materiales y pérdidas económicas. A continuación se citan algunos ejemplos de los principales eventos catastróficos:

En 1870, un deslizamiento de rocas y lodo destruyó la población de Socha

(hoy día Socha viejo) implicando la reubicación de sus pobladores a unos 6 km al norte (hoy Socha).

En 1933, la población de la Paz (hoy Paz Viejo) fue destruida por un deslizamiento de movimiento lento, obligando a su reubicación en donde hoy se encuentra la principal población de la región llamada Paz de Río. Hoy día este deslizamiento sigue activo.

En 1979, en la vereda Carichana al SW de Paz de Río un deslizamiento obstruyó el cauce del río Chicamocha destruyendo un tramo de la vía férrea, básica para el transporte del mineral de hierro hacia su centro de procesamiento en Belencito. Este mismo deslizamiento originó una represa con un gran volumen de agua que puso en estado de alerta a los habitantes de Paz de Río.

En la última década, Paz de Río ha sido amenazada continuamente por nuevos deslizamientos de gran peligrosidad que convergen hacia ésta población (El Salitre, La Chapa, etc).

En este estudio se tuvieron en cuenta varios criterios que resultan básicos para la cartografía de los deslizamientos y la determinación de la susceptibilidad del terreno hacia estos. El primer punto fue definir el elemento o elementos del deslizamiento a cartografiar (coronas de arranque, cuerpo, pata etc).

De acuerdo con las observaciones de campo, se comprobó que muchos de los materiales deslizados eran transportados por corrientes de agua, o depositados pendiente abajo sobre otras unidades de terreno no involucradas en la formación del movimiento. Esto llevó a contemplar que las coronas de arranque constituyen el elemento más confiable para la determinación de la susceptibilidad y la relación de una unidad de terreno con los dife-

rentes tipos de movimientos cartografiados.

De otra parte, como los materiales deslizados constituyen zonas potenciales de inestabilidad, se involucraron diferencialmente como unidades de terreno dentro del mapa geológico.

En este estudio se clasificaron los movimientos en tres tipos de acuerdo con su actividad, dimensiones y características así: activos mayores, activos menores y deslizamientos inactivos antiguos. A continuación se presentan las principales características de estos movimientos.

Tipo 1: Deslizamientos activos mayores.

Por su posición y dimensiones (mas de 500 m²), sobre áreas pobladas o de interés económico se les dá el carácter de "peligrosos". Estos movimientos son los más claramente visibles sobre las imágenes de satélite, especialmente por la alta reflectancia que presenta la zona de arranque y el material recientemente removido.

Se cartografiaron un total de 57 movimientos de este tipo, de los cuales los más destacados son los deslizamientos de: El Salitre, La Chapa, Carichama y Paz Viejo.

El deslizamiento El Salitre se localiza en la parte central del área, en inmediaciones de la población de Paz de Río. Es un movimiento complejo, definido como un flujo de escombros, de forma estrecha y alargada, de unos 2.600 m de largo y un volumen de material removido de 2'800.000 m³. Su peligrosidad radica en que la masa se dirige hacia el cauce del río Soapaga en inmediaciones de Paz de Río. (Ver Figura 9A).

El deslizamiento de la Chapa se localiza en la zona del páramo del mismo nombre al SE del área. Es un deslizamiento que cubre 18 hectáreas e involucra unos 150.000 m³ de material removido. Su corona se localiza en el nacimiento de la quebrada La Chapa y sobre el techo una zona

escarpada, lo cual constituye un factor de alta dinámica para el material inestable. La peligrosidad de este deslizamiento radica en que el material deslizado sigue el curso de la quebrada con un fuerte gradiente hasta su desembocadura sobre el río Chicamocha (en la zona urbana de Paz de Río). (Ver Figura 9B).

El deslizamiento de Carichama se localiza sobre la margen izquierda del río Chicamocha aguas arriba de Paz de Río. Es un deslizamiento de 345 hectáreas y de unos 14'000.000 m³ que obstruyó en su inicio (1979) el cauce del río Chicamocha, causando grandes daños en un sector de la vía férrea. Actualmente, su movimiento es muy lento y está semiestabilizado por obras de ingeniería.

El deslizamiento de Paz Viejo se localiza en la parte Norte del área. Es un movimiento activo iniciado en 1933, y afecta unas 120 hectáreas de tierra. Su corona se inicia con un plano de falla planar y se continúa con un movimiento lento de una gran masa arcillosa hasta una zona escarpada en donde forma flujos de lodo de mayor velocidad.

Tipo 2: Incluye los movimientos menores activos, de menores dimensiones (< 500 m²) como desprendimientos, caídas, reptación, flujos, deslizamientos de roca y suelos. Sobre las imágenes la corona es determinada por su forma semicircular en movimientos donde hubo desprendimiento de material litológico. La identificación de movimientos lentos de suelos sobre las imágenes es difícil y poco contrastante, haciéndose necesario los controles de campo; sin embargo, ésta área puede ser evidente por su respuesta espectral de material en movimiento si su contenido de agua es notable.

Estos movimientos son los más numerosos y ampliamente distribuidos en el área, de los cuales se identificaron y catografiaron un total de 175.

Tipo 3: Representa los deslizamientos antiguos. Sobre las imágenes son poco evidentes, especialmente por la presencia de vegetación sobre el material deslizado. Aunque su reconocimiento espectral en las imágenes es difícil, se identificaron por sus rasgos geomorfológicos (zona de arranque). Estos deslizamientos son muy característicos en la margen derecha del río Chicamocha. Sobre el área de estudio se cartografiaron 67 deslizamientos de este tipo.

El análisis de los diferentes parámetros y unidades de terreno con los movimientos en masa se realizó a partir de las coronas de los tres tipos de deslizamientos representados en imágenes-mapas. (Ver Figura 10).

Una zonificación de la distribución de las coronas de deslizamientos es presentada en la Figura 11, como mapa de densidad (landslide isopleths). Este mapa fue realizado mediante la aplicación sucesiva de dos filtros digitales de alta frecuencia, el primero de tipo paso alto con un tamaño de malla o ventana móvil de 51x51 píxeles en línea por columna y el segundo, de tipo paso bajo de 15x15 píxeles en línea por columna.

3.2. USO Y OCUPACION DEL SUELO

Utilizando el proceso de clasificación automática supervisada (método de mínimo de distancia) por selección de parcelas (píxeles de igual valor radiométrico) sobre la imagen realizada espectral y visualmente (Figura 7), se elaboró el mapa de ocupación del suelo. Para la zona de estudio se definieron 8 unidades de uso y ocupación del suelo, que se relacionan con los procesos morfodinámicos y la estabilidad del área. (Figura 12).

Clase 1. Zonas de afloramientos de areniscas ferruginosas. Estas rocas presentan una alta resistencia a la erosión.

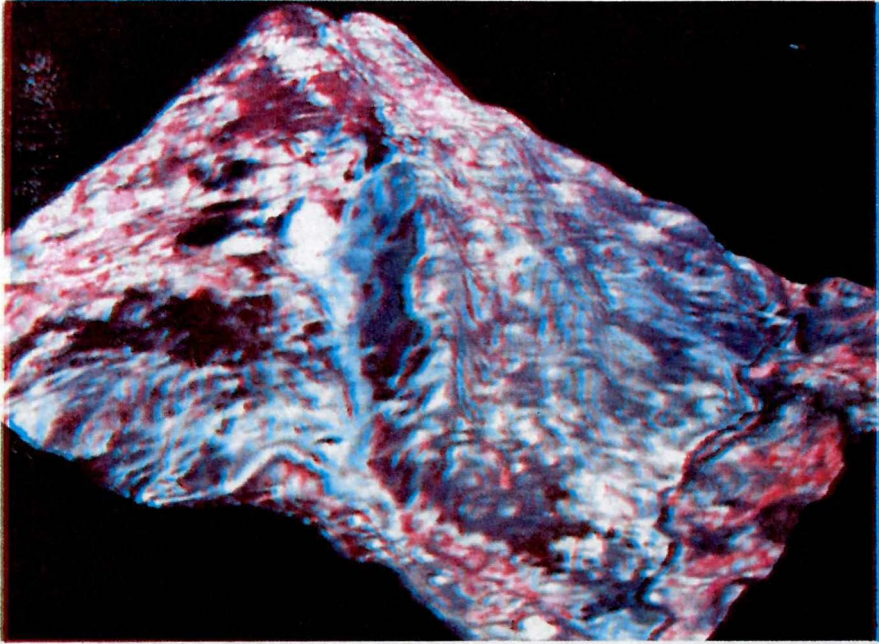
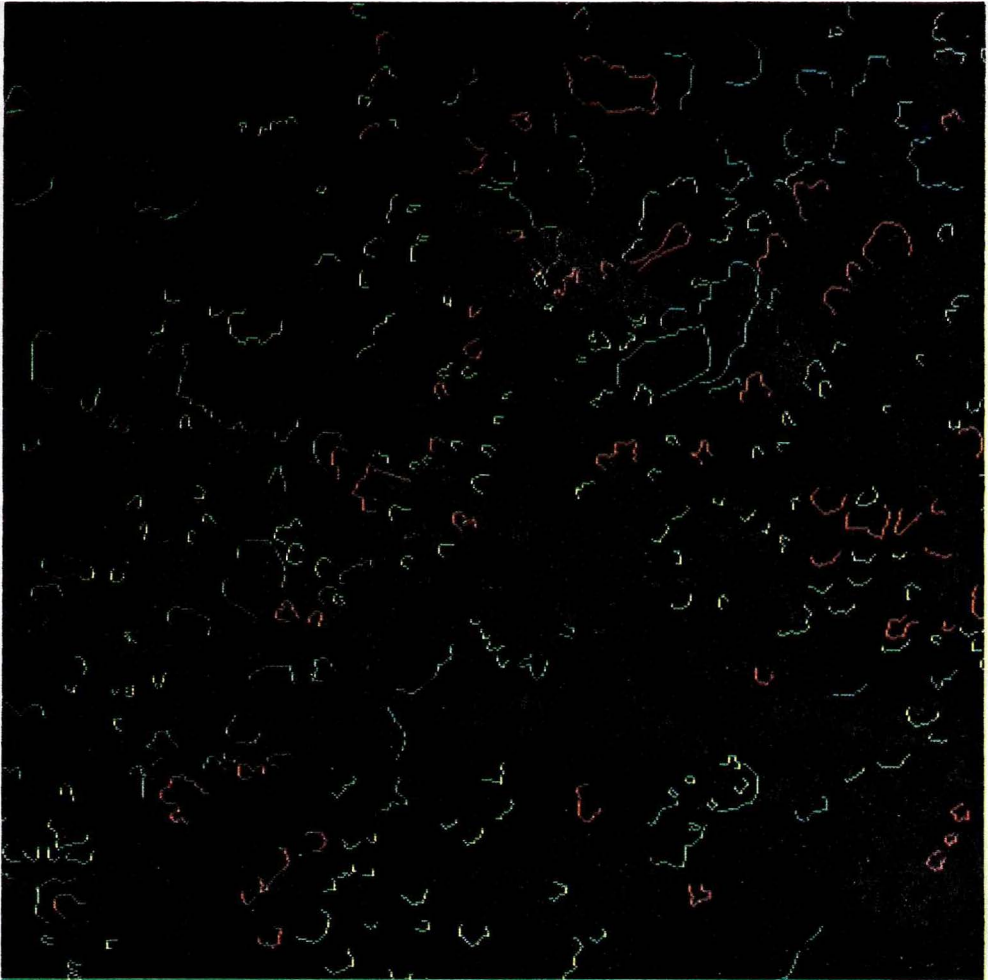


FIGURA 9: VISTAS PERSPECTIVAS EN TRES DIMENSIONES MEDIANTE LA SUPERPOSICION DEL MNT Y LA ORTOIMAGEN SPOT-XS. A. DESLIZAMIENTO DEL SALITRE, B. DESLIZAMIENTO DE LA CHAPA



0 1Km
└───┘

Rojo:	Deslizamientos de tipo 1
Amarillo:	Deslizamientos de tipo 2
Azul:	Deslizamientos de tipo 3

FIGURA 10: IMAGEN MAPA DE CORONAS DE DESLIZAMIENTOS

Clase 2. Zonas de suelos desnudos de color verdoso (desarrollados a partir de rocas paleozoicas). Estos materiales presentan características mineralógicas particulares que permiten una clara diferenciación espectral sobre las imágenes de satélite. Sobre estos suelos se presenta una notable erosión hídrica de tipo laminar.

Clase 3. Representa zonas de rocas de composición arenosa, afectadas por procesos de erosión y remoción en masa.

Clase 4. Zonas de rocas de composición arcillosa, afectadas por procesos de erosión y remoción en masa.

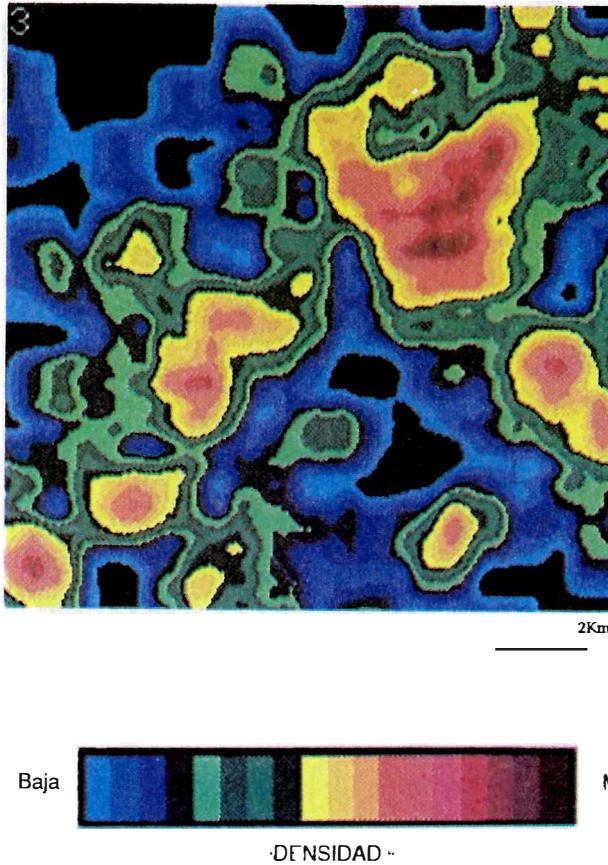


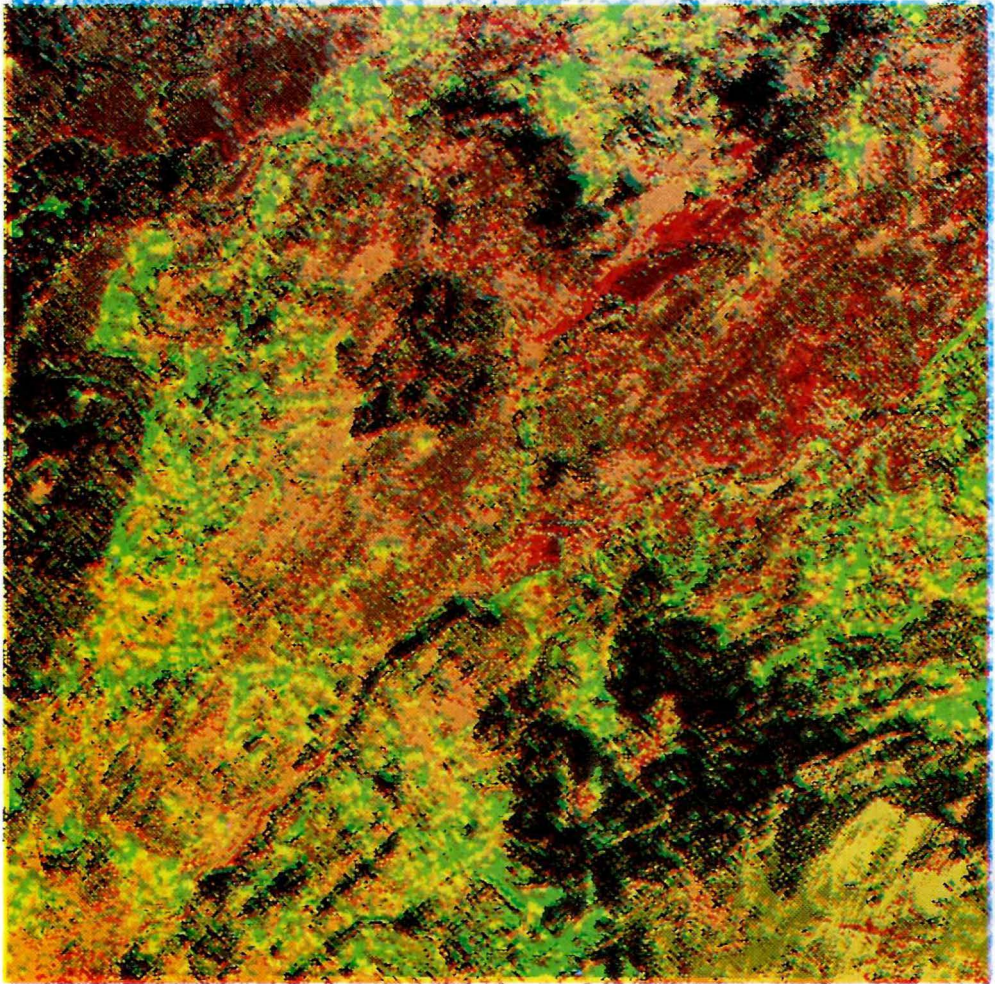
FIGURA 11: IMAGEN-MAPA DE DENSIDAD DE CORONAS DE DESLIZAMIENTOS

- Clase 5.** Areas de cultivos y pastizales.
- Clase 6.** Vegetación natural arbustiva.
- Clase 7.** Zonas de bosques naturales y áreas reforestadas principalmente por pinos.
- Clase 8.** Areas de actividad minera (explotación superficial de hierro).

Sobre los deslizamientos de tipo 1 (mayores activos) la unidad de terreno que representa la actividad humana en la explotación del hierro (clase 8), presenta un alto valor de peso (0.98).

La determinación del peso de las diferentes unidades de ocupación y uso del suelo respecto a los tres tipos de deslizamientos es presentada en la Tabla 1.

A partir de las observaciones de campo y de los documentos de referencia se estableció que gran parte de los materiales residuales de estas explotaciones, fueron involucrados en deslizamientos recientes. Por el contrario la influencia de la actividad humana, respecto a los deslizamientos de tipo 3 es prácticamente nula en la parte minera (clase 8).



0 1Km

FIGURA 12: MAGEN-MAPA DE OCUPACION Y USO ACTUAL DEL SUELO

Sobre los deslizamientos de tipo 2, las unidades tres y cuatro (relacionadas con los fenómenos de remoción en masa) muestran un alto valor de peso (1.06 y 1.47 respectivamente), igualmente en los deslizamientos de tipo 1, estas unidades presentan un importante valor de peso (0.70 y 1.00 respectivamente).

La influencia de las actividades agropecuarias (clase 5), muestra una alta relación, especialmente sobre los deslizamientos de tipo 2.

Observaciones de campo registraron un uso inadecuado e intensivo del suelo por ésta última actividad, con pérdida de la

TABLA 1: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE USO Y OCUPACION DEL SUELO HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Unidades de uso y ocupación del suelo	Superficie total de unidades de uso ocupación del suelo (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de uso y ocupación del suelo (# de pixeles)"DZX"			Susceptibilidad o "peso" de las unidades de uso y ocupación del suelo a los deslizamientos (W%).		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
CLASE 1	13.425	27	49	62	0.20	0.36	0.46
CLASE 2	39516	246	441	303	0.62	1.12	0.76
CLASE 3	60064	419	638	470	0.70	1.06	0.78
CLASE 4	10373	103	153	57	1.00	1.47	0.55
CLASE 5	37959	252	471	297	0.66	1.24	0.78
CLASE 6	52389	237	419	463	0.45	0.80	0.88
CLASE 7	46174	130	323	405	0.28	0.70	0.87
CLASE 8	1735	27	14	1	0.98	0.80	0.06

capa orgánica. Este abandono de tierras se evidencia por el gran número de viviendas abandonadas y las obras artesanales (cercas de piedra).

3.3. GEOLOGIA

Sobre el área de estudio se cuenta con estudios de cartografía regional (ULLOA, *et al*, 1973; REYES, 1984), a escalas 1:100.000 y 1:50.000 y estudios a escala media (1:25.000) orientados hacia la zonificación de movimientos en masa (VARGAS, 1989). En este trabajo, el mapa geológico se obtuvo a partir de interpretaciones visuales sobre pares estereoscópicos de imágenes Spot-XS y Landsat-TM a escala 1:50.000, y un previo reconocimiento del terreno.

Los resultados de éstas interpretaciones fueron digitalizados y perfeccionados digitalmente sobre la pantalla de computador. Posteriormente se transformaron estos archivos vectoriales en una imagen-mapa tipo raster, en la cual cada unidad geológica esta representada por un conjunto de pixeles con igual valor numérico. (Ver figuras 13 y 14).

A continuación se presenta una breve descripción litológica de las unidades geológicas del área de estudio desde la más antigua a la más reciente.

- *Formación Silgará (PDS)*. Comprende una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas, tipo pizarras, filitas, metali-

molitas, metaarenitas, metaconglomerados, milonitas y protomilonitas. Estas dos últimas son comunes en la zona de la falla de Soapaga.

- *Formación Girón (JG)*. Consta de una secuencia de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas de color rojo-violeta. Sobre el área, las rocas de esta formación se caracterizan por desarrollar suelos ricos en hierro y pobres en materia orgánica, por lo cual su cobertura vegetal es muy baja y la erosión laminar es alta.
- *Formación Luna (KSL)*. Comprende una secuencia de rocas de tipo chert, porcelanitas, calizas y lutitas en esporádicos niveles de fosforita. Las rocas de esta formación se caracterizan por su alta deformación y fracturamiento.
- *Formación Guadalupe (KSG)*. En el área, esta formación comprende dos miembros: uno inferior arcilloso (lutitas de Los Pinos) y uno superior arenoso (Arenisca Tierna).
- *Formación Guaduas (KTG)*. Comprende una espesa secuencia de rocas arcillosas con intercalaciones de arenisca y mantos de carbón.
- *Formación Socha Inferior (TPSI)*. Está compuesta de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso con niveles de arcillolitas y limolitas.

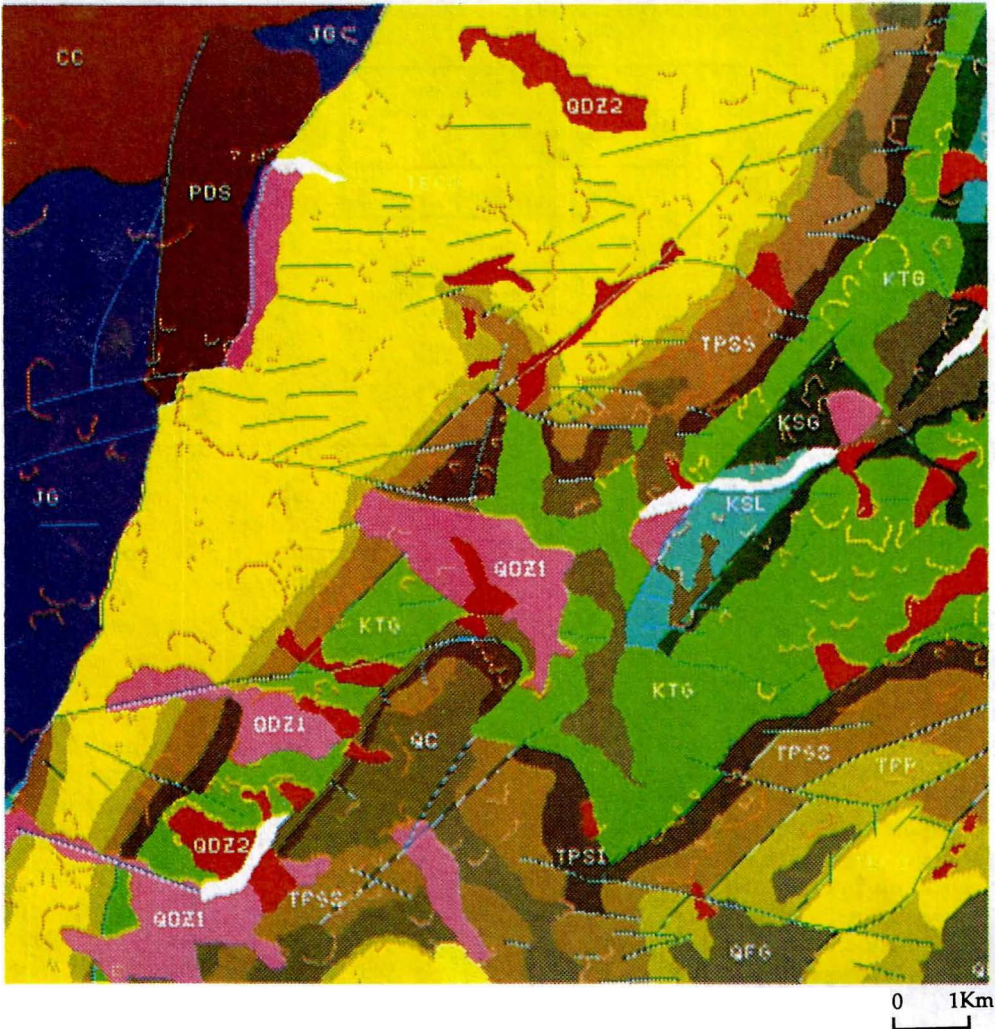


FIGURA 13: IMAGEN-MAPA GEOLOGICO ESTRUCTURAL

- *Formación Socha Superior (TPSS)*. Es una unidad predominantemente arcillosa constituida por arcillolitas y limolitas de colores variados con intercalaciones de arenisca. Localmente presenta mantos de turba y costras de yeso.
- *Formación Picacho (TPP)*. Representa un paquete de areniscas feldespáticas de grano fino a conglomeráticas, de consistencia friable y deleznable. En el sector de La Chapa, al NE del área presenta notables niveles arcillosos.

Formación Concentración (TECO). Comprende una espesa secuencia de arcillas y limolitas de colores claros (amarillo, crema, gris, etc) con intercalaciones de areniscas. Hacia la base de ésta formación se presenta un manto de hierro oolítico de 2 a 9 m de espesor, el cual constituye uno de los principales minerales explotables en la industria del acero, que caracteriza esta región.

Conglomerados de Tenería (TQC). Bajo este nombre se define a un paquete

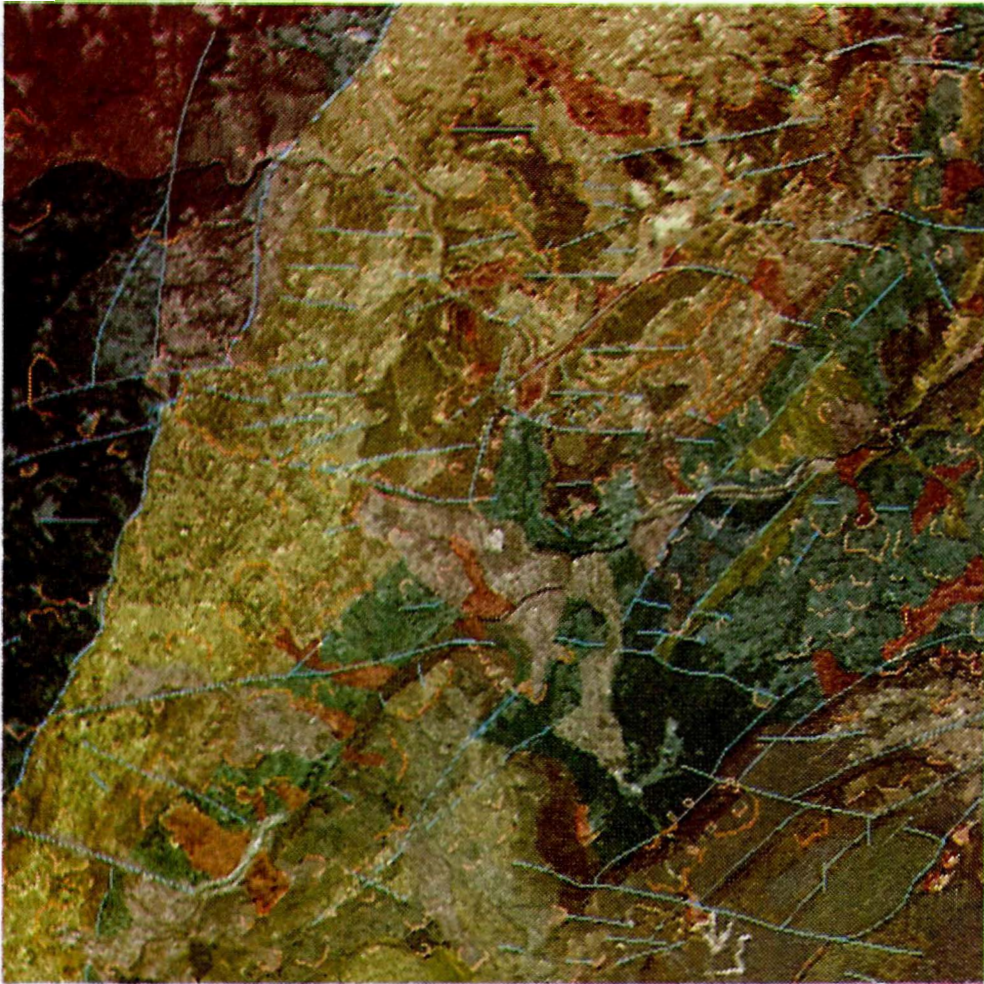


FIGURA 14: MAPA GEOLOGICO ESTRUCTURAL SUPERPUESTO A LA ORTOIMAGEN SPOT

de conglomerados polimícticos semi-consolidados, conformados por cantos de cuarcitas y metaareniscas en una matriz arenosa; en sectores esta matriz se presenta bien cementada por óxidos de hierro. Sus afloramientos representan escarpes verticales de unos 50 metros de altura y montañas onduladas.

Se definieron 5 tipos de depósitos inconsolidados, de acuerdo con su origen y composición:

Fluvioglaciares (QFG). Están conformados por grandes bloques rocosos de for-

ma angular a subangular, en una matriz limoarcillosa poco compacta. Los fragmentos son principalmente areniscas. Estos depósitos se restringen principalmente a la margen derecha del río Chicamocha entre las poblaciones de Tasco (al Sur) y Socha (al Norte).

Aluviales (QAL). Cantos y bloques de diferente origen y composición, principalmente asociados al río Chicamocha y al río Soapaga.

Coluviales (QC). Gravas, cantos y bloques subangulares a angulares (princi-

palmente areniscas), sobre la superficie del terreno o embebidas en una matriz areno-arcillosa.

Depósitos de deslizamientos antiguos (QDZ1). Numerosos bloques, guijos y cantos de rocas, en una matriz predominantemente arcillosa y moderadamente compacta.

Depósitos de deslizamientos recientes (QDZ2). Material rocoso (arcillolitas, areniscas, o calizas, etc) mezclado con restos vegetales en una matriz arcillo-arenosa o arenolimsa, dependiendo de las rocas que originaron el movimiento.

La litología representa un factor importante en la definición de la susceptibilidad del terreno hacia tipos particulares de deslizamientos. En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis estadístico que determina el "peso" de cada unidad litológica hacia los deslizamientos.

De la anterior tabla, resulta evidente que los materiales rocosos recientemente removidos (depósitos de deslizamientos recientes "QDZ2") constituyen una unidad

litológica altamente susceptible a deslizarse o reactivarse el movimiento (deslizamientos tipo 1).

Otra unidad geológica que presenta un alto "peso" hacia los deslizamientos de tipo 1, es la formación Guaduas (KTG). El alto valor (1.38) está relacionado en parte por su carácter predominantemente arcilloso y los numerosos cortes del terreno por vías y excavaciones rudimentarias realizadas para la explotación de carbón.

Las formaciones litológicas que presentan mayor susceptibilidad a los deslizamientos de tipo 2 son: Luna, Socha inferior, Guadalupe, Concentración, Socha superior y Picacho. La diversidad de litologías está relacionada a la misma variedad de movimientos que se incluyen dentro de este tipo (flujos, derrumbes, caídas, etc).

Un caso especial lo constituye un depósito de terraza (QT) que esta involucrado casi en su totalidad por un movimiento de tipo 2, por lo cual dada su poca extensión en el área (77 pixeles que hacen 154 m²) muestra un valor de susceptibilidad muy alto (6.5).

TABLA 2: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES GEOLOGICAS HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Formación litológica (Símbolo)	Superficie total de la unidad de terreno (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por formación geológica (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la formación geológica a los tipos de deslizamientos (W%).		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
QAL	1640	-	-	-	-	-	-
QDZ2	9772	279	32	5	2.90	0.33	0.05
QDZ1	14206	80	71	47	0.56	0.50	0.33
QC	13931	64	123	97	0.46	0.88	0.70
QT	77	-	5	-	-	6.50	-
QFG	9719	10	34	11	0.10	0.35	0.11
TQC	883	-	10	-	-	1.13	-
TECO	67643	299	848	794	0.44	1.26	1.04
TPP	16460	93	181	181	0.56	1.10	1.10
TPSS	27968	102	319	415	0.36	1.14	1.50
TPSI	10755	15	250	60	0.14	2.32	0.56
KTG	35267	485	279	197	1.38	0.79	0.56
KSG	7219	4	150	23	0.05	2.10	0.32
KSL	3252	-	97	3	-	2.98	0.09
JG	22357	-	30	241	-	0.13	1.08
CC	11400	-	-	29	-	-	0.25
PDS	8284	-	79	44	-	0.95	0.53

Las unidades litológicas más relacionadas con los deslizamientos de tipo 3 (antiguo inactivo), corresponden a las formaciones Socha superior (TPSS), Picacho (TPP), y Concentración (TECO). Gran parte de las coronas de estos deslizamientos (tipo 3) se presentan en sectores de antigua influencia fluvio-glacial, en la zona de contacto, entre estas formaciones arcillosas y arenosas.

3.4. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista de teledetección "lineamiento" se define como aquellos rasgos rectilíneos o ligeramente curvados representados sobre las imágenes de satélite como anomalías radiométricas lineales, discontinuidades morfológicas, etc, que evidencian elementos estructurales regionales como fallas, fracturas, ejes de pliegues etc. (SCANVIC, 1983).

La cartografía de los rasgos estructurales se realizó a partir de interpretaciones de imágenes Spot-XS y Landsat-TM en estereoscopia y digitalmente sobre el computador. En este último proceso se aplicaron filtros numéricos direccionales para su realce.

Como resultado de esta interpretación se cartografiaron nuevos sistemas de lineamientos que corresponden a fallas, especialmente de rumbo, no identificados en estudios anteriores y no perceptibles en las fotografías aéreas. Estos nuevos lineamientos presentan una orientación predominante en dirección E-W.

Con base en esta información se realizó un análisis digital de estadística circular representado bajo la forma de diagramas "rosa", que expresan la dirección de lineamientos en cuanto a la longitud y el número acumulado. (Figura 15).

Los sistemas de lineamientos más importantes en número y longitud acumulada se orientan en dirección N70-90W y N70-90E. Observaciones de campo, indican que éstos lineamientos

corresponden en su mayoría a fallas de tipo normal y de rumbo y sistemas de lineamientos en dirección N40 a 50 E se asocian a fallas regionales de varios tipos: inversa, cabalgamiento y normal.

En el área la estructura más destacada es la Falla de Soapaga, que se expresa sobre el terreno y las imágenes como un lineamiento rectilíneo, formado por el cabalgamiento hacia el este de rocas Jurásicas de la Formación Girón y Silgará, con una morfología de montañas y colinas pronunciadas, sobre rocas del Terciario Superior de la Formación Concentración, de morfología suavemente ondulada. Esta falla origina en este sector un salto estratigráfico de más de 3000 m en donde se han generado una serie de rocas cataclásticas (milonitas, etc) y zonas de rocas muy fracturadas y deformadas.

La falla de Soapaga se presenta truncada y desplazada por varias fallas transversales con desplazamientos laterales y verticales. Entre estas fallas se destaca la Falla de Colacote, localizada al SW del área de estudio.

Sobre el sector SE del área, en la zona de la "Chapa" se presenta un sistema de fallas normales escalonadas e inclinadas hacia el oeste, afectando las rocas de la Formación Picacho.

Otra estructura importante en el área es el anticlinal del Chicamocha. Es un pliegue estrecho y asimétrico con una dirección SW-NE, fallado en sus flancos y con fuertes cabeceos axiales hacia el SW. En el área lo conforman rocas de la formación Guadalupe y Luna.

El mapa de lineamientos está representado bajo una estructura de tipo raster y en forma lineal. Para la evaluación y análisis espacial con los deslizamientos se transformó la información lineal en areal (mapa de densidad), mediante la aplicación sucesiva de dos filtros numéricos. El primer filtro de tipo "paso alto" (alta frecuencia) con un tamaño de malla de 51x51

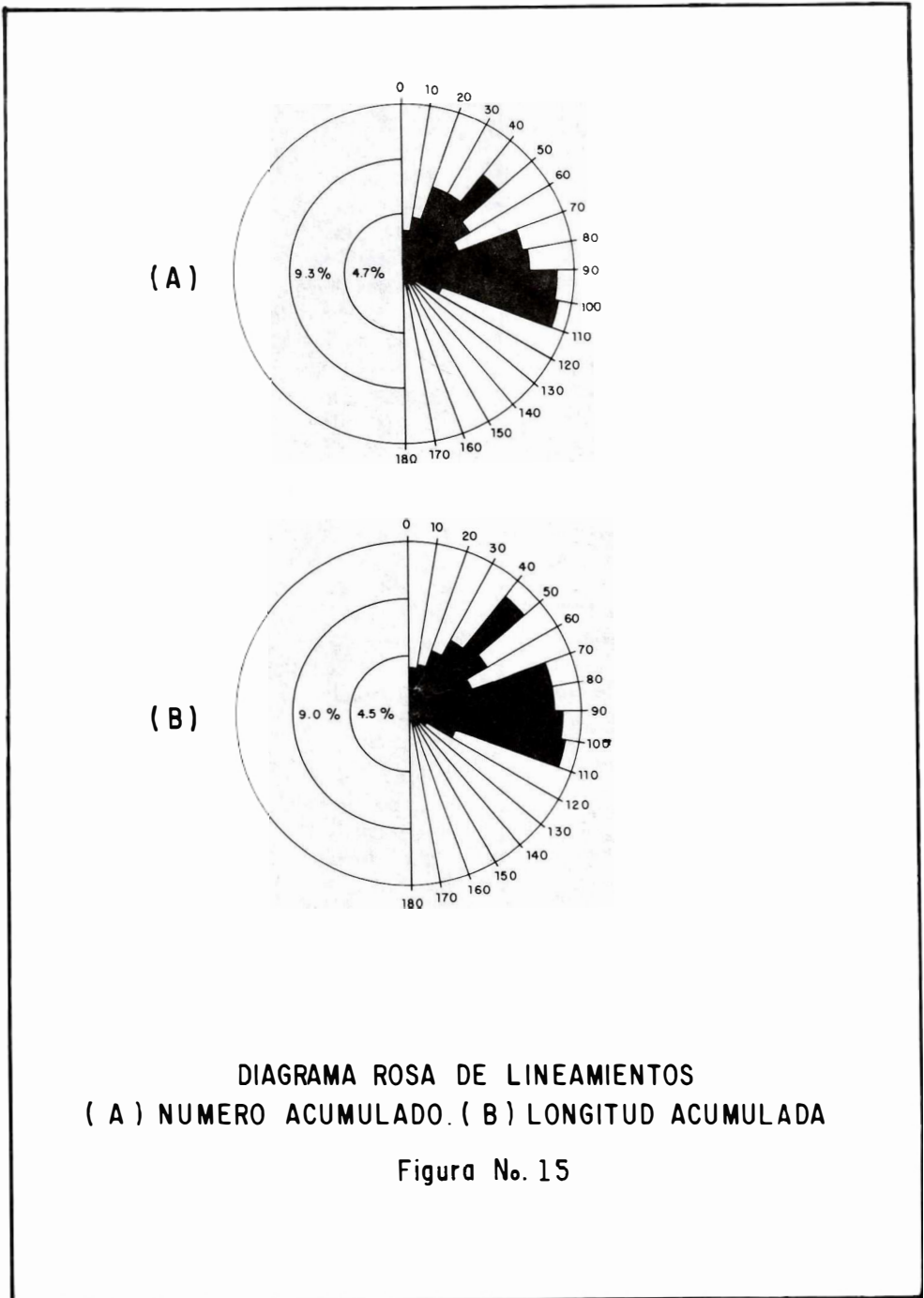


FIGURA 15: DIAGRAMA ROSA DE LINEAMIENTOS. (A) NUMERO ACUMULADO. (B) LONGITUD ACUMULADA.

pixeles en línea por columna define arealmente la información lineal. El segundo filtro de tipo paso bajo de 15x15 pixeles en línea y columnas realza los bordes.

El mapa de densidad de lineamientos, definido por esta técnica representa las áreas de mayor o menor concentración de lineamientos en siete unidades bajo la terminología de muy baja a muy alta. (Ver Figura 16).

El análisis estadístico de este parámetro de terreno con los deslizamientos (Tabla 3), muestra que no existe una relación directa de las zonas de mayor densidad de lineamientos con los deslizamientos; tal es el caso de la unidad de mayor densidad que no muestra ningún valor de "peso" hacia los deslizamientos de tipo 1. Similar-

mente ocurre para los deslizamientos de tipo 2.

3.5. MAPAS DERIVADOS DEL MODELO NUMERICO DE TERRENO.

Un modelo numérico de terreno o modelo digital de elevación se define como un archivo digital ordenado de valores que representan la distribución espacial de las altitudes (Z) en una posición dada (X, Y).

Los modelos numéricos de terreno constituyen un producto básico en estudios de las ciencias de la tierra, en especial los relacionados con geomorfología dinámica. Varias aplicaciones de MNT se han desarrollado en este campo de los deslizamientos (VARGAS, 1992).

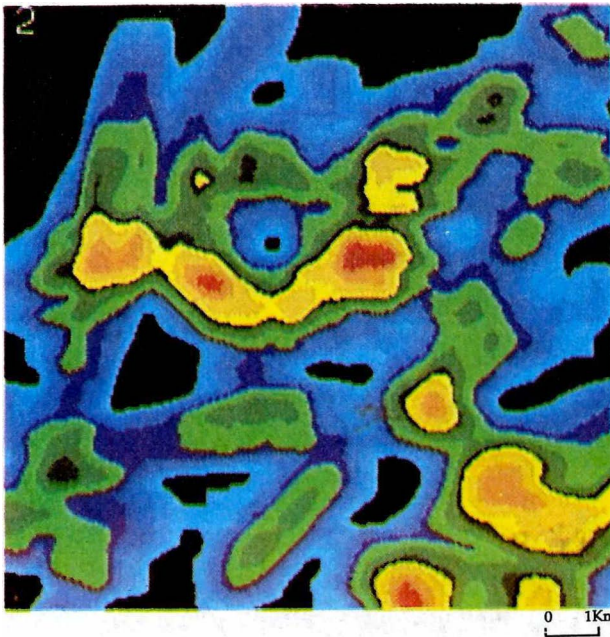


FIGURA 16: IMAGEN-MAPA DE DENSIDAD DE LINEAMIENTOS

TABLA 3 CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE DENSIDAD DE LINEAMIENTOS HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Intervalos de densidad de lineamientos "densidad"	Superficie total de densidad de lineamientos (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de densidad de lineamientos (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la densidad de lineamientos a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Muy baja	40680	230	331	290	0.56	0.81	0.71
Baja	44739	323	366	457	0.72	0.81	1.02
Media baja	65174	336	824	557	0.51	1.26	0.85
Media	26179	147	243	229	0.56	0.92	0.87
Media alta	16052	148	186	125	0.92	1.16	0.78
Alta	13529	42	155	131	0.31	1.15	0.97
Muy alta	4579	-	28	24	-	0.06	0.05

Entre las principales aplicaciones cartográficas desarrolladas a partir de modelos numéricos de terreno se destacan: la extracción automática de formas circulares asociadas a coronas de deslizamientos (PAPO Y GELBMANE, 1984; TAUD y PARROT, 1991 y 1992); medidas automáticas de planos estructurales (MARTZ y DE JONG, 1978; CHOROWICZ, 1984; VILLIERS y LAYMARIE, 1984; CHOROWICZ *et al*, 1991); reconocimiento de formas de terreno (COLLINS, 1975; PIKE y ROZEMA, 1975; MASSON D'AUTUME, 1978; UNGAR *et al*, 1983; PIKE, 1986, 1988; CHOROWICZ *et al*, 1989), cartografía temática de mapas morfométricos (MARK 1975; EVANS, 1980; DUPERET, 1990).

Como se anotó anteriormente, en esta investigación se utilizó un MNT generado por correlación automática entre un par estereoscópico de imágenes Spot XS y Landsat TM. De este modelo se derivaron automáticamente cuatro mapas temáticos: altitud relativa, exposición u orientación de pendientes (Figura 17), drenaje y microcuencas que se describen a continuación:

3.5.1. ALTITUD RELATIVA

Este mapa (Figura 17-A) muestra la altitud del área en contornos o intervalos cada 50 m, que se expresa sobre el mapa con diferentes coloraciones que van desde azul oscuro en el punto más bajo (2.200 m) sobre el cauce del río Chicamocha a rojo

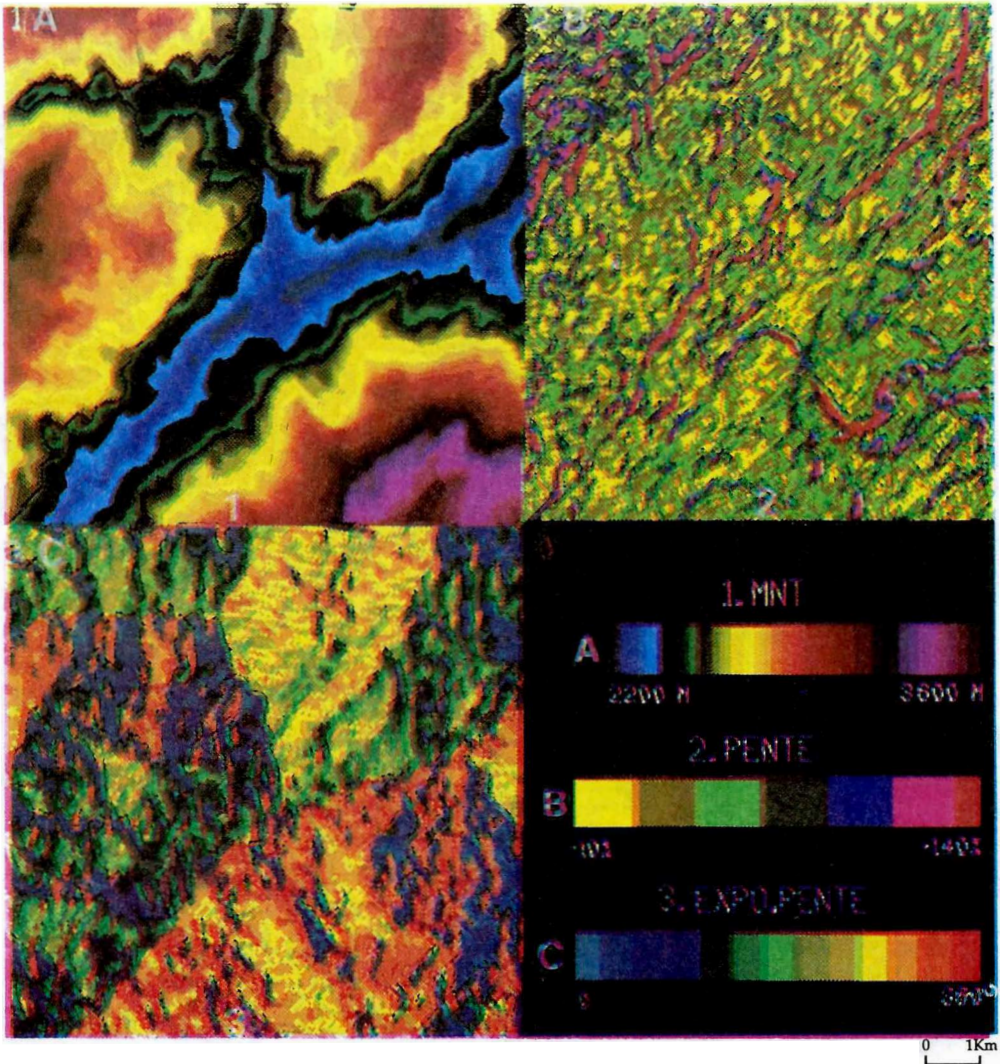
en el área más alta (3.600 m) en la zona del páramo de La Chapa. En este mapa se destacan claramente los valles estrechos de los ríos Chicamocha y Soapaga y la quebrada Cororadales (afluente del río Soapaga), los cuales separan cuatro zonas o regiones de montañas altas.

La importancia de este parámetro, en el análisis de los movimientos en masa en el área, se debe a la estrecha relación que existe entre la altitud y las unidades climáticas o microclimas, y sus correspondientes factores (precipitación, temperatura, etc).

El análisis estadístico de los deslizamientos con la altitud relativa muestra que los deslizamientos de tipo 1 se relacionan principalmente a las laderas bajas próximas a los ríos Chicamocha y Soapaga entre los 2200 y 2400 metros. Los deslizamientos de tipo 2 se asocian más a altitudes medias, entre los 2400 y 2600 m, y los deslizamientos de tipo 3 se relacionan principalmente a las laderas altas, entre los 2800 y 3000 metros.

3.5.2. INCLINACION DE PENDIENTES

Este mapa representa el ángulo formado por la superficie del terreno y un plano horizontal imaginario. Siete intervalos de pendientes, cada diez grados fueron definidos para el área (Figura 17-B).



A ALTITUD RELATIVA
 B. INCLINACION DE PENDIENTES

C. ORIENTACION DE PENDIENTES
 D. INTERVALOS TEMATICOS

FIGURA 17: IMAGENES-MAPA MORFOMETRICOS DERIVADOS DEL MNT

La distribución cartográfica de las pendientes en área, especialmente de las zonas escarpadas (mayores de 70°) evidencia una alta influencia tectónica en la región, con escarpes desplazados (fallas) o curvados (plegamiento).

Las pendientes generalmente constituyen un factor fundamental en la evaluación de los fenómenos de remoción en masa, sin

ser determinante el concepto que a mayor pendiente será menor la probabilidad de ocurrir un movimiento. Sobre la misma área de estudio es evidente la presencia de deslizamientos en áreas de pendientes muy suaves (Paz Viejo - La Chapa). Sin embargo, la dinámica de muchos de estos movimientos está estrechamente relacionada a la morfología de escarpes escalonados que impera en el área.

El análisis estadístico de este parámetro con los deslizamientos (Tabla 5), muestra que existe poca influencia de este factor con los deslizamientos de tipo 1 (valores de peso entre 0.46 y 0.57), mientras que para los deslizamientos de tipo 2 los valores de peso de los intervalos de pendientes son mayores (0.63 a 1.41) y presentan una relación directa a mayor grado de pendiente. Para los deslizamientos de tipo 3 las pendientes más fuertes ($>70^\circ$) representan el mayor valor de peso.

3.5.3. ORIENTACION DE LA PENDIENTE

Este mapa representa el ángulo formado entre el norte geográfico de la imagen y la normal a la pendiente del terreno. Se expresa de 0° a 360° en dirección este. En el área, este mapa (Figura 17C) presenta 12 intervalos, los cuales caracterizan 6 unidades geomorfológicas, bien definidas por el curso de los ríos Chicamocha y Soapaga

Sobre la margen derecha del río Chicamocha, la exposición de las pendientes constituye una unidad geomorfológica relativamente homogénea de orientación preferencial NS, mientras que sobre la margen izquierda de este mismo río se definen 5 unidades geomorfológicas, con direcciones predominantes E-W y NW.

El análisis estadístico de este factor con los deslizamientos (Tabla 6), muestra el bajo "peso" de este parámetro con los deslizamientos de tipo 1.

Para los deslizamientos de tipo 2, las laderas orientadas entre 50° - 100° , y los 300° - 360° presentan altos valores de susceptibilidad (1.17 y 1.16 respectivamente), y las laderas orientadas entre los 100° - 150° y los 200° - 250° , muestran altos valores de susceptibilidad hacia los deslizamientos de tipo 3.

TABLA 4: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE ALTITUD RELATIVA HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Altitud relativa en metros	Superficie total de la Altitud Relativa (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidades de Altitud Relativa (# de pixeles) DZXamientos (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de las unidades de Altitud Relativa a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
2000-2200	18774	33	1231	31	0.17	0.64	0.16
2200-2400	72736	665	769	461	0.91	1.00	0.63
2400-2600	80242	585	1005	674	0.73	1.25	0.83
2600-2800	58722	60	524	586	0.10	0.89	1.00
2800-3000	17085	58	89	231	0.33	0.52	1.35
3200-3400	12188	30	-	58	0.24	-	0.47
3400-3600	1888	-	-	16	-	-	0.84

TABLA 5: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE INCLINACION DE PENDIENTE HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Inclinación de la pendiente en grados	Superficie total de la inclinación de la pendiente (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidades de inclinación de la pendiente (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la inclinación de la pendiente a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
< 10	38942	80	244	242	0.46	0.63	0.62
10-20	75568	421	649	536	0.56	0.86	0.71
20-30	66652	403	650	555	0.60	0.98	0.83
30-40	39593	198	442	298	0.50	1.11	0.75
40-50	19352	107	228	162	0.55	1.18	0.83
60-70	10404	58	147	104	0.56	1.41	1.00
> 70	11124	64	148	160	0.57	1.33	1.43

TABLA 6: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE ORIENTACION DE LAS PENDIENTES HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Intervalos de Exposición de la pendiente en azimut	Superficie total de la Exposición pendiente (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de exposición de la pendiente (# de pixeles) "DZ"			Susceptibilidad o "peso" de la exposición de la pendiente a los tipos de deslizamiento (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
0.50	38988	237	1375	81	0.60	0.96	0.46
50-100	38122	162	447	306	0.42	1.17	0.80
100-150	47751	331	459	475	0.69	0.96	1.00
150-200	27547	192	232	218	0.70	0.84	0.79
200-250	32824	186	313	389	0.56	0.95	1.18
250-300	62768	252	523	419	0.40	0.83	0.66
300-360	13634	71	159	69	0.52	1.16	0.50

3.5.4. DRENAJE Y MICROCUENCAS

En los últimos años las investigaciones sobre cartografía automática de rasgos hidrográficos a partir de modelos numéricos de terreno han evolucionado notablemente. Entre éstas investigaciones se destacan: la extracción de redes de drenaje (HARALICK, 1983; JENSON, 1985; JENSON y DOMINIQUE, 1988; RIAZANOF *et al*, 1992), y límites hidrográficos en varios órdenes de cuencas o microcuencas (BAND, 1986; DOUGLAS, 1986; MORRIS Y MERDEGEN, 1988).

En este trabajo se obtuvo automáticamente la red de drenaje superficial y las líneas de divisoria de aguas (Figuras 18a y 18b) a partir del MNT utilizando software Arborecence y Bassins (ISTAR, 1990).

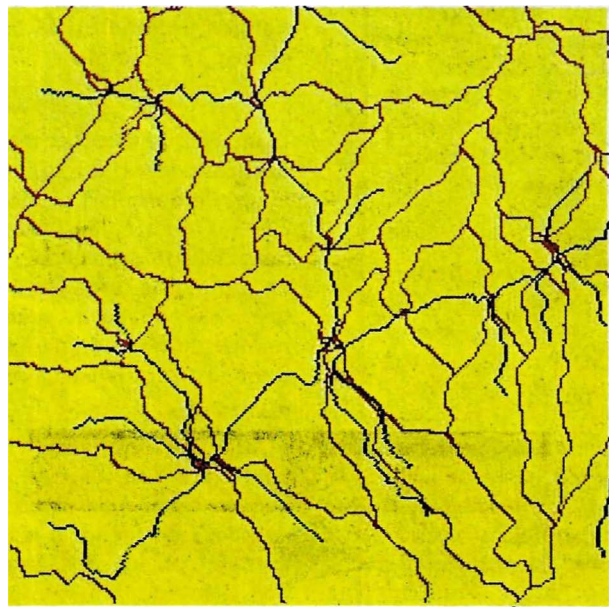
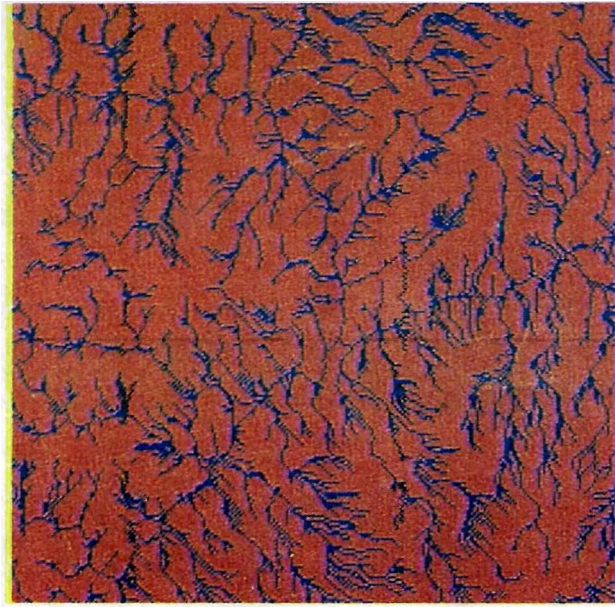
La cartografía de las redes de drenaje superficial se definió hasta un orden de cuarto grado. Su configuración define patrones de tipo paralelo y subparalelo, especialmente sobre la margen derecha del río Chicamocha, y dendrítico a subdendrítico en la margen opuesta del mismo río. Cabe anotar que este drenaje define las líneas o áreas por donde se pueden encauzar cuerpos de agua (lluvias)

y no corrientes permanentes, ya que las corrientes permanentes en el área se limitan principalmente a los ríos Chicamocha y Soapaga.

El mapa de líneas de divisoria de aguas definen un total de 48 microcuencas para el área de estudio.

El análisis de este factor de terreno con los deslizamientos se realizó a partir de un mapa de densidad de drenaje (Figura 19). Generalmente las zonas de mayor densidad de drenaje se relacionan a áreas en donde la erosión hídrica es o fue intensa. El mapa de densidad de drenaje representa cinco unidades de densidad, en términos de muy baja a muy alta.

El análisis estadístico (Tabla 7), de este parámetro con los deslizamientos indica que no existe una relación directa de las unidades de menor a mayor densidad de drenaje con los deslizamientos del área. Por ejemplo para los deslizamientos de tipo 2, la unidad de "media" densidad de drenaje presenta un mayor valor de susceptibilidad (1.23) que la unidad de muy alta densidad de drenaje (0.86).



A: RED DE DRENAJE B: MICROCUENCAS

FIGURA 18: MAPA HIDROGRAFICO DERIVADO DEL MNT

TABLA 7: CALCULO ESTADISTICO DEL PESO DE LAS UNIDADES DE DENSIDAD DE DRENAJE HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

Intervalos de densidad de drenaje "densidad"	Superficie total de densidad de drenaje (# de pixeles) "S"	Superficie acumulada de deslizamientos por unidad de densidad de drenaje (# de pixeles) "DZX"			Susceptibilidad o "peso" de la densidad de drenaje a los tipos de deslizamientos (W%)		
		TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Mu baja	5122	-	-	7	-	-	0.13
Baja	38067	76	184	419	0.20	0.48	1.10
Media	84234	523	1042	8110	.62	1.23	0.96
Alta	12184	804	1092	750	0.71	0.97	0.66
Muy alta	22028	28	190	70	0.12	0.86	0.31

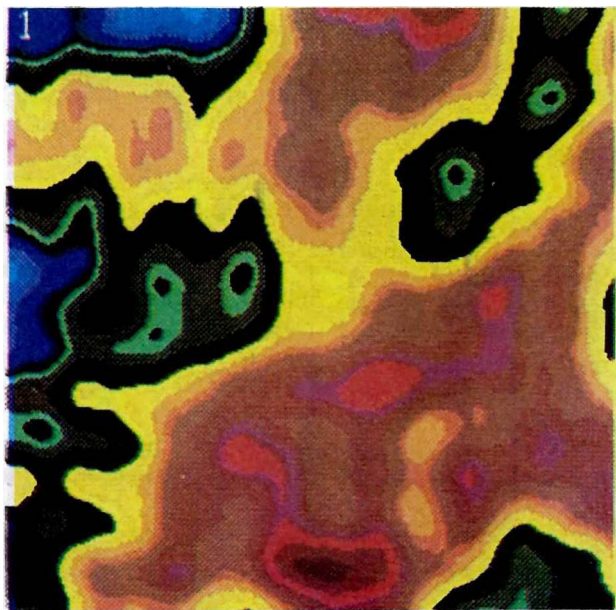


FIGURA 19: MAPA DE DENSIDAD DE RED DE DRENAJE

4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos se realizan a partir del análisis estadístico que determina el valor de "peso" de cada unidad de terreno.

El método cartográfico se fundamenta en la recodificación de los valores iniciales de las unidades de terreno de los mapas digitales (Ej: los depósitos aluviales "Qal" tienen un valor de 1, y la unidad PDS de 17, etc), en términos de susceptibilidad ("W").

Como el valor del "peso" es dado en porcentaje, en un rango de valores entre 0 y 6.94, se realizó un análisis estadístico mediante el ajuste de los datos a una curva de distribución normal sobre cada tipo de movimientos en masa. Este análisis permitió establecer seis intervalos de susceptibilidad (Tabla 8).

La recodificación de los mapas temáticos en términos de susceptibilidad se realiza con valores de 1 a 6 de acuerdo con el intervalo en que se encuentre el valor del peso (W) de la respectiva unidad de terreno; por ejemplo, la unidad litológica TPSI tiene un valor de 11 sobre la imagen-mapa geológico y su susceptibilidad hacia los deslizamientos de tipo 1 muestra un va-

lor de 0.14. Entonces esta unidad se recodificará con un valor de 1 para este tipo de movimiento.

En las figuras 20 a 26 se presentan los mapas de susceptibilidad de los siete parámetros de estudio: geología, uso y ocupación del suelo, inclinación de la pendiente, densidad de lineamientos, altitud relativa, densidad de drenaje y orientación de la pendiente hacia los tres tipos de movimientos.

Una vez obtenidos los diferentes mapas temáticos de susceptibilidad específicos a los tres tipos de movimientos, se realizan los mapas de susceptibilidad del terreno.

El principio de análisis estadístico para la elaboración de estos mapas se fundamenta en el proceso de adición de imágenes-mapas de susceptibilidad temática (Figura 27).

En este proceso el valor del pixel (z) de la imagen resultante será la suma de los pixeles de las imágenes de entrada bajo la misma posición (x, y). En este caso siete mapas de entrada que tienen valores de pixel entre 1 y 6 producirán una imagen resultante que represente la susceptibilidad del terreno a un movimiento en especial. En esta imagen-mapa el valor del pixel será múltiplo de siete en un rango de 7 a 42.

TABLA 8: INTERVALOS DE SUSCEPTIBILIDAD

VALOR	INTERVALO (W)	TERMINO DESCRIPTIVO DE LA SUSCEPTIBILIDAD
1	< 0.25	Nula a muy baja
2	0.26 - 0.50	Baja
3	0.51 - 0.75	Media baja
4	0.76 - 1.00	Media Baja
5	1.01 - 1.25	Alta
6	> 1.26	Muy alta

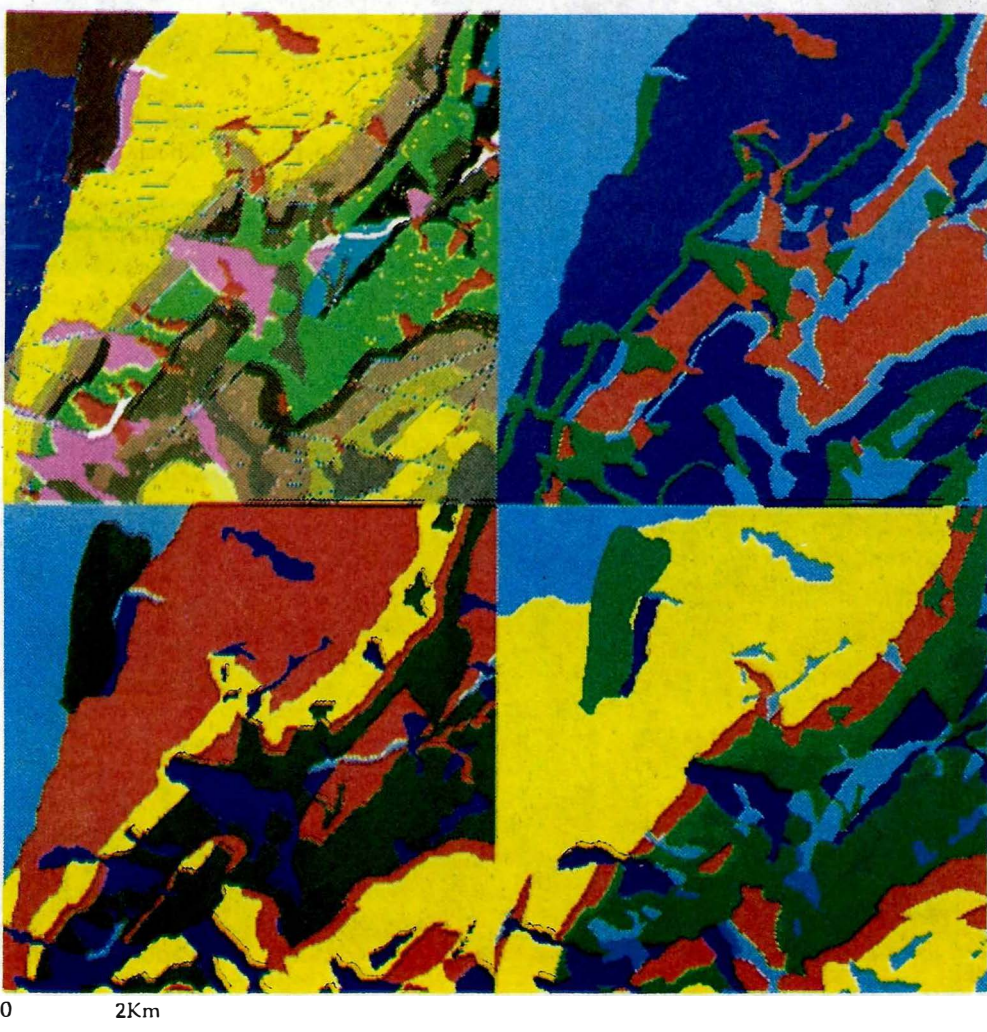


IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 20: IMAGENES-MAPAS DE SÚSCEPTIBILIDAD GEOLOGICA A LOS DESLIZAMIENTOS

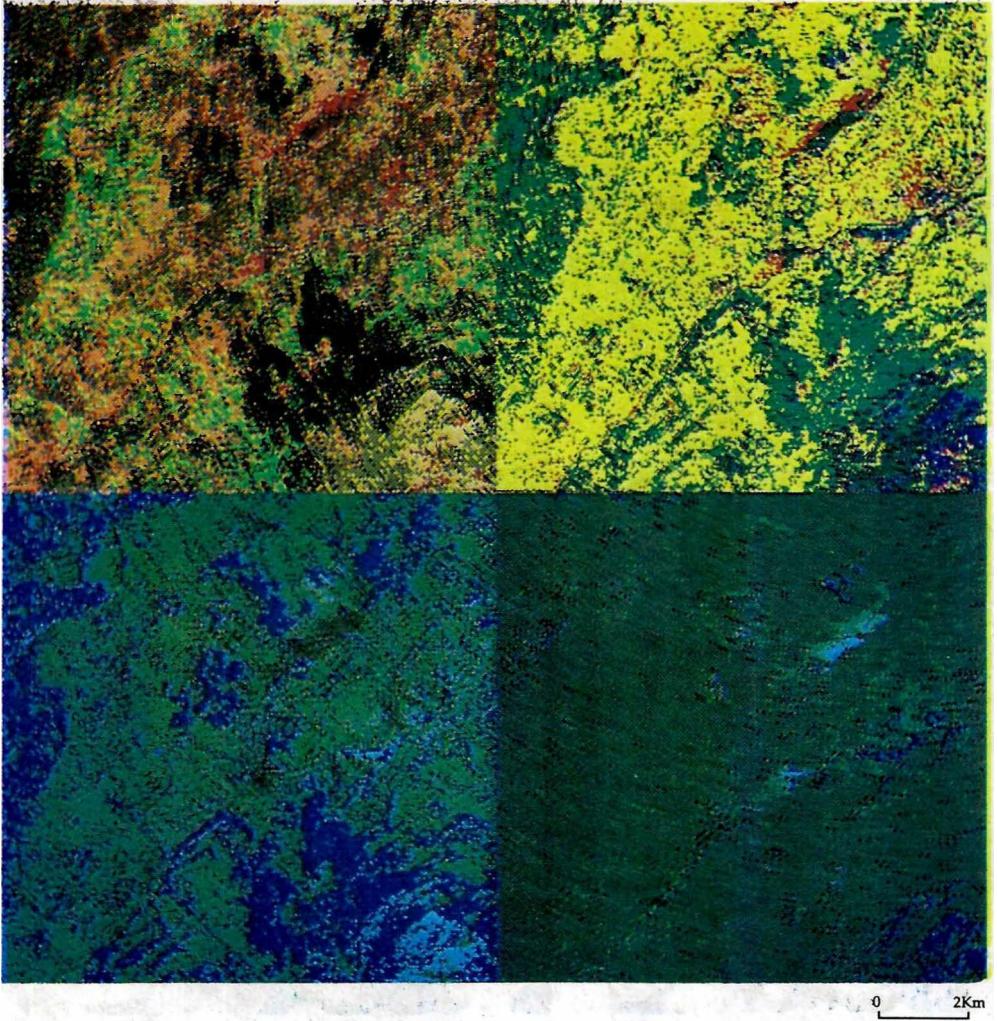


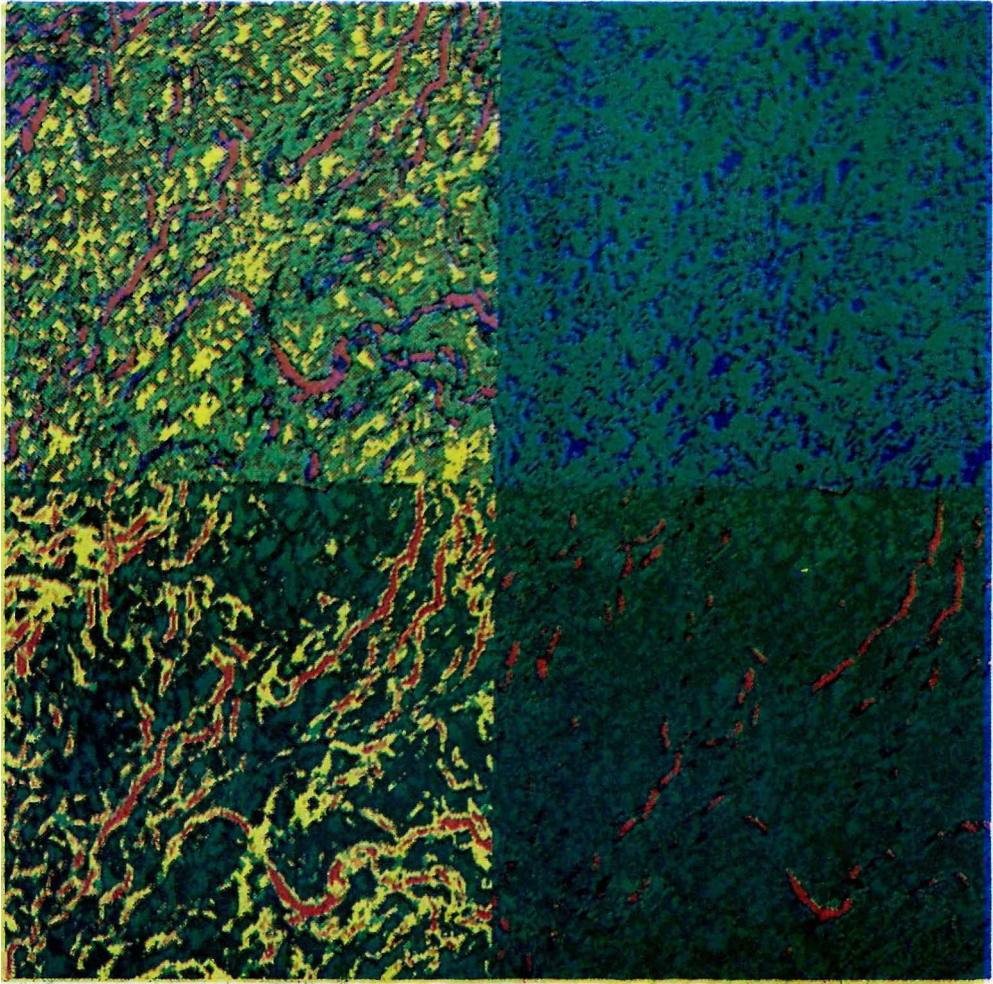
IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 21: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA OCUPACION Y USO DE SUELO A LOS DESLIZAMIENTOS



0 2Km

MAGEN 1. MAPA TEMATICO

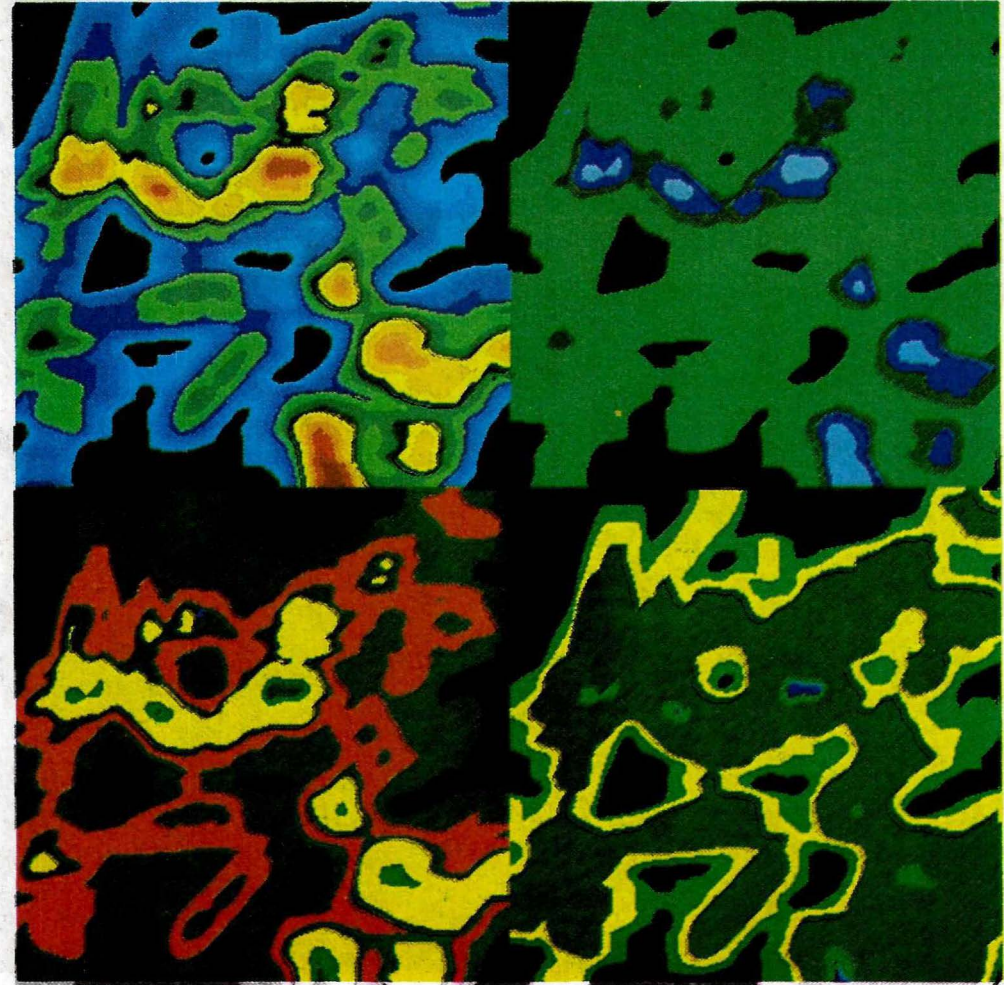
IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 22: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA INCLINACION DE LA PENDIENTE A LOS DESLIZAMIENTOS





0 2Km

IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 23: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DENSIDAD DE LINEAMIENTOS A LOS DESLIZAMIENTOS

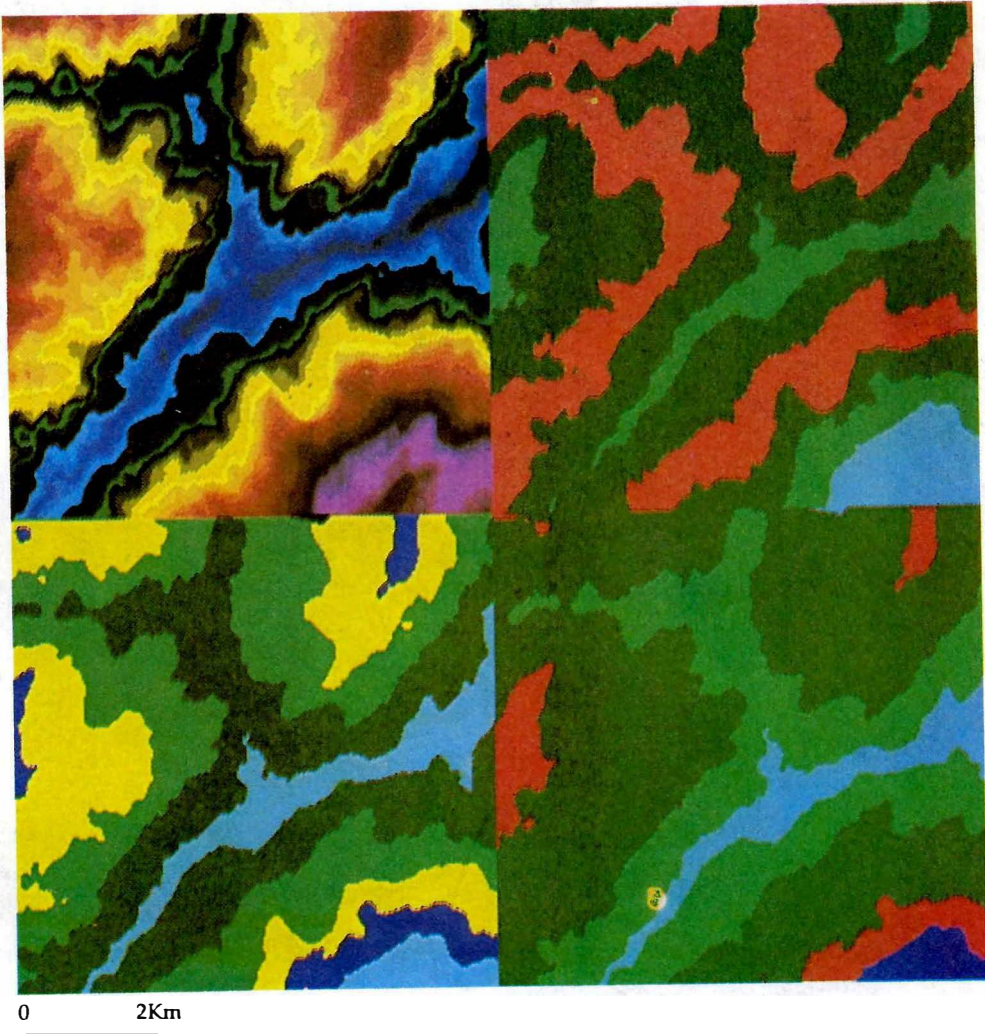


IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 24: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA ALTITUD RELATIVA A LOS DESLIZAMIENTOS

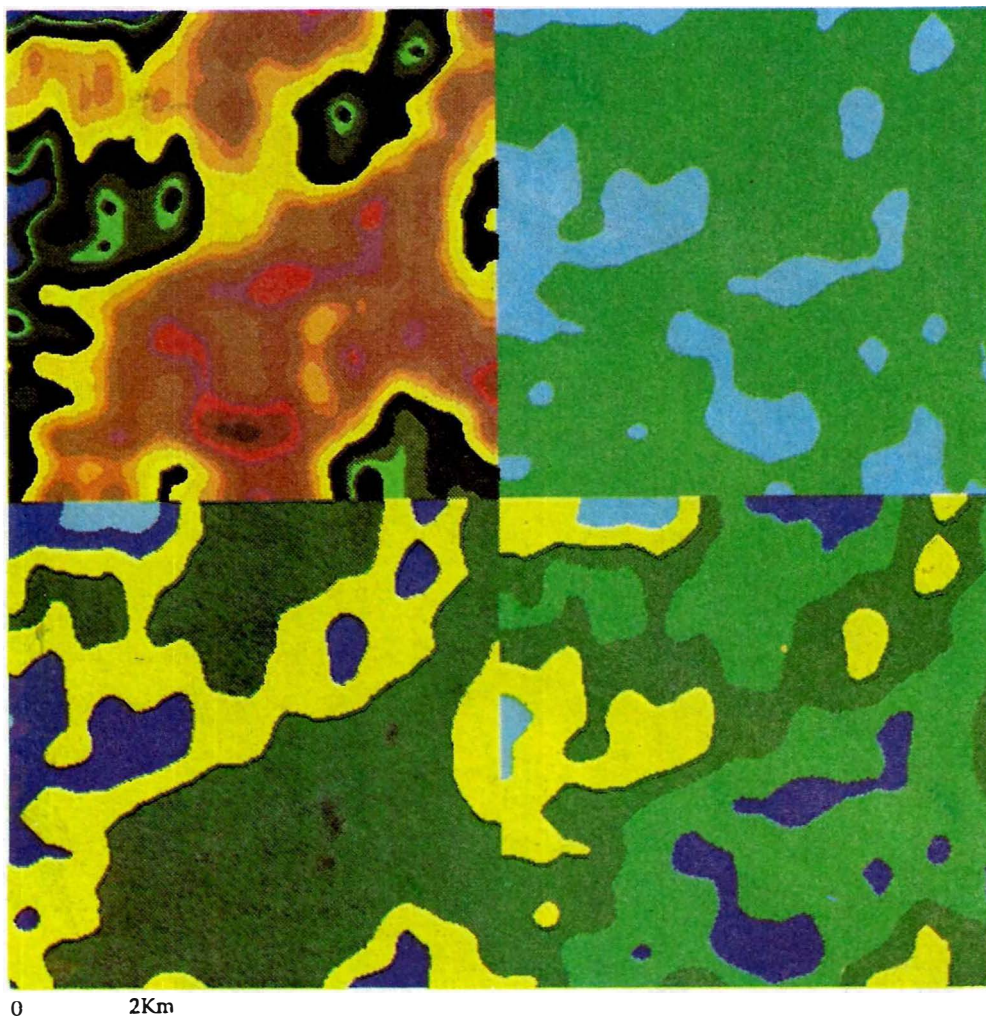


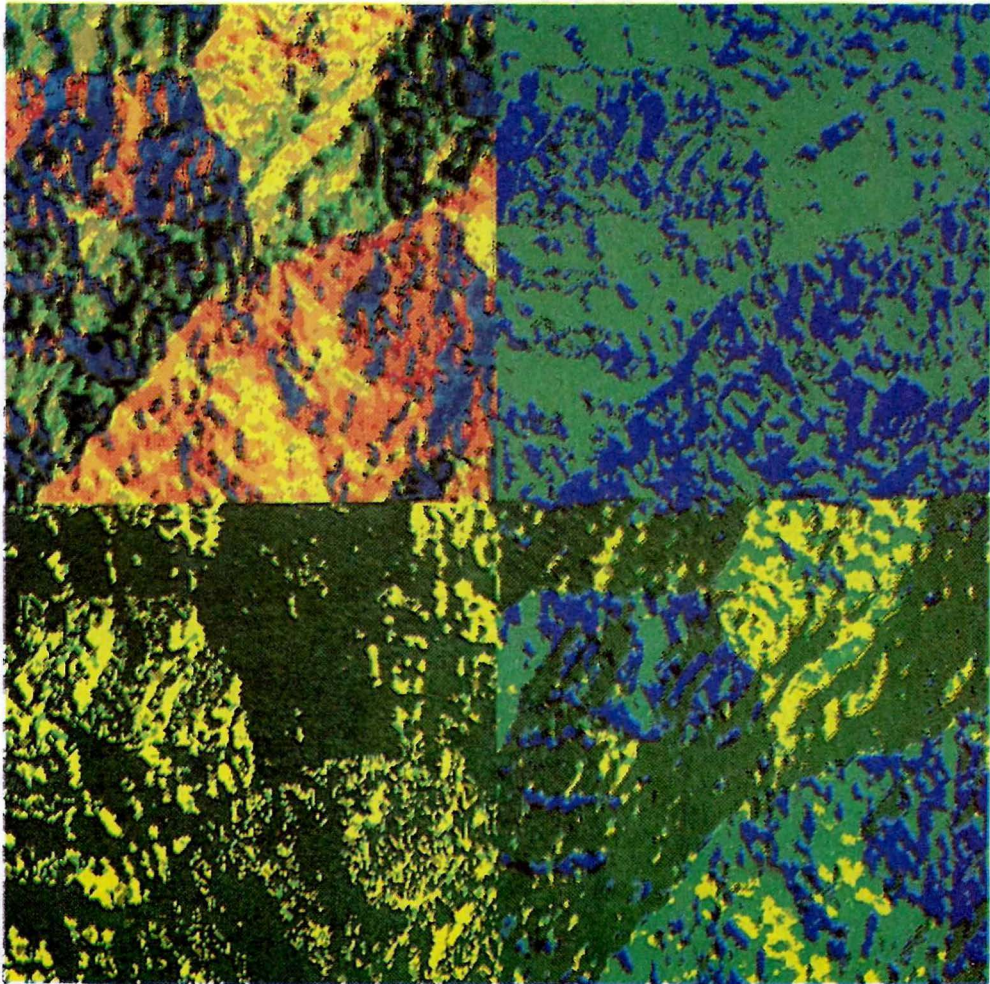
IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 25: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA DENSIDAD DE DRENAJE A LOS DESLIZAMIENTOS



0 2Km

IMAGEN 1. MAPA TEMATICO

IMAGEN 2. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 1

IMAGEN 3. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 2

IMAGEN 4. SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS TIPO 3

FIGURA 26: IMAGENES-MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA ORIENTACION DE LAS PENDIENTES A LOS DESLIZAMIENTOS

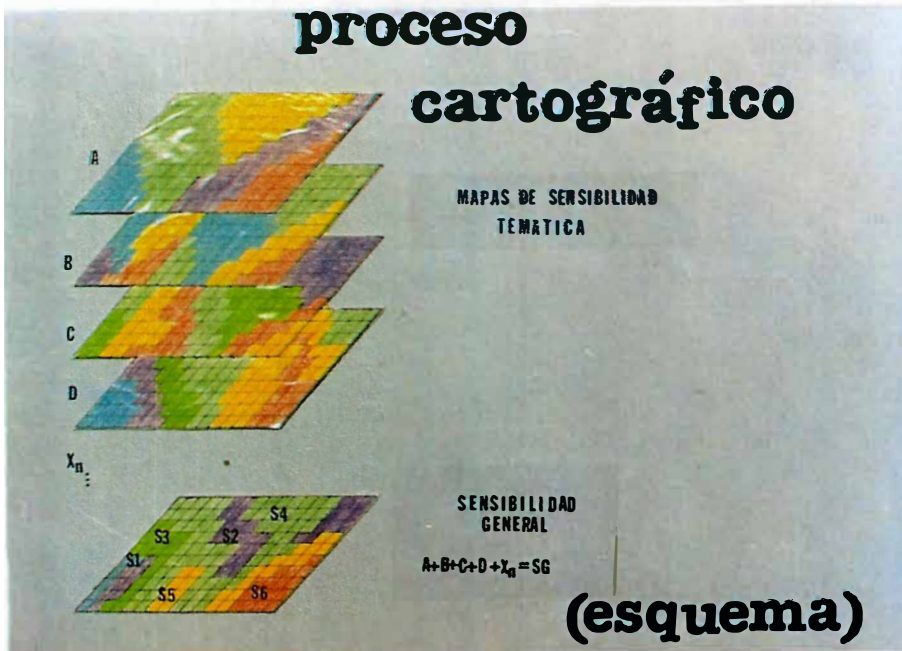


FIGURA 27: ESQUEMA DE SUPERPOSICION DIGITAL DE IMAGENES SOBRE UN SIG PARA LA ELABORACION DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO HACIA LOS DESLIZAMIENTOS

El mapa de susceptibilidad del terreno específico a un movimiento, se realiza recodificando la imagen en términos de las seis categorías de susceptibilidad definidas. Ej: los píxeles con valores menores que siete se recodifican con el valor 1 (gráficamente se le asigna un color de escena azul claro), los píxeles con valores entre 8 y 14 se recodifican a 2 y se le asigna un color azul oscuro etc.

En las figuras 28, 29, y 30 se presentan los mapas de susceptibilidad del terreno hacia los deslizamientos de tipo 1, 2, y 3.

Un tercer mapa de susceptibilidad del terreno que involucra todos los movimientos clasificados (tipo 1, 2, y 3) fue realizado mediante el mismo proceso anterior de adición de imágenes. Aquí las imágenes de entrada fueron las imágenes de suscepti-

bilidad del terreno específicas a cada movimiento. (Figura 31).

4.1. VALIDACION DEL METODO

La validación de mapas regionales de susceptibilidad a los movimientos es compleja debido a que se requiere de un seguimiento en el tiempo y el espacio de los movimientos del terreno existentes y la observación continua de las áreas sin procesos de remoción en masa actual, pero susceptibles en un cierto grado a estos.

Sobre el área de prueba se cuenta con varios factores que han facilitado validar el método aquí propuesto. Entre estos factores se cuentan la poca extensión del área, su facilidad de acceso, los valiosos registros de inventarios y estudios de zonas inesta-

Mapas temáticos de susceptibilidad

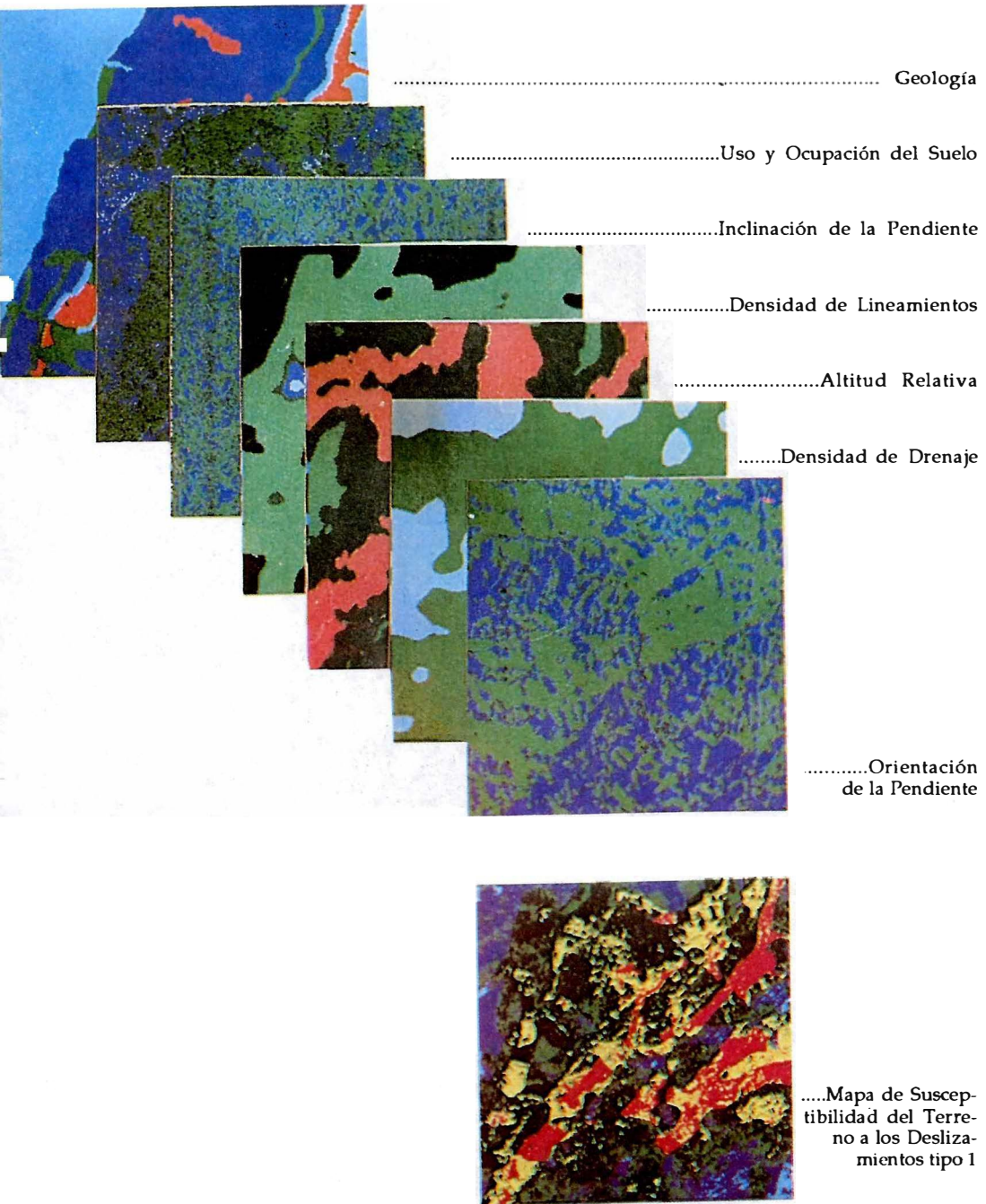


FIGURA 28: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LOS DESLIZAMIENTOS DE TIPO 1

Mapas temáticos de susceptibilidad

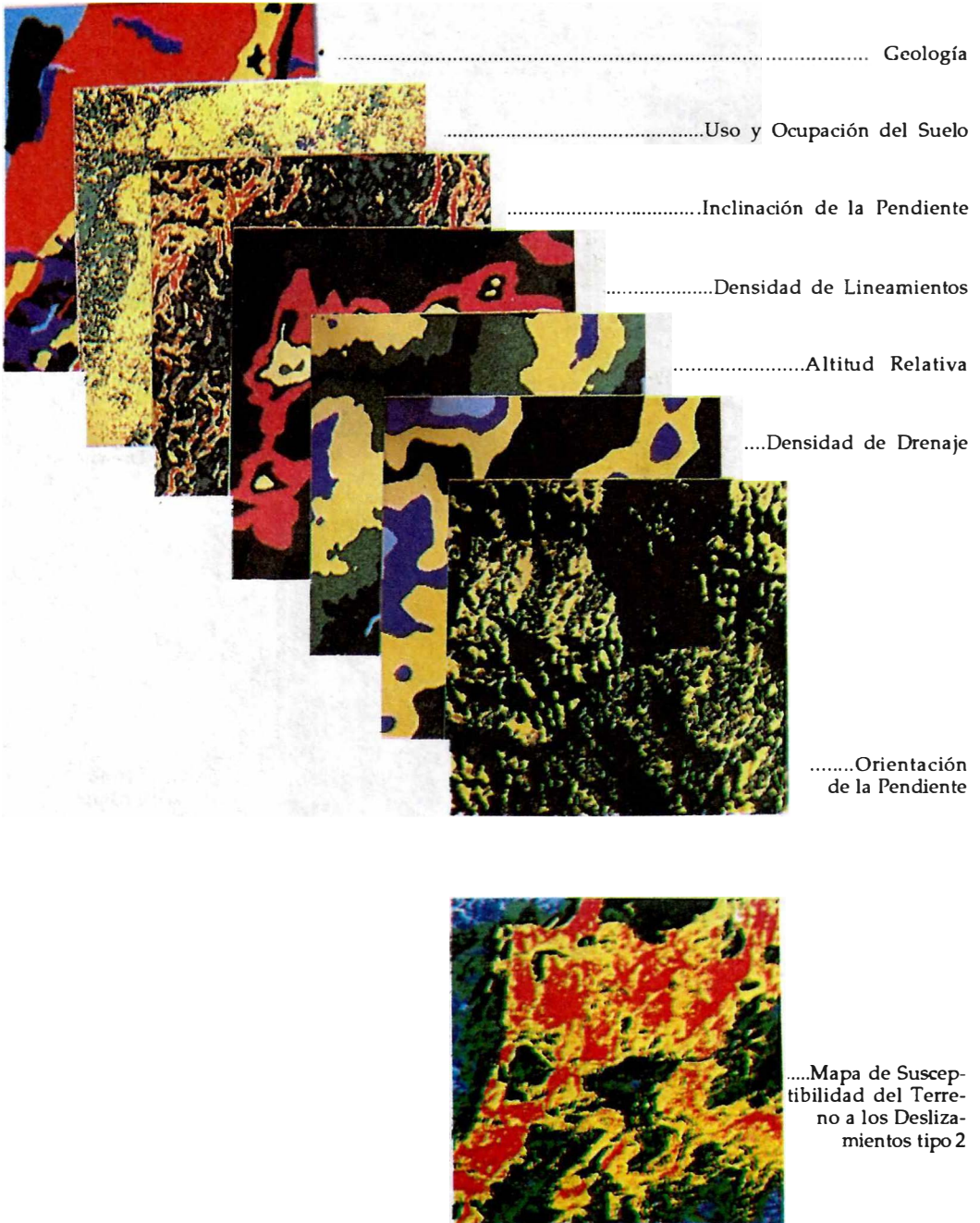


FIGURA 29: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LOS DESLIZAMIENTOS DE TIPO 2

Mapas temáticos de susceptibilidad

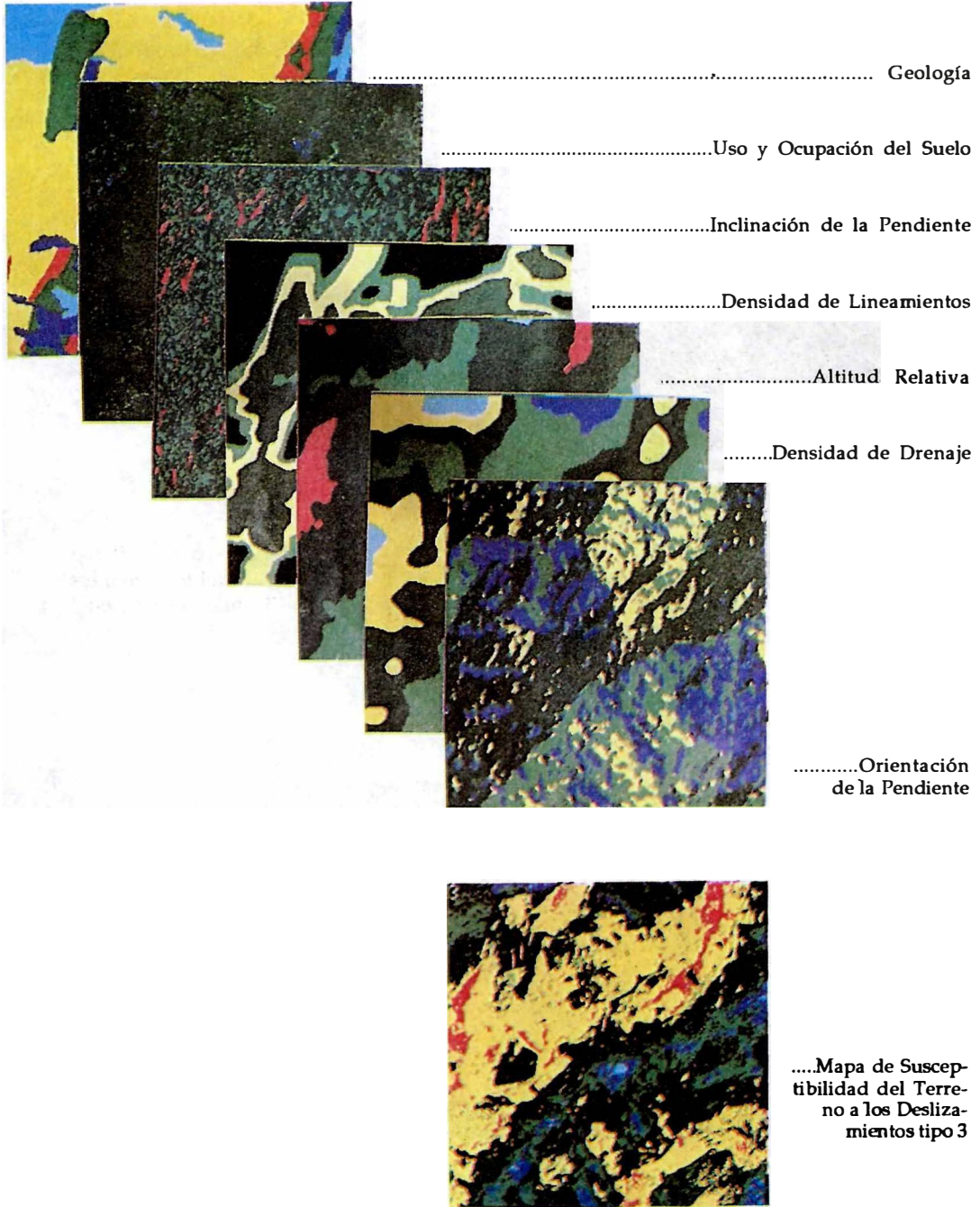


FIGURA 30: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A LOS DESLIZAMIENTOS DE TIPO 3

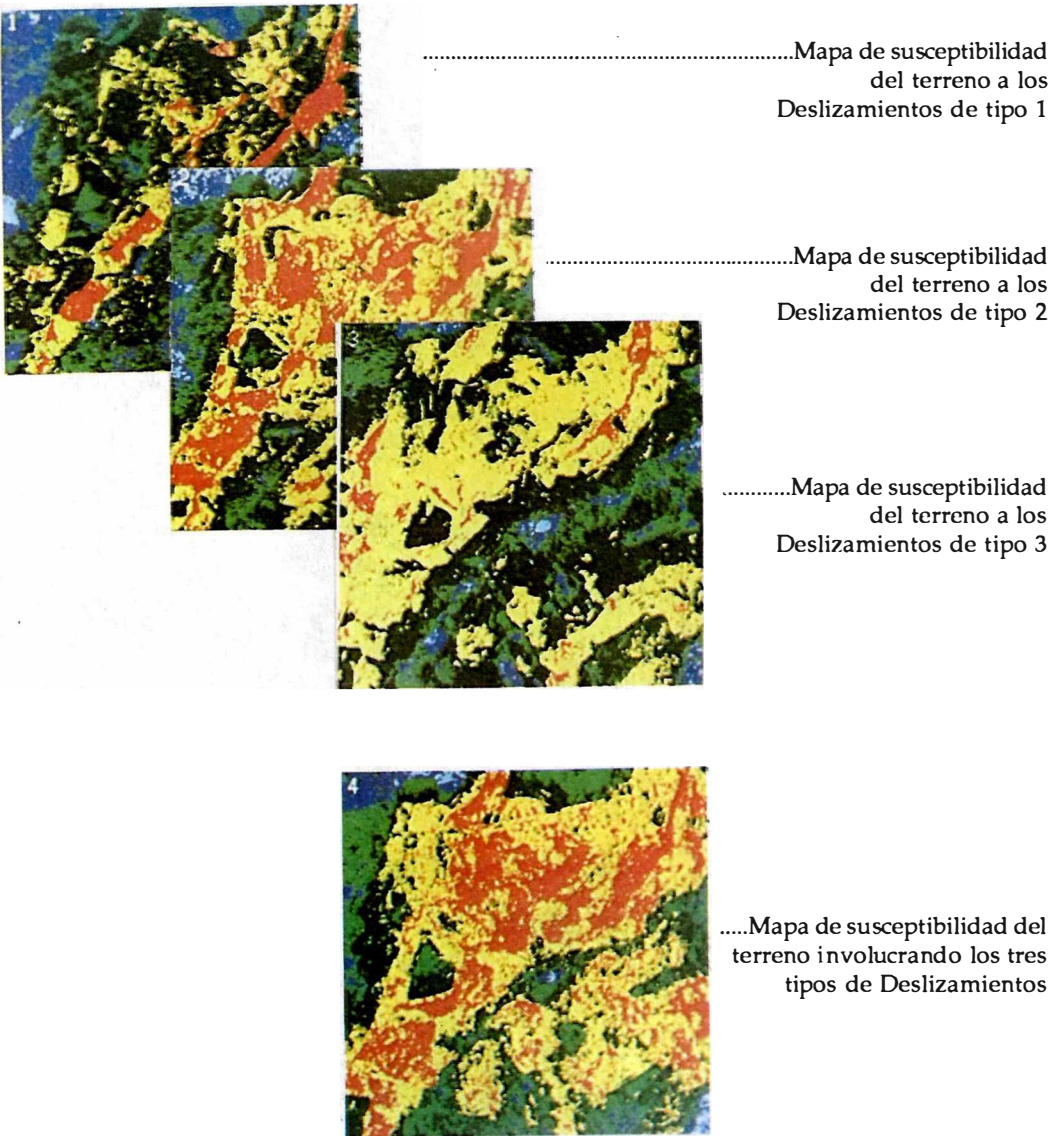


FIGURA 31: SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO HACIA LOS DESLIZAMIENTOS EN GENERAL

bles en un lapso de más de 60 años, la disponibilidad de fotografías aéreas a escalas detalladas, e imágenes de satélite de buena calidad y un buen conocimiento y experiencia en el terreno.

La cartografía de zonas inestables en este trabajo fue soportada en registros de campo (1989-1990) e imágenes de satélite de 1988. Los resultados de esta investigación fueron posteriormente evaluados sobre el terreno en noviembre de 1991 por una comisión de expertos Franceses y Colombianos. De esta visita se establecieron varias observaciones importantes:

Las áreas donde actualmente existe mayor inestabilidad por remoción en masa corresponden sobre el mapa de susceptibilidad a zonas de mayor grado.

Se verificó la importancia en la diferenciación de los movimientos en masa para el análisis y cartografía de los mapas de susceptibilidad; por ejemplo las zonas de alta susceptibilidad hacia los movimientos antiguos se relacionan más a factores naturales en las zonas de mayor altitud, donde imperaron condiciones climáticas y geoambientales muy particulares en épocas pasadas, que se relaciona principalmente a ambientes fluvio-glaciares.

Se identificaron nuevos movimientos de pequeña extensión localizados sobre las áreas que indicaban alta susceptibilidad a los deslizamientos de tipo 2 (menores activos).

4.2. DISCUSION DE RESULTADOS

En este aparte se discuten las ventajas y limitantes en el método aquí propuesto para la cartografía digital de mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa, usando técnicas de sensores remotos y SIG.

En primer lugar la posibilidad cartográfica de un área por sensores remotos depende

en principio de tres factores físicos de las imágenes como: disponibilidad de la imagen(es) adecuada (SPOT-PAN, SPOT-XS o LANDSAT-TM), la calidad (% de cobertura de nubes), y el nivel de corrección radiométrica y geométrica.

La disposición de imágenes ópticas sobre la región Andina, constituye en muchos casos una limitante, en especial por las difíciles condiciones atmosféricas que imperan. Al iniciar esta investigación se tuvo este inconveniente en la adquisición de una segunda imagen SPOT-XS para conformar la estereoscopia, la cual en más de un año de programación no fue posible su registro. Sin embargo, la estereoscopia se obtuvo por el sinergismo gráfico con LANDSAT-TM y sintéticamente mediante la generación de imágenes a diferente vista perspectiva por métodos artificiales (software VUE3D) utilizando la ortoimagen Spot y el modelo numérico de terreno.

Otro punto importante es el nivel de corrección radiométrica y geométrica que debe tener la imagen base. La necesidad de combinar productos de diferentes sistemas cartográficos, hace indispensable contar con ortoimágenes o imágenes georreferenciadas al mismo sistema cartográfico. Aquí se utilizó una nueva técnica desarrollada para el proyecto "GARS" que consiste en obtener una ortoimagen y un MNT por correlación automática entre imágenes SPOT-XS y Landsat-TM.

De otra parte, un modelo numérico o digital de terreno constituye un producto indispensable para estos estudios. Su obtención más convencional se realiza mediante la digitalización de curvas de nivel, aunque en nuestro país existen aun áreas sin cubrimiento topográfico. En ausencia de mapas topográficos se puede obtener un MNT por las técnicas de correlación automática de imágenes de satélite que formen estereoscopia, como el utilizado en esta investigación. Cabe anotar que el MNT debe ser geoméricamente correlacionable a los otros productos cartográficos involucrados en el estudio.

En la cartografía morfodinámica digital, las imágenes de satélite mostraron una gran capacidad en la identificación de deslizamientos activos especialmente en donde se ha removido material rocoso y la vegetación es mínima. Esto se refleja sobre la imagen con una alta respuesta espectral. Mientras que para la identificación de movimientos antiguos o zonas de reptación, existen limitantes que hacen necesarios los controles de campo y realizar análisis estereoscópicos.

Para la caracterización y cartografía de las unidades de uso u ocupación del suelo, las imágenes de satélite mostraron su mayor utilidad cartográfica. La influencia de la vegetación sobre la inestabilidad de un área es de gran importancia, por lo tanto su cartografía debe ser lo más objetivamente posible. La imagen SPOT realizada, aportó claras diferencias en cuanto a textura y respuesta espectral entre estos tipos de vegetación.

Otra clara diferenciación ocurre sobre los suelos desnudos que pueden representar desde capas de rocas resistentes, suelos agrícolas o áreas erosionadas. En este estudio se diferenciaron claramente dos zonas de remoción en masa, suelos residuales, zonas de rocas desnudas y afloramientos de hierro sobre los cuales existe una alta actividad minera.

El modelo numérico de terreno es un producto de gran capacidad cartográfica, en especial en la cartografía morfométrica e hidrográfica. La facilidad de modificación de las variables o intervalos facilitó el análisis hacia las zonas inestables y la selección de los mejores intervalos o unidades de terreno.

Los mapas de densidad (lineamientos, drenaje, deslizamientos) obtenidos por métodos digitales de filtraje de imágenes introducen un nuevo sistema cartográfico que permite evaluar la información de parámetros lineales bajo una forma areal.

El análisis digital estadístico de las coronas de deslizamientos sobre los diferentes mapas temáticos digitales permitió determinar cuantitativamente el peso o susceptibilidad de cada parámetro de terreno hacia tres tipos de deslizamientos. Este método se fundamenta en un sistema tradicional de cálculo de movimientos por unidad de área o de terreno.

El mayor aporte se refiere en la exactitud del cálculo, que está soportado en un análisis raster (malla) con una unidad mínima de un pixel, el cual representa un área de 20x20 m. La definición de las coronas de los movimientos como elemento de análisis, permitió definir exactamente los sectores en donde se combinaron una serie de parámetros de terreno que intervinieron en la formación del movimiento.

Igualmente, la clasificación de estas coronas de deslizamientos en tres tipos permitió establecer que en la formación de estos movimientos intervienen factores de terreno particulares en cada uno de ellos.

El concepto y utilización de un SIG en estudios de este tipo, resultó ser una herramienta indispensable, facilitando el almacenamiento estructurado de la información cartográfica y el análisis espacial para la determinación de la susceptibilidad de los factores y su expresión cartográfica.

Finalmente, cabe anotar que esta metodología ha sido desarrollada con siete factores básicos del terreno que involucran parámetros geológicos, estructurales, geomorfológicos e hidrográficos. Sin embargo existen otros factores no contemplados aquí, como el meteorológico, sismológico y geotécnico que pueden representar un papel importante en la inestabilidad de las laderas. La determinación del "peso" o influencia de estos otros factores representa una perspectiva para la complementación de este método.

4.3. PERSPECTIVAS

En el curso de ésta investigación se demostró el potencial y las limitaciones de las imágenes de satélite para la cartografía temática y la elaboración de mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa.

El desarrollo progresivo de estos nuevos productos satelitarios pronostica a corto plazo la superación de sus limitantes en cuanto a su resolución espacial, capacidad estereoscópica y baja calidad por nubosidad; igualmente, un mejoramiento de sus bandas espectrales.

Entre estos productos, el más promisorio es el satélite japonés JERS-1, puesto en órbita el 11 de febrero de 1992. Presenta una capacidad estereoscópica, una resolución de 18 m, un sensor óptico con 7 bandas espectrales que abarcan desde el visible, cercano infrarrojo, onda corta-infrarrojo y un instrumento SAR (Synthetic Aperture Radar) de microondas que supera los problemas atmosféricos y conserva la resolución de 18 m.

Otros satélites que muestran buenas perspectivas son el ERS-1 (ESA), MOS-1 (japonés), y los futuros productos de Landsat y Spot.

Así mismo el desarrollo de los sistemas de Información Geográfica ofrece cada día mejores capacidades para el manejo y análisis de información, en la zonificación de fenómenos naturales.

Como perspectiva de complementación de ésta investigación se contempla la evaluación de otros factores de tipo físico (meteorología y sismología) y geotécnico, en un nivel más regional.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a INGEOMINAS por apoyar y colaborar en todos los aspectos técnicos y logísticos en el desarrollo de está

investigación; a la oficina de Cooperación Técnica y Científica de la Embajada de Francia en Colombia y al centro de Estudios Espaciales (CNES) de Francia por el financiamiento de mis estudios en Francia; Mi gratitud a todos los integrantes de comité GARS por su cooperación en el desarrollo de está investigación; un especial reconocimiento al personal científico y administrativo del departamento de teledetección del BRGM en Orleans por su amabilidad, acogimiento y colaboración en la solución de inquietudes y aportes recibidos en la formación en este campo de la teledetección. Al profesor Jean Chorowicz de la Universidad de París 6, mi gratitud y agradecimientos por apoyar la continuación de esta investigación bajo la dirección de una tesis de Doctorado que actualmente adelanto.

6. CONCLUSIONES

El principal resultado de este trabajo es la aplicación exitosa de un método basado en sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) que cuantifica el "peso" o susceptibilidad de las diferentes unidades y parámetros del terreno hacia varios tipos de movimientos. Esta información es básica para el diseño de planes de control y manejo de zonas inestables.

El método aquí desarrollado permite obtener en menor tiempo y a menores costos, evaluaciones confiables de la inestabilidad geológica-geomorfológica actual y potencial en regiones de interés a nivel regional (zonas Departamentales, cuencas hidrográficas, corredores en proyectos de obras civiles, etc) y escala media (en Municipios, veredas, etc).

También se ha demostrado en ésta investigación que las imágenes de satélite y modelos numéricos de terreno son una herramienta de gran capacidad cartográfica en estudios de ciencias de la tierra aplicados a la zonificación de fenómenos de remoción en masa y la prevención de desastres naturales.

La determinación de la susceptibilidad temática hacia tres movimientos y características diferentes, ha permitido comprobar la diferencia de "peso" de los factores de terreno sobre estos movimientos, perfeccionando y haciendo más exacta su cartografía.

Los mapas de susceptibilidad sobre el área de aplicación, muestran que un 10.3% de su extensión presenta una muy alta susceptibilidad a los deslizamientos de tipo 1 (mayores activos), un 21% hacia los movimientos de tipo 2 (menores activos) y un 4.5% hacia los movimientos de tipo 3 (antiguos).

Las áreas que presentan mayor susceptibilidad a los deslizamientos se ubican preferencialmente sobre las laderas de la margen izquierda del río Chicamocha y en las laderas medias de la margen derecha de este río.

De estos resultados se resaltan dos observaciones importantes.

Existe una notable diferencia en el valor del "peso" de una misma unidad de terreno hacia los tres tipos de movimientos involucrados, lo cual determina la importancia de su clasificación.

Se demuestra igualmente que ciertos factores denominados "críticos" no tienen la misma incidencia sobre todos los tipos de deslizamientos. Por ejemplo el "peso" del parámetro inclinación de la pendiente para los deslizamientos de tipo 1 (menores activos) no es tan significativo ($W = 046 - 060$) como para los otros tipos de movimientos, que muestran un mayor valor ($W = 062-143$) y una relación directa a mayor pendiente.

7. REFERENCIAS

- ALVARADO, B., 1955.- *Informe sobre los deslizamientos en la hoya del río Chicamocha, entre las poblaciones de Tasco y Paz de Río*. Ingeominas, Bogotá.
- ANBALAGAN, R., 1992.- *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. Engineering Geology, 32, pp. 269-277.
- BAND, L.E., 1986.- *Topographic partition of watersheds with digital elevation model*. Water Resour. Res, 22, pp.15-24.
- CAPELLINI, V., ALPARONE, L., GALLI, LANGE, P., NECOCCI, A. and MENICHETTI, L., 1991.- *Digital processing of stereo images and 3-D reconstruction techniques*. International journal of remote sensing. Vol. 12 N) 3, pp 477 - 490.
- CARDENAS L.A, VARGAS J., 1989.- *Estudio de estabilidad en el Alto Chicamocha, sector Tasco-Paz de Río-Socha, Boyacá*. Univ. de Sogamoso. Tesis de grado.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. and RECHENBAH, P., 1991.- *Gis techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 16, pp. 427-445.
- CENDERO, A., SANCHES, J., & ANTOLIN, C., 1990.- *Geopcientific maps for planning in semiarid regions: Valencia and Gran Canaria, Spain*. Engineering Geology, 29, pp. 291-319.
- CHOROWICZ, J., 1984.- *Importance of pattern recognition for geological remote sensing*. Remote sensing for Geological Mapping. Publication IUGS, 18 pp 29-40.

- CHOROWICZ, J., KIM J., MANOUSSIS S., RUDAN J.P., FOIN P., VEILLET I., 1989.- *A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in digital elevation models*. Remote Sensing and Environment, Vol. 29, Nº 3, pp 229-239.
- CHOROWICZ, J., BREARD, Y. J. GUILLANDE, R., ROGER, C., PRUDON, D., and RUDANT, J.P., 1991.- *Dip strike measured systematically on digitized three-dimensional geological maps*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, Nº 4, pp. 431-446.
- COLLINS, S.H., 1975.- *Terrain parameters directly from a digital terrain model*. Canadian Surveyor 29(5), pp.507-508.
- DOUGLAS, D.H., 1986.- *Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model*. Cartographica 23,(4) pp.29-61.
- DUFOUR, H.M., et ABGRALL, F. 1983.- *Éléments remarquables du relief; définitions numériques utilisables*. Com. Franá. Cartogr., fascicule no 95, pp. 57-79.
- DUPERET, A. 1990/91.- *Utilisation Géomorphométrique d' un Modéle numérique de Terrain calculé par corrélation automatique d'images Spot*. Photo-Interprétation fas. 4, pp.31-34.
- EHLERS, M., and WELCH. 1987.- *Stereocorrelation of Landsat Tm Images*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 53, pp. 1231-1237.
- EVANS, I.S. 1980.- *An Integrated System of terrain analysis and Slope Mapping*. Z. Geomorphology, N. F. Suppl. Bd. 36, pp. 274-295.
- EVELYN, B., NEWMAN, E.B. PARADIS, A.R. and BRABB, E.E. 1978.- *Feasibility and Cost of Using a computer to prepare Landslide susceptibility Maps of the San Francisco Bay Region, California*. Geological Survey Bulletin 1443. 24 pp. and 1 color map.
- GUPTA, R.P. and JOSHI, B.C. 1990.- *Landslide hazard zoning using the GIS approach- a case Catchment, Himalayas*. Engineering Geology, 28, pp. 119-131.
- HARALICK, R.M., 1983.- *Ridges and valleys on digital images*. Computer Vision Graphics and Image processing, 22, pp. 28-38.
- HANSEN, A. 1984.- *Landslide Hazard Analysis*. In Brunsten, D. and Prior, B. (eds) Slope Instability Wiley & Sons, New York. pp. 523-602.
- HUBACH, E., Y ALVARADO, B., 1933.- *La destrucción de los sitios de reconstrucción de la Paz, Boyacá*. Informe 222. Ingeominas, Bogotá, y Compilación de Estudios Geológicos Oficiales de Colombia, tomo VI, pp 60-69.
- IGAC. - INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZI, 1984.- *Estudio Regional integrado del Altiplano Cundiboyacense, valle Alto del Chicamocha*. Publicaciones IGAC, Bogotá.
- JENSON, S.K. 1985.- *Automated derivation of hydrologic basin characteristics from digital elevation model data*. Proceedings of Auto-Carto VII ASP publication, Washington, D.C. pp. 301-310.
- JENSON, S.K., et DOMINIGUE, J.O., 1988.- *Extracting topographic structure from digital elevation model data for geographic information system analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, pp. 1593-1600.

- JULIEN P., 1987.- *Exploitation des images par corrélation automatique pour la réalisation de MNT*. Rap PERS N°89, aux Marseille.
- LEROI, E., ROSEAU, O., SCANVIC, J., WEBER, C. and VARGAS, G. 1992.- *Remote sensing and GIS technology in Landslide hazard mapping in the Colombian Andes*. Episodes, V 15 No. 1 p. 32-35.
- LOBO-GUERRERO, U.A., y RODRIGUEZ P.J.A., 1978.- *Análisis geológico del deslizamiento de el Salitre, Municipio de Paz de Río, y elaboración del mapa potencial de amenaza por avalancha de detritos o inundaciones*. Informe inédito Ingeominas.
- LLINAS, R. PRECIADO, A. 1988.- *Estudio geomorfológico y geotécnico del área de Paz del Río-Boyacá*. Estudios y proyectos Ambientales S.A. Bogotá.
- _____, 1989.- *Casos del deslizamiento de Coradales - El Salitre y de la remoción en masa de La Chapa*. V Congreso Colombiano de Geología. Bucaramanga.
- MARK, D. M. 1975.- *Geomorphometric Parameters: A review and evaluation*. Geog. Ann., Vol. 3-4, pp. 165-177.
- MARTZ, W.L. DE JONG. 1978.- *CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from Digital Elevation Models*. Computers and Geosciences. 14(5), pp. 627-640.
- MASSON D'AUTOME 1978.- *Construction du modèle numérique d' une surface par approximations successives*. Bull. Société Française de Photogrammétrie et Télédétection 3:4, pp. 33-41.
- _____, 1984.- *Correction numérique d' images quelconques selon les lignes quasi épipolaires par approximations successives*. Bull. Soc. Franc. Teled., N° 95, pp 23-24.
- MOURRIS, D.J. and MERDEGEN, R.G., 1988.- *Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological application*. Geomorphology, 2, pp.134-141.
- ORDOÑES, R., 1962.- *Deslizamiento en Tasco, Boyacá*. Ingeominas, Bogotá.
- PACHAURI, A.K. and PANT, M. 1992.- *Landslide hazard mapping based on geological attributes*. Engineering Geology, 32, pp. 81-100.
- PACHECO, A. 1971.- *Informe sobre los deslizamientos del municipio de Paz del Río-Boyacá*. Ingeominas. Bogotá.
- PAPO, H.B., and GELBMANE E. 1984.- *Digital Terrain Models for slope and curvatures*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 35, pp. 695-701.
- PANTON, D.J. 1978.- *A flexible Approach to Digital Stereo Mapping*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 45, No 12, pp.1499-1512.
- PERTL, A., 1985.- *Digital image correlation with and analytical plotter*. Photogrammetria 40, pp 9-19.
- PIKE, R.J. and ROZEMA, W.J. 1975.- *Spectral Analysis of Landforms: Ann. Assoc. Amer. Geog.*, vol. 65, pp. 499-516.
- PIKE, R.J., 1986.- *Geometric signatures of Intermediate-Scale Topography*. Geol. Soc. Amer. Abst. prog., Vol. 18, pp. 171.
- _____, 1988.- *The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models*. Mathematical Geol., 20, PP. 491-511.
- RADBRUCH-HALL, D.H., VARNES, D.J. and SAVAGE, W.Z., 1976.- *Gravitational Spreading of steep-sided ridges (Sackung) in Western United States*. Bull. Int. Ass. Engin. Geol. N° 14, pp 23-35.

- RENGERS, N., SOETERS, R., and VAN WESTEN, J. 1992.- *Remote sensing and gis applied to mountain hazard mapping*. Episodes. Vol. 15, N° 1, pp. 36-44.
- REYES, I. 1971.- *El deslizamiento de Costa Rica (k283 + 300 del Ferrocarril Belencito-Paz de Río)*. informe inedito Acerías Paz del Río, S.A. Belencito, Boyacá.
- _____, 1983.- *Los deslizamientos en el sector "El Limo" Ferrocarril Belencito-Paz del Río*. Informe inédito Acerías Paz del Río, S.A. Belencito, Boyacá.
- _____, 1984.- *Geología de la región de Duitama - Sogamoso - Paz del Río (Departamento de Boyacá)*. Belencito. Inédito.
- _____, 1987a.- *Control geotécnico del Ferrocarril de Paz del Río*. VIII CPMSIF-PCSMFE, Cartagena-Colombia.
- _____, 1987b.- *El deslizamiento de Carichana, municipio de Paz del Río, Departamento de Boyacá, Acerías Paz del Río, S.A. Belencito*.
- RIAZANOF, S., JULIEN, P., CERVELLE, B., CHOROWICZ, J. 1992.- *Extraction et analyse automatiques d'un réseau hiérarchisé de talwegs. Application A un modèle numérique de terrain dérive d'un couple stéréoscopique SPOT*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 13, N° 2, pp. 337-364.
- RITCHIE A.M., 1958.- *Recognition and identification of landslides. Landslides and engineering practices*. Nat. Research Council, Highway Research board Spec. Rept. No 29, pp. 48-68.
- RODRIGUEZ, A. 1987.- *Estudio geológico y mapa de riesgos, quebrada la Chapa, área de los municipios de Socha, Tasco y Paz del Río, Departamento de Boyacá*. Ingeominas.
- SARMIENTO A., 1973.- *Informe sobre la selección del terreno para la construcción de un Instituto Industrial en el area de Paz de Río, Boyacá*. Ingeominas, Bogotá.
- SCANVIC, Y.J., 1983.- *Utilisation de la télédétection dans le ciencias de la terre*. BRGM Mannuels et Methodes Fr., N° 7 pp 823-85.
- SCANVIC, Y.J., GIRAULT F., 1989.- *Imagerie Spot 1 et inventaire des mouvements de terrain: l'exemple de la Paz (Bolivie)*. Revue Photo-interpretation 1989-2, fasc. 1, editions technip, París.
- SCANVIC J. Y. et al, 1990.- *Spot, outil d'aménagement exemple de réalisation par télédetection et analyse multicritère d'une cartographie des zones sensible aux mouvements de terrain le site de la Paz - Bolivie*. Rapport BRGM.
- SCANVIC, J.Y., MOTTI, E., 1990.- *Mapping the vulnerability of ground to landslides. Potential use of Spot stereoscopy data for la Paz, Bolivia*. ERIM, proceeding, 23° symposium on remote sensing of environment, Bangkok, Thailande.
- SIMARD. R., and KRISHNA, V.G., 1983.- *Successful Approach in three dimensional perception of stereo Landsat-MISS Images ouer Cordilleran Relief*. Proceedings of the 9th International Symposium on machine processing of Remotely Sensed Data.
- SIMARD. R.R., OLIVER and E. PINA. 1984.- *Digital Elevation Modeling with Landsat- RBV Data*. Proceedings of Enviroment, París, France. pp 825-834.
- SOCIETE INSTAR. 1990.- *Manuel de référence logiciel VUE3D version 3.1*.

- SOCIETE INSTAR. 1990.- *Manuel de référence logiciel ARBORESCENCE.*
- TAUD, H. and PARROT, J.F., 1991.- *Analyse numérique des formes sub-circulaires sur l'images satellitaires. 2e journées de télédétection ORSTON. "Caractérisation et suivi des milieux terrestres en région aride et tropicale" pp. 293-329.*
- _____, 1991/92.- *Analyse numérique des loupes d'arrachement sur les images satellitaires, étude d'une zone à risque des Andes Péruviennes. Photo-interpretation N° 1, pp.9-13.*
- _____, 1992.- *Detection of circular structures on satellite images. Int. J. Remote Sensing, Vol 13, N° 2, pp. 319-335.*
- UNGAR, S.G., MERRY, C.J., STRAHLER, A.H., MCKIM, H.L., GAUTHIER, B., WEILL, G. and MILLER, M.S. 1983.- *Extraction of topography from side-looking satellite systems; a case study with SPOT simulation data. Proc. Int. Sysmp. Rem. Sens. Environm. 17, pp. 535-550.*
- ULLOA C, RODRIGUEZ E, GUERRA A., 1973.- *Plancha geológica 172, Paz del Río. Ingeominas.*
- VAN WESTEN C.J., 1989.- *Using the "Ilwis" Geographical information system for a medium scale mountain hazard mapping in the Andean environment, using Geographical Information System. Decision Makers Seminar, 11-16 December 1989 IGAC, Bogotá, Colombia.*
- VARGAS CUERVO G., 1989.- *Estudio geológico-geomorfológico y zonificación de amenazas de la cuenca alta del río Chicamocha entre Socha y Belencito, Departamento de Boyacá, Colombia. Informe Ingeominas. 176 p., tres anexos.*
- _____, 1991.- *Methodologie pour l'establissement de cartes de sensibilité aux mouvements de terrain fonde sur L'utilisation d' un couple stereographique Spot Xs/Landsat Memoire DESS. Universite Pierre et Marie Curie, 30 p. Paris (France).*
- _____, 1992.- *Los modelos numericos de terreno y su aplicación al estudio de los deslizamientos. Memorias II Simposio Latinoamericano Sobre Riesgo Urbano. II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. 17 p.*
- VARNES, D.J., 1984.- *Landslides hazard zonation. Review of principles and practice. Serie N° 3, UNESCO, Paris, pp. 1-55.*
- VILLIERS DE A. and LAYMARIE, P. 1984.- *Cartographie automatique des situations topographiques en vue d'utilisations géologiques. Computer in Earth Sciences for Natural Resources Characterization (J.J. Royer, Editor), Nancy, pp. 333-350.*
- WELCH, R., 1985.- *Cartographic potential of Spot image data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 51 N° 8, pp 1085 - 109.*

**REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA**

**BENEFICIO DE ROCA FOSFORICA EN LOS
MUNICIPIOS DE NUEVO COLON, TURMEQUE Y
VENTAQUEMADA (BOYACA)**

Por:

JESUS ZAMBRANO P. Y EDUARDO ROMERO F.

1991

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	120
1. INTRODUCCION.....	120
1.1 ASPECTOS GENERALES	120
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	121
2. FUNDAMENTO TEORICO.....	121
2.1 ASPECTOS GEOLOGICOS	121
2.2 TEORIA DE LA FLOTACION	122
2.2.1 DEFINICION DE LA FLOTACION	122
2.2.2 FLOTACION A LA ESPUMA	122
2.2.3 IMPORTANCIA ECONOMICA DEL PROCESO	122
2.2.4 OBSERVACIONES EXPERIMENTALES	122
2.2.5 REACTIVOS DE FLOTACION	123
2.2.6 INTERACCION COLECTOR - SUPERFICIE DEL MINERAL	123
2.2.7 FORMACION DE ESPUMAS	124
2.2.8 CALIDAD DE LA ESPUMA DE FLOTACION	124
2.2.9 PRACTICA DE LA FLOTACION	124
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	125
3.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	125
3.1.1 PROCESAMIENTO	125
3.2 CARACTERIZACION QUIMICA Y MINERALOGICA	125
3.2.1 ASPECTOS GENERALES.....	125
3.3 ACONDICIONAMIENTO Y FLOTACION.....	127
3.3.1 TAMAÑO DE PARTICULA.....	128
3.3.2 SECADO DE LAS FRACCIONES	128
3.4 ENSAYO A ESCALA PILOTO.....	131
4. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	135
5. BIBLIOGRAFIA.....	139

FIGURAS

1 Mapa de reservas de roca fosfórica de la formación Plaeners en el sinclinal de Piranchón (Sur).....	126
2 Diagrama de flujo típico para flotación de roca fosfórica con ácidos grasos	129
3 Diagrama de flujo de molienda, concentración y acidulación de la roca fosfórica.....	132

TABLAS

1. Análisis de elementos metálicos de muestra de mineral fosfórico por espectroscopía de emisión.....	127
2 Granulometría vía seca por tamices de la serie U.S. Standard	128

3	Distribución del fósforo de acuerdo al tamaño de partícula (tamices de la serie U.S Standard)	131
4	Variación del tiempo de deslame.....	133
5	Variación del pH en el deslame.....	133
6	Variación del depresante (silicato de sodio).....	133
7	Variación del ácido oléico.....	134
8	Variación del pH de flotación.....	134
9	Variación de la cantidad de espumante (aceite de pino).....	134
10	Recuperación del fósforo (P_2O_5)	135

GRAFICAS

1	Análisis granulométrico.....	130
2	Curva de porcentaje de P_2O_5 en función del número de tamiz.....	136
3	Relación del P_2O_5 total y el P_2O_5 soluble en citrato de amonio neutro.....	136
4	Curva de recuperación del P_2O_5 en función del número de flotaciones de limpieza.....	137
5	Variación del enriquecimiento del P_2O_5 en función del número de flotaciones de limpieza.....	138



RESUMEN

Se hace énfasis en la necesidad de aprovechar los recursos de roca fosfórica en el país. Utilizando muestras de roca fosfórica tomadas en el área Turmequé-Ventaquemada en el departamento de Boyacá del nivel fosfático principal de la formación Plaeners, sinclinal de Piranchón, se hizo un estudio de concentración del mineral mediante el proceso de flotación. En esta forma se obtuvieron concentrados del 32% en P_2O_5 partiendo de un mineral con un contenido del 18.7%. En dicho estudio se hace una variación de todos y cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso de flotación tales como tiempo de deslame, pH del deslame, concentración del reactivo depresante (silicato de sodio), concentración del reactivo colector (ácido oléico), nivel del espumante (aceite de pino) y pH de la flotación lo mismo que la recuperación del fósforo y flotaciones de limpieza.

El procedimiento consistió en variar un parámetro en los diferentes ensayos dejando fijos los demás, con base en el mejor resultado en cuanto al aumento de P_2O_5 y lo mismo que a su recuperación en el concentrado, se seleccionó el mejor valor que a su vez se utilizó en los ensayos subsiguientes. Se hace lo mismo con todos y cada uno de los parámetros sometidos a estudio hasta encontrar los valores óptimos de cada uno de ellos con los cuales se obtuvo un concentrado del 32% en P_2O_5 con una recuperación del ochenta y cinco por ciento. Utilizando los valores óptimos de las variables que intervienen en el proceso de flotación se hacen ensayos a escala piloto en una celda con capacidad de cincuenta kilogramos, comprobándose en esta forma que los resultados del estudio tal como se realizaron a escala de laboratorio son válidos a escala industrial.

Se hace también un estudio económico del proceso con base en los costos de explotación, secado, molienda y proceso

de concentración por tonelada relacionándolo con el precio actualizado en el mercado de la roca fosfórica en el país.

1. INTRODUCCION

1.1. ASPECTOS GENERALES

El fósforo junto con el potasio y el nitrógeno son los elementos indispensables en la nutrición de las plantas, de ahí su gran importancia en la agricultura.

Al ser la roca fosfórica la principal fuente de fósforo, todo lo que se haga para su conocimiento en cuanto a exploración, cuantificación de reservas, beneficio y formas de aprovechamiento será bienvenido ya que el consumo del país en fertilizantes fosfatados depende en un noventa por ciento de las importaciones tanto de roca fosfórica como de sus derivados o sea los fertilizantes de alta solubilidad como los superfosfatos y fosfatos de amonio, cantidades que se consumen en orden de cientos de miles de toneladas al año en el país. Cabe señalar que a nivel mundial, el principal proveedor de roca fosfórica y de fertilizantes derivados de ésta son los Estados Unidos, principalmente La Florida, pero de acuerdo con políticas del gobierno norteamericano los Estados Unidos suspenderán exportaciones de este mineral en unos pocos años, produciéndose una disminución en la oferta de alrededor de cincuenta millones de toneladas al año en el mercado mundial, lo que traerá como consecuencia un aumento en el precio de la roca fosfórica y de sus derivados, entonces es oportuno que países como Colombia que dependen de las importaciones fomenten su búsqueda y estudio para un mayor y mejor aprovechamiento.

La producción actual de roca fosfórica en el país es de unas cuarenta mil toneladas al año provenientes de los depósitos de Sardinata, Norte de Santander, con una

producción anual de unas diez y seis mil toneladas con destino a la empresa Abonos Colombianos (ABOCOL) en la ciudad de Cartagena la cual es utilizada como materia prima para la producción de fosfatos solubles de uso agrícola para la agricultura nacional. Por otra parte en el departamento del Huila existen algunas explotaciones (áreas de Tesalia y Media Luna) donde se procesa la roca fosfórica para la aplicación directa en los suelos; algunas empresas de aquella región están haciendo intentos para elaborar superfosfatos solubles mediante el tratamiento con ácido sulfúrico. En el área de Pesca- Iza en Boyacá desde hace tiempo se ha intentado la explotación de la roca fosfórica pero por razones de orden técnico no se ha logrado asegurar una producción suficiente ni siquiera para satisfacer las necesidades de la agricultura regional. En la actualidad se realizan explotaciones a nivel de pequeña minería, lo que constituyen apenas explotaciones de subsistencia.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En reciente estudio exploratorio realizado por el INGEOMINAS, se identificaron en el área de Ventaquemada-Turmequé, algunos depósitos de roca fosfórica aptos para pequeña minería y con reservas del orden de veinte millones de toneladas pero con tenores inferiores al veinte por ciento en P_2O_5 los que se consideran no utilizables directamente para fines agrícolas, ni tampoco aptos para tratamiento industrial debido a su bajo contenido en fósforo. Sin embargo la ubicación de estos depósitos cercanos a regiones con agricultura intensiva hace que estos depósitos sean aprovechables mediante un tratamiento previo de beneficio por flotación con el objeto de aumentar el contenido de fósforo a valores superiores al treinta por ciento. Otros países como Brasil y Méjico aplican este mismo proceso para producir concentrados de más del treinta por ciento en fósforo y del orden de varios millones de

toneladas anuales a partir de minerales con tenores inferiores al diez por ciento. Entonces el objetivo principal es la obtención de concentrados de roca fosfórica de grado comercial a partir de mineral con tenores inferiores al veinte por ciento, que sean aptos para su utilización directa en la agricultura o para su acidulación y en esa forma aumentar su efectividad agronómica.

2. FUNDAMENTO TEORICO

2.1. ASPECTOS GENERALES

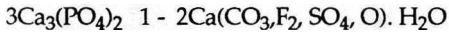
La roca fosfórica continental consiste esencialmente de fluorapatita submicrocristalina, $Ca_{10}F_2(PO_4)_6$, la cual contiene un exceso de flúor y una pequeña cantidad de sodio.

Los compuestos $Ca_{10}(OH)_2(PO)_6$, $Ca_9H_2O(PO_4)_6$ y $Ca_{10}CO_3(PO_4)_6H_2O$, forman una serie extensa de soluciones sólidas con fluorapatita, algunos de cuyos miembros ocurren en rocas geológicamente recientes. La roca fosfórica de Curazao es esencialmente un hidrato de fosfato tricálcico $Ca_{10}(F,OH)_2(PO_4)_6$

El hueso animal libre de materia orgánica, es un carbonato de apatita, $Ca_{10}CO_3(PO_4)_6H_2O$, isomorfo en fluorapatita. La oxiapatita $CaO(PO_4)_6$ y puede ser preparada calentando la hidroxiapatita o hueso a 900 grados centígrados. Los depósitos de roca fosfórica del mundo consisten de varios minerales amorfos y apatitas microcristalinas; ciertas fosforitas en Francia consisten esencialmente de fosfato tricálcico coloidal, colofona, estafelita cristalina y dalita cristalina. Se concluyó que las fosforitas estaban conformadas por los siguientes compuestos en solución sólida:

Dalita	$9CaO.3P_2O_5 . CaCO_3.H_2O$
Francolita	$9CaO.3P_2O_5 .Ca(F_2CO_3).H_2O$
Colofana	$9CaO.3P_2O_5 .CaCO_3.H_2O+x H_2O$
Fluorapatita	$9CaO3P_2O_5 .CaF_2$
Hidroxiapatita	$9CaO3P_2O_5 Ca(OH)_2$

El principal constituyente de la fosforita, también llamada roca fosfórica o hueso de fósiles es una sustancia amorfa con propiedades muy características para ser reconocida como un material distinto; es llamado colofana y tiene la siguiente fórmula aproximada:



También se ha establecido que hay un número de minerales comunmente definidos, que ocurren en la roca fosfórica. Algunos de ellos son:

Volquerita	$\text{Ca}_{10}\text{O}(\text{PO}_4)_6$
Dalita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Podolita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3$
Estafelita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaF}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Colofanita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \times 0(2\text{CaF}_2\text{CO}_3) \text{ y } 2\text{H}_2\text{O}$

Los resultados del análisis químico indican que el hueso es un carbonato de apatita $\text{Ca}_{10}\text{CO}_3(\text{PO}_4)_6$, con hidroxiapatita y carbonato de calcio. Los huesos de fósiles se han descrito como colofana.

Puesto que los compuestos mencionados anteriormente están estrechamente relacionados en su composición química, es difícil identificarlos en los materiales submicrocristalinos en que ocurren en la naturaleza. Los tamaños de las pequeñas partículas de las impurezas no fosfáticas, hacen difícil la interpretación de los resultados de análisis. Esto hace prácticamente imposible determinar la distribución correcta del flúor y CO_2 de las impurezas.

2.2. TEORIA DE LA FLOTACION

2.2.1. DEFINICION DE LA FLOTACION

La flotación es un proceso de separación de materiales sólidos en pulpa acuosa; consiste en formar con ciertos minerales un complejo más liviano que el conjunto restante, sobre el cual este complejo puede flotar y ser separado fácilmente.

2.2.2. FLOTACION A LA ESPUMA

En una pulpa compuesta por sólidos finos y agua, se forman agregados estables entre burbujas de aire y uno o varios sólidos seleccionados; estos agregados son transportados en forma de espuma a la superficie de la pulpa.

Generalmente algunos sólidos se adhieren a las burbujas de aire gracias a la intervención de reactivos químicos particulares o específicos que son los llamados COLECTORES y que son capaces de hacer selectivamente esos minerales hidrófilos o hidrófobos.

2.2.3. IMPORTANCIA ECONOMICA DEL PROCESO

La flotación a la espuma data desde comienzos del siglo, es un proceso muy importante dada la explotación intensiva de yacimientos de materias primas minerales; como los yacimientos minerales de buena calidad están en vía de agotamiento, se ha hecho necesario recurrir a yacimientos minerales de baja calidad por lo que se ha hecho imprescindible el proceso de concentración por flotación.

2.2.4. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

El proceso de flotación es el resultado de un conjunto de fenómenos complejos que no están bien dilucidados actualmente. Las dificultades de su investigación se debe a la intervención de un gran número de variables y a múltiples interacciones entre estas variables.

Para poder emplear este proceso, se deben tener en cuenta tres condiciones esenciales:

- 1) Obtención de burbujas de aire estables que puedan formar espumas.
- 2) Adhesión de los minerales a flotar, a las burbujas de aire.
- 3) No adhesión de las partículas que no se deseen flotar.

En la práctica lo que se ha podido concluir es que la flotación es un fenómeno de superficie y que las interfases entre las tres fases gaseosa, líquida y sólida juegan un papel muy importante. En la práctica estas tres fases son el aire, el agua y un mineral sólido.

2.2.5. REACTIVOS DE FLOTACION

Para tener las condiciones favorables de la flotación, hay que hacer intervenir reactivos específicos que deben tener influencia en los siguientes factores:

- 1) La mayoría de los minerales, cuando están contaminados en la superficie, se adhieren al agua y no al aire; ellos son hidrófilos y aerófilos.
- 2) La parafina y otras sustancias hidrocarbonadas se adhieren al aire y no al agua, ellas son hidrófobas y aerófilas.
- 3) Numerosos minerales se pueden hacer adherentes al aire y no al agua cuando se les agrega en pulpa acuosa ciertos reactivos químicos bien seleccionados.
- 4) Según los reactivos químicos seleccionados se puede a menudo hacer los minerales adherentes bien al aire (burbuja) o bien al agua.

Sólo algunos minerales como el azufre, el carbón y la molibdenita son poco humectables por el agua y poseen flotabilidad natural, es decir que ellos tienen tendencia a adherirse al aire y no al agua.

Los reactivos de flotación que son llamados también colectores deben ser moléculas heteropolares es decir compuestos orgánicos donde la molécula tiene dos partes bien distintas:

- 1- Un grupo hidrocarbonado no polar que es atraído por el aire en la burbuja pues es hidrófobo.

- 2- Un grupo polar, generalmente ionizado o ionizable que es adsorbido a la superficie del mineral a flotar.

Para modificar la adhesión de los minerales, sea al aire o sea al agua se emplean los reactivos llamados activantes o depresantes.

Para hacer posible la flotación se hace necesario obtener burbujas de aire estables que puedan tomar los minerales hidrófobos y mantenerlos en una espuma persistente.

Para estabilizar las burbujas se utilizan reactivos tensoactivos que modifican la tensión interfacial líquido-gas. Son también moléculas heteropolares en las cuales el grupo hidrocarbonado se orienta hacia el aire, pero el grupo polar que de preferencia es no ionizable es atraído por el dipolo que es el agua, pueden ser catiónicos o aniónicos dependiendo si su carga es positiva o negativa.

Como ejemplo se citan dos casos típicos de reactivos colectores:

- 1- Acido oleico



parte no polar o hidrófoba

parte polar o hidrófila

- 2- Acido sulfónico



Parte polar o hidrófila

parte no polar o hidrófoba

2.2.6. INTERACCION COLECTOR - SUPERFICIE DEL MINERAL

La atracción del grupo polar del colector a la superficie del mineral puede resultar por:

- 1- Una atracción puramente física debida a la atracción de las cargas eléctricas.
- 2- Una afinidad química que da lugar a una quimiadsorción, es decir, a una reacción química de superficie.
- 3- Una combinación variable debida a los dos tipos de atracción.

En la capacidad colectora de un reactivo es importante el pH, pues siempre habrá para cada tipo de mineral competencia entre los iones del colector y los otros iones presentes en la pulpa. Por consiguiente en el caso de los colectores aniónicos hay siempre competencia entre sus iones efectivos y los iones OH⁻ presentes en el agua.

Para los colectores catiónicos hay competencia con los iones H⁺. O sea que el valor del pH condiciona grandemente la efectividad de un reactivo colector.

En la adsorción de los colectores el potencial electrocinético juega un papel importante.

La fijación de los colectores a la superficie del mineral se explica por la teoría del potencial electrocinético. Los cationes son adsorbidos por las superficies de carga negativa, y los aniones son adsorbidos por la superficie de carga positiva.

2.2.7. FORMACION DE ESPUMAS

Sistema burbuja-mineral

Para que las partículas minerales a concentrar puedan ser separadas de la pulpa que las contiene, es necesario después de haberlas preparado superficialmente por adición de reactivos colectores y de agentes de acondicionamiento, ponerlas en contacto con burbujas de aire estabilizadas a las cuales se van a adherir para luego ser llevadas a la superficie.

2.2.8. CALIDAD DE LAS ESPUMAS DE FLOTACION

Las espumas de flotación deben satisfacer algunos requisitos:

- a- Las espumas deben estar mineralizadas, es decir llevar un máximo peso de partículas sólidas; el grado de mineralización es directamente proporcional al tenor de la pulpa y del porcentaje del constituyente a flotar.
- b- Las espumas deben tener un tiempo de duración suficientemente largo de tal manera que permanezcan en la superficie y alcancen a ser retiradas mecánicamente.
- c- La cantidad de reactivos a emplear debe ser baja, no solamente por la economía del proceso, sino para permitir la re flotación ulterior de los concentrados flotados.

2.2.9. PRACTICA DE LA FLOTACION

Preparación de la pulpa

GRANULOMETRIA

Se ha comprobado que cuando se flota un mineral puro, el rendimiento de la flotación varía en función de la dimensión de las partículas y que sobretodo cuando hay una granulometría heterogénea, son las partículas gruesas y las muy finas las que menos flotan. Las partículas gruesas flotan difícilmente por razones mecánicas, la adhesión partícula mineral-burbuja de aire no es suficientemente fuerte para resistir a las aceleraciones debidas a la agitación intensa en la máquina, lo mismo que las partículas muy finas flotan mal pues no logran adherirse a las burbujas de aire, ya que la masa no es suficiente para poder romper la película del líquido que envuelve la burbuja de aire.

Se admite generalmente que las dimensiones más favorables para la flotación están comprendidas entre 10 y 100 micrones. (Ver Tabla 1 y Gráfica1).

DILUCION DE LA PULPA

La dilución de la pulpa varía entre quince y cuarenta por ciento de sólidos. El empleo de pulpas poco diluidas permite economía de agua y de reactivos (humectantes y reguladores de pH), y los aumentos en la recuperación y la capacidad de tratamiento en las máquinas. En cambio la cantidad de sólidos especialmente ganga en la espuma es muy elevada y los concentrados son menos ricos en solución diluida. Se puede concluir que es mejor emplear en las flotaciones de limpieza una pulpa más diluida que en la primera flotación.

ACONDICIONAMIENTO

La acción de reactivos de flotación no es siempre instantánea y exige a menudo un cierto tiempo antes de ser efectiva y completa. Esta duración se llama tiempo de acondicionamiento y varía según la naturaleza de los reactivos y los minerales a concentrar.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Trituradora de mandíbulas
Molino de disco
Cuarteador
Celda Denver Sub. A para quinientos gramos
Celda de flotación a escala piloto para 50 kilogramos
Bandejas esmaltadas 10
Bandejas metálicas 6
Balde plásticos

REACTIVOS

Hidróxido de sodio
Silicato de sodio
Acido oléico
Aceite de pino

3.1.1. PROCESAMIENTO

3.1.1.1. *Preparación de la muestra.*- Se tomó una muestra de 50 kilogramos de roca fosfórica proveniente del área

Ventaquemada-Turmequé en el Departamento de Boyacá, correspondiente a la trinchera N° 6 del nivel fosfático principal en la formación Plaeners del Sinclinal de Piranchón, (ver Figura 1) y se sometió a cuarteo para luego pasarla por molino de discos en porciones de un kilogramo de tal manera que un 95% del mineral molido pasara la malla 30 pues es a este tamaño de partícula donde el apatito se libera en mayor proporción de acuerdo a la curva granulométrica; después se sometió a una homogeneización adicional, y de allí se tomaron muestras para análisis químico y caracterización mineralógica.

En el proceso previo a la flotación es necesario eliminar las partículas finas, normalmente las que pasan la malla 150, pues al ser la interacción entre el fosfato y el reactivo colector (ácido graso) un fenómeno de superficie, el consumo de reactivos será mucho mayor, aumentándose los costos de proceso. Para ello se somete a agitación el mineral en la misma celda a un porcentaje de sólidos al 30% en agua y a un pH de 11, ajustado con soda; después de dos minutos se decanta y se retira el sobrenadante que está enriquecido de partículas finas.

3.2. CARACTERIZACION QUIMICA Y MINERALOGICA

3.2.1. ASPECTOS GENERALES

Composición química: P_2O_5 : 18.86%, CaO: 26.64%, SiO_2 : 49.20%.

MINERALES PRINCIPALES:

Contiene el apatito en forma de carbonato de fluorapatito, la sílice o cuarzo en forma microcristalina, y la calcita. Igualmente trazas de óxido de hierro, glauconita y materia orgánica en algunas de las muestras.

ELEMENTOS MENORES Y TRAZAS

Se realizaron análisis espectrográficos para las muestras tomadas en las trincheras. Los resultados obtenidos son similares a los de las rocas fosfóricas de la Forma-

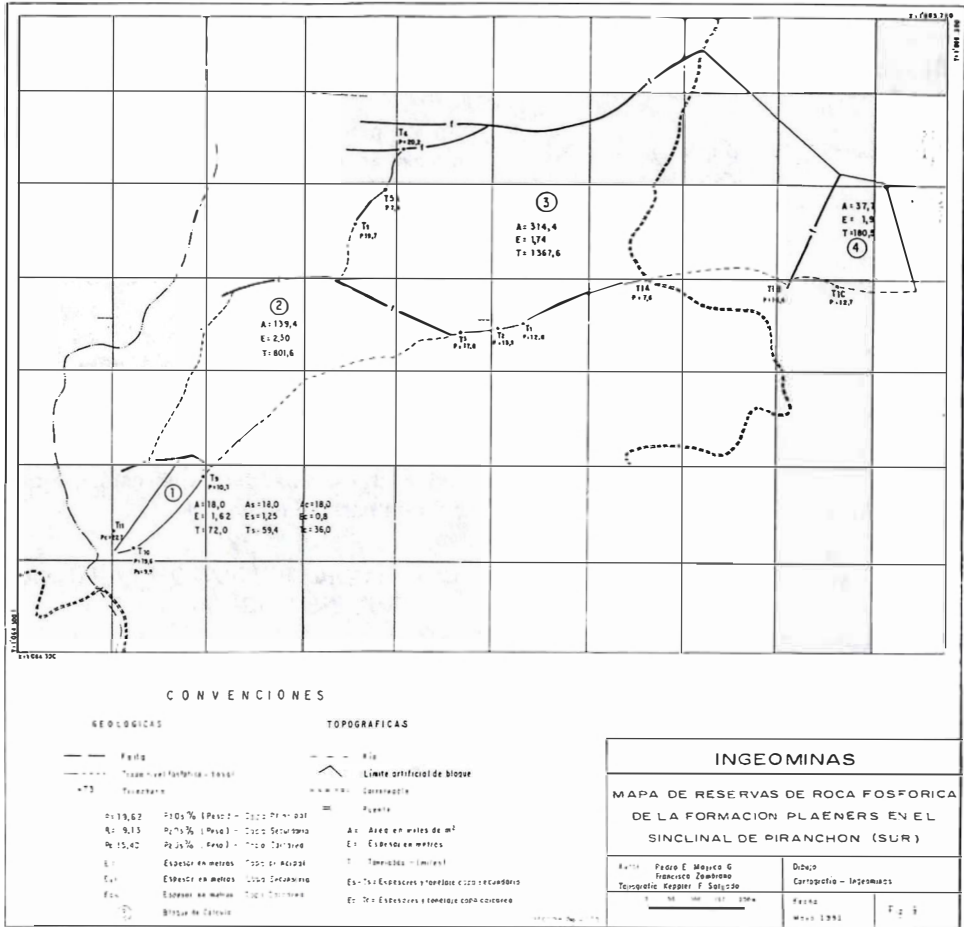


FIGURA 1: MAPA DE RESERVAS DE ROCA FOSFORICA DE LA FORMACION PLAENERS EN EL SINCLINAL DE PIRANCHON (SUR).

TABLA 1: ANALISIS DE ELEMENTOS METALICOS DE LA MUESTRA DE MINERAL FOSFORICO POR ESPECTROSCOPIA DE EMISION

DETERMINACION			
Hierro	Fe	%	0.5
Magnesio	Mg	%	0.2
Calcio	Ca	%	G.20
Titanio	Ti	%	0.03
Manganeso	Mn	ppm	150
Plata	Ag	"	N
Arsénico	As	"	N
Oro	Au	"	N
Boro	B	"	L 10
Bario	Ba	"	300
Berilio	Be	"	3
Bismuto	Bi	"	N
Cadmio	Cd	"	20
Cobalto	Co	"	N
Cromo	Cr	"	150
Cobre	Cu	"	50
Galio	Ga	"	N
Lantano	La	"	300
Molibdeno	Mo	"	L5
Niobio	Nb	"	N
Níquel	Ni	"	20
Plomo	Pb	"	10
Paladio	Pd	"	N
Platino	Pt	"	N
Antimonio	Sb	"	N
Escandio	Sc	"	L5
Estaño	Sn	"	N
Estroncio	Sr	"	1500
Vanadio	V	"	70
Tungsteno	W	"	N
Ytrio	Y	"	G200
Zirconio	Zr	"	150
Zinc	Zn	"	L200

SIMBOLOS: % = gramos del elemento por cien gramos de muestra- ppm miligramos del elemento por kilo de muestra- G mayor que el indicado a continuación de la G- N Elemento no detectado en el límite de detección- L Elemento detectado por debajo del límite de detección o del valor indicado a continuación de la L- H Elemento no determinado por encontrarse interferida su longitud de onda.

ción Plaeners en otras regiones en el departamento de Boyacá y en especial a las del yacimiento de la Conejera (Pesca), Tabla 2. La forma como los elementos menores y traza están combinados en las rocas analizadas, no está perfectamente definida, aunque por su origen y composición con las fosforitas de la formación "Fosforia" en USA, pueden adelantarse los siguientes planteamientos:

El Hierro (FeO), se encuentra en contenidos bajos, alrededor del 0.3%, lo cual sugiere que hubo poco aporte de material de naturaleza ígnea y máfica; el magnesio está también alrededor del 0.3%.

El estroncio por lo general está asociado al apatito y se presenta en cantidades superiores a las normales para este elemento.

El bario y el manganeso se encuentran como inclusiones demasiado pequeñas para ser detectadas por difracción de rayos X. (ZAMBRANO F. MOJICA P. informe 2135).

Los elementos como níquel, cromo y cobre, generalmente están asociados a la materia orgánica y se hallan en contenidos bajos debido probablemente a la meteorización.

3.3. ACONDICIONAMIENTO Y FLOTACION

Dado que el ácido grasoso (ácido oléico) interactúa tanto con el material silíceo (cuarzo) como con el fosfato, se requiere que el material silíceo se recubra con silicato de sodio para evitar que interactúe con el ácido oléico. Esta operación se realiza en la misma celda después de ser deslamado el material a 70% de sólidos. Luego se acondiciona con ácido oléico durante tres minutos y se flota ajustándose el pH a 9.0 agregándose también aceite de pino como espumante en el orden de 0.18 kilos por tonelada de mineral tratado.

TABLA 2: GRANULOMETRIA VIA SECA POR TAMICES DE LA SERIES U. S. STANDARD

TAMIZ	ABERTURA	PESO		PORCENTAJE	
		(g)		(%)	
Nº	TAMIZ (um)	Retenido	Acumulado	Retenido	Acumulado
10	2000	0.0	0.0	0.00	0.00
18	1000	2.3	2.3	1.14	1.14
35	500	23.4	25.7	11.58	12.72
60	250	59.9	85.6	29.65	42.37
100	150	32.7	118.3	16.19	58.56
140	106	23.3	141.6	11.53	70.09
200	75	17.6	159.2	8.71	78.80
325	45	22.9	182.1	11.34	90.14
Fondo	---	19.9	202.0	9.86	100.00
Total		202.0		100.00	

En esta tabla se muestra el grado de triturabilidad del mineral tal como se utilizó en los ensayos, el cual fue sometido a rompimiento manual, luego se pasó a trituradora de mandíbula y finalmente se pasó por molino de disco. En estas condiciones se encuentra que el 78% del mineral se distribuye entre el tamiz número 10 y el número 200.

Finalmente se diluye la pulpa convenientemente con agua y se abre la válvula de aire produciéndose la espumación; en esta forma al retirarse mecánicamente las espumas ricas en fosfato se obtienen los concentrados que posteriormente van a ser tratados con agua y flotados para aumentar así el grado de fósforo en el concentrado final. (ver diagrama de flujo, Figura 2).

En el trabajo experimental se estudiaron las siguientes variables que tienen que ver con la eficiencia del proceso (aumento en la concentración del fósforo y en el porcentaje de recuperación).

- 1- Tamaño de partícula. (Tabla 3).
- 2- Tiempo de agitación. (Tabla 4).
- 3- pH (Tabla 5).
- 4- Concentración de silicato de sodio. (Tabla 6).
- 5- Concentración del ácido oléico. (Tabla 7).
- 6- pH de la flotación. (Tabla 8).
- 7- Influencia del espumante, aceite de pino. (Tabla 9).

3.3.1. TAMAÑO DE PARTICULA

De acuerdo con la teoría de la flotación no se debe utilizar mineral demasiado grueso, pues las partículas por razones de la

gravedad, presentan una fuerza superior a la fuerza que existe en el sistema partícula-burbuja de aire y reactivo colector lo cual hace que no floten.

Se establece de acuerdo con la granulometría resultante en un proceso de molienda que el 81.8% del fósforo se distribuye entre los tamices 40 y 170.

También se comprobó mediante un ensayo previo que al no deslamar el mineral, el aumento de grado en el concentrado es mínimo, lo que hace pensar que un excesivo material fino del cual están constituidas las lamas, produce un mayor consumo del reactivo colector lo cual hace ineficiente el proceso desde el punto de vista económico.

De acuerdo con lo anterior se seleccionó, para todos los ensayos un tamaño de partícula comprendido entre las mallas 30 y 150.

3.3.2. SECADO DE LAS FRACCIONES

Después del proceso de flotación las muestras se sometieron a decantación por un tiempo de dos horas, luego se retiró el sobrenadante y se procedió a secarlas en estufa a 60 grados centígrados, por un

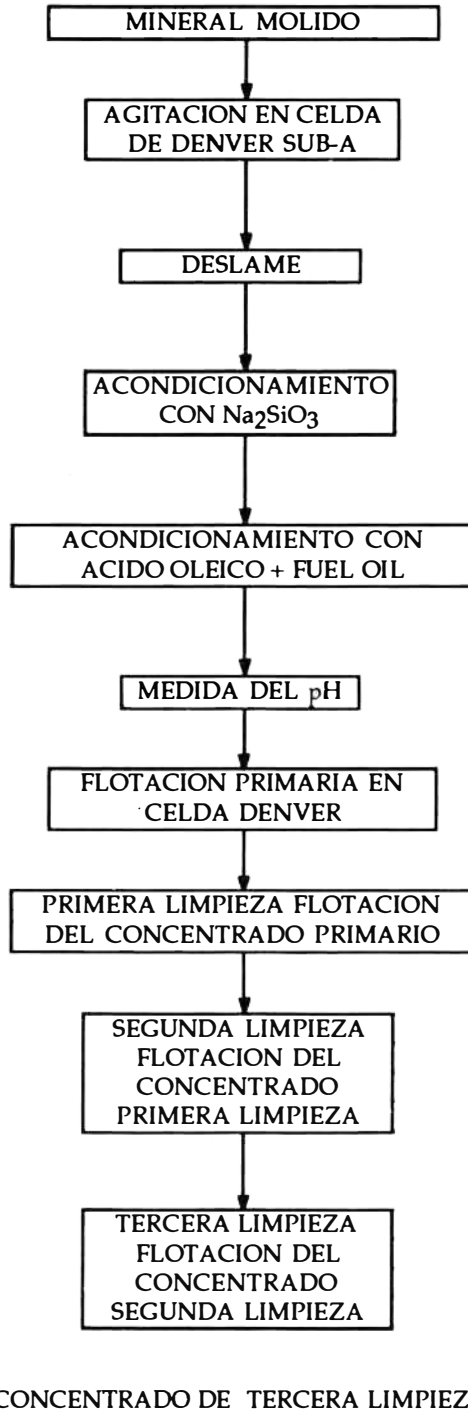


FIGURA 2: DIAGRAMA DE FLUJO TIPICO PARA FLOTACION DE ROCA FOSFORICA CON ACIDO GRASO

GRAFICA 1:

ANALISIS GRANULOMETRICO

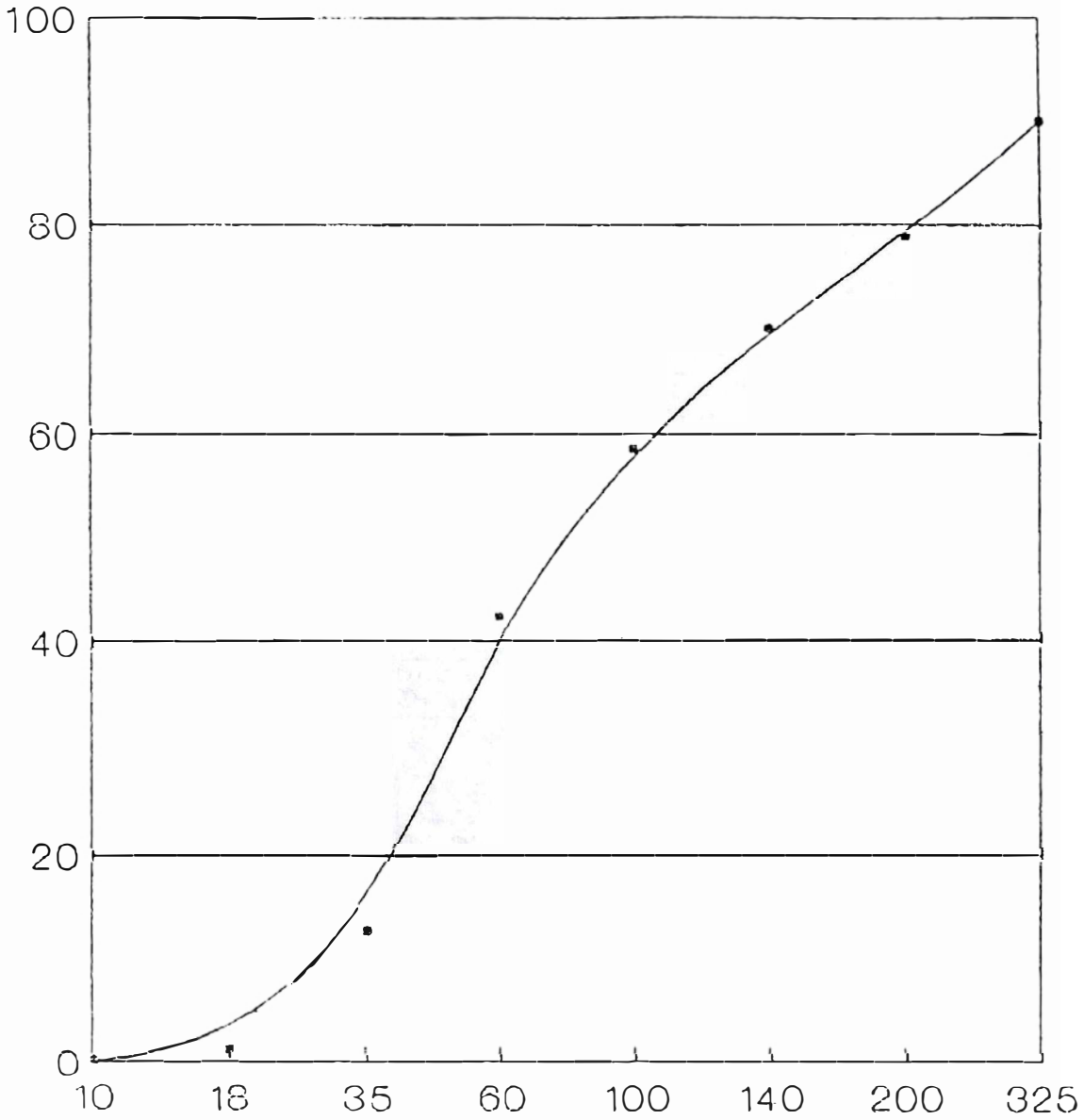


DIAGRAMA DEL ANALISIS GRANULOMETRICO DE TAMAÑO DE TAMIZ CONTRA EL PORCENTAJE ACUMULADO EN CADA MALLA.

TABLA 3: DISTRIBUCION DEL FOSFORO DE ACUERDO AL TAMAÑO DE PARTICULA

TAMIZ Nº	ABERTURA TAMIZ (μm)	P_2O_5 (%)	PESO FRACCION (g)	P_2O_5 (g)
14	1.40	17.0	1.0	0.17
20	0.85	18.8	3.5	0.66
40	0.425	20.1	18.8	3.62
60	0.250	21.0	25.0	5.25
120	0.125	18.0	23.0	4.14
170	0.090	19.0	10.6	2.01
230	0.063	17.2	7.5	1.29
Fondo	-----	15.0	11.4	1.71

tiempo de 12 horas. Una vez el material seco se homogeneizó, se pesó y se tomó muestra para análisis químico de fósforo.

Pensando que a escala industrial el proceso de secado es costoso ya que se debe realizar en horno rotatorio utilizando combustibles cuyo precio es relativamente alto, se sugiere el uso de ácido sulfúrico para acidular el concentrado húmedo después de quitarle el exceso de agua por decantación, tanto al concentrado como a la fracción de lodos cuyo contenido de fósforo también es apreciable (alrededor del 17.0% en P_2O_5).

Al realizar la acidulación se presenta un secado espontáneo en un tiempo de doce horas a la vez que se realiza una transformación del fósforo a fósforo soluble y resultando por consiguiente un producto de buena efectividad agronómica (Figura 3).

Utilizando 178 gramos por tonelada de mineral tratado de aceite de pino, se obtiene la mejor recuperación de fósforo en un valor de 73.54% y un contenido del 32.13% de fósforo en el concentrado.

3.4. ENSAYO A ESCALA PILOTO

Utilizando los mejores valores de las variables obtenidas a escala de laboratorio, se realizaron ensayos en la celda de 50 kilogramos de capacidad, fabricada con el propósito de comprobar en este trabajo, la validez del estudio a escala industrial.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios por cuanto se pudo comprobar la repetibilidad a escala industrial de los datos alcanzados a escala de laboratorio.

Las condiciones experimentales fueron las siguientes:

Silicato de sodio:	500 gr/ton.
pH del deslame	9.0
Tiempo del deslame	5 minutos
Aceite de pino	178 gr/ton.
Acido oléico	1250 gr/ton.
pH de la flotación	9.0

Se puede ver en la Tabla 10 que se necesitan 2.12 toneladas de mineral para obtener una tonelada de concentrado, teniendo en cuenta que la muestra cruda tiene 18.8% y el concentrado tiene 30.8%.

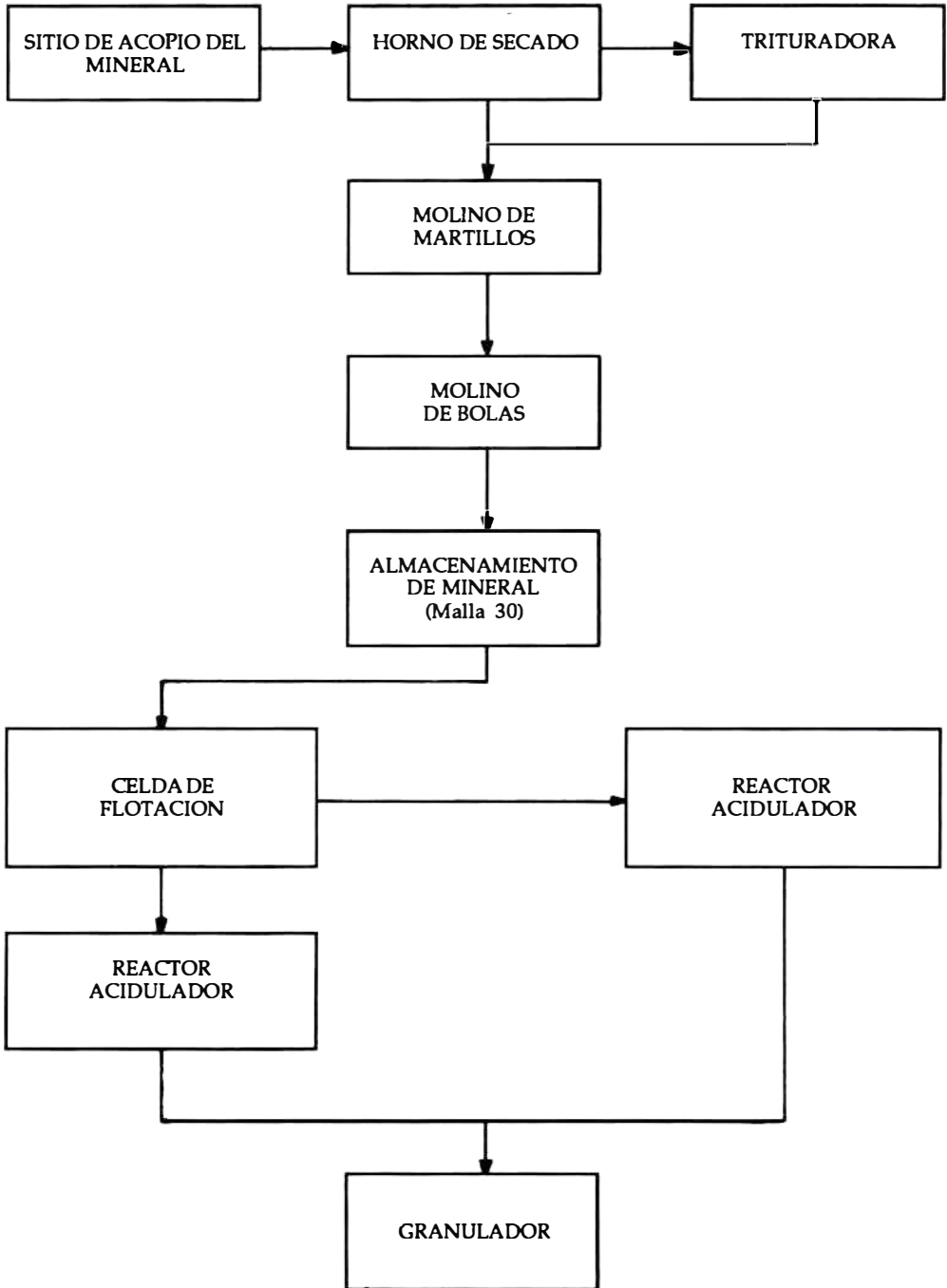


FIGURA 3: DIAGRAMA DE FLUJO DE MOLIENDA, CONCENTRACION Y ACIDULACION DE LA ROCA FOSFORICA

TABLA 4: VARIACION DEL TIEMPO DE DESLAME

ENSAYO N°	TIEMPO DE DESLAME	CONCENTRANDO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
27	3'	19.20	29.11	30.20	13.20	23.61	18.10	29.88
28	5'	49.20	32.61	29.60	10.40	15.11	17.20	85.79
29	7'	25.11	30.60	28.10	14.60	20.14	17.14	41.09

Con un tiempo de deslame de 5', se obtiene la mejor recuperación del fósforo con un valor de 85.79% y un contenido de fósforo de 32.61%.

TABLA 5: VARIACION DEL pH EN EL DESLAME

ENSAYO N°	DESLAME		CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
	g/ton	pH	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
23	0.0	5.95	45.00	31.82	22.32	5.03	21.08	12.06	76.57
24	450	7.50	46.00	30.90	19.54	12.69	21.22	17.20	76.01
25	900	9.00	52.10	30.91	22.60	20.10	17.88	11.14	84.44
26	3.600	10.90	44.00	33.00	26.92	18.14	19.86	10.11	77.64

Al variar el pH en el deslame se obtiene la mejor recuperación de fósforo a un pH de 9.0.

TABLA 6: VARIACION DEL SILICATO DE SODIO (DEPRESANTE)

ENSAYO N°	ACONDICIONAMIENTO	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
12	0.00	43.00	32.20	23.76	14.21	19.54	17.01	74.04
13	500	48.60	30.13	18.24	8.10	16.60	18.04	78.30
14	1050	42.80	32.13	23.00	12.20	28.00	18.08	73.54
15	1500	22.40	33.04	47.46	7.60	19.26	16.56	39.58
16	2100	20.54	34.20	48.96	16.50	15.00	17.04	37.56

En el ensayo realizado con quinientos gramos por tonelada de silicato de sodio, se encontró la mejor recuperación del fósforo con un 78.30% y un grado de 30.13% de fósforo en el concentrado.

TABLA 7. VARIACION DEL ACIDO OLEICO

ENSA- YO Nº	ACONDI- CIONA- MIENTO g/ton	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECU- PERA- CION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
8	500	6.8	30.15	64.76	10.10	19.48	6.85	10.96
9	750	5.6	31.20	60.84	8.01	16.08	16.97	9.34
10	1000	35.2	32.10	34.30	7.52	23.00	17.90	60.42
11	1250	48.0	33.40	22.90	6.71	20.20	18.60	85.73
12	1750	31.6	30.20	32.60	6.08	16.90	15.85	51.03
13	2000	54.8	27.15	18.60	6.10	17.20	18.78	79.56

El mejor valor en cuanto a recuperación del fósforo, corresponde al ensayo en el cual se utilizó una cantidad de 1250 gramos /ton de ácido oléico (reactivo colector).

TABLA 8: VARIACION DEL pH DE FLOTACION

ENSA- YO Nº	pH	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
5	5.0	0.0	0.00	70.0	13.10	17.8	19.14	0.00
6	6.0	37.0	36.10	33.6	7.50	19.4	13.10	71.43
7	7.0	22.4	24.72	47.6	8.91	18.0	17.57	29.61
8	8.0	18.2	32.44	39.6	10.11	27.6	18.52	31.57
9	9.0	42.8	32.13	23.0	12.20	28.0	18.08	73.54
10	10.0	34.6	33.06	39.6	10.90	15.8	18.04	61.17
11	11.0	30.0	33.37	30.0	8.70	18.1	17.63	53.53

Al variar el pH de la flotación se encontró el mejor valor en cuanto a recuperación del fósforo a pH 9.0, con una recuperación de 73.54%.

TABLA 9: VARIACION DE LA CANTIDAD DE ESPUMANTE (ACEITE DE PINO)

ENSA- YO Nº	ESPU- MANTE ACEITE DE PINO g/ton	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECU- PERA- CION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
1	0.0	17.48	32.50	57.34	14.80	14.56	18.14	30.38
2	356	28.00	34.30	41.62	9.15	11.60	19.17	51.03
3	220	18.60	32.60	49.82	8.01	13.08	20.16	32.43
4	178	42.80	32.13	23.00	12.20	28.00	18.08	73.54

Utilizando una cantidad de 178 g. de aceite de pino por tonelada de mineral tratado, se obtiene la mejor recuperación de fósforo en un valor de 73.54% y un análisis en el concentrado del 32.13% en P₂O₅.

Los resultados obtenidos fueron:

pH del deslame: 9.0
Tiempo del deslame: 5 minutos.

TABLA 10: RECUPERACION DEL FOSFORO

Producto	%	P ₂ O ₅ %	Recuperación %
CABEZA	100	18.8	30
CONCENTRADO	47.25	30.8	77.4
COLAS	23.26	7.7	9.5
LAMAS	21.10	17.70	19.0

4. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio granulométrico, entre las mallas 40 y 150 de la serie U.S Standard se encuentra un 70% de fósforo. Desde el punto de vista económico esto es importante, pues se establece que no hay necesidad de moler el mineral a un tamaño de partícula demasiado fino. Además es este rango de tamaño de partícula donde el proceso de flotación es más efectivo pues las partículas gruesas con un diámetro de un milímetro son muy pesadas y no suben a la espuma; de otra parte las partículas muy finas, aquellas que pasan la malla 150 consumen demasiado reactivo a causa del aumento de la superficie total de contacto (Gráfica 2).

De acuerdo con los resultados experimentales se encontró una recuperación del fósforo del 85% con un tenor del 32% en P₂O₅ en el concentrado; las condiciones óptimas del proceso de flotación son las siguientes:

Aceite de pino: 178 gramos por tonelada de mineral tratado.
pH: 9.0
Silicato de sodio: 500 gramos por tonelada de mineral tratado.
Acido oléico: 1250 gramos por tonelada de mineral tratado.

En cuanto al rendimiento o eficiencia del proceso, los resultados en cuanto a recuperación y grado de P₂O₅ en el concentrado son buenos, si se tiene en cuenta que los concentrados obtenidos por flotación en los Estados Unidos (Florida) y que son comercializados a escala mundial poseen 32% en fósforo.

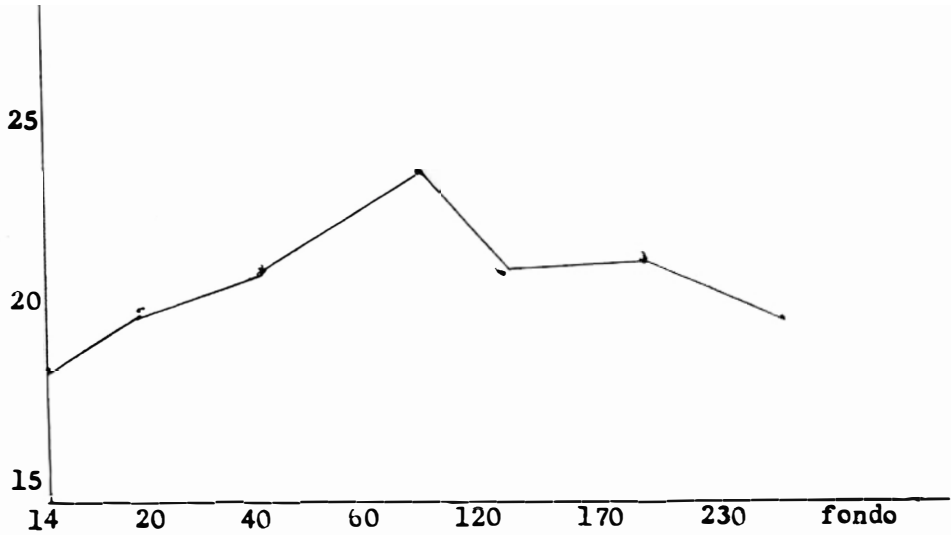
Se establece que a medida que aumenta el fósforo en las fracciones, aumenta también el fósforo soluble en citrato de amonio neutro en las fracciones (Gráfica 3), aspecto que es importante desde el punto de vista agronómico, pues a mayor fósforo soluble mayor efectividad agronómica.

Siendo la operación de secado tanto de los concentrados como de los lodos costosa debido al alto precio de los combustibles utilizados para tal efecto, se recomienda el proceso de acidulación mediante el uso de ácido sulfúrico produciéndose en esta forma un superfosfato, el cual es una mezcla de sulfato de calcio y fosfato monocálcico. Debido a la formación del sulfato de calcio se produce un secado espontáneo, a la vez que se obtiene el fosfato monocálcico que es altamente soluble y por consiguiente de una efectividad agronómica excelente (Figura 3).

De acuerdo con los ensayos que se realizaron para observar la variación del número de flotaciones de limpieza o de refinación del primer concentrado (gráficas 4 y 5) se establece que con la primera flotación se obtiene el mayor porcentaje de recuperación del fósforo y el menor grado de fósforo en el concentrado a la vez que a mayor número de operaciones de refinación, mayor es el grado del concentrado; es así que con la cuarta operación se obtuvo un concentrado del 43% en fósforo pero con una recuperación baja por lo cual se demuestra lo antieconómico que es

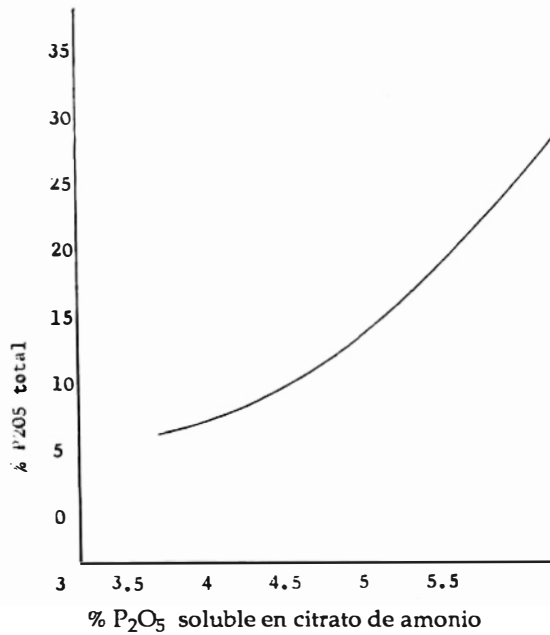
GRAFICA 2

CURVA DE PORCENTAJE DE P_2O_5 EN FUNCION DEL NUMERO DEL TAMIZ



GRAFICA 3

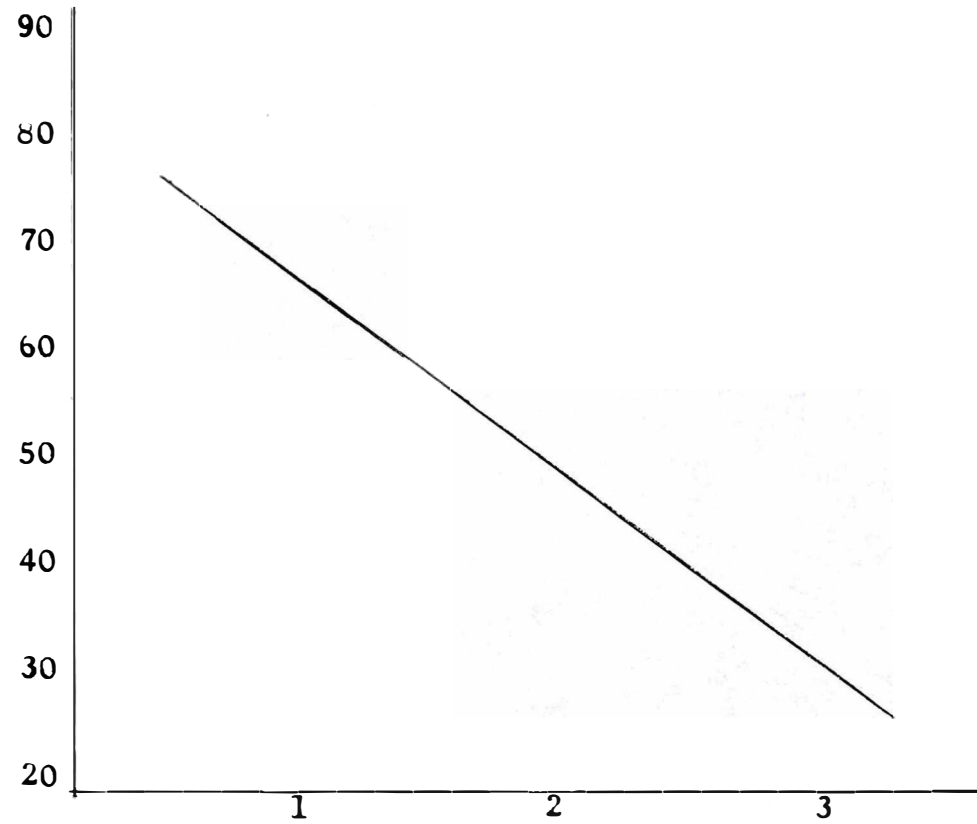
RELACION DE P_2O_5 TOTAL Y P_2O_5 SOLUBLE EN CITRATO DE AMONIO NEUTRO



Relación entre el P_2O_5 total y el fósforo asimilable determinado como fósforo soluble en citrato de amonio correspondiente a colas, lodos y a concentrados con grado de P_2O_5 total.

GRAFICA 4

CURVA DE RECUPERACION EN FUNCION DEL NUMERO DE FLOTACIONES DE LIMPIEZA

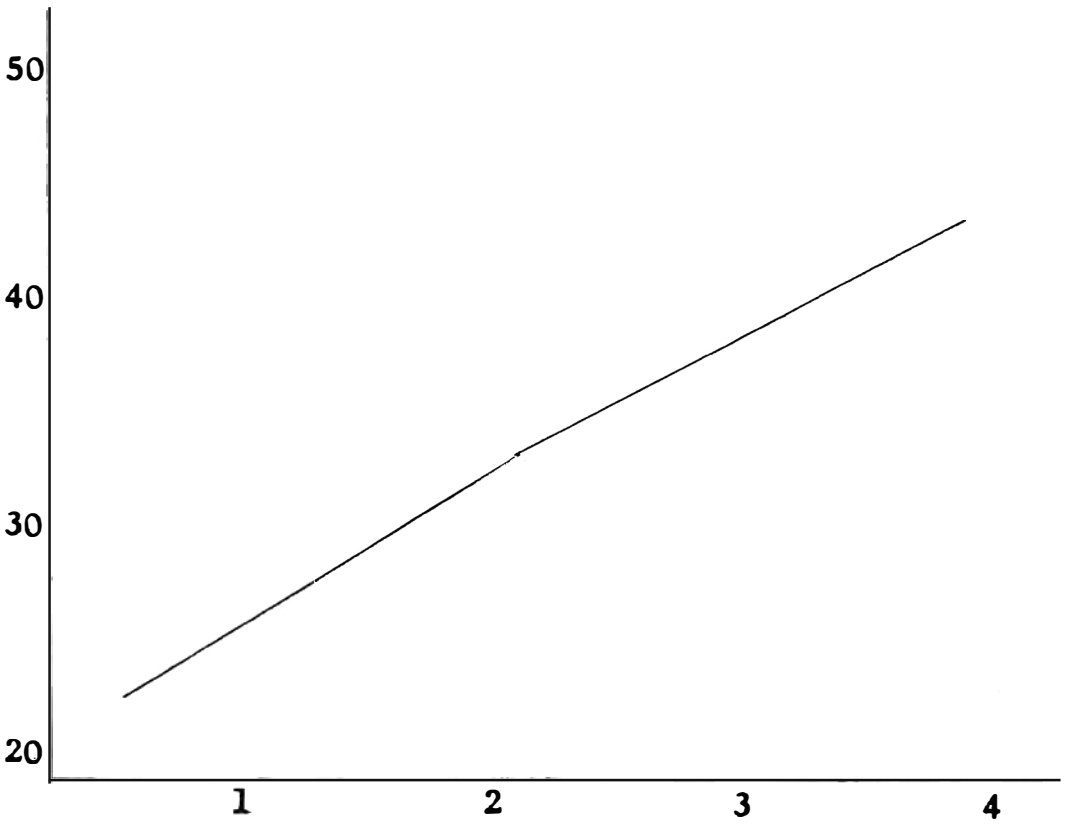


Número flotaciones de limpieza

—●— % de recuperación

GRAFICA 5

VARIACION DEL ENRIQUECIMIENTO DE P_2O_5 EN FUNCION DEL NUMERO DE FLOTACIONES DE LIMPIEZA



Número flotaciones de limpieza

—●— % de P_2O_5

realizar más de tres operaciones de limpieza.

Respecto a la rentabilidad del proceso se establece que, teniendo en cuenta el porcentaje de recuperación del 85% para obtener una tonelada de concentrado del 32%, se requieren 2.2 toneladas de mineral del 18% en fósforo cuyo costo de explotación, trituración y molienda está alrededor de \$18.000 a precios actuales y el precio de los reactivos de flotación para estas mismas 2.2 toneladas de mineral está alrededor de \$6000; entonces se tiene un costo total de \$24.000 por tonelada de concentrado del 32%. En la actualidad el

precio de una tonelada de roca fosfórica con el 20% en fósforo es de \$30.000, pero al ser este concentrado de 32% su valor aumenta proporcionalmente de acuerdo al contenido de fósforo por lo que se espera tenga un valor de \$45.000, lo que representa una rentabilidad del 80%, la cual se considera buena.

Finalmente se concluye que utilizando el proceso de beneficio por flotación de roca fosfórica, se pueden aprovechar los recursos que el país tiene de este mineral, en especial los localizados en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá donde la agricultura es intensiva.

5. BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN CYANAMID COMPANY, 1986. *Mining Chemicals. Hand-Book.* N.Y.
- CHIEN, S.H., 1979.- *Dissolution of phosphate rocks in acid soils as influence by nitrogen and potasion fertilizers.* Soil science 127.
- CORNEILLE E., MASSON, A., 1973.- *Cours de Mineralurgie et Preparation des minerais.* Editions Deroux. Liege.
- HENDRICKS, S. B. HILL W.L. et al., 1931.- *Structural Characteristics of apatite - like substances and composition of phosphate rock and bone as determined from microscopical and X-ray diffraction examinations.* Industrial and Engineering Chemistry. Vol 23, Nº 12.
- INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER, 1976.- *Technical Studies of Upgrading and Utilization of Pesca and Sardinata ores.* Preliminary draft of final report, U. S.A.
- MARTINS, J., MARQUEZ, E., 1983.- *Characterization of Brazilian Phosphatic Rocks, Present and Future Perspectives.* Primera Conferencia Latinoamericana de Roca Fosfórica. Cochabamba.
- MONTAÑA, G., 1989.- *Roca Fosfórica.* Bol. Colombia Minera, Ecominas, Bogotá.
- MOJICA, P., 1987.- *Fosfatos.* Tomo II, Recursos Minerales de Colombia. Ingeominas, Pub. Geol. Esp. Nº 1. Bogotá.
- SAINT, R., 1979.- *Stituation actuelle et possibilites generales de la valorisation des minerais phosphates a gangue carbonaté.* Seminaire sur la valorisation de roche phosphat. Universidad de Cagliari. Cagliari.

- STOWASSER, R., 1980. *Phosphate Rock*. Bureau of Mines Bulletin 671, Washington, D.C.
- TAGGART, A., 1945.- *Handbook of mineral dressing*. John Wiley and sons, Inc. N.Y.
- ZAMBRANO, F., MOJICA, P., 1991.- *Exploración de Roca fosfórica en los municipios de Nuevo Colón, Turmequé y Ventaquemada (Boyacá)*. Ingeominas, Bogotá.

NORMAS EDITORIALES PARA EL BOLETIN GEOLOGICO

El Boletín Geológico publica contribuciones sobre geología básica y geociencias aplicadas, tales como ingeniería geológica, minería, química, etc., que estén relacionadas con Colombia. Se aceptan trabajos en español e inglés.

ACEPTACION DE TRABAJOS

Los trabajos que se reciban, serán revisados y evaluados por especialistas calificados del Consejo Editorial de Ingeominas, para velar por la calidad y utilidad del material que se publique.

Después de evaluado un trabajo, el autor principal recibirá un resumen de los comentarios y exigencias de los evaluadores, en el caso de que el trabajo requiera revisión y correcciones, o informándole de su no aceptación.

Un manuscrito que sea sometido para su aprobación, no puede ser enviado a otro medio de publicación con el mismo fin.

TEXTO Y FORMATO

La extensión de los artículos no debe pasar de 40 páginas en tamaño carta a doble espacio, por una sola cara, incluidas las tablas e ilustraciones. El trabajo deberá enviarse inicialmente, para su aprobación, en tres copias completas.

Después de aprobado un trabajo, su autor enviará el texto con las correcciones finales, en diskette de 3,5" utilizando un programa de levantamiento de textos para Macintosh, o que sea compatible con IBM; el diskette debe enviarse con una copia del texto y con originales de las figuras.

RESUMEN

Cada trabajo debe contener un Resumen en español con un máximo de 300 palabras y su correspondiente Abstract.

ILUSTRACIONES

Las figuras y tablas no deberán exceder el tamaño carta; en casos especiales (como mapas) no deben exceder el doble del tamaño carta; en este caso las leyendas de los mapas deben estar escritas en letra de tamaño adecuado para que al hacer la reducción al formato de la revista sean legibles. En los mapas, incluya siempre una escala gráfica.

Las fotografías en blanco y negro o a color deben enviarse en papel brillante y con una longitud horizontal máxima de 13 cm; deben incluir su número de orden y leyenda explicativa, que pueden ir al respaldo. Envíe preferiblemente diapositivas.

Envíe solo fotografías de buena calidad (por su contraste y nitidez) para que no sean rechazadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Se deben presentar ordenadas alfabéticamente y deben contener en su orden la siguiente información:

- a. **Para un artículo incluido en una publicación seriada:** Autor(es), año de publicación, título del artículo, nombre de la publicación, volumen y número, páginas, ciudad donde se publica. Ejemplo:

BÜRGL, H., 1981. Sedimentación cíclica en el geosinclinal cretáceo de la Cordillera Oriental de Colombia. Boletín Geológico Ingeominas, Vol. 7 (1-3): 85-118. Bogotá.

- b. **Para libros:** Autor(es), año de publicación, título, institución o casa editorial, ciudad, número de páginas. Ejemplo:

MAYNARD, J.B., 1983.- Geochemistry of Sedimentary Ore Deposits. Springer-Verlag, New York, 305 p.

- c. **Para congresos, seminarios, etc.:** Autor(es), año del evento, título del trabajo, nombre del evento, nombre de la publicación, páginas, ciudad. Ejemplo:

DUQUE-CARO, H., 1972. The Geology of Montería area. 14th Annual Conference. Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists. Guidebook. p. 397-431. Bogotá.

- d. **Para mapas:** Autor(es), año de publicación, título, escala, institución, entidad editora. Ejemplo:

BEHRENDT, J.C. and. BAJWA, L.Y., 1972. Bouguer gravity map of Colorado Scale 1:500.000. U.S. Geological Survey.

Para otros casos no indicados aquí, se deben seguir normas internacionales.

PRUEBAS DE IMPRENTA

El autor principal recibirá las galeras de prueba del texto para que realice únicamente correcciones tipográficas absteniéndose de hacer cambios de texto; deberá retornar el material revisado y corregido en un plazo no mayor de 30 días al de la fecha de envío por parte de los editores.

SEPARATAS

Cada autor recibirá 10 separatas del trabajo publicado.

DERECHOS DE AUTOR

(Permission/Copyright)

El autor es el único responsable de la obtención de los permisos que requiera para la publicación de ilustraciones previamente publicadas en otro medio. En esos casos, el autor debe adjuntar a su artículo una carta original del permiso del dueño de los derechos de autor.