

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



INGEOMINAS

BOLETIN GEOLOGICO

Zonificación de Cuencas por Movimientos en Masas Bajo SIG, Río Lejos, Quindío
Humberto Caballero A.
Isabel Mejía P.

Estudio de Optimización de las variables involucradas en la producción, a escala
laboratorio de sulfato de magnesio a partir de magnesitas del Valle del Cauca y Magdalena

Marcela Hernández S.
Carlos Julio Espitia E.
Javier C. Quintero P.

Volumen 36, No 1-3, pp. 1 -97, 1994
Santafé de Bogotá D.C, Colombia
ISSN-0120-1425

977

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

INGEOMINAS



BOLETIN GEOLOGICO

CONTENIDO GENERAL

Página

Humberto Caballero A. Isabel Mejía P.	Zonificación de Cuencas por Movimientos en Masa Bajo SIG, Río Lejos, Quindío 3 - 40
Marcela Hernández S. Carlos Julio Espitia E. Javier C. Quintero P.	Estudio de optimización de las variables involucradas en la producción, a escala laboratorio de sulfato de magnesio a partir de magnesitas del Valle del Cauca y Magdalena 41 - 97

Volumen 36, N° 1-3, pp. 1 - 97, 1997
Santafé de Bogotá - Colombia
ISSN - 0120 - 1425

4

Bol. Geol.
Ingeominas

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. C., Colombia S. A.

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

Formato de publicación 21 x 27 cm

Editor:

ALBERTO VILLEGAS BETANCOURT

Geólogo

Diseño, diagramación e impresión INGEOMINAS

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

UNIDAD OPERATIVA MEDELLIN

**ZONIFICACION DE CUENCAS
POR MOVIMIENTOS EN MASA
BAJO SIG, RIO LEJOS, QUINDIO**

Por:

HUMBERTO CABALLERO ACOSTA
ISABEL MEJIA PELAEZ

Medellín, abril de 1995

CONTENIDO

RESUMEN	6
1. INTRODUCCION	6
1.1. OBJETIVOS	6
1.2. METODOLOGIA	6
1.2.1. Revisión de información	6
1.2.2. Interpretación de fotografías aéreas	6
1.2.3. Trabajo de campo	7
1.2.4. Interpretación de resultados	7
1.2.5. Elaboración del informe	7
1.3. AGRADECIMIENTOS	7
2. ASPECTOS GEOGRAFICOS	7
2.1. LOCALIZACION	7
2.2. FISIOGRAFIA, CLIMA Y VEGETACION	7
3. MARCO GEOLOGICO Y GEOMORFOLÓGICO	10
3.1. LITOLOGIA	10
3.1.1. Paleozoico	10
3.1.2. Mesozoico	10
3.1.3. Cenozoico	11
3.2. TECTONICA	11
3.3. GEOMORFOLOGIA	11
3.3.1. Aspectos morfoestructurales	11
3.4. ZONIFICACION MORFOLOGICA DE LA CUENCA	13
3.5. MORFOGENESIS	14
4. PROCESOS ACTIVOS IDENTIFICADOS	14
4.1. EROSION	14
4.1.1. Cabeceras de la Quebrada Las Camelias	15
4.1.2. Quebrada La Cuzumbera	15
4.1.3. Quebrada Las Paisitas	16
4.1.4. Quebradas La Española y Las Pizarras	16
4.1.5. Casco urbano de Pijao	16
4.2. MOVIMIENTOS EN MASA	16
4.2.1. Características de pequeños desgarres	16
4.2.2. Caída de rocas	16
4.2.3. Desplomes	17
4.3. REPTACION EN LUPAS	18
4.4. EFECTOS DE LA ACTIVIDAD HUMANA	19
4.5. ACTIVIDAD FLUVIOTORRENCIAL DE LAS CORRIENTES	21
4.6. ACTIVIDAD SISMICA	22
4.7. AMENAZA VOLCANICA	22
5. EVALUACION DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA Y EROSION	23
5.1. SELECCION DE UN METODO PARA LA EVALUACION DE LA AMENAZA EN LA CUENCA DEL RIO LEJOS	23

5.2. PROCEDIMIENTO PARA EL USO DEL PAQUETE «ILWIS» EN LA CUENCA DEL RIO LEJOS	24
5.2.1. Mapas de Entrada	24
5.2.2. Procesamiento de la información y resultados principales	31
5.3. ANALISIS DE INFORMACION Y PREPARACION DE LOS MAPAS DE AMENAZA	34
5.3.1. Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, (Figura 15)	34
5.3.2. Mapa de Amenaza por Carcavamiento, (Figura 16)	36
6. CONCLUSIONES	36
7. BIBLIOGRAFIA	40

FIGURAS

1. Localización del Cuenca del Río Lejos	8
2. Mapa topográfico de la Cuenca del Rio Lejos	9
3. Vista general de la cárcava de Las Camelias	15
4. Caída de rocas en la cuenca media de Las Camelias	17
5. Grandes desplomes. Sector de Mameyal	18
6. Pendientes cóncavo-convexas por reptación en lupas. Sector de Las Camelias	19
7. Reptación en terracetas. Sector El Paraíso	20
8. Detalle del lecho de la Quebrada Las Camelias	21
9. Mapa geológico. Cuenca Rio Lejos	25
10. Mapa geomorfológico. Cuenca Rio Lejos	26
11. Mapa de procesos morfodinámicos	28
12. Mapa de uso agrícola del suelo	29
13. Mapa de isoyetas	30
14. Mapa de pendientes	32
15. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa	35
16. Mapa de susceptibilidad por carcavamiento	37

RESUMEN

Este estudio se diseñó con el propósito de conocer adecuadamente el origen de los fenómenos torrenciales que afectan la población de Pijao (Quindío), e identificar los procesos morfodinámicos actuantes y su impacto en el deterioro de la cuenca del río Lejos.

Utilizando el "paquete" ILWIS versión 1.21, (Integrated Land and Water Information System), desarrollado por ITC de Holanda, se cruzó información de seis mapas temáticos, en cada uno de los cuales se representan los factores determinados como importantes en el desencadenamiento de los procesos. El resultado fueron dos mapas de susceptibilidad del terreno a movimientos en masa y carcavamiento, considerados como los de mayor incidencia relativa.

Los mapas temáticos empleados en el análisis fueron:

Geológico, Geomorfológico, Uso Agrícola del Suelo, Pendientes, Isoyetas y Procesos Morfodinámicos.

Los mapas de susceptibilidad obtenidos dividen el territorio en zonas de Muy Alta, Alta, Media, Baja y Mínima, según sea el grado de propensión a movimientos en masa y carcavamiento.

Aproximadamente un 20% de la cuenca es de susceptibilidad muy alta, 40% de alta, 30% de media y 10% de baja a movimientos en masa y carcavamientos; no se encontraron zonas de susceptibilidad mínima.

1. INTRODUCCION

La necesidad de tener un conocimiento adecuado sobre el origen de los fenómenos que han afectado, a lo largo de la historia, al municipio de Pijao tales como deslizamientos, avenidas torrenciales, carcavamientos, represamientos y erosión severa, llevó al Ingeominas, a través de la Regional Noroccidente, a plantear a la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) el estudio de las zonas alta y media de la cuenca del río Lejos,

con el fin de sugerir las soluciones más viables para la reducción del deterioro del medio rural y su consiguiente impacto sobre el casco urbano del municipio y su infraestructura.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio fue realizar la zonificación de amenazas geológicas en la cuenca del río Lejos, mediante el análisis de variables tales como litología, pendientes, clima, uso agrícola del suelo, vegetación, geomorfología y procesos activos. La comparación de estas variables se hizo utilizando el sistema de información geográfica ILWIS (Integrated Land and Watershed Information System), el cual permite una actualización rápida de los procesos de acuerdo a los cambios que se sucedan.

Los resultados del estudio proporcionarán directrices claras de manejo del suelo, tanto para las autoridades locales como regionales.

1.2. METODOLOGIA

Mediante el sistema de información geográfica ILWIS se combinaron los mapas enunciados, con algunos datos de las características de los suelos, para encontrar índices aproximados de susceptibilidad a los movimientos en masa y carcavamiento. Se realizaron las siguientes actividades:

1.2.1. Revisión de información

Se realizó una revisión histórica, geológica, geográfica y de estudios anteriores relacionados con la zona de interés.

1.2.2. Interpretación de fotografías aéreas

Se hizo una interpretación de fotografías de diferentes escalas y años, con un cubrimiento del 100% del área, con el fin de analizar las principales características morfológicas. La información se consignó en mapas 1:25.000 y posteriormente fue digitalizada.

1.2.3. Trabajo de campo

Se hicieron recorridos tanto de las quebradas como de las divisorias de aguas de la cuenca, con el fin de tener un panorama detallado de los fenómenos. Toda la información compilada se consignó en planos topográficos escala 1:25.000.

Se realizó un inventario de rasgos de erosión, perfil de meteorización, datos estructurales, conductividad hidráulica, uso agrícola del suelo, descripción de corrientes y muestreo de sedimentos

1.2.4. Interpretación de resultados

1.2.5. Elaboración del Informe

1.3. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de los geólogos del INGEOMINAS Eduardo Parra P. y Ricardo Viana R., por su participación en el trabajo de campo y en la discusión de los resultados. Al geólogo Jaime Jiménez por su asesoría en el manejo del Sistema de Información Geográfica y a la dibujante Norha Hincapié por la digitalización de todos los mapas.

2. ASPECTOS GEOGRAFICOS

2.1. LOCALIZACION

El área de estudio corresponde con las partes alta y media de la cuenca del río Lejos, Departamento del Quindío, limitada por las coordenadas $X=976.500$, $X=963.700$ y $Y=1'147.100$, $Y=1'164.400$ (Figuras 1 y 2).

Para el ingreso a las zonas alta y media de la cuenca sólo se cuenta con una vía en buenas condiciones hasta la escuela de Mameyal; el resto del recorrido se hace a pie o en bestias. En la zona baja existen vías veredales que permiten un fácil acceso.

2.2. FISIOGRAFIA, CLIMA Y VEGETACION

Fisiográficamente, el área de estudio ocupa la margen occidental de la Cordillera Central, en un valle estrecho labrado por el río Lejos, de relieve abrupto, donde se pueden diferenciar tres zonas con características geomorfológicas y climáticas diferentes:

La zona alta comprende desde la escuela Mameyal (Figura 2), hasta el eje de la Cordillera Central, con alturas desde 2.400 hasta 3.700 m.s.n.m.; el clima es frío, temperaturas entre 6 y 12°C y un promedio anual de lluvias entre 1.600 y 2.800 m.s.n.m. Según Espinal (1977), ocupa el piso térmico bosque pluvial Montano (bp-M); esta formación está asociada a un relieve muy pendiente de profundas gargantas y escarpados desfiladeros.

De la vegetación natural quedan aún parches de bosque con gruesas capas de musgos y líquenes; el resto ha sido reemplazada por pequeños cultivos de papa y desarrollos ganaderos. El bp-M se considera la zona productora de agua en las cuencas hidrográficas, de ahí la importancia de conservar la vegetación natural ya que ella protege y regula el caudal de las corrientes que nacen en este piso térmico.

La zona media va desde la escuela Mameyal hasta la cabecera municipal, con alturas desde 1.800 hasta 2.400 m.s.n.m.; caracterizada por un clima templado a frío, temperaturas entre los 14 y 18°C y precipitación promedio anual entre 2.000 y 2.200 mm. El piso térmico característico es el bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB); la topografía es accidentada.

De la vegetación natural quedan escasos parches donde se destacan las palmas de cera y los yarumos blancos; el resto ha sido removida para el desarrollo de labores ganaderas. En la actualidad existen reforestaciones con coníferas en las partes más altas de la zona. Por las condiciones climáticas, el bmh-MB juega un papel muy destacado en el régimen hidrológico de los ríos; por la alta lluviosidad y la baja temperatura hay poca evapotranspiración haciendo que parte del agua aumente los caudales de las corrientes cercanas.

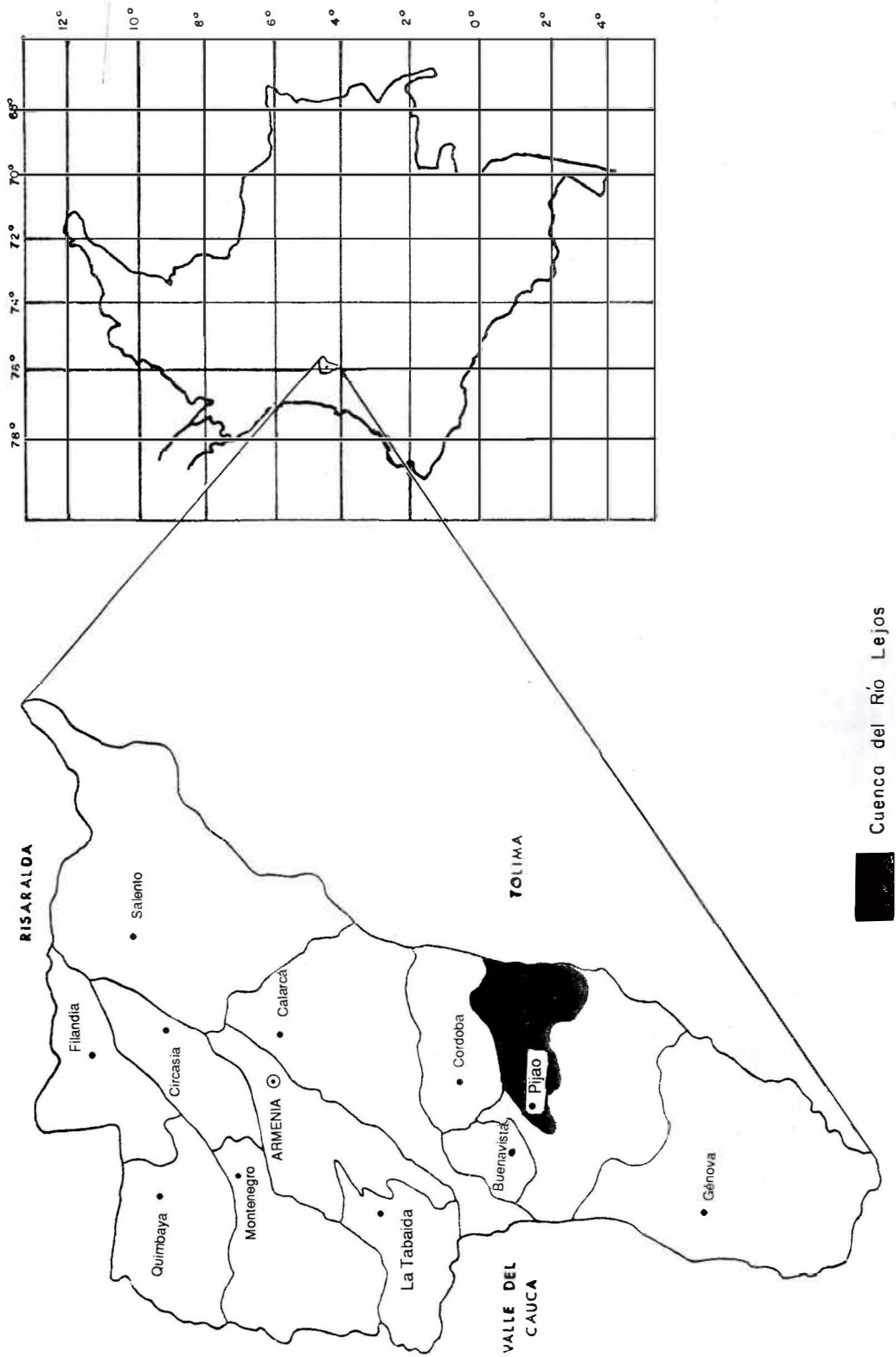


FIGURA 1 LOCALIZACION DEL AREA DEE L D O

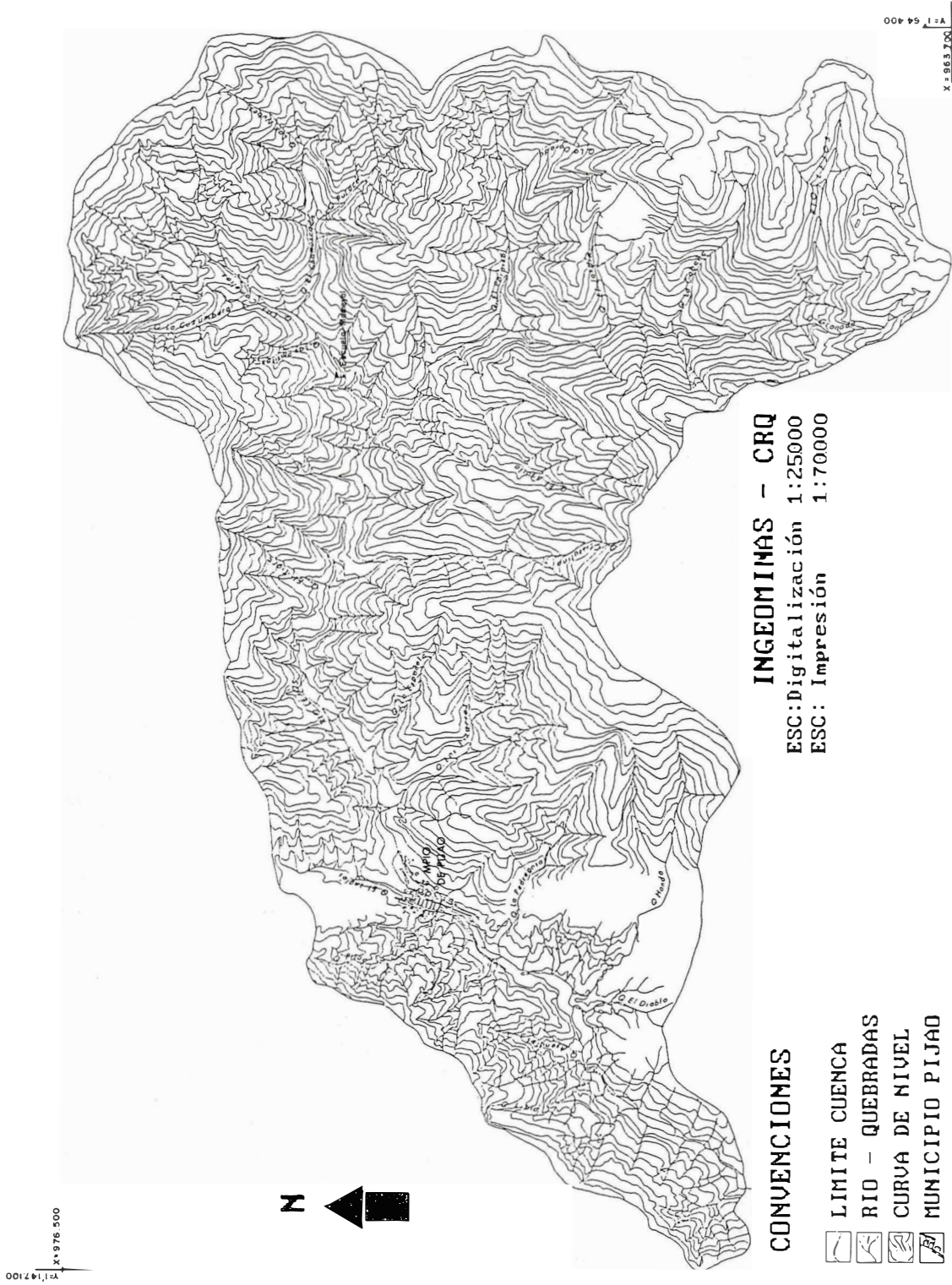


FIGURA 2. MAPA TOPOGRAFICO DE LA CUENCA DEL RIO LEJOS

- **La zona inferior** va desde la cabecera municipal hasta la confluencia de los ríos Azul y Lejos, con alturas desde 1.400 hasta 1800 m.s.n.m., caracterizada por un clima templado, temperatura promedio entre 18 y 22°C y una precipitación promedio anual entre 2.000 y 4.000 mm. Es muy notorio el incremento de las lluvias hacia las partes altas de las montañas; la zona de vida es el bosque muy húmedo Premontano (bmh-PM) que corresponde con la zona cafetera de relieve de altos cerros, profundas cuencas y mesetas onduladas. La vegetación original desapareció completamente para dar paso al cultivo del café. En la zona de estudio se encuentran parches de alguna extensión donde se está reforestando con coníferas.

Puede decirse de manera general que muy probablemente las lluvias han sido desencadenadoras de un alto porcentaje de los procesos erosivos y de los movimientos en masa localizados en la parte NE de la cuenca. La ausencia de datos de precipitación de la parte alta, donde el comportamiento de las lluvias es diferente, no permite corroborar dicha hipótesis. Estos picos de lluvia, pueden producir efectos de erosión puntual muy dramáticos, dentro de una misma zona con condiciones geológicas, topográficas y climáticas relativamente similares, causando el deterioro de la capa superficial.

Según Thouret y Faivre (1989), existen dos máximos y dos mínimos de precipitación relacionados con la altura. Los mínimos están ubicados en los 1.260 m con una precipitación de 2.060 mm y en los 1.540 m con 1.800 mm; los máximos en 1.480 m con 2.420 mm y en los 2.040 m con 2.900 mm.

3. MARCO GEOLOGICO Y GEOMORFOLOGICO

La geología que se describe para el área de estudio fue tomada del mapa geológico generalizado del Departamento del Quindío, compilado por González y Núñez (1991). El análisis geomorfológico del área fue realizado durante este estudio.

3.1. LITOLOGIA

Las unidades de roca aflorantes en el área tienen edades que van desde el Paleozoico hasta el Cenozoico; a continuación se describirán los diferentes tipos de roca en cada uno de los períodos de tiempo geológico.

3.1.1. Paleozoico

Este período está representado por rocas metamórficas del **Complejo Cajamarca (Pzc)**, principalmente esquistos sericíticos y cloríticos que afloran al este de la cuenca.

3.1.2. Mesozoico

El registro mesozoico está representado por varias unidades:

Complejo Quebradagrande (Kvc, Ksc, Kg). Secuencia volcano-sedimentaria limitada al este por la Falla de San Jerónimo y al oeste por la Falla de Pijao-Silvia. Las rocas volcánicas (Kvc), son predominantemente de composición basáltica y en menor cantidad se encuentran andesitas y piroclastitas con intercalaciones de sedimentitas marinas. La unidad sedimentaria (Ksc), está constituida por grawacas, lutitas, limolitas y localmente chert, calizas y niveles conglomeráticos.

Al oeste de la Falla de San Jerónimo aparece una franja donde predominan rocas volcano-sedimentarias (Kg), también pertenecientes al Complejo Quebradagrande.

Rocas Ultramáficas (Kus). Cuerpos alargados y delgados de rocas ultramáficas serpentinizadas y tectonizadas, emplazadas en la zona de fallamiento Pijao-Córdoba.

Complejo Arquía (Kiea, Kies). Constituido por anfibolitas graníferas, esquistos anfibólicos, esquistos anfibólicos con granate (Kiea), asociados a una secuencia pelítica (Kies), y a esquistos grafíticos con granate y cloritoide.

Intrusivos Tonalíticos-Dioríticos (Kdi). Denominado Complejo Igneo de Córdoba, está consti-

tuido por rocas de composición variable entre diorita y tonalita.

3.1.3. Cenozoico

Caracterizado por la presencia de rocas hipoabisales porfídicas (Tadh), de composición intermedia, andesítica a dacítica; no se identificaron depósitos cuaternarios de importancia a excepción de la cubierta de cenizas volcánicas.

3.2. TECTONICA

En la zona de estudio las fallas principales pertenecen al Sistema Romeral; entre ellas se destacan la de San Jerónimo que marca el contacto entre el Complejo Cajamarca y el Complejo Quebradagrande y la Falla Pijao- Silvia que limita los Complejos Quebradagrande y Arquía; ambas son de carácter regional. La primera fue estudiada inicialmente en Antioquia y la segunda fue cartografiada al sur del país. No hay evidencias de actividad de estas fallas; sin embargo, no se debe descartar ya que hacia el norte se han encontrado signos de actividad en varias trazas del Sistema.

En un perfil topográfico del río se observan varios puntos de quiebre, que coinciden con el cruce de las fallas El Salado y Silvia-Pijao, los cuales corresponden a rejuvenecimientos del lecho, posiblemente por actividad cuaternaria de las fallas.

Las fallas del Sistema Romeral que tienen evidencias de actividad cuaternaria son la de Montenegro que cruza al oeste de la población del mismo nombre y la Falla Aeropuerto que pasa cerca al aeropuerto del Edén; ambas cortan el cono del Quindío de edad cuaternaria; se considera una tasa de desplazamiento de 0,1 mm/año, o sea un grado de actividad de bajo a moderado, (PAGE, 1986).

3.3. GEOMORFOLOGIA

La zona de estudio corresponde a la cuenca de drenaje del río Lejos, comprendida desde sus nacimientos en la divisoria de la Cordillera Central hasta la desembocadura en el río Azul, aguas

abajo del casco urbano de Pijao; desde este punto hacia abajo el río adquiere un comportamiento diferente, entrando en zonas de baja pendiente donde predomina el proceso de transporte de sedimentos en contraste con la cuenca de drenaje, caracterizada fundamentalmente por la fuerte actividad erosiva.

3.3.1. Aspectos morfoestructurales

Se entiende por morfoestructura, la expresión morfológica de las distintas unidades geológicas y tectónicas aflorantes en la cuenca, resultado principalmente de la acción diferencial de procesos como la meteorización y la erosión. Desde este punto de vista se distinguieron en la cuenca varios dominios morfoestructurales; se excluyeron las rocas ultrabásicas y los pórfidos andesíticos debido a lo escaso de su área.

Rocas metamórficas. Dentro de este dominio se incluyen tanto las rocas del Paleozoico que afloran en la parte alta de la cuenca, como las agrupadas bajo el nombre estratigráfico de Complejo Arquía. Ambas unidades tienen una marcada anisotropía, definida por su foliación característica; los saprolitos derivados tanto de los esquistos cuarzo-sericíticos como de los cloríticos y anfibólicos, son generalmente de baja porosidad y permeabilidad, debido a la abundancia de materiales arcillosos. La mayor deleznablez de los esquistos cuarzo-sericíticos hace que sean más fácilmente atacables por los procesos denudativos.

En el Complejo Cajamarca las corrientes de primer orden presentan un marcado paralelismo entre filos y valles, alineados preferencialmente con la foliación, que en el sector es próxima a N30°E; algunas cabeceras de corrientes de orden superior y un tramo importante del río Lejos, presentan tendencia norte-sur en concordancia con la orientación de la foliación. Las quebradas de orden dos o mayor cortan en forma perpendicular la mencionada tendencia estructural, debido quizás al rápido levantamiento de la cordillera. Los filos que bordean cuencas de primer orden son subredondeados debido a la espesa cubierta de ceniza volcánica que recubre la región; las vertientes de estas quebradas son fuertes y rectilíneas.

En contraste con lo anterior, sobre las rocas del Complejo Arquía, que afloran en la cuenca baja, las corrientes de orden uno se han conformado paralelamente entre ellas pero perpendiculares a la orientación de la foliación; sólo las de orden superior siguen aproximadamente esta tendencia estructural. Esta aparente contradicción podría explicarse si existiese un diaclasamiento importante de sentido N45°W a lo largo del cual se encajaron las corrientes más elementales. Los filos entre corrientes primarias son anchos, de aspecto convexo predominante; las vertientes son cortas, rectilíneas y de inclinación moderada; la cubierta de cenizas volcánicas enmascara en parte las características intrínsecas a esta unidad morfoestructural.

Rocas volcano-sedimentarias del Complejo Quebradagrande. Esta es una secuencia interestratificada de rocas volcánicas básicas y sedimentarias compuestas predominantemente por areniscas, lutitas y limolitas; aunque las dos unidades se encuentran intercaladas, fueron cartografiadas separadamente tomando en cuenta el predominio de uno y otro conjunto; toda la secuencia se encuentra plegada en forma variable dependiendo de la competencia de las rocas.

Tiene grados diferentes de anisotropía, representada de un lado por los planos de estratificación y del otro por el contraste de propiedades físico-mecánicas de los distintos componentes. La meteorización ha producido saprolitos ferruginosos a arcillosos de baja permeabilidad y porosidad.

En esta unidad existe una marcada tendencia de las corrientes de segundo orden y superiores, a correr siguiendo ejes N-S y NE-SW, los cuales coinciden aproximadamente con la tendencia general de los planos de estratificación. Se excluyen las quebradas La Española, Las Pizarras y La Pedregosa que fluyen del SE al NW.

Rocas Intrusivas del Complejo Córdoba. Son rocas de composición variable entre diorita y tonalita; de comportamiento homogéneo y sin direcciones preferenciales para la acción de los agentes meteóricos. El resultado de la meteorización es un "gruss" limo-arenoso con contenidos variables de arcilla.

La morfología típica desarrollada es de colinas suaves convexo-cóncavas con interfluvios amplios y cuencas poco profundas, especialmente las de bajo orden. El drenaje principal tiene tendencia SW-NE, paralelo a las fallas que bordean el cuerpo granítico; las quebradas de primer y segundo orden confluyen perpendicularmente con las principales, siguiendo quizás algún sistema preferencial de diaclasamiento.

Influencia morfológica de la tectónica. La cuenca del río Lejos está atravesada por varias trazas de fallas pertenecientes al Sistema de Fallas de Romeral de rumbo general N10°E; no hay suficiente información sobre la extensión de rocas afectadas por éstas, las cuales tienen un marcado comportamiento anisotrópico debido al grado variable de trituración que ha sufrido la roca. En fotos aéreas es posible observar el alineamiento de quebradas y depresiones del terreno que siguen la traza de las fallas debido a la mayor facilidad que ofrecen para la erosión. Varias son visibles en el campo como alineamientos prolongados de quiebres notables de pendientes; en algunos de estos se observó una estrecha asociación espacial con movimientos en masa de tamaño medio, aproximadamente de 100 m³.

Influencia de la cubierta piroclástica. Depósitos de material piroclástico cubren de manera casi continua la mayor parte del paisaje; se exceptúan las zonas de fuerte pendiente que forman los bordes de las corrientes principales por ser zonas de erosión activa. En la parte más alta de la cuenca, donde aún se observan evidencias de la pasada actividad glacial, se pasa directamente del suelo orgánico (Turberas), a la roca fresca o semimeteorizada, indicando que la cubierta superior de saprolito y material piroclástico fue completamente erosionada por la acción del hielo.

El espesor, la granulometría y la estratigrafía del material piroclástico varían según la parte de la cuenca que se considere; los mayores espesores (2 m), se encuentran preferentemente en la cuenca alta donde dominan niveles de cenizas volcánicas de grano fino, intercaladas con horizontes de pómez, con tamaños hasta de 3 cm de diámetro (lapilli grueso).

Morfológicamente tienen un efecto suavizador del paisaje, convirtiendo una región de filos predominantemente agudos en divisorias de aspecto suave con marcada tendencia a la convexidad. La presencia del material volcánico le confiere a las vertientes una dinámica particular, debido al marcado contraste de conductividad hidráulica que existe entre éstas y los saprolitos de la mayoría de las unidades geológicas que afloran en la cuenca. De la fotointerpretación se desprende que la zona de morfología más suavizada por la espesa cubierta piroclástica es la de Las Camelias, que coincide con gran cantidad de movimientos en masa y procesos erosivos.

3.4. ZONIFICACION MORFOLOGICA DE LA CUENCA

La cuenca fue dividida en cinco unidades geomorfológicas diferentes, con el propósito de encontrar alguna relación entre procesos morfodinámicos dominantes y geoformas características. Para dicha zonificación se utilizó la combinación de los criterios que se mencionan a continuación:

- Las pendientes, se clasificaron de acuerdo con el grado de inclinación, en fuertes o suaves; con la longitud, en largas o cortas; con su forma, en rectilíneas, cóncavas, convexas o sus combinaciones; y con sus características, en regulares o irregulares.
- Los filos se clasificaron en agudos, redondeados, subredondeados y convexos y algunas combinaciones de éstos.

Las unidades geomorfológicas determinadas se caracterizan igualmente por los procesos dominantes y secundarios identificados en cada una de ellas.

Los principales rasgos de las unidades geomorfológicas cartografiadas se presentan en la figura 10 y son:

Unidad 1. Cubre desde la desembocadura del río Azul en el Lejos hasta aproximadamente 2000

m.s.n.m.; las pendientes son fuertes, rectilíneas y regulares. Los filos son predominantemente agudos y los procesos dominantes identificados son erosión laminar superficial y formación de terracetas.

Unidad 2. Se extiende desde alrededor de 2000 m.s.n.m. hasta cerca de 2600 m.s.n.m., ocupando la cuenca media. Las pendientes son fuertes e irregulares, con perfil cóncavo-convexo típico; los filos varían de subredondeados estrechos a convexos de ancho moderado. El proceso dominante es reptación en lupas, también conocido por algunos autores como soliflucción tropical, (FLOREZ, 1983); como procesos secundarios se identificaron movimientos en masa de volumen pequeño que afectan principalmente cenizas volcánicas y ocasionalmente el saprolito; hay cárcavas importantes en varias de las cabeceras de las quebradas de orden dos y tres; la construcción de carreteras, banqueos etc., desencadena movimientos en masa con facilidad.

Unidad 3. Es una franja estrecha ubicada entre 2600 y 3000 m.s.n.m.; las pendientes son fuertes, largas e irregulares, con filos predominantemente agudos. El proceso dominante es la reptación de la cubierta de cenizas volcánicas, dando lugar a terracetas de desgarre y del tipo caminos de ganado; secundariamente se identificaron movimientos en masa de moderados a pequeños (del orden de 10m^3); son comunes los de tipo golpe de cuchara; la reptación en lupas se observa más esporádicamente y existe un carcavamiento incipiente.

Unidad 4. Desde 3000 a 3600 m.s.n.m.; se caracteriza por pendientes fuertes, largas e irregulares; son comunes los escarpes con inclinaciones mayores al 100%. Los filos son predominantemente convexos y amplios a subredondeados. Con base en los procesos dominantes se separaron dos subunidades; la del norte donde hay una abundancia equilibrada de filos redondeados y agudos, es la subunidad más afectada por fenómenos erosivos a gran escala. Hacia el sur, existe un predominio de filos redondeados, con procesos erosivos de menor importancia.

Unidad 5. Abarca las áreas que se encuentran a alturas mayores de 3500 m.s.n.m.; es una unidad de geoformas y paisajes heredados de épocas pleistocénicas cuando estuvieron bajo la influencia de glaciares de montaña. Las pendientes son suaves y moderadas con predominio de formas convexas; los filos son redondeados y amplios. Una de sus características más sobresalientes, después de los rasgos glaciares, es la escasa o ausente cubierta de cenizas volcánicas debido a la acción erosiva del hielo.

3.5. MORFOGENESIS

Las geoformas presentes en la cuenca se pueden clasificar, desde el punto de vista genético, en una o más de las siguientes categorías:

Formas heredadas de origen glaciar. Se encuentran por encima de los 3500 msnm, dentro de las que se destacan, superficies aborregadas, planos cepillados, etc.

Formas asociadas a las vertientes. Donde el mecanismo principal es la acción de la gravedad combinada con el efecto del agua lluvia que circula superficialmente o se infiltra; estos procesos dieron lugar a los tipos de vertientes detalladas en el numeral anterior.

Formas ligadas al sistema fluvial. Estas formas se pueden dividir, dependiendo del proceso dominante, en formas erosivas y de acumulación. Entre las primeras se encuentran los profundos valles en forma de V y algunas gargantas muy estrechas labradas en la roca, por donde el río fluye a gran velocidad durante las crecientes. Las formas de acumulación son pequeñas terrazas que se conservan principalmente en cercanías del casco urbano del municipio; otras acumulaciones importantes se encuentran en el cauce activo del sistema fluvial, donde es posible reconocer aún muchos rasgos morfológicos y sedimentológicos del carácter torrencial del río Lejos; los tramos donde se presentan las mayores acumulaciones son: Quebrada Las Camelias desde la confluencia de la quebrada Cuzumbera hasta su desembocadura en el río Lejos y en el mismo río a su paso por el área urbana, donde se presenta el mayor volumen de sedimentos.

4. PROCESOS ACTIVOS IDENTIFICADOS

La dinámica actual de las vertientes y cauces en la región estudiada, tiene origen tanto en causas naturales como en la actividad humana.

Los fenómenos geodinámicos que afectan las vertientes, están relacionados con factores tales como la velocidad de incisión de las corrientes, el tipo de roca aflorante y su grado de meteorización, el clima, el tipo de vegetación y en buena medida por la presencia de una capa de cenizas volcánicas de espesor variable que cubre la mayor parte de la región.

A continuación se hará la descripción de los principales rasgos morfodinámicos, identificados en la cuenca del río Lejos.

4.1. EROSION

En la región estudiada, sobresale por su espectacularidad la erosión en cárcavas; otras como la erosión laminar, en surcos y algunos tipos de reptación están más ligadas a la intervención humana sobre el paisaje.

Las cárcavas son zanjas relativamente profundas, formadas por la acción erosiva de las aguas superficiales, que se desplazan a gran velocidad pendiente abajo sobre materiales poco cohesivos como cenizas volcánicas, saprolitos arenosos o rocas fuertemente trituradas. Una característica importante es que avanzan de abajo hacia arriba en forma regresiva, siguiendo generalmente la línea de mayor pendiente; existen otros procesos asociados a su evolución como la incisión o profundización longitudinal del cauce o lecho y el ensanchamiento lateral mediante pequeños derrumbes de diverso tipo.

Las razones principales para dar inicio a un proceso erosivo de esta naturaleza, son: incremento en los volúmenes de agua de escorrentía, debido a la existencia de fenómenos meteorológicos excepcionales, o al aumento de la capacidad erosiva de un flujo de escorrentía relativamente constante, motivado por cambios en la cubierta vegetal.

4.1.1. Cabeceras de la Quebrada Las Camelias

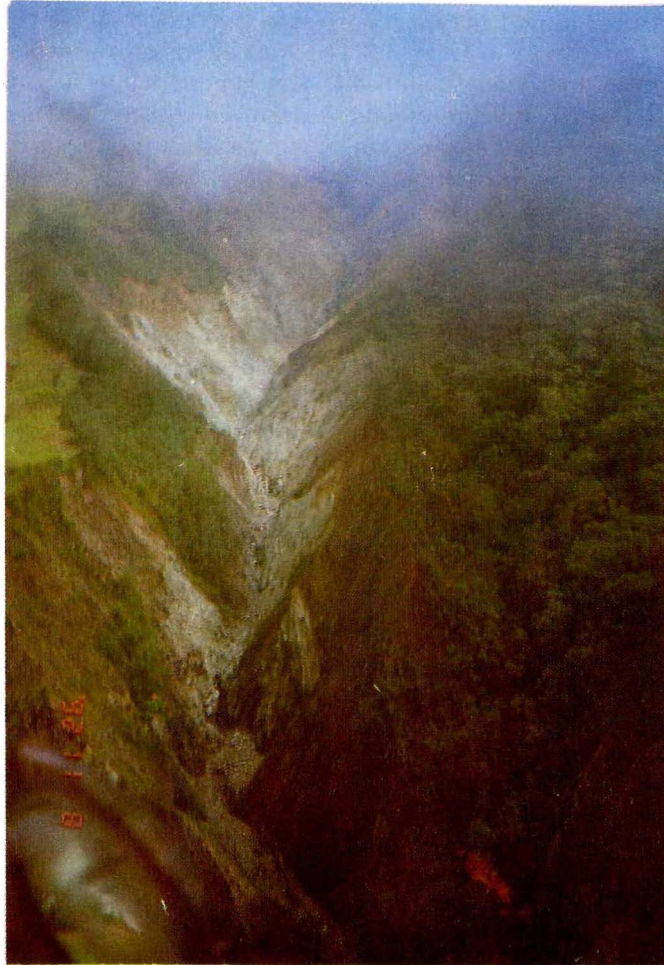
En este sector existe una cárcava de grandes dimensiones, la cual se originó, según informes de pobladores de la región, a finales de la década del 50 o principios de los 60.

Esta cárcava tiene más de 1 km de largo y 250 m en su parte más ancha; la profundidad en su parte media es de unos 30 a 50 m, disminuyendo hacia la cabecera. Tiene un canal principal y unos pocos canales secundarios; en las partes media y alta se concentra la mayor actividad y es posible observar la ocurrencia permanente de pequeños derrumbes laterales (Figura 3).

La cárcava de Las Camelias se ha identificado como la mayor aportante de sedimentos al río Lejos, que puede alcanzar hasta el 70% del total de la carga actual del río.

4.1.2. Quebrada La Cuzumbera

Varias de las cabeceras de esta cuenca presentan cárcavamientos con diferentes grados de actividad; algunas han revegetado espontáneamente, favoreciendo la disminución de los procesos que le dieron origen. La mayoría de las cárcavas visitadas dentro de esta subcuenca presentan un alto grado de actividad y se caracterizan por la fuerte incisión de sus cauces principales, algunos



de los cuales presentan flujo permanente de agua. El cauce de la quebrada La Cuzumbera presenta evidencias morfológicas y sedimentológicas de comportamiento torrencial, probablemente originado en el aporte de sedimentos desde estos focos erosivos.

4.1.3. Quebrada Las Paisitas

De características similares a la anterior, las cárcavas de esta subcuenca son todas activas y afectan tanto la cubierta de cenizas volcánicas como el saprolito de la roca; a diferencia de las cartografiadas en La Cuzumbera, parecen ser más activas en la corona mediante un proceso de avance regresivo.

4.1.4. Quebradas La Española y Las Pizarras

Situadas en la parte media de la cuenca, ambas presentan fenómenos de carcavamiento en sus cabeceras, en zonas de alta pendiente; le aportan gran cantidad de material a sus respectivas corrientes, las cuales presentan un régimen torrencial bastante marcado.

4.1.5. Casco urbano de Pijao

También se cartografiaron cárcavas en pequeñas cuencas próximas al casco urbano, algunas de las cuales fueron originadas por procesos antrópicos como la construcción de carreteras y caminos y por el vertimiento inadecuado de los drenajes de vías, como el caso observado en la carretera a la escuela Mameyal (Pedregal).

4.2. MOVIMIENTOS EN MASA

A diferencia de la erosión, estos son desprendimientos relativamente rápidos de volúmenes variables de suelo, rocas o combinación de ambos. Las causas más comunes de su origen son: altas pendientes, aumento de presiones intersticiales por infiltración de agua, disminución de soporte lateral debido a cortes o erosión, sobrepeso de materiales acumulados en las vertientes y por la combinación de éstos con factores geológicos

como los contrastes de conductividad hidráulica entre unidades, grado de fracturamiento o presencia de discontinuidades con inclinaciones similares a las de las vertientes y espesor de la cubierta de meteorización, entre otras.

Se distinguieron tres tipos diferentes de movimientos en masa: pequeños desgarres en zonas de alta pendiente, caídas de roca y desplomes de volumen variable en las márgenes de las corrientes principales. El aporte de este tipo de procesos al deterioro de la cuenca se considera moderado.

4.2.1. Características de pequeños desgarres

Son derrumbes de volúmenes que pocas veces superan los 10.000 m³ de material. Ocurren con más frecuencia en las partes altas de la cuenca (zona de bosque de niebla), donde las pendientes son generalmente fuertes y bastante largas. El derrumbe típico tiene unos 20 m de ancho en la corona y 40 m en la base; la longitud más frecuente es de 100 m y la profundidad de la zona de ruptura de 4 m.

Este tipo de movimiento involucra, en la mayoría de los casos, la cubierta de cenizas volcánicas; se localizan en la parte alta de la cuenca y se acumulan sobre un depósito de vertiente, conformado por bloques de roca decimétricos en una matriz limo-arcillosa con abundante materia orgánica. Muy probablemente se originan por las presiones intersticiales existentes en el contacto entre las cenizas volcánicas, muy permeables y el depósito de vertiente de baja permeabilidad; las fuertes pendientes, la alta humedad y la deforestación a que ha sido sometido el sector, son factores que contribuyen para su ocurrencia. No se descarta la influencia de la actividad sísmica en su desencadenamiento.

4.2.2. Caída de rocas

Menos frecuentes que los anteriores, pueden alcanzar volúmenes considerables, como el que se cartografió en la parte media de la quebrada Las Camelias (Figura 4); ocurren en zonas de fuerte pendiente donde las discontinuidades de la roca

tienen buzamientos similares a la pendiente. Aunque sólo se observan unos pocos lugares con actividad, es muy frecuente a todo lo largo de la región visitada, ver grandes acumulaciones de bloques de roca de tamaños variables, desde unos pocos centímetros hasta varios metros de diámetro; todas las acumulaciones de bloques estudiadas se depositaron sobre la cubierta de cenizas volcánicas lo que permite distinguirlas de los depósitos de vertiente, mencionados en el aparte anterior.

Las subcuencas de La Cuzumbera, Las Paisitas y El Brillante, presentan la mayor cantidad de este tipo de acumulaciones; también ocurren caídas de roca de menor importancia, en cuanto a volumen, cerca a los cauces de las quebradas principa-

les que contribuyen a aumentar la carga de las corrientes.

4.2.3. Desplomes

En esta denominación se incluyen movimientos masivos con poco desplazamiento lateral; son frecuentes en las zonas de fuerte pendiente, próximas a los cauces de las quebradas más importantes. Su volumen puede variar entre centenas y varios miles de metros cúbicos de material; algunos son activos y abundan evidencias morfológicas de desplomes inactivos o en equilibrio inestable, especialmente en la margen izquierda de la quebrada Las Camelias entre El Brillante y Mameyal (Figura 5); también se obser-



FIGURA 4. Caída de rocas en la cuenca media de Las Camelias

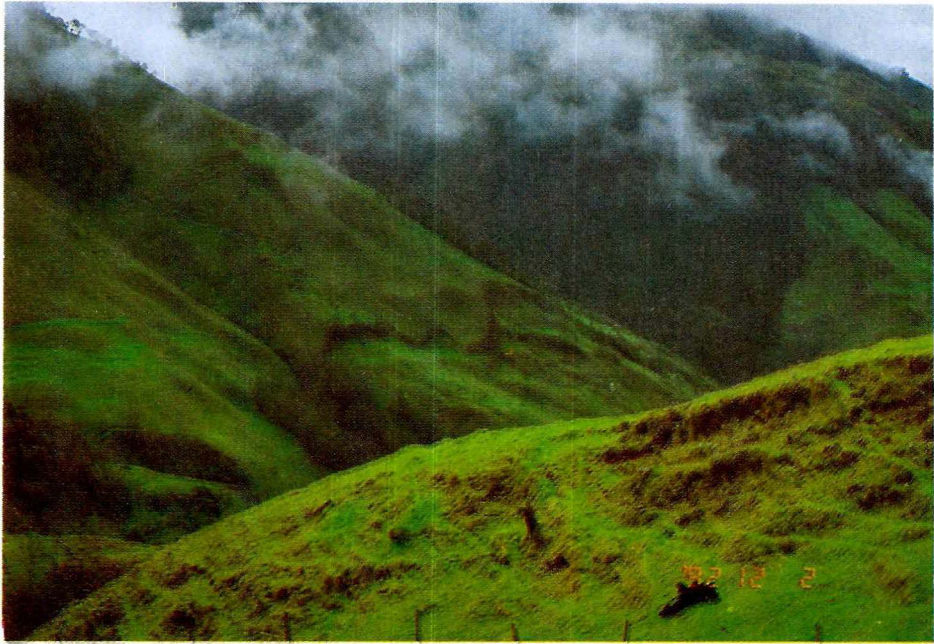


FIGURA 5. Grandes desplomes. Sector de Mameyal

varon desplomes de volumen considerable en las márgenes de La Cuzumbera y La Española.

4.3. REPTACION EN LUPAS

Por la poca velocidad que caracteriza este fenómeno, debió ser tratado en el numeral correspondiente a erosión, pero se hace por separado debido a su amplia distribución en la cuenca media y alta, y a que puede dar lugar a pequeños desgarres del terreno cuando se produce su aceleramiento durante los períodos de lluvias. Flórez (1983), hizo una descripción detallada del fenómeno en el área de Manizales-Chinchiná, bajo la denominación de solifluxión profunda que corresponde bien con lo observado en la cuenca del río Lejos.

Las vertientes afectadas por este proceso, se caracterizan por una sucesión casi continua de concavidades seguidas de convexidades o abultamientos del terreno (Figura 6), detrás de los cuales es frecuente observar zonas húmedas o

de empozamiento; las dimensiones típicas entre la cabecera de la concavidad y el fin de la convexidad puede oscilar entre 20 y 30 m por 10 a 15 m de ancho.

Según Flórez (1983), este tipo de reptación se produce mediante un flujo lento de las cenizas volcánicas que cubren una capa plástica (arcilla o arcillo-limosa) derivada de la meteorización de las mismas cenizas o de la roca del substrato. Por la poca velocidad del fenómeno y la abundante cantidad de agua involucrada, la masa fluye sin producir efectos de cizallamiento (no hay superficie de ruptura) en la base del movimiento.

Este proceso de reptación en lupas, se genera gracias al fuerte contraste en la conductividad hidráulica de las cenizas volcánicas y la capa arcillo-limosa ubicada en profundidad; contribuyen además la alta humedad presente y las pendientes fuertes. El autor ya mencionado, encontró más al norte del área de estudio que este proceso es geológicamente muy antiguo y aún continúa activo.

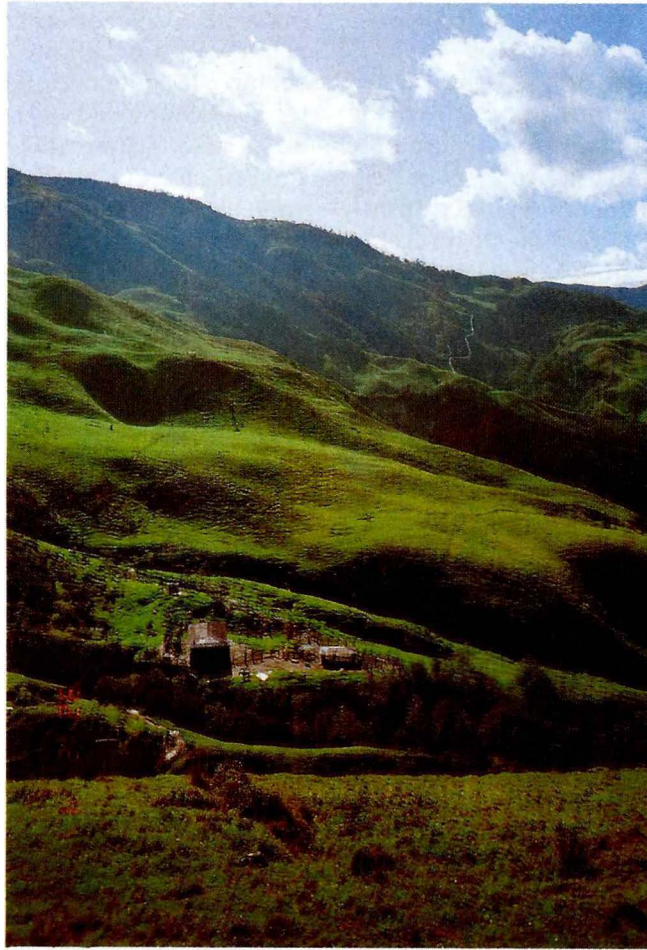


FIGURA 6. Pendientes cóncavo-convexas por reptación en lupas. Sector de Las Camelias

4.4. EFECTOS DE LA ACTIVIDAD HUMANA

La mayor parte de la cuenca del río Lejos ha sufrido los rigores de una fuerte intervención representada por deforestación, construcción de vías, agricultura intensiva y ganadería, entre otras. Como resultado de este proceso se desencadena o acelera una serie de fenómenos que contribuyen al deterioro progresivo del paisaje.

Los fenómenos más comunes son movimientos en masa a lo largo de los cortes de carreteras, que se producen por la disminución del soporte lateral de las vertientes, especialmente cuando la vía cruza por sectores afectados por reptación en

lupas o áreas de derrumbes previos. Otro efecto negativo de las vías son las entregas deficientes de las aguas de escorrentía, que se dejan a media pendiente con lo que generan agresivos procesos de carcavamiento como los existentes en la carretera que de La Quebra conduce a la escuela Mameyal.

El cambio de café con sombrero por caturra, tiene implicaciones serias en cuanto al aceleramiento de procesos erosivos que no han sido evaluados aún con el suficiente detalle; el café con sombrero protegía las vertientes de la erosión y de los movimientos en masa, ya que se conformaba una cobertura vegetal de varios estratos que resguardaban el suelo del efecto erosivo de la lluvia y la escorrentía; el anclaje profundo de los árboles de

sombra contribuía también a la retención del suelo, disminuyendo en forma sustancial la probabilidad de ocurrencia de derrumbes.

El café caturra por el contrario, no requiere de sombrío, no admite la competencia de otro tipo de vegetación y su sistema radicular es mucho menos importante que el de los árboles de sombrío, favoreciendo así el aceleramiento de la erosión y ocurrencia de movimientos en masa.

La deforestación de la cuenca alta, especialmente en las zonas de fuerte pendiente y su reemplazo por potreros, contribuye a la generación de movimientos en masa en la medida que se elimina la estabilidad que proporciona el anclaje de las raíces, las cuales al descomponerse aumentan sensiblemente la porosidad y permeabilidad de los suelos.

Los efectos negativos del sobrepastoreo se observan claramente en la parte alta de la quebrada Las

Camelias, donde hay extensas zonas afectadas por reptación en terracetos del tipo denominado pata de vaca o caminos de ganado (Figura 7); debido a la combinación de las fuertes pendientes, la alta humedad y el sobrepeso de los animales, se pasa fácilmente de reptación a desgarres superficiales, que pueden evolucionar hacia movimientos en masa de mayores proporciones, como los que se pudieron observar en proximidades de la casa de Las Camelias.

Otro tipo de intervención humana en la cuenca, es la reforestación de amplias zonas con especies exóticas, cuyos efectos en bien o en contra de la estabilización de los procesos superficiales no han sido suficientemente evaluados. Sin embargo, durante el trabajo de campo se pudo observar que en las zonas dedicadas a esta actividad no existen procesos de remoción, debido a la espesa cubierta de hojas en descomposición que disminuyen la escorrentía.



FIGURA 7. Reptación en terracetos. Sector El Paraíso

4.5. ACTIVIDAD FLUVIOTORRENCIAL DE LAS CORRIENTES

La mayor parte de las corrientes se caracteriza por presentar espesas acumulaciones de detritos, donde han quedado registradas evidencias morfológicas y sedimentológicas de una fuerte actividad torrencial, algunos de cuyos eventos han tenido consecuencias catastróficas para los pobladores del casco urbano de Pijao.

Del análisis sedimentológico, se desprende que la quebrada Las Camelias tiene una marcada tendencia a presentar flujos de escombros y en menor proporción flujos de lodo, originados por el gran aporte de material finogranular proveniente de las zonas de carcavamiento (Figura 8)

Morfológica y sedimentológicamente se encontraron evidencias de comportamientos torrenciales tales como acumulaciones hasta de 5 m de altura con respecto al nivel actual del cauce, conformadas por niveles irregulares de material mal seleccionado, generalmente bloques de dis-

tinto tamaño incluidos en una matriz arenosa, areno-limosa o limosa según haya sido la génesis del proceso.

Dentro de estas acumulaciones se pudieron observar intercalaciones de depósitos originados por flujos de lodo o de escombros, con matriz arenosa o areno-limosa derivada de las áreas metamórficas principalmente; los flujos de lodo, de menor importancia en cuanto a volumen y número, se caracterizan por tener una matriz limosa proveniente de las cenizas volcánicas que cubren las vertientes.

De acuerdo con las observaciones antes anotadas se deduce que el proceso dominante es el flujo de escombros, el cual se origina en los carcavamientos de la zona de microcuencas. De otro lado, los flujos de lodo parece que se inician a partir de derrumbes en las vertientes.

Otros rasgos sedimentológicos característicos de este tipo de comportamiento, lo constituyen las barras laterales (diques) de bloques de gran tamaño, acumulados en los bordes de los canales activos en el momento de un evento. Son comu-



FIGURA 8. Detalle del lecho de la quebrada Las Camelias

nes los depósitos con gradación inversa o sea que los bloques de mayor diámetro (1 a 2 m), ocupan la parte superior, sin matriz, acumulados sobre un depósito de cantos de tamaño menor, contenidos en una matriz arenosa; el espesor de estas acumulaciones puede tener de 2 a 3 m.

Otra característica de los depósitos dejados por los flujos de escombros, es la ubicación de los bloques de mayor tamaño en la parte frontal de la acumulación.

El comportamiento torrencial que presenta la corriente, está en relación con la pendiente relativamente alta del canal, la alta precipitación y el aporte de grandes volúmenes de sedimentos finos que eleva la densidad del fluido, permitiéndole el transporte de material muy grueso que no puede ser movilizado en condiciones normales o en crecientes de agua únicamente (inundaciones).

Los volúmenes de sedimentos acumulados, se explican por el estrechamiento que sufre el canal un poco antes de desembocar en el río Lejos, el cual funciona de alguna manera como una presa de sedimentos.

Otra zona de acumulación cubre los lechos del río Lejos y de las quebradas La Española y Las Pizarras principalmente; los sedimentos aquí depositados tienen características similares a las descritas anteriormente. A diferencia de la zona anterior, esta acumulación de sedimentos se genera por una disminución marcada del gradiente del cauce, dando lugar a un abanico interno de sedimentación rápida, evidenciado en el ascenso del nivel del río en cercanías del casco urbano; a pesar de que el valle es relativamente amplio, en este sector la acumulación de los bloques de mayor diámetro se concentra en la parte más baja del abanico. Los sedimentos provienen principalmente de las quebradas La Española y Las Pizarras y en menor cantidad de la zona de acumulación de Las Camelias.

Existen estrechamientos del cauce, con paredes de fuerte inclinación hasta verticales labradas en roca fresca, originados probablemente por la incisión acelerada debido a rejuvenecimientos del cauce por procesos tectónicos. Por lo estrecho del canal la corriente adquiere mayor velocidad y

capacidad de transporte, razón por la cual las acumulaciones de sedimentos son escasas; a lo largo de estos segmentos se transfieren sedimentos de una zona de acumulación a otra y a la vez sirven de seleccionadores de tamaño de bloques.

4.6. ACTIVIDAD SISMICA

Es importante hacer una evaluación de la actividad sísmica que afecta al Departamento del Quindío, como posible detonadora de movimientos del terreno, fenómeno que ya ocurrió en la región del río Coredó, municipio de Murindó (Antioquia) con los terremotos del 17 y 18 de Octubre de 1992.

Thouret y Faivre (1989), indican cómo algunos factores externos pueden contribuir al desencadenamiento de movimientos en masa, los cuales actúan específicamente en los materiales situados sobre la zona de interfase (cenizas volcánicas). La incidencia del factor climático está condicionada a los períodos de lluvias intensas y durables que saturan los suelos volcánicos, los cuales tienen cualidades de retención muy alta, incrementando su sensibilidad a ser removilizadas. En cuanto al factor geodinámico, las sacudidas sísmicas en los alrededores de fallas activas del Sistema Romeral, pueden ocasionar el desplazamiento súbito del terreno, por pérdida de la cohesión entre las partículas que conforman estas cenizas volcánicas ya saturadas.

Aunque en el área del trabajo no se encontraron enjambres de cicatrices o movimientos activos con edad similar, que pudieran ser relacionados con un origen sísmico, no se debe descartar su ocurrencia, ya que el Departamento se encuentra localizado en una zona de amenaza sísmica alta y que la actividad cuaternaria de las fallas que lo cruzan es apenas conocida.

4.7. AMENAZA VOLCANICA

Al igual que todo el Departamento del Quindío, la cuenca del río Lejos puede verse afectada por caída de cenizas provenientes de la actividad eruptiva de los volcanes del Complejo

Ruiz-Tolima. Este fenómeno sólo se produciría en el caso de que al momento de una erupción, los vientos estén dirigidos hacia el suroeste, dirección que se da con muy poca frecuencia en la actualidad. Se espera que los volúmenes de cenizas que caigan sean mínimos y por lo tanto no se considera como una amenaza importante.

5. EVALUACION DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA Y EROSION

Los procesos morfodinámicos con una incidencia mayor en el deterioro de la cuenca del río Lejos, son derrumbes activos de diverso tipo y carcavamientos. En este capítulo se pretende encontrar, mediante el cruce de mapas donde se presentan los diferentes factores que intervienen en la generación de estos procesos, cuáles son las áreas de la cuenca más propensas o susceptibles a la aparición de estos fenómenos.

Un mapa de amenaza muestra el territorio dividido en áreas o zonas de características homogéneas con respecto a la posibilidad de desencadenamiento de un determinado fenómeno; en otras palabras, se considera que dentro de una de estas zonas existe la misma posibilidad de generación de éste, ya que los factores que le dan origen se encuentran presentes en el mismo rango.

5.1. SELECCION DE UN METODO PARA LA EVALUACION DE LA AMENAZA EN LA CUENCA DEL RIO LEJOS

Durante el trabajo de campo se recogió la información necesaria para la elaboración de varios mapas temáticos, cuyos factores se consideraron críticos en el desencadenamiento de los distintos procesos morfodinámicos, identificados en el terreno como los principales contribuyentes al deterioro progresivo de la cuenca.

Con excepción del mapa de unidades geológicas, elaborado por González y Núñez (1991), se realizaron mapas del uso agrícola del suelo, geomorfológico, de isoyetas, de procesos

morfodinámicos y el programa ILWIS permitió el cálculo del mapa de pendientes a partir de la base topográfica existente.

Se dispuso igualmente de datos de permeabilidad (conductividad hidráulica), para cada uno de los saprolitos provenientes de las unidades geológicas; aunque se realizó el análisis de ellos, al compararlos de manera regional, se consideró que los datos no fueron suficientes para realizar un mapa adicional de contrastes de permeabilidad, lo suficientemente confiable.

Sin embargo, los valores permiten sacar algunas conclusiones preliminares sobre la incidencia que tienen en los procesos de movimientos en masa y carcavamientos.

Los valores obtenidos para las cenizas volcánicas presentan la mayor permeabilidad, la cual varía entre 4 y 10 cm/min. De los saprolitos, los más impermeables corresponden con los provenientes de las rocas ultramáficas (1.26 cm/min), Complejo Igneo de Córdoba (1.74 cm/min) y las rocas sedimentarias de la Formación Quebradagrande (1.72 cm/min); de otro lado, los saprolitos más permeables son en su orden las rocas metamórficas del Complejo Arquía (18.95 cm/min) y los pórfidos andesíticos hornbléndicos (14.3 cm/min).

El contraste de conductividad hidráulica entre los saprolitos (suelos residuales) de las diferentes rocas presentes en el área y la cubierta de cenizas volcánicas, permite explicar la mayor o menor incidencia de movimientos en masa y carcavamiento en cada una de ellas, como se muestra a continuación:

- Para el Complejo Igneo de Córdoba, se presenta un contraste alto, de 10 cm/min para las cenizas volcánicas y 1.74 para el saprolito; esto explica la mínima presencia de deslizamientos y la incidencia media en la generación de cárcavas, cuya génesis está en relación con la acumulación y circulación del agua de infiltración en la zona de interfase.

La circulación del agua, a lo largo de la interfase ya mencionada, ocasiona erosión interna (sofusión) que al progresar da lugar al proceso de carcavamiento.

- En las rocas sedimentarias del Complejo Quebradagrande, el contraste alto con las cenizas volcánicas, explica la alta incidencia tanto de cárcavas como de deslizamientos que se observa en la unidad.
- El escaso contraste existente entre las cenizas volcánicas y los saprolitos de los pórfidos y de las rocas metamórficas del Complejo Arquía, indica una mínima susceptibilidad a los procesos ya mencionados.

De acuerdo con el tipo y la calidad de la información disponible, se optó por el método de análisis estadístico univariado, consistente en el cruce individual del mapa de procesos morfodinámicos, presentado en forma de densidad relativa por proceso, con cada uno de los otros mencionados; se obtuvieron nuevos mapas y tablas que expresan el grado de correlación entre los distintos parámetros analizados. Los mapas resultado son producto de los cruces de los datos, obtenidos de los cruces antes mencionados.

5.2. PROCEDIMIENTO PARA EL USO DEL PAQUETE "ILWIS" EN LA CUENCA DEL RIO LEJOS

Para la utilización del programa ILWIS versión 1.21 se procedió de la siguiente manera:

- Elaboración y digitalización, en modo VECTOR, de todos los mapas obtenidos en las fases iniciales del estudio; cada uno de los mapas fue acompañado de la respectiva tabla de atributos por clase o factor considerado.
- Paso del modo VECTOR al RASTER para cada mapa. Se utilizó una dimensión de pixel de 20 x 20m.
- Construcción digital del mapa de pendientes puntuales.
- Cruce de cada uno de los mapas temáticos y su respectiva tabla de atributos, con el mapa de procesos morfodinámicos y su tabla, para la obtención de los pesos relativos de cada factor analizado.

- Obtención de los mapas de susceptibilidad a partir de las combinaciones anteriormente mencionadas.

5.2.1. Mapas de Entrada

En este aparte se hará una breve descripción de cada uno de los mapas utilizados en el análisis.

Mapa geológico (Figura 9). Este mapa tiene las siguientes clases o factores:

- Complejo Igneo de Córdoba (Código 1): Diorita con variaciones a granodiorita.
- Complejo Arquía: Esquistos anfibólicos y anfibolitas intercaladas (Código 2) y (Código 3) para esquistos cuarzo sericíticos localmente intercalados con cuarcitas.
- Complejo Quebradagrande, volcanosedimentario (Código 4): Rocas volcánicas y sedimentarias del Cretáceo, intercaladas tectónicamente con esquistos cloríticos, clorítico-actinolíticos del Paleozoico. Miembro Sedimentario, (Código 5): Pizarras arcillosas y silíceas, grawacas, limolitas, liditas y localmente calizas; tiene metamorfismo dinámico.
- Rocas ultramáficas, (Código 6): Serpentinitas localmente con estructura esquistosa por efectos dinámicos.
- Complejo Quebradagrande, Miembro Volcánico, (Código 7): Lavas submarinas y piroclastitas con intercalaciones locales de sedimentitas.
- Complejo Cajamarca, (Código 8): Esquistos cuarzo-sericíticos, actinolíticos y cloríticos sin diferenciar.
- Pórfido andesítico, (Código 9): Pórfidos andesíticos hornbléndicos.

Mapa geomorfológico (Figura 10). Se diferenciaron las siguientes unidades:

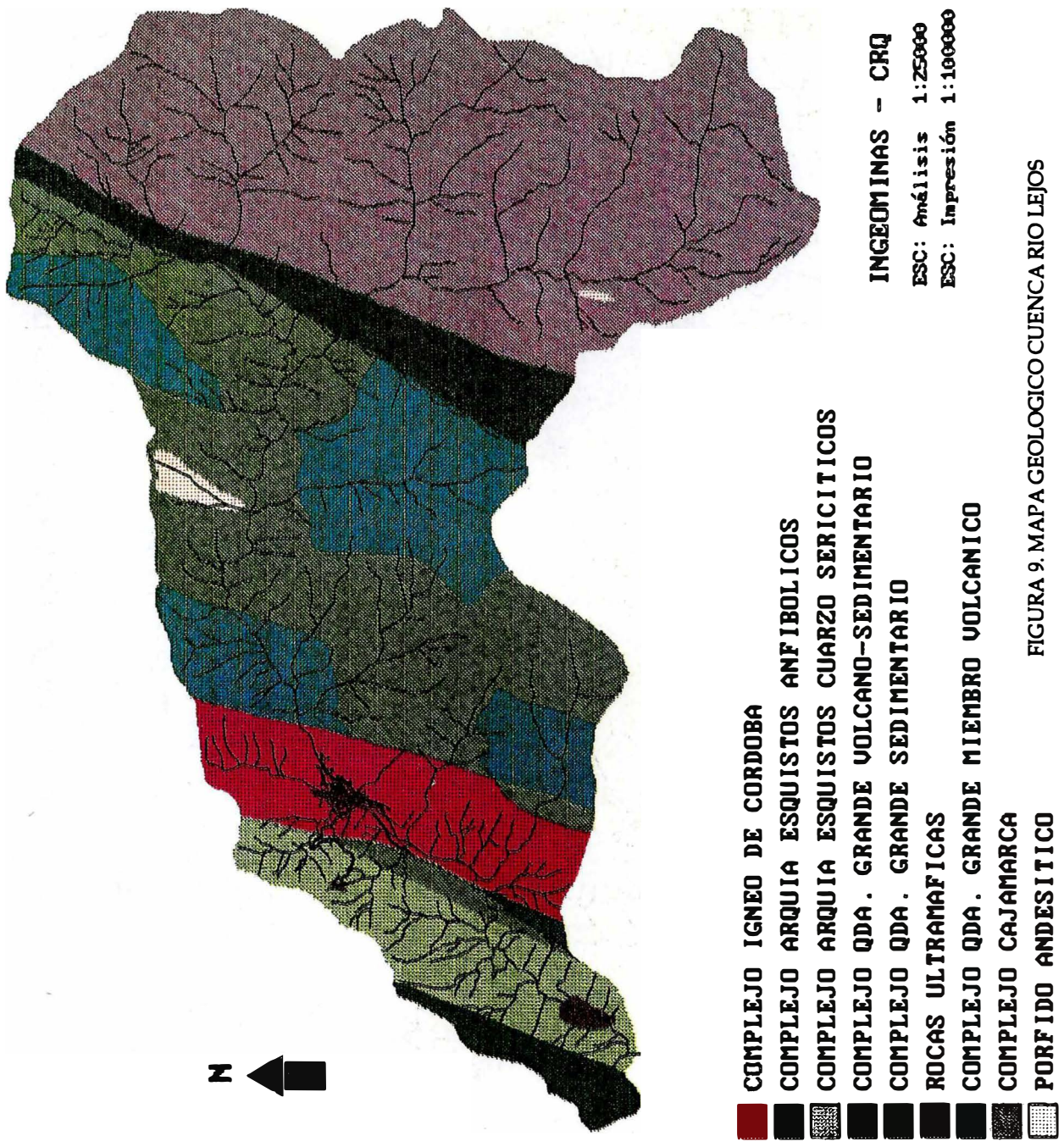


FIGURA 9. MAPA GEOLOGICO CUENCA RIO LEJOS

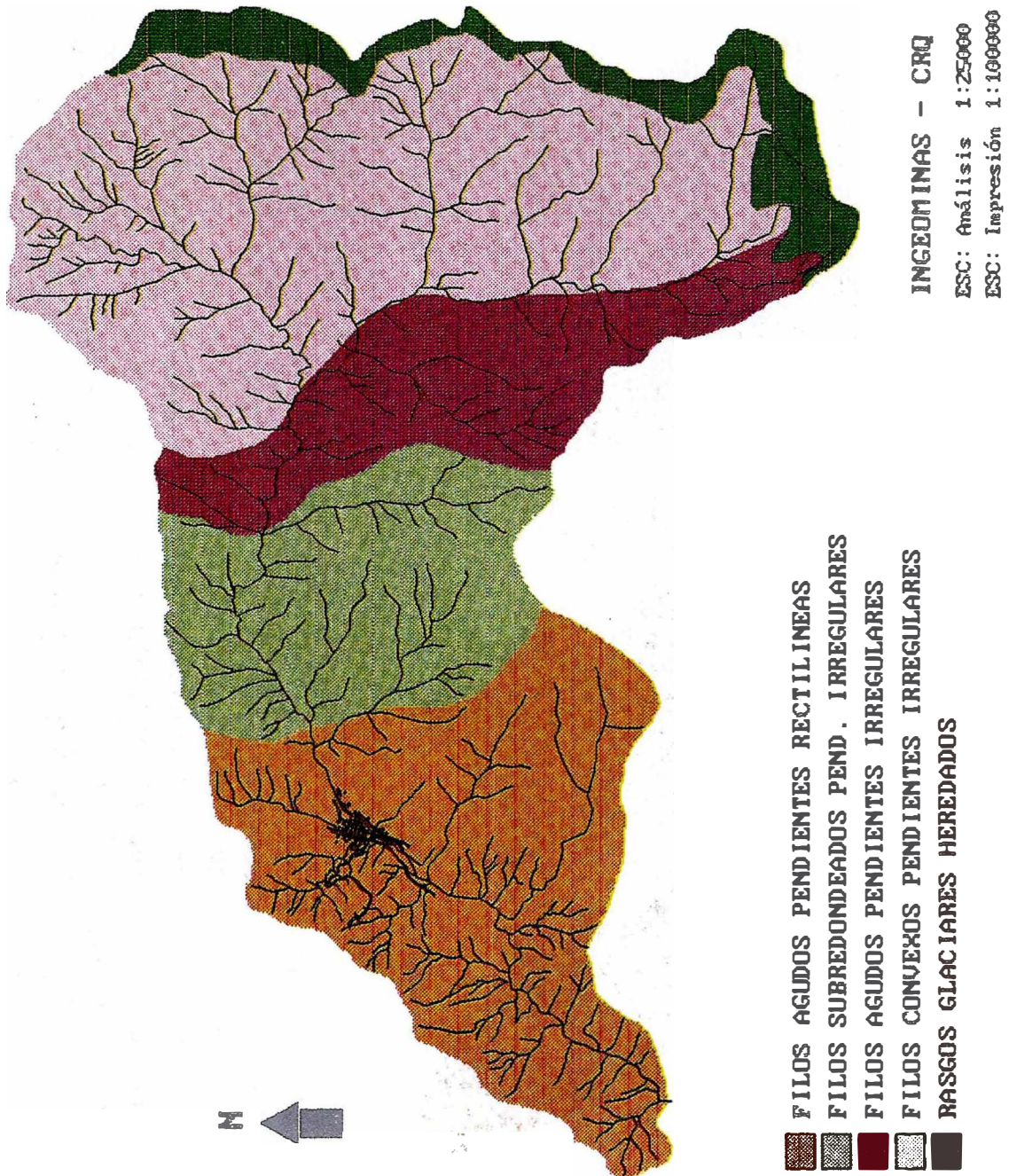


FIGURA 10. MAPA GEOMORFOLOGICO CUENCA RIO LEJOS

- Unidad filos agudos, pendientes rectilíneas, (Código 1).
- Unidad filos subredondeados, pendientes irregulares, (Código 2).
- Unidad filos agudos, pendientes irregulares, (Código 3).
- Unidad filos convexos, pendientes irregulares (Código 4).
- Unidad de rasgos glaciares heredados, (Código 5).

Mapa de procesos morfodinámicos (Figura 11). Se agruparon en polígonos dependiendo del proceso dominante en cada uno de ellos.

- Cicatrices de derrumbes, (Código 1): Derrumbes inactivos de diverso tipo y volúmenes variables.
- Derrumbes activos, (Código 2). Derrumbes activos de diverso tipo y volumen .
- Cárcavas, (Código 3): Carcavamiento activo en distintas etapas de desarrollo.
- Reptación en lupas, (Código 4): Proceso de movimiento lento del terreno; produce topografía cóncavo-convexa.
- Reptación en terracetas, (Código 5): Terracetas de desgarré y caminos de ganado.

Se agregó una zona de procesos mínimos debido a la baja densidad de estos, (Código 6).

Mapa de uso agrícola del suelo (Figura 12). Para la elaboración de este mapa se tomaron como base las fotografías aéreas en diferentes escalas y fechas y se ajustaron con lo observado en el campo, de acuerdo con las siguientes categorías:

- Bosque comercial adulto, (Código 1): Plantaciones comerciales de cipreses desarrollados.
- Bosque comercial pequeño, (Código 2): Plan-

taciones de cipreses comerciales o de protección, en distintas etapas de crecimiento.

- Bosque secundario, (Código 3): Bosque regenerado espontáneamente, principalmente en la parte media y alta de la cuenca.
- Bosque primario, (Código 4): Existen "parches" de bosque primario en las zonas de vida (Espinal, 1977), bh-PM, bmh-PM, bmh-MB. Predomina el ambiente de bosque bmh-MB.
- Bosque primario de gramíneas y frailejones, (Código 5): Predomina bosque de la zona de vida, bp-h. (Espinal, 1977).
- Cafetal con sombrío, (Código 6): Cafetal con sombrío de guamo y plataneras.
- Cafetal sin sombrío, (Código 7): Caturrales en diferentes etapas de desarrollo.
- Pastos, (Código 8): Zonas con dedicación a la ganadería extensiva de leche, principalmente.

Mapa de isoyetas (Figura 13). Por la carencia de datos pluviométricos de la cuenca del río Lejos y debido a que la casi totalidad de estaciones existentes sólo cubren la zona cafetera, se elaboró el mapa de isoyetas asumiendo que la precipitación de la cuenca varía con la altura, de la misma manera como se estableció en el Transecto Parque de los Nevados, unos 60 km en línea recta al norte del área de estudio (THOURET y FAIVRE, 1989a, 1989b).

Este mapa tiene como inconveniente principal que no toma en consideración las especificaciones microclimáticas de la cuenca. Las clases o rangos establecidos de acuerdo a la precipitación promedio anual, son los siguientes:

Isoyeta 2000 - 2500 mm anuales (Código 1)

Isoyeta 2500 - 3000 mm anuales (Código 2)

Isoyeta 3000 - 3500 mm anuales (Código 3)

Isoyeta 3500 - 4000 mm anuales (Código 4)

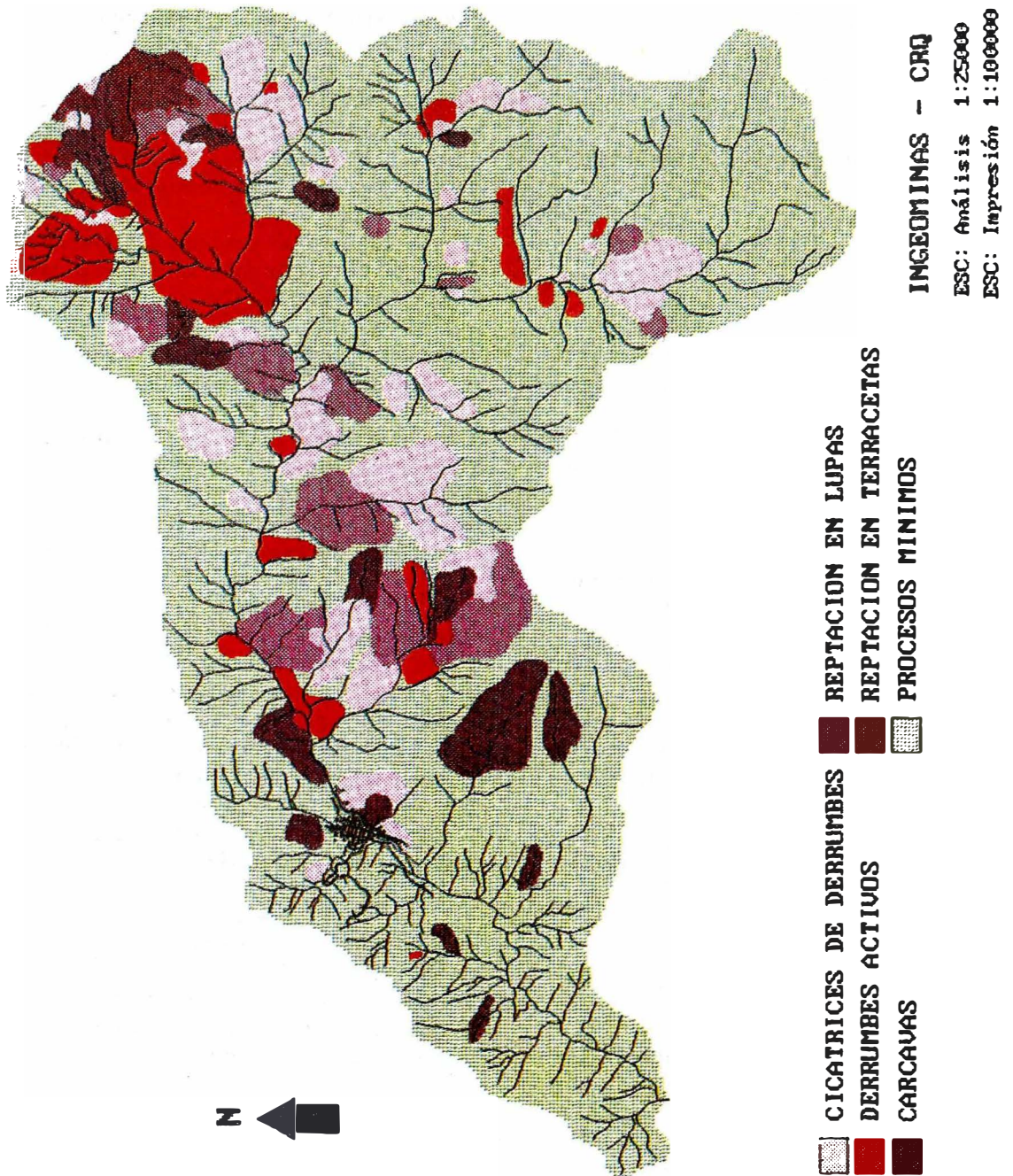


FIGURA 11. MAPA DE PROCESOS MORFODINAMICOS CUENCA RIO LEJOS

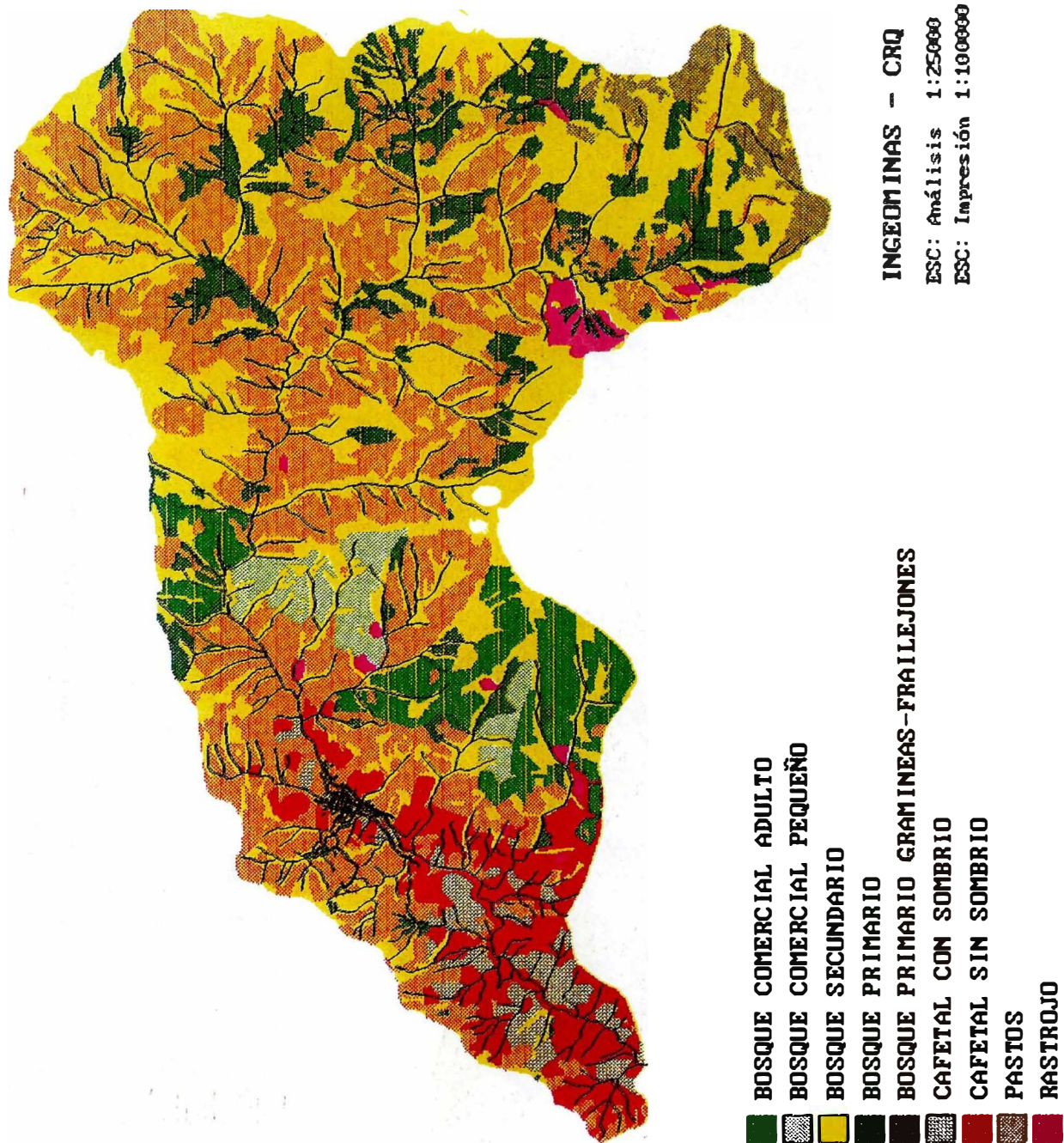


FIGURA 12. MAPA DE USO AGRICOLA DEL SUELO CUENCA RIO LEJOS

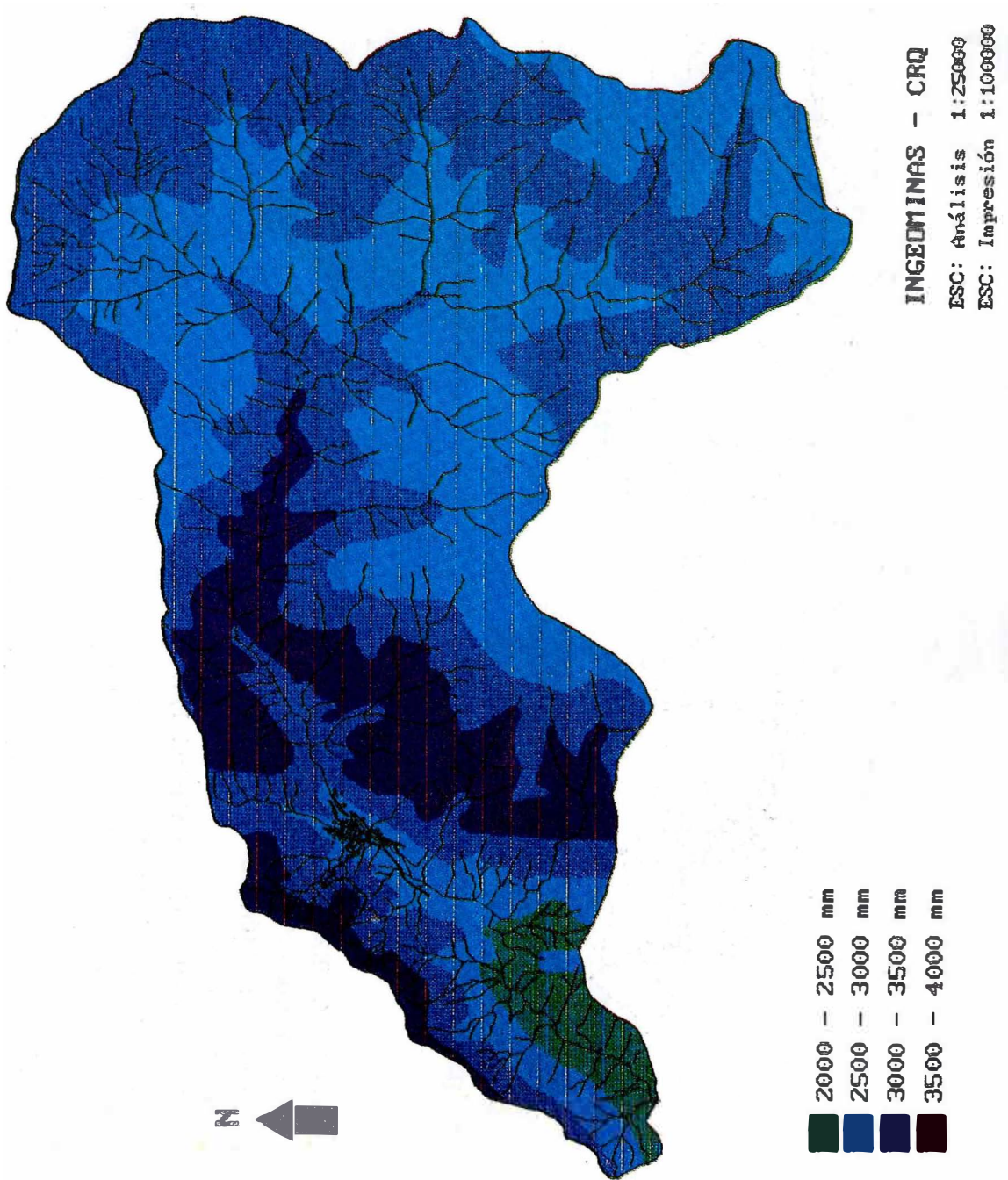


FIGURA 13. MAPA DE ISOYETAS

Mapa de Pendientes (Figura 14). Producido por el programa ILWIS a partir del mapa de curvas de nivel previamente digitalizado. Para su elaboración se utilizaron los siguientes 10 rangos de pendiente:

- 0° - 5° (Código 1)
- 5° - 10° (Código 2)
- 10° - 15° (Código 3)
- 15° - 20° (Código 4)
- 20° - 25° (Código 5)
- 25° - 30° (Código 6)
- 30° - 35° (Código 7)
- 35° - 40° (Código 8)
- 40° - 45° (Código 9)
- > 45° (Código 10)

5.2.2. Procesamiento de la información y resultados principales

Una vez digitalizados los mapas anteriores y convertidos a modo RASTER, se procedió a hacer el cruce de tablas. Como se dijo antes, se tomó como mapa base para todas las comparaciones el de procesos morfodinámicos; así se obtuvo una serie de mapas intermedios que muestran la susceptibilidad que tienen las distintas unidades de terreno consideradas, a la ocurrencia de cada uno de los procesos identificados previamente.

Dicha susceptibilidad se encontró comparando cada unidad de terreno contra el número de píxeles, (graduándose las unidades de más a menos susceptibles). Con el fin de conocer el peso relativo de cada unidad, se calculó el porcentaje de área representada por cada una y se multiplicó por el número de píxeles, obteniéndose su peso ponderado; este resultado se comparó con los datos iniciales y no se encontraron diferencias sustanciales.

En los siguientes párrafos se discuten las principales conclusiones de este cruce de mapas.

Mapa de pendientes vs. mapa de procesos (PENPROC)

El coeficiente de correlación de estos mapas fue de 0.80169, considerado bueno. Los procesos dominantes son en su orden: Cicatrices de derrumbes,

derrumbes activos y cárcavamiento. Los rangos de pendiente más sensibles a la ocurrencia de estos fenómenos son los correspondientes a los códigos 5 y 6; el Código 7 juega igualmente un papel importante en la generación de derrumbes activos.

Los rangos más estables se agrupan entre los de pendiente más baja (1, 2, 3) y los más altos (9, 10). Esto último se opone a la idea general que entre mayor sea la pendiente del terreno, mayor es la probabilidad de que se generen movimientos de remoción en masa; el hecho de ser las pendientes intermedias las más afectadas, podría explicarse mediante la combinación de dos factores críticos como son pendiente y volumen de infiltración de aguas lluvias; las pendientes bajas pueden recibir abundante infiltración pero la acción de la gravedad no es lo suficientemente importante. La fuerte inclinación de los rangos superiores, por el contrario, inhiben la infiltración de agua.

La simetría de valores hallados para los procesos 1, 2 y 3 podría explicarse por la relación causal que hay entre ellos; un cárcavamiento acelerado puede iniciarse a partir de la ocurrencia de derrumbes que dejan descubierta de vegetación algunas áreas, dando inicio el proceso erosivo; de la misma manera, cárcavas con elevado grado de deterioro pueden desestabilizar áreas importantes, contribuyendo a la generación de movimientos masivos.

El avance progresivo de la reptación, (procesos 4 y 5) puede igualmente dar origen a derrumbes, generalmente de tamaño moderado.

Mapa de uso agrícola del suelo vs. mapa de procesos (USOPROC)

Se obtuvo un buen grado de correlación (0.77721).

El uso del suelo más susceptible a la ocurrencia de todos los procesos es el de pastos para ganadería extensiva; esto concuerda perfectamente con lo observado en campo, donde la eliminación de la protección que ofrece el bosque en zonas de laderas, permite el fácil desencadenamiento de procesos erosivos y de remoción en masa, por la eliminación del "amarre" del suelo que ejercen las raíces de los árboles.

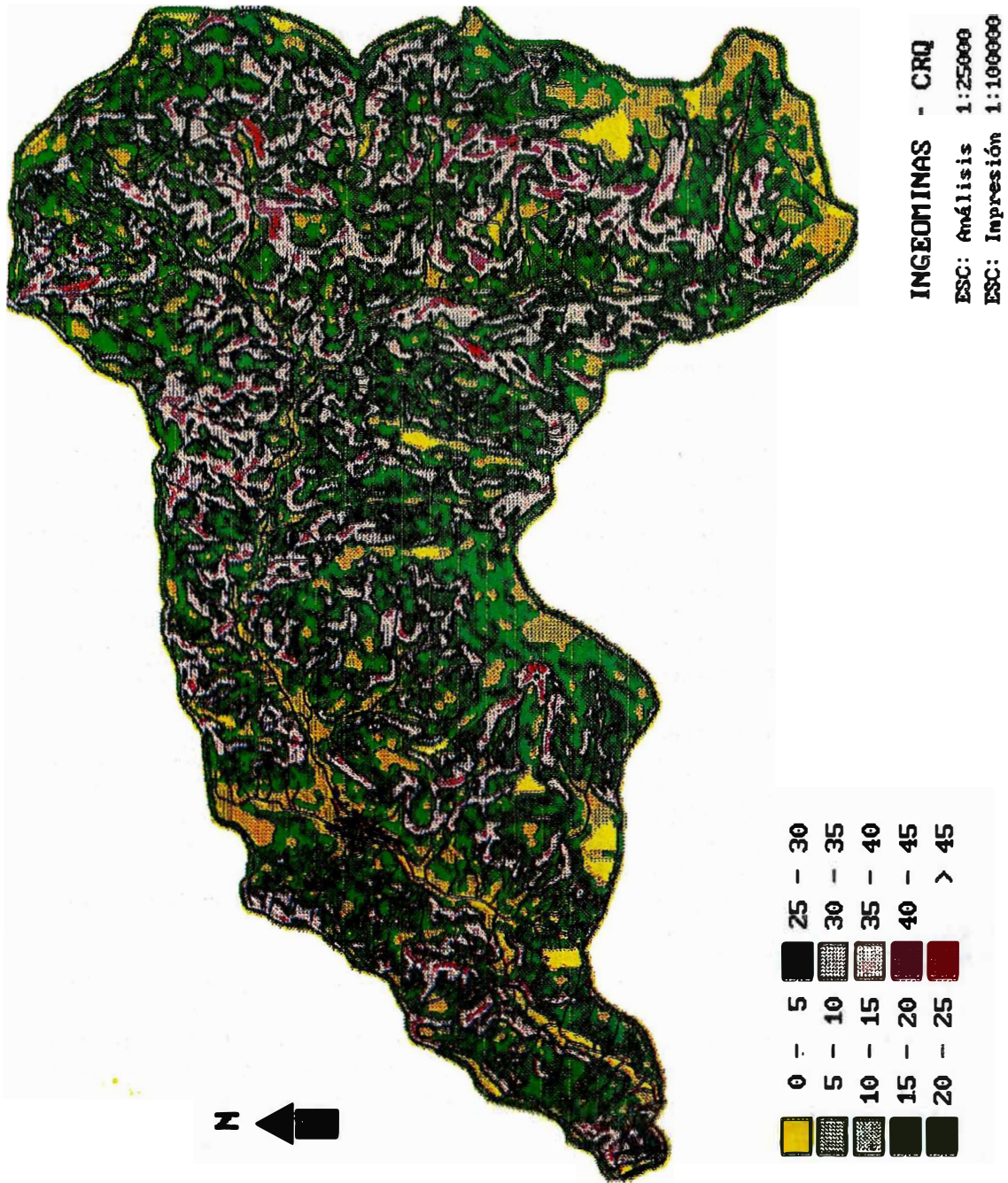


FIGURA 14. MAPA DE PENDIENTES

En estudios realizados en ambientes similares de la vertiente occidental de la Cordillera Central (FLOREZ, 1983), se ha encontrado que los movimientos de masa pequeños, del tipo golpe de cuchara, aparecen entre 2 y 5 años después de la tala del bosque, iniciándose de esta manera el deterioro progresivo de las vertientes.

Los procesos que tienen mayor incidencia en este uso del suelo son: cicatrices de derrumbes antiguos, derrumbes activos, reptación en lupas y caracavamiento, todos estrechamente ligados a la deforestación.

Un problema mayor se encuentra en la alta correlación que hay entre el uso bosque primario y la aparición de procesos morfodinámicos. Esta conclusión se contradice abiertamente con lo anterior y no corresponde con las observaciones de campo; la dificultad en la interpretación podría deberse a razones de método como:

- Que los parches de bosque natural sean en realidad menores que lo presentado en el mapa de uso agrícola del suelo.
- Que zonas de rastrojo o bosque regenerado espontáneamente, después de la ocurrencia de algunos de estos procesos, hayan sido cartografiados como bosque natural, debido a la poca experiencia de los geólogos en esta actividad.

Aunque la susceptibilidad de este uso aparece como alta, según los resultados del cruce de mapas, se le asigna al grupo de susceptibilidad baja por las razones antes expuestas.

Más acorde con la información de campo, es que los usos más compatibles con el mantenimiento y mejoramiento de la estabilidad de las vertientes son el bosque comercial adulto, el bosque secundario y el rastrojo. El cafetal con sombrío presenta un buen comportamiento; aunque los cultivos de café caturra, (sin sombrío), tienen una susceptibilidad a los procesos analizados, de nula a media, es muy intensa la erosión superficial o laminar, no contemplada dentro del esquema de trabajo, pero que tiene igualmente consecuencias graves para la conservación de los recursos naturales.

Mapa geológico vs. mapa de procesos (GEOLPROC)

El coeficiente de correlación obtenido en el cruce de estos mapas fue de 0,83488, muy bueno.

La unidad geológica más propensa a presentar fenómenos de remoción en masa es el Complejo Cajamarca, compuesto por rocas metamórficas foliadas, algunas de las cuales son muy delezna- bles, facilitando la ocurrencia de derrumbes. Las cárcavas son más comunes en el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande; el metamorfismo dinámico extendido que caracteriza esta unidad, puede ser uno de los factores que facilitan la erodabilidad de la secuencia litológica.

La reptación en lupas predomina en la misma unidad anterior, mientras que la reptación en terracetas se asocia más fácilmente con el Complejo Cajamarca. Las unidades más estables son el Complejo Igneo de Córdoba, de composición diorítica-cuarzodiorítica y el Complejo Arquía, de carácter metamórfico; el predominio de esquistos anfibólicos y anfibolitas en este último contribuyen a conferirle este grado de estabilidad.

Mapa geomorfológico vs mapa de procesos (GEOMPROC)

Se obtuvo un buen coeficiente de correlación, equivalente a 0,855571.

De las cinco unidades geomorfológicas cartografiadas en la cuenca del río Lejos se encontró que la más propensa a presentar derrumbes de todo tipo es la que se codificó con el número 4, denominada unidad de filos convexos y pendientes irregulares, altitudinalmente ubicada entre los 3000 y 3500 m.s.n.m.; le sigue en orden de jerarquía la unidad 2 o de filos subredondeados y pendientes irregulares localizada entre 2000 y 2600 m.s.n.m.

Contrariamente a lo esperado, la unidad más afectada por el proceso de caracavamiento es la número 1 caracterizada por filos agudos y pendientes rectilíneas; la unidad 4, donde existen las manifestaciones más espectaculares, por las di-

menciones de las cárcavas, tiene una susceptibilidad alta. Las unidades 5 y 3 son las menos influenciadas por el carcavamiento, lo que explica en parte el relativo bajo volumen de carga (sedimentos en el cauce) que transportan las corrientes que la drenan.

La reptación en lupas, (solifluxión tropical), es muy importante en las unidades 2, (filos subredondeados, pendientes irregulares) y 4, (filos convexos, pendientes irregulares); las terracetas de desgarrar y sobrepastoreo tienen su mejor expresión en la unidad 4. La unidad más estable en su conjunto es la de rasgos glaciares heredados (5), seguida por la unidad 3 de filos agudos y pendientes irregulares.

Mapa de isoyetas vs mapa de procesos (ISOPROC)

El coeficiente de correlación obtenido en el cruce de estos mapas fue de 0.85571 que se considera muy bueno.

En los rangos de precipitación 2, (2.500 - 3.000 mm/año), 3, (3.000 - 3.500 mm/año) y 4, (3.500 - 4.000 mm/año), es donde ocurren o han ocurrido en el pasado el mayor número de movimientos en masa de diferente tipo y volumen. La isoyeta 1 que varía entre 2.000 y 2.500 mm/año es la menos afectada por este fenómeno.

El carcavamiento es dominante en las isoyetas 3 y 2 respectivamente, mientras que en la 1 prácticamente no se produce. La reptación en lupas coincide fundamentalmente con las isoyetas 3 y 2.

5.3. ANALISIS DE INFORMACION Y PREPARACION DE LOS MAPAS DE AMENAZA

Como último paso se procedió a realizar los mapas de amenaza; se consideró que los procesos activos con mayor incidencia en el deterioro de la cuenca son los derrumbes activos y el carcavamiento; la reptación en lupas y en terracetas de desgarrar se pueden asimilar como el inicio de los procesos anotados.

Después de calificar la susceptibilidad de los cinco factores estudiados, se le asignó a cada una de las clases determinadas por factor, un índice de calificación de 1 a 5 según fuera su susceptibilidad: Muy baja, (1), baja (2), media (3), alta (4) o muy alta (5). Una vez recalculados los mapas se procedió a sumarlos y el total se dividió por cinco (5), ya que todos tienen el mismo peso relativo como lo indican los coeficientes de correlación obtenidos.

5.3.1. Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, (Figura 15)

Representa muy bien la apreciación que tuvieron los técnicos durante el trabajo de campo.

Susceptibilidad muy alta. Aparece como una franja alargada en sentido norte-sur, concentrada principalmente en las cabeceras del río Lejos; se exceptúa la franja que coincide con la unidad geomorfológica de rasgos glaciales heredados, ocupada por bosque de páramo.

Las subcuencas más afectables son: Chamuscados margen derecha, Puracé parte alta, la casi totalidad del Paraíso y El Jardín, la cabecera de río Lejos en especial su margen derecha, Las Camelias parte alta, La Cuzumbera y la margen derecha de la cuenca de Las Camelias, (sector el Alto-El Pedregal).

Susceptibilidad alta. De la cuenca del río Lejos cubre aproximadamente el 60% de la parte alta y el 70% de la media. Se destacan dentro de esta categoría las subcuencas de La Cristalina, El Aguila, Las Camelias alta y baja, la parte alta de La Española y Las Pizarras y un tramo del río Lejos comprendido entre La Sierra y Guamal.

Susceptibilidad media. Resalta dentro de esta clasificación la parte más alta de la cuenca, zona de páramo, poco afectada hasta el presente por la actividad humana.

Aproximadamente el 30% de la cuenca media y parte de la baja del río Lejos, queda incluida

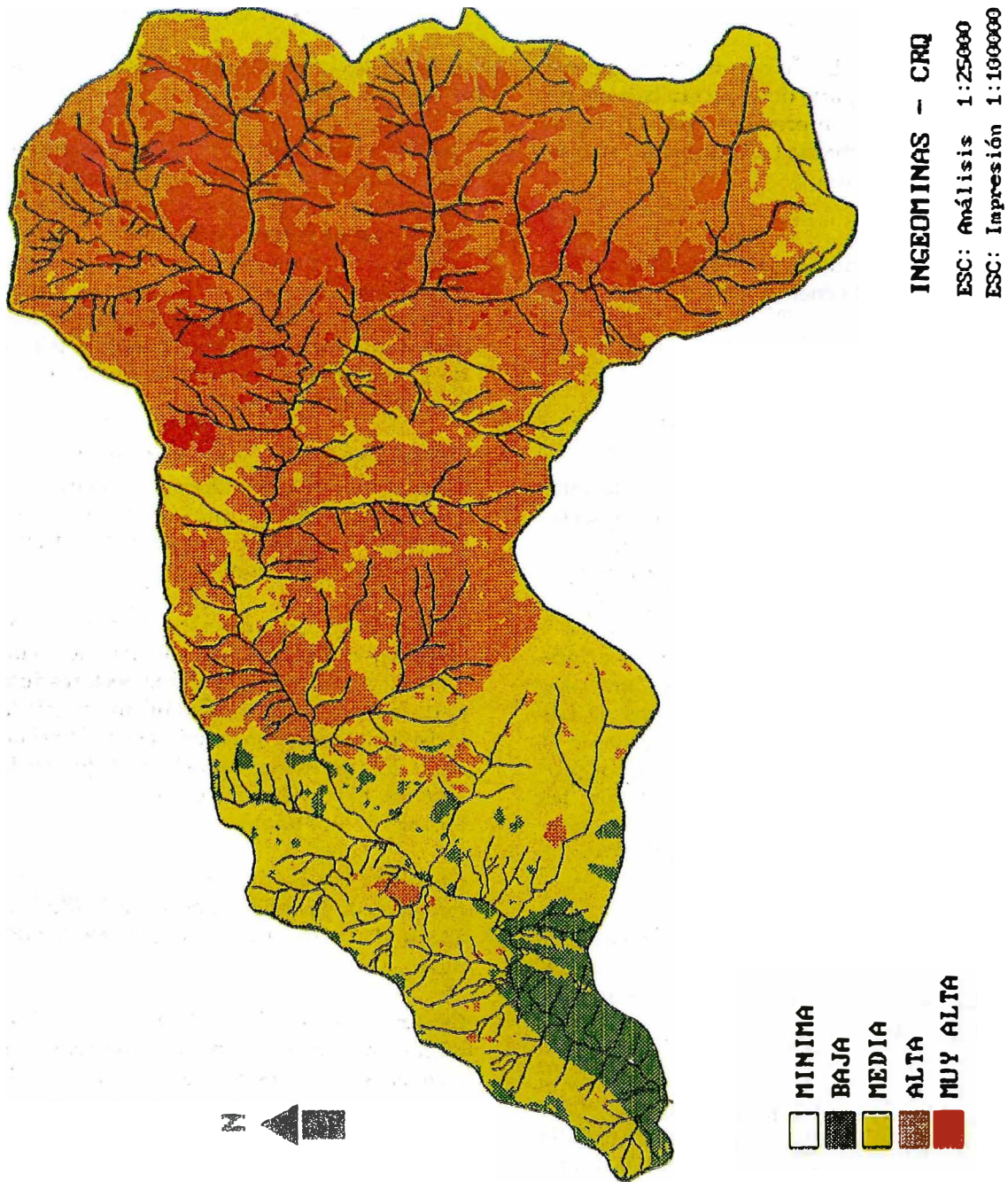


FIGURA 15. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

dentro de esta clasificación. Se destaca que la zona cafetera en su gran mayoría es de susceptibilidad media a la ocurrencia de movimientos en masa.

Susceptibilidad baja. En este rango, se agrupa solo una pequeña parte de la cuenca baja del río Lejos, en el sector comprendido entre la desembocadura de la quebrada La Pedregosa y su confluencia con el río Azul.

Susceptibilidad muy baja. No se encontró en ninguna parte de la cuenca.

5.3.2. Mapa de Amenaza por Carcavamiento, (Figura 16)

Su distribución es más homogénea que la anterior, en buena correspondencia con las apreciaciones de campo; los diferentes grados de susceptibilidad a este fenómeno se distribuyen así:

Susceptibilidad muy alta. Se concentra principalmente en las cuencas altas de Las Camelias y La Cuzumbera; los afluentes derechos de Las Camelias entre las quebradas Las Paisitas y El Tigre son igualmente afectables. En menor proporción las cabeceras del Paraíso y Puracé, las quebradas La Española, Las Pizarras, El Inglés y La Pedregosa parte alta.

Susceptibilidad alta. Se concentra en las cabeceras del río Lejos, especialmente en su margen derecha, y partes de las cuencas de Las Camelias y la Cristalina.

Susceptibilidad media. En este rango se incluyen la margen izquierda del río Lejos parte alta, la unidad geomorfológica de rasgos glaciales heredados y la cuenca baja del río.

Susceptibilidad baja. Se concentra únicamente en la parte más baja del cauce principal del río Lejos.

Susceptibilidad muy baja. No se encontró en la cuenca.

6. CONCLUSIONES

Las subcuencas con mayores rasgos de inestabilidad son en su orden:

- Quebrada Las Camelias, cuyo proceso erosivo tiene unos 40 años según lo informado por habitantes del sector. Se destaca la presencia de cárcavas de grandes dimensiones, con segmentos en diferente grado de actividad. Debido al avanzado estado de deterioro se constituye en la principal fuente de sedimentos, (especialmente finos), transportados por el río Lejos; su aporte se estima en 70% de la carga total actual del río.

Del estudio morfológico y sedimentológico de la acumulación detrítica en el cauce de Las Camelias, se concluye que la mayor parte del comportamiento torrencial del río se origina en este foco de erosión.

- Quebrada La Cuzumbera, afluente de Las Camelias, con procesos de carcavamiento intenso en varias de sus cabeceras. Sectores de la parte media y alta presentan una marcada incisión del cauce con la consecuente desestabilización de márgenes. Al igual que en la anterior, hay evidencias de comportamiento torrencial importante.
- Quebrada Las Paisitas; con cárcavas activas en varias de las microcuencas de origen. Su aporte al total de carga activa del río es moderada.
- Quebradas La Española y Las Pizarras. Con carcavamiento y movimientos de remoción en masa activos en sus orígenes. El aporte a la carga total del río se considera importante; el comportamiento torrencial de estas quebradas está bien representado en su acumulación sedimentaria.
- Los movimientos en masa tienen menor importancia relativa que el carcavamiento en el proceso de deterioro de la cuenca; con pocas

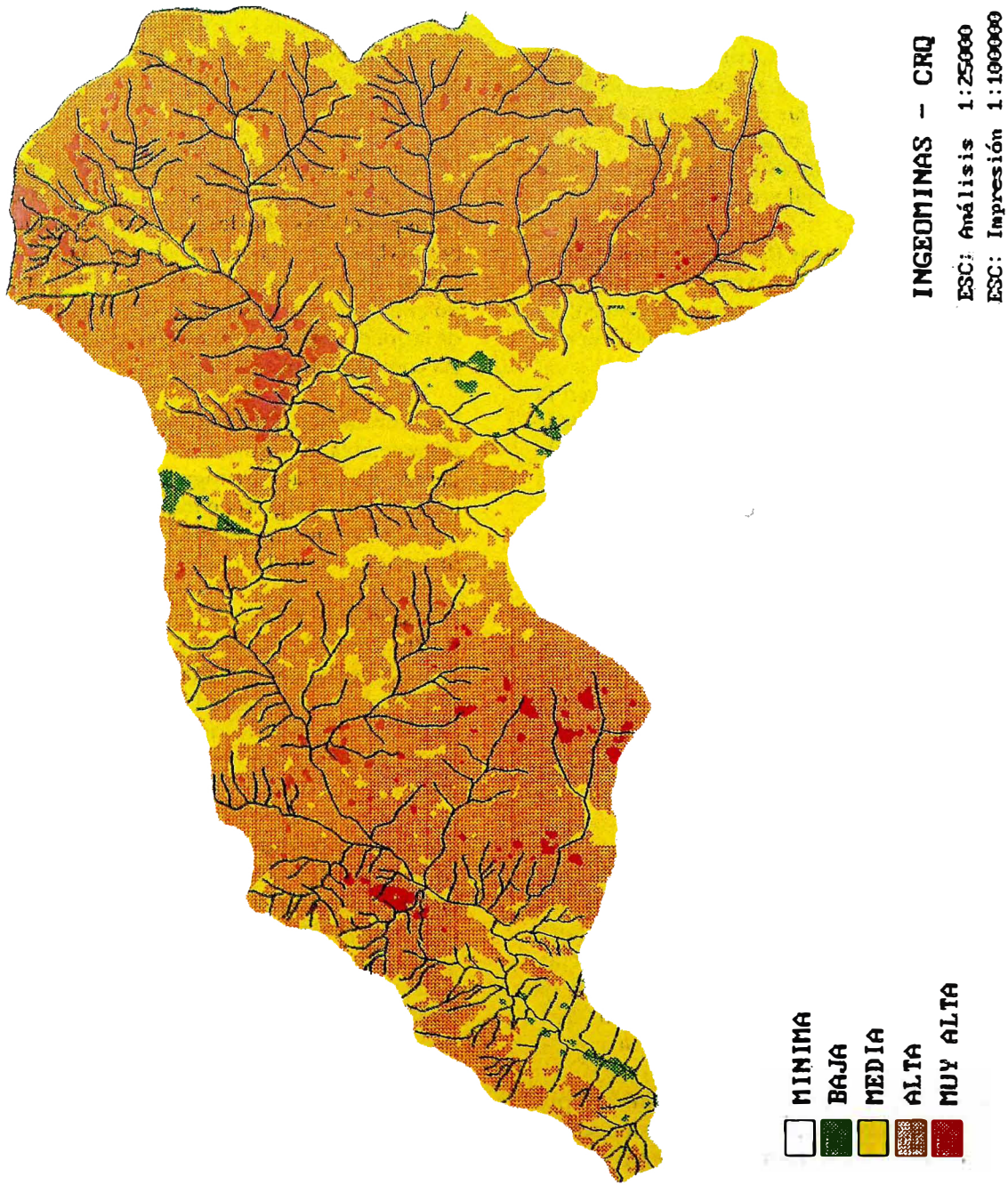


FIGURA 16. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR CARCAVAMIENTO

excepciones, son de volumen moderado y contribuyen en menor proporción a la carga total del río.

Se diferenciaron cicatrices de derrumbes inactivos o en estado latente y derrumbes activos de diferentes tipos; los más importantes son: desgarres, desplomes, caídas de rocas y derrumbes planares; las caídas de roca son los más destacados en cuanto a número y volumen de material involucrado, el cual puede ser de centenas a miles de m³.

La reptación en lupas (también conocida como solifluxión tropical) y la reptación en terracetas son localmente importantes; contribuyen, en forma moderada, al deterioro total de la cuenca.

La reptación en lupas tiene su origen en la dinámica natural del paisaje de la región; se le observa tanto en zonas de potrero como de bosque natural; sin embargo, la acción antrópica produce aceleración del proceso, dando paso a movimientos de remoción en masa, especialmente del tipo desgarres.

La reptación en terracetas predomina en zonas de potrero y está directamente relacionada con la deforestación y el sobrepastoreo de estos terrenos. Es común observar la transición de reptación en terracetas de desgarre a movimientos de masa superficiales. El proceso de reptación en terracetas es el comienzo del deterioro progresivo del suelo.

La actividad humana ha tenido gran influencia en el deterioro de la cuenca; las que más contribuyen son la deforestación, el sobrepastoreo de zonas de potreros y los cortes de carreteras; estos últimos producen desestabilización de vertientes y carcavamiento debido a las deficientes entregas de aguas de esorrentía.

El reemplazo de café con sombrío por caturrales limpios, aumenta la erosión superficial de suelos fértiles y contribuye a la generación de movimientos en masa; no obstante lo anterior, la zona cafetera de la cuenca presenta un grado de deterioro moderado; los movimientos en masa y el carcavamiento son escasos en este sector.

El río Lejos y algunos de sus tributarios principales presentan evidencias de comportamiento torrencial reciente a actual; los fenómenos torrenciales identificados en el registro sedimentario son flujos de escombros y flujos de lodo en su orden. Las crecientes torrenciales, (con baja concentración de sedimentos), son bastante frecuentes según los informes obtenidos de la comunidad.

- Debido a sus características geomorfológicas y de gradiente, los tramos de cauce más afectados por el depósito de sedimentos son: Quebradas Las Camelias, Cuzumbera, La Española y Las Pizarras y el tramo del río comprendido entre un poco antes de la desembocadura de la quebrada La Española hasta su confluencia con La Pedregosa.

La acumulación que ocurre en este tramo del río amenaza la seguridad del casco urbano, debido a la elevación progresiva del fondo del lecho y por el ángulo de incidencia (casi perpendicular) que tiene éste con respecto a la ubicación del poblado.

- El sistema de información geográfica (SIG) ILWIS permitió, eficientemente, la comparación y cruce de una variada cantidad de información del medio natural, con el propósito de encontrar el aporte de cada uno de los factores estudiados a las condiciones de inestabilidad que presenta la cuenca del río Lejos.
- Los factores considerados durante el estudio fueron: pendientes, uso agrícola del suelo, geología, geomorfología, isoyetas y procesos morfodinámicos.

Cada uno de los mapas temáticos fue cruzado digitalmente con el de procesos morfodinámicos, obteniéndose los grados de susceptibilidad que tiene cada una de las unidades de terreno consideradas.

- De la información procesada mediante el uso del paquete ILWIS, se concluye que los factores críticos en el desencadenamiento de fenómenos como derrumbes y erosión por carcavamiento son:

Pendientes

Los rangos 5(20°-25°), 6(25°-30°) y 7(30°-35°) son críticos para la generación de derrumbes y cárcavas.

Uso agrícola del suelo

El uso de potreros (Código 8) es altamente susceptible a la ocurrencia de todos los cinco procesos estudiados. Le siguen en orden de importancia bosque secundario (Código 3) y bosque comercial adulto. Los potreros más vulnerables son aquellos localizados en la zona de vida correspondiente al bosque de niebla.

Hay que aclarar que los procesos asociados a los usos de bosque secundario y bosque comercial adulto pueden ser heredados de la situación anterior a su consolidación, ya que durante los recorridos de campo se pudo comprobar el buen desempeño de estas dos formaciones vegetales como inhibidoras efectivas de los procesos erosivos y de remoción en masa.

Geología

El Complejo Cajamarca, de composición metamórfica, (Código 8), es el más propenso a los fenómenos de remoción en masa.

El carcavamiento es más activo en el miembro sedimentario del Complejo Quebradagrande de edad cretácea, debido probablemente al alto grado de tectonismo que presenta esta unidad.

Geomorfología

Los derrumbes de todo tipo son más frecuentes en la unidad geomorfológica de fillos convexos y pendientes irregulares, (Código 4), ubicada entre 3000 y 3500 m.s.n.m.; le sigue la unidad de fillos subredondeados y pendientes irregulares, (Código 2) localizada entre los 2000 y 2600 m.s.n.m. La unidad de fillos agudos y pendientes rectilíneas es la más afectada por carcavamiento, aunque los focos erosivos más espectaculares se encuentran en la unidad 4.

Isoyetas

Con excepción del rango de precipitación 1 (2000 - 2500 mm/año), los otros tres (2500 - 4000 mm/año), son igualmente propensos a presentar derrumbes de diferente tipo y volumen. El carcavamiento es más común en las isoyetas 2 y 3 (2500 - 3000 y 3000 - 3500 mm/año).

- Debido a que la cuenca se encuentra dentro de una zona de amenaza sísmica alta se considera como probable la generación de derrumbes durante la ocurrencia de sismos de alta magnitud y duración. No obstante la importancia que tiene este factor para la estabilidad de vertientes, no se incluyó en el análisis digital debido a su carácter adimensional, (no zonificado).
- Se calcularon, mediante el paquete ILWIS, los mapas de amenaza por movimientos en masa y por carcavamiento, ya que se consideró que estos dos procesos son los que contribuyen en mayor grado al deterioro de la cuenca.

Ambos mapas reflejan en buena medida las apreciaciones de los técnicos durante el trabajo de campo.

- En cada uno de los mapas de susceptibilidad se divide el territorio en cinco categorías según sea en afectabilidad de los procesos.
- Según el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, la zona más propensa se encuentra en las cabeceras del río Lejos. Las subcuencas más afectables son: Chamuscados, Puracé, Paraíso y Jardín. El 60% de la cuenca alta y el 70% de la media caen dentro de la denominación alta susceptibilidad. El sector menos susceptible lo conforma una pequeña parte de la cuenca baja del río.

Las zonas más susceptibles a carcavamiento son: la cuenca alta de Las Camelias, La Cuzumbera, Las Pizarras y La Española. Gran parte de la cuenca alta y media se clasificó como de susceptibilidad alta y la más baja de la cuenca es la menos vulnerable a este fenómeno.

7. BIBLIOGRAFIA

- ESPINAL, S.T. 1977. *Zonas de vida o Formaciones Vegetales de Colombia*. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. IGAC. 238p. Bogotá.
- FLOREZ, A. 1983. *Geomorfología del Area Manizales-Chinchiná*. IGAC. Análisis Geográficos N° 9 159p. Bogotá.
- GONZALEZ, I. H. y NUÑEZ, T.A. 1991. *Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Quindío*. Memoria explicativa. Ingeominas. 42p. Bogotá.
- PAGE, W. 1986. *Geología Sísmica y Sismicidad del Noroeste de Colombia*. Informe para ISA. 155P. Medellín.
- THOURET, J.C. y FAIVRE, P. 1989a. *Suelos de la Cordillera Central, Transecto parque Los Nevados*. En: Estudios de Ecosistemas Tropoandinos Vol3:293-442. Berlín-Stuttgart.
- THOURET, J.C. y FAIVRE, P. 1989b. *Procesos morfodinámicos sobre las vertientes de la Cordillera Central*. En: Estudios de Ecosistemas Tropoandinos Vol.3:279-292. Berlín-Stuttgart.



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

AREA QUIMICA

ESTUDIO DE OPTIMIZACION DE LAS VARIABLES
INVOLUCRADAS EN LA PRODUCCION, A
ESCALA LABORATORIO, DE SULFATO DE
MAGNESIO A PARTIR DE MAGNESITAS DEL
VALLE DEL CAUCA Y MAGDALENA

Por:

MARCELA HERNANDEZ SABOGAL
CARLOS JULIO ESPITA ECHEVERRIA
JAVIER C. QUINTERO PEREZ

Sanatafé de Bogotá, D.C. Febrero de 1996

CONTENIDO

RESUMEN	45
1. INTRODUCCION	45
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	45
2.1. DESCRIPCION DE LOS YACIMIENTOS	45
2.1.1. Magnesita - Generalidades	45
2.1.1.1. Magnesita en Colombia	46
2.2. MUESTREO DE YACIMIENTOS	46
2.2.1. Métodos para muestreo de yacimientos	47
2.3. HIDROMETALURGIA	48
2.3.1. Descripción de los procesos hidrometalúrgicos	48
2.3.2. Concentración	49
2.3.3. Tostación	49
2.3.4. Lixiviación	50
2.3.5. Separación sólido - líquido	51
2.3.6. Purificación	51
2.4. METODOS DE PRODUCCION DE SALES UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA AGROQUÍMICA	52
2.4.1. Obtención de sulfato de magnesio heptahidratado	52
3. ETAPA EXPERIMENTAL	52
3.1. LOCALIZACION GEOGRAFICA	52
3.2. MUESTREO DE MAGNESITAS	53
3.3. CARACTERIZACION DEL MINERAL	54
3.3.1. Análisis espectrográfico	54
3.3.2. Análisis químicos	56
3.3.3. Análisis granulométrico y análisis de contenidos	57
3.4. ESTUDIO DE REACTIVIDAD	62
4. DISEÑO EXPERIMENTAL	64
4.1. DEFINICION DE VARIABLES	64
4.2. FORMULACION DE HIPOTESIS	65
4.3. DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	65
4.3.1. Optimización diseño experimental, Magnesitas Bolívar - Valle	70
4.3.2. Optimización diseño experimental, Magnesitas Santa Marta	84
5. CONCLUSIONES	96
6. BIBLIOGRAFIA	96

TABLAS

1. Identificación de muestras de Magnesitas	54
2. Análisis espectrográfico magnesitas Bolívar - Valle y Santa Marta	55

	<u>Pág.</u>
3. Análisis Químicos Caracterización Magnesitas Bolívar - Valle y Santa Marta.....	57
4. Análisis Granulométrico Magnesitas Bolívar - Valle.....	58
5. Análisis Granulométrico Magnesitas Santa Marta	58
6. Análisis Granulométrico Complementario Magnesitas Bolívar - Valle	59
7. Análisis Granulométrico Complementario Magnesitas Santa Marta	59
8. Estudio de Reactividad Magnesitas Bolívar - Valle	62
9. Estudio de Reactividad Magnesitas Santa Marta	62
10. Definición Variables de Lixiviación de Magnesitas	65
11. Matriz Diseño Experimental Magnesitas Bolívar - Valle	66
12. Resultados Diseño Experimental Lixiviación Magnesitas Bolívar - Valle	66
13. Matriz Experimentación Resultados Magnesitas Bolívar - Valle	67
14. Diseño Experimental Lixiviación Magnesitas Bolívar - Valle	68
15. ANAVA Magnesitas Bolívar - Valle.....	69
16. Matriz Optimización Magnesitas Bolívar - Valle	70
17. Resultados Optimización Magnesitas Bolívar - Valle	71
18. Matriz Optimización Resultados Magnesitas Bolívar - Valle.....	72
19. ANAVA Modelo Lineal	73
20. Comprobación Modelo Lineal	74
21. Comprobación Modelo de Optimización	78
22. Ensayos Nuevo Modelo Lineal	78
23. Resultados Diseño Experimental	83
24. Matriz Diseño Experimental Magnesitas Santa Marta	84
25. Resultados Diseño Experimental Magnesitas Santa Marta	85
26. Matriz Experimentación Resultados Magnesitas Santa Marta.....	85

	<u>Pág.</u>
27. Diseño Experimental Lixiviación Magnesitas Santa Marta	86
28. ANAVA Magnesitas Santa Marta	86
29. Matriz Optimización Magnesitas Santa Marta	87
30. Resultados Optimización Magnesitas Santa Marta	88
31. Matriz Optimización Resultados Magnesitas Santa Marta	88
32. Modelo de Segundo Orden	89
33. ANAVA Formulación Modelo de Segundo Orden	90
34. Resultados Modelo de Segundo Orden	91
35. Modelo de Tercer Orden	92

GRAFICAS

1. % Retenido vs. Diámetro de Partícula - Magnesitas	60
2. % Acumulado vs. Diámetro de Partícula - Magnesitas	61
3. % MgCO ₃ vs. Número de Malla - Magnesitas	61
4. Variación de pH con respecto al tiempo Magnesitas Bolívar - Valle	63
5. Variación de pH con respecto al tiempo Magnesitas Santa Marta	63
6. Resultados Optimización Magnesitas Bolívar - Valle	75
7. Superficie de Respuesta Magnesitas Bolívar - Valle	76
8. Resultados por el Método SIMPLEX Magnesitas Bolívar - Valle	77
9. Superficie de Respuesta 2o. Modelo Lineal Magnesitas Bolívar - Valle	80
10. Superficie de Respuesta Magnesitas Bolívar - Valle	81
11. Corte de la Superficie de Respuesta Magnesitas Bolívar - Valle	82

FIGURAS

1. Mapa de Localización del Yacimiento de Magnesita de Bolívar - Valle	53
--	----

RESUMEN

El presente proyecto buscó realizar el estudio de aprovechamiento de magnesitas nacionales, con el propósito de establecer parámetros técnicos que permitan su uso como materia prima para la obtención de sales empleadas en la Industria Agroquímica.

Este estudio contempló la caracterización química y la producción a escala laboratorio de sulfato de magnesio, a partir de magnesitas de los departamentos del Valle del Cauca y Magdalena.

Fueron estudiadas siete (7) muestras de los frentes de explotación en Bolívar - Valle y nueve (9) muestras de la zona de explotación de magnesitas en Santa Marta - Magdalena.

Con el objeto de optimizar la extracción de MgO presente en las magnesitas, se utilizó una matriz de diseño experimental del tipo 23 y se lograron modelar los procesos estudiados. El método de Doolittle fué usado en la construcción de los modelos matemáticos. La significancia factorial y la optimización de los procesos se llevaron a cabo mediante análisis de varianza (ANAVA), utilizando el programa estadístico STATGRAPH 7.0.

Los resultados obtenidos a escala laboratorio son promisorios pero deberán, sin embargo, ser probados a escala piloto para realizar estudios de factibilidad técnica y económica.

1. INTRODUCCION

En la actualidad, los fertilizantes e insumos agrícolas en el país provienen principalmente de las importaciones y de procesos rudimentarios o de bajo nivel tecnológico. Esta última circunstancia determina productos de escasa calidad con altos contenidos de contaminantes, que generalmente producen un efecto tóxico sobre los entes (suelos, plantas y animales) que los asimilan como nutrientes. El país posee yacimientos de minerales importantes en cantidad y calidad, los cuales pueden ser utilizados como materias primas industriales para ser empleados en la industria agroquímica. El presente proyecto tiene por objeto desarrollar el estudio de los diferentes procesos utilizados actualmente para mejorar la tecnología existente, empleando magnesitas nacionales.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. DESCRIPCION DE LOS YACIMIENTOS.

A continuación se hace una descripción de los yacimientos de los minerales utilizados en este proyecto para la obtención de sales.

2.1.1. Magnesita - Generalidades.

La magnesita puede presentarse en varios tipos de depósitos, en forma cristalina o amorfa (criptocristalina). Los depósitos menos frecuentes son los de tipo sedimentario en los cuales las capas de magnesita alternan con arcilla o caliza. Su origen supuesto es la precipitación en aguas enriquecidas en magnesio por reacción con carbonato de sodio; solamente se conocen algunos depósitos de este tipo en California.

En el segundo tipo, más clásico, la magnesita se presenta en forma de lentes producto de reemplazo en calizas dolomíticas, cristaliza en el sistema trigonal clase ditrigonal escalenoédrica, se suele presentar en masas criptocristalinas de color blanco, amarillo o pardo, compacta o terrosa; raras veces aparece en cristales aislados. Tiene brillo vitreo o sedoso; su dureza oscila entre 4 y 4,5 y el peso específico entre 2,9 y 3,1 (VILLEGAS, 1987; CIRCULO DE LECTORES, 1980).

2.1.1.1. Magnesita en Colombia.

Los depósitos y prospectos de magnesita son bastante escasos en Colombia. Hay que reconocer por una parte que los ambientes geológicos a los cuales se encuentran asociados ofiolitas, dolomitas, calizas dolomíticas y algunas formaciones sedimentarias particulares, son poco comunes y a veces mal conocidos en nuestro país, pero quizás por falta de exploraciones sistemáticas. Hasta ahora se han explotado solamente dos depósitos uno en Bolívar (Valle) y otro en Santa Marta (Magdalena).

- **Depósito de Bolívar (Valle).** Este es el depósito de magnesita más importante que se haya explotado en Colombia; el área de éste forma parte del macizo ultrabásico de Bolívar, se trata de una secuencia de rocas básicas y ultrabásicas; la magnesita se presenta en venas de espesor variable entre algunos milímetros y treinta centímetros, de forma irregular, prácticamente no deformada; no existe aparentemente ninguna orientación preferencial, salvo en la cercanía de algunos diques donde las venas tienden a orientarse paralelamente al dique. En general el aspecto del conjunto de venas es el de una red irregular. Diversas hipótesis han sido propuestas sobre el posible origen de la mineralización del depósito de Bolívar y aunque todas coinciden en proponer como mecanismo la acción de aguas cargadas en CO₂ sobre las rocas ultrabásicas, hay discrepancia en cuanto a la procedencia meteórica o hidrotermal del agua (ESCOBAR, 1991).
- **Depósito de Santa Marta.** Este depósito es del mismo tipo que el de Bolívar. Está constituido por esquistos verdes que han sido parcialmente invadidos o intruídos por serpentinitas y talco, dando la apariencia de diques tubulares de forma más o menos regular y que en general siguen la misma dirección de los esquistos verdes en que se sitúan otras rocas presentes en el área; son intrusiones de carácter ácido, de forma irregular, correspondientes a cuarzo-dioritas y diques de cuarzo que cortan en diversas direcciones a los esquistos verdes y a los diques de serpentinita.

Génesis del yacimiento. Los diques tubulares de serpentinita, al ser fracturados posiblemente fueron sometidos al ataque de soluciones carbonatadas de origen hidrotermal que, al ascender fácilmente por dichas fracturas, ocasionaron su transformación local en lentes de carbonato de magnesio (VILLEGAS, 1987; MENDEZ Y LANDEAZABAL, 1983).

2.2. MUESTREO DE YACIMIENTOS.

El muestreo en los yacimientos es un medio para que, con ayuda de muestras aisladas, se pueda llegar a conclusiones sobre la composición del yacimiento total o de partes del mismo. El método es sólo aproximado y es necesario un trabajo cuidadoso y sistemático para poder llegar a resultados utilizables. El muestreo puede servir para distintos fines: investigación del yacimiento, dirección del muestreo y control de la explotación. Generalmente el muestreo tiene por fin la investigación del yacimiento y no se presentan grandes dificultades si se trata de estratos de calidad uniforme y en otros casos sencillos.

Las tomas de muestras mediante perforaciones y excavaciones se utilizan primeramente para determinar las variaciones espaciales en contenido de metal que, representadas en mapas, permiten formar una idea de cómo es el yacimiento y hacer un cálculo fundamentado de las reservas; estos trabajos

generalmente no incluyen una sola mina, sino que muchas veces se extienden a todo un distrito minero y la financiación no corre a cargo de una mina aislada. Para complementar o afinar los datos de estas investigaciones generales, después se llevan a cabo muestreos más detallados para explicar las circunstancias locales de una mina dada o de una zona todavía más limitada. Estos pueden circunscribirse, en casos dados, a cuestiones muy especiales.

En los yacimientos en estratos de mucha potencia hay que formar juicio separadamente sobre las partes más ricas y más pobres, especialmente las pendientes y subyacentes de las partes merecedoras de explotación. Esto no es siempre posible por un simple examen visual.

Más difícil es valorar y establecer bases de explotación de yacimientos constituidos por venas y filones, especialmente si se trata de un filón muy alterado con una distribución muy irregular del mineral. Sin embargo, se ha indicado que con una densidad suficiente de puntos del muestreo, aún en estos casos puede ligarse a resultados utilizables. Se pueden distinguir las partes explotables de las que no lo son, así como las rocas que las limitan.

En las venas y filones se puede explicar, mediante la toma de muestras, la génesis del yacimiento. Mediante una toma de muestras sistemática se puede tener una idea sobre la distribución del mineral y las direcciones de las galerías y sobre todo las diferencias de nivel primarias y secundarias.

2.2.1. Métodos para muestreo de yacimientos.

Muchas veces para efectuar el muestreo son esenciales los conocimientos anteriores que se tengan sobre el tipo de yacimiento y, con frecuencia, las puras suposiciones. Aún para yacimientos no descubiertos, se establece una limitación en los tipos posibles sobre bases geológicas generales, y después de las primeras aclaraciones (excavaciones, sondeos, análisis y estudios microscópicos).

Se puede a veces determinar claramente el tipo de yacimiento; después y para todos los tipos en los que el contenido de metal muestre diferencias, se procederá a determinar las zonas en las que deben tomarse las muestras, porque las tomadas en otras partes del yacimiento no tendrían ningún valor y podrían dar una idea totalmente falsa.

Al iniciar el estudio de un yacimiento deben realizarse estudios geológicos, físicos y mineros; estos son luego decisivos para la ejecución del muestreo sistemático.

A continuación se enuncian los métodos más importantes para la toma de muestras, teniendo en cuenta el tipo de yacimientos y la distribución del mineral, que influyen en la elección del método de muestreo:

- Muestreo en frentes visibles:
 - Muestreo por rozas.
 - Muestreo con barrenos.
 - Muestreo en el material arrancado.
 - Integración óptica.
 - Muestreo con escala patrón.

- Muestreo en yacimientos no descubiertos o no conocidos:
 - Muestreo con barrenos huecos a cielo abierto.
 - Muestreo mediante perforaciones en húmedo con barreno macizo.
 - Muestreo con perforación en seco con barreno macizo.
 - Muestreo mediante excavaciones y pozos.

2.3. HIDROMETALURGIA.

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia extractiva que comprende los procesos de obtención en vía húmeda de concentrados o compuestos metálicos a partir de minerales o fuentes secundarias, mediante reacciones que tienen lugar en soluciones acuosas u orgánicas que se desarrollan en la mayoría de las situaciones, a temperaturas relativamente bajas. (VAN ARSDALE, 1965)

2.3.1. Descripción de los procesos hidrometalúrgicos.

Los procesos de extracción de metales se han desarrollado para recuperar y producir concentrados metálicos de alta pureza a partir de minerales y concentrados intermedios.

La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza en forma de compuestos minerales y se presentan en mezclas más o menos complejas de sulfuros, óxidos, carbonatos y silicatos. Es ocasional encontrar un mineral prácticamente puro de alta ley¹, que no requiera de tratamiento previo; pero en su mayoría, los minerales son de baja ley y tienen que concentrarse por métodos de beneficio para separarlos y liberarlos de su roca matriz, antes de los pasos de extracción que producen el concentrado metálico.

Por lo general, el beneficio de los minerales consiste en triturar y moler el mineral hasta un tamaño suficientemente pequeño, no más fino de lo absolutamente requerido, para la liberación del elemento o elementos metálicos del mineral de la roca de desecho que los contiene y concentrar inicialmente estos valores minerales por combinación de métodos de separación por gravedad, por permeabilidad magnética, por flotación u otros métodos. Parte del mineral beneficiado se desecha como material sin valor, mientras el concentrado del compuesto mineral va al proceso de tostación o directamente al proceso de extracción sólido-líquido para producir el concentrado metálico por tratamiento hidrometalúrgico. En esta etapa, la extracción de los valores metálicos se hace por medio de una lixiviación con un agente químico acuoso previamente seleccionado, que extrae el o los componentes de interés en forma selectiva, para separarlos del mineral y dejar el material de desecho como residuo insoluble, al cual se le debe realizar un tratamiento previo antes de su evacuación de la planta y evitar así una mayor contaminación, o se puede almacenar en un sitio específico, para después efectuar una lixiviación en botaderos² y después de hacerle lavados se lleva a un determinado lugar para efectuar un relleno.

La selección de los procesos unitarios a aplicar para la extracción y refinación reales, debe ser de tal manera que estos queden integrados en un patrón general. Existe entonces una relación entre los diferentes procesos, convirtiéndose el producto del primer proceso unitario en el material de alimentación al segundo proceso unitario y así sucesivamente, por toda una serie completa de tratamientos individuales.

Es frecuente que un metal pueda producirse a partir de un mineral o un concentrado por más de un conjunto de pasos de varias condiciones. Ciertos tipos de compuestos metálicos de los minerales se prestan a una extracción mucho más fácil por un método que por otro; por ejemplo los óxidos y los sulfatos se disuelven con rapidez y facilidad en soluciones lixiviantes, mientras que los sulfuros sólo

¹ La ley de un mineral expresa la concentración del metal o metales de interés.

² Este proceso consiste en formar pilas del mineral de residuo, inundarlas con solución lixiviante y drenar luego a piletas la solución cargada.

pueden disolverse con dificultad. Otra condición calificativa es el grado de pureza que se requiere, el cual puede ser obtenido mejor con un conjunto de métodos de extracción que con otro.

El cinc producido pirometalúrgicamente en retortas o hidrometalúrgicamente por vía de lixiviación, en ambos casos a partir de concentrados de flotación de sulfuro de cinc, ilustra esta diferencia. El cinc metálico producido por retortas todavía contiene algunas impurezas de plomo, arsénico o hierro, pero es bastante adecuado en cuanto a pureza para galvanizado o para hacer latones.

Por otra parte, el cinc hidrometalúrgico precipitado electrolíticamente de una solución lixiviante es de muy alta pureza y es el metal que se prefiere para la preparación de ciertas aleaciones de cinc.

La recuperación de una impureza, en particular si tiene un valor considerable como subproducto, es también un factor a tener en cuenta en el procesamiento de metales. Pueden considerarse como ejemplos los métodos de refinación de cobre, en los que la refinación a fuego separa muchas de las impurezas, pero no permite lograr la recuperación de los metales preciosos, mientras que la refinación electrolítica, sí logra hacer la separación de los metales preciosos como subproducto.

Los tratamientos extractivos para la mayoría de los metales no ferrosos tienen muchas características en común, tanto en el proceso pirometalúrgico como en el hidrometalúrgico.

Estos pueden subdividirse para establecer diferencias entre los tratamientos específicos para los metales no reactivos y para los metales reactivos. Los procesos unitarios más importantes dentro del proceso hidrometalúrgico son:

2.3.2. Concentración.

El objetivo de la operación de concentración es aumentar el porcentaje del mineral útil a partir de la separación de la ganga. Esta etapa mejora la economía de los procesos metalúrgicos porque cuando se procesan concentrados más ricos, se aumenta la capacidad de las unidades y se disminuye el consumo de energía y fundentes por unidad de producto. Además, se disminuye la cantidad de minerales perdidos en la escoria.

En la industria de los minerales, los métodos de concentración más importantes son los métodos gravimétricos y la flotación. En los métodos gravimétricos se aprovechan las diferencias en la densidad de los minerales y muy frecuentemente se usa agua o líquidos pesados.

2.3.3. Tostación.

Es común que el compuesto metalífero no esté en una forma de la que pueda separarse el metal ni fácil ni económicamente por un proceso simple y primero es necesario convertir el compuesto metálico mediante un tratamiento químico preliminar, a una forma en la que pueda procesarse con mayor facilidad.

La tostación se hace con el propósito de cambiar los compuestos metálicos insolubles en otros que sean solubles en el agente químico lixiviante, así como para volatilizar ciertas impurezas solubles que pudieran contaminar a la solución cargada. También es útil para volver porosos a los compuestos metálicos y hacerlos de esta forma más fácilmente atacables por el disolvente de lixiviación.

Es con esta finalidad que los sulfuros se convierten en óxidos, sulfatos y cloruros, los óxidos se convierten en sulfatos y cloruros y los carbonatos se convierten en óxidos.

2.3.4. Lixiviación.

En la mayoría de los casos, el mineral que se lleva a lixiviación es de tal naturaleza que por alguna razón no responde con facilidad a la extracción de los metales por tratamiento pirometalúrgico, o bien, puede suceder que el proceso de lixiviación sea el más simple de usar, o que la ley del mineral sea demasiado baja para justificar otro tratamiento diferente al hidrometalúrgico, el cual aunque más lento es menos costoso.

Los procesos de lixiviación en hidrometalurgia, están relacionados con la solubilización del mineral que contiene el elemento metálico de interés que ha de recuperarse mediante el contacto con disolventes.

La lixiviación de los elementos deseados se hace en forma selectiva, a fin de separarlos del resto del material no deseado, o ganga, que queda como residuo insoluble. Además del agua sola, se conocen muchos reactivos que forman soluciones acuosas capaces de disolver minerales con elementos metálicos o concentrados, entre los que se cuentan ácidos, bases y sales.

Existen varias cualidades que debe tener un reactivo para la lixiviación; el costo del mismo es una de las más importantes. Otras son su capacidad para disolver selectivamente el elemento metálico deseado, su facilidad de consecución, manejo y carga al proceso, la factibilidad de recuperación para volver a usarlo y el grado al cual corroe el equipo de proceso. Quizá el ácido sulfúrico es el disolvente que más se usa, ya que su agresividad, precio y disponibilidad general compensan su poca selectividad³. También los ácidos nítrico y clorhídrico son buenos disolventes, pero su aplicación es limitada debido a su acción altamente corrosiva, así como a su falta de selectividad y mayor costo. El amoníaco se utiliza mucho en ciertas aplicaciones y su elevado costo requiere que se le recupere, regenere y reutilice en el circuito de lixiviación. Es un disolvente altamente selectivo para níquel, cobre y cobalto en particular y no ataca a los equipos construidos en acero.

La lixiviación debe ser selectiva en mayor grado con el fin de disolver únicamente los metales cuya recuperación se desea, dejando la porción que no tiene valor como residuo insoluble. Esta selectividad puede incrementarse mediante una adecuada selección del agente lixivante, en el que los metales deseados tengan una rapidez de disolución mucho mayor que la de los elementos no deseados. Tal condición puede mejorarse a veces mediante un pretratamiento térmico, con el cual puede darse a un sulfuro una tostación oxidante⁴ para producir un sulfato soluble en agua, o pueda darse a un óxido una tostación clorizante⁵ controlada, para producir un calcinado metálico que se disuelva fácilmente en la solución lixivante y que deje la mayor parte del hierro en forma de óxidos, los cuales se disuelven con menor rapidez.

La concentración del disolvente elegido al igual que la temperatura tienen también influencia en la selectividad, por lo que se ajustan estos dos factores para aprovechar las diferencias inherentes de solubilidad entre los metales valiosos y las gangas de desecho.

³ La poca selectividad del H_2SO_4 , se refiere a que éste extrae toda clase de óxidos y sulfatos, en proporciones determinadas por las condiciones de lixiviación.

⁴ La tostación oxidante se hace en presencia de oxígeno o cloro y con ayuda de alta temperatura, oxida los sulfuros a óxidos o sulfatos o bien a cloruros del metal a extraer.

⁵ La tostación clorizante se hace en presencia de cloro (añadiendo $NaCl$), el cual convierte las impurezas a cloruros volátiles que salen con los gases, o forman cloruros insolubles que permanecen como residuo después de la lixiviación.

Desde el punto de vista económico es importante establecer condiciones de lixiviación, para las cuales se disuelven los elementos deseados tan rápidamente como sea posible. La concentración del reactivo, la temperatura y la agitación son las principales variables controlables que influyen en el régimen de lixiviación (TERKEL, 1987).

Los minerales deben también molerse a la suficiente finura para lograr la exposición óptima y aumentar el área de contacto con la solución lixivante y deben tener bajo contenido de ganga y minerales básicos, que sólo representan consumo adicional de ácido, cuando se utiliza una solución lixivante ácida.

Otras variables que tienen efecto en los regímenes de lixiviación, son: la densidad de la pulpa o lodo por lixiviar, la disponibilidad de agitación, el tiempo de contacto que se permite entre los sólidos y el líquido, el potencial químico y el pH.

A menudo se utilizan reactivos gaseosos en las soluciones de lixiviación en hidrometalurgia, siendo el oxígeno el principal. La cantidad de oxígeno que se puede disolver en la fase acuosa depende de la presión parcial de oxígeno en equilibrio con la solución; al aumentar la presión aumenta la solubilidad. También influye la temperatura del sistema en conjunto, disminuyendo la solubilidad del gas al aumentar la temperatura.

La composición de la solución tiene también efecto sobre la solubilidad del gas al aumentar la temperatura y la solubilidad disminuye si la concentración de las sales disueltas es grande.

El papel del oxígeno disuelto es oxidar los elementos metálicos de interés y el hierro que esté presente, y ponerlos en una condición tal en la que el óxido del metal deseado sea más reactivo con la solución lixivante y el óxido de hierro sea menos reactivo. (VAN ARSDALE, 1965)

Un tipo especial de lixiviación es la bacterial, en la que varias especies de bacterias oxidantes aceleran la lixiviación en forma considerable cuando se usa ácido sulfúrico con minerales sulfurados. El efecto es acelerar la oxidación de los sulfuros para formar ácido sulfúrico y sulfatos solubles de cobre y hierro debido a la reoxidación de iones ferrosos a férricos y al posible ataque que ejercen estas bacterias sobre los sulfuros metálicos. (TERKEL, 1987)

2.3.5. Separación sólido-líquido.

El proceso de separación sólido-líquido en hidrometalurgia es importante, puesto que después de la lixiviación el material de más importancia es el licor obtenido de ésta; debido a esto se hace necesario separar la torta o lodo de lixiviación (que en algunos casos puede no sólo ser ganga, sino que puede contener elementos secundarios de interés que de alguna manera se pueden recuperar) y el licor o solución cargada, que contiene el elemento metálico de interés.

Este proceso se realiza por diferentes métodos; los más utilizados son la filtración y la decantación.

2.3.6. Purificación.

La solución cargada que contiene los valores de metal disuelto procedente del proceso de separación sólido-líquido, se trata de diversas maneras para precipitar el metal disuelto y recuperarlo en forma sólida. En algunos casos, debe purificarse primero el licor de lixiviación, ya sea mediante la utilización de extracción líquido-líquido o por procesos electroquímicos, para separar los metales secundarios que

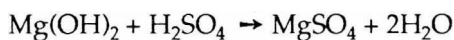
también entraron en solución durante la lixiviación, los cuales, si no se separan primero selectivamente, también se precipitan con el producto metálico valioso, contaminándolo.

En otros casos, es posible efectuar la recuperación selectiva directa del metal valioso de la solución al salir del circuito de lixiviación y separación sólido-líquido, sin necesidad de purificación preliminar, realizando una cristalización fraccionada de la solución cargada. (TERKEL, 1987)

2.4. METODOS DE PRODUCCION DE SALES UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA AGROQUIMICA.

2.4.1. Obtención de sulfato de magnesio heptahidratado. $MgSO_4 \cdot 7H_2O$

La forma comercial más importante del sulfato de magnesio se fabrica generalmente por neutralización del óxido o el hidróxido de magnesio o del carbonato básico de magnesio, con ácido sulfúrico:



La eliminación de impurezas se realiza mediante un tratamiento con exceso de óxido de magnesio para precipitar el hierro y otras impurezas, luego filtración y evaporación hasta densidad de 1,35; el $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ cristaliza por enfriamiento. (AREVALO, 1993)

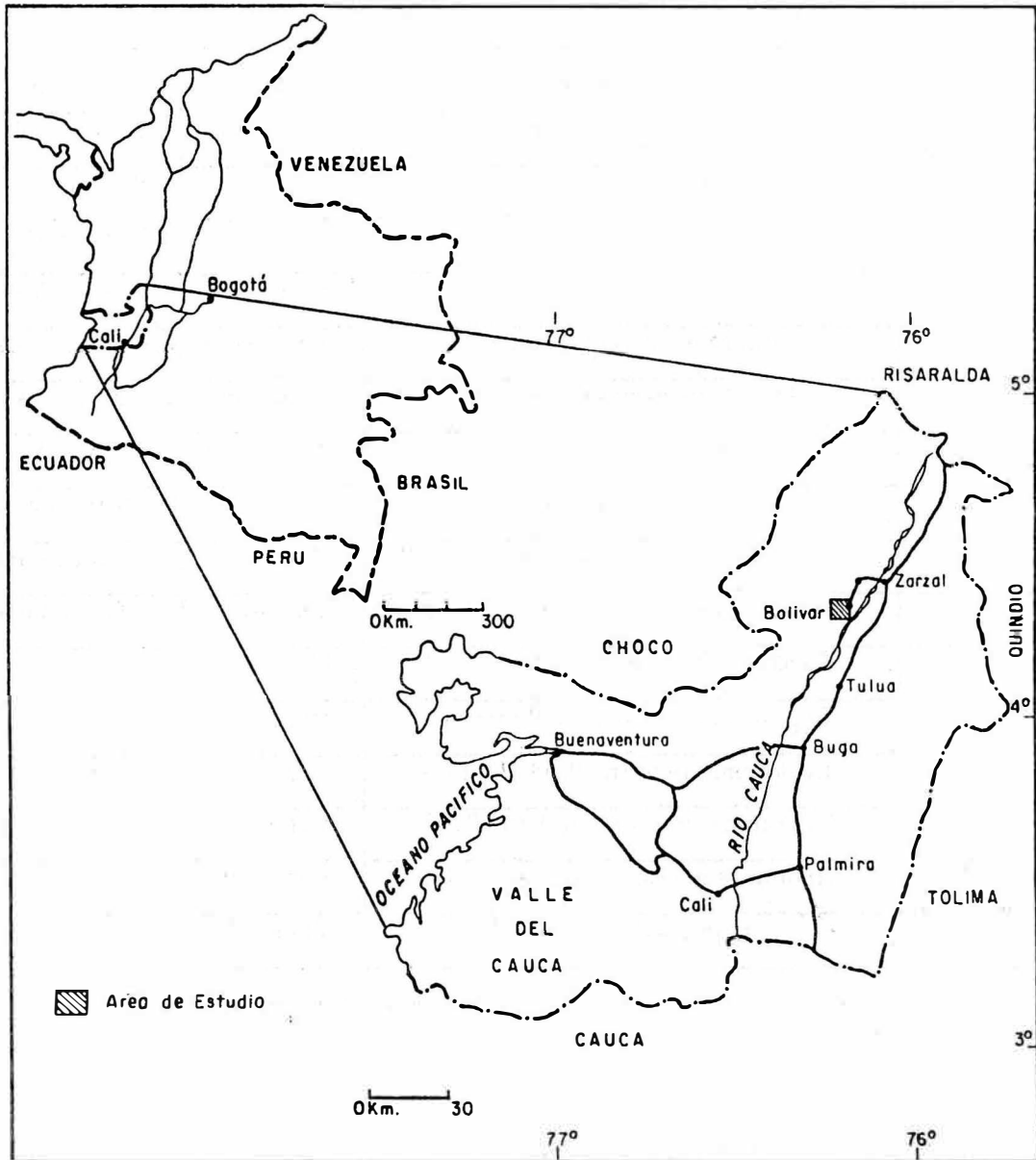
3. ETAPA EXPERIMENTAL

3.1. LOCALIZACION GEOGRAFICA.

Para realizar el estudio de obtención de sulfato de magnesio a partir de magnesita, se seleccionaron los dos yacimientos más importantes del país.

Bolívar - Valle. Este yacimiento se encuentra localizado en el Departamento del Valle del Cauca, al sur-este del municipio de Bolívar. El acceso a la mina se logra por la vía que comunica con el municipio de Roldanillo (ver mapa de localización del yacimiento).

Santa Marta. Este depósito se halla localizado en el municipio de Santa Marta, en el perímetro urbano (Cerca a la Quinta de San Pedro Alejandrino) en el Departamento del Magdalena.



Mapa de localización del Yacimiento de Magnesita de Bolívar - Valle

3.2. MUESTREO DE MAGNESITAS.

Para realizar el estudio experimental se tomaron muestras de los dos yacimientos, se efectuó un muestreo sistemático tanto para las muestras de los yacimientos como para las de producción, siguiendo las recomendaciones descritas en la literatura (PROSKE, 1966), con el objeto de determinar las características fisicoquímicas de cada material. Se consideraron además algunos desechos para estudiar la posibilidad de beneficiarlos, sin lograr resultados promisorios. Se recolectaron en total 16 muestras, identificadas en la Tabla 1.

TABLA 1. IDENTIFICACION DE MUESTRAS DE MAGNESITAS

Muestra Número	Referencia	Tipo	Lugar
1	Desechos Bolívar	Magnesita	Bolívar - Valle
2	Desechos Carlitos	Magnesita	Bolívar - Valle
3	Finos Bolívar	Magnesita	Bolívar - Valle
4	Finos Carlitos	Magnesita	Bolívar - Valle
5	Magnesita más quebradiza	Magnesita	Bolívar - Valle
6	Magnesita menos quebradiza	Magnesita	Bolívar - Valle
7	Desechos Vera del Camino	Magnesita	Bolívar - Valle
8	Explominas, muestra bruta	Magnesita	Santa Marta
9	Explominas muestra escogida Punto. 1	Magnesita	Santa Marta
10	Explominas muestra Prod. Punto. 1	Magnesita	Santa Marta
11	Explominas muestra Prod. Punto. 2	Magnesita	Santa Marta
12	Explominas muestra Prod. Punto. 3	Magnesita	Santa Marta
13	Explominas muestra Prod. Punto. 4	Magnesita	Santa Marta
14	*Explominas muestra Prod. (A+B+C)	Magnesita	Santa Marta
15	*Explominas muestra escogida (A+B+C)	Magnesita	Santa Marta
16	Explominas Residuo (RL)	Magnesita	Santa Marta

* Estas muestras se obtuvieron mezclando proporciones iguales de tres frentes de explotación .

La muestra 13 se obtuvo mediante mezcla de mineral en bruto. La muestra 14 se obtuvo mediante mezcla de mineral escogido.

3.3. CARACTERIZACION DEL MINERAL.

La caracterización química del mineral proveniente de los dos yacimientos se realizó por medio de técnicas espectrográficas (Espectros de Emisión - Semicuantitativo) y análisis químicos cuantitativos por vía húmeda empleando HCl en el ataque.

Para conocer la distribución de tamaño de partícula se realizó análisis granulométrico en cada caso.

3.3.1. Análisis espectrográfico.

De acuerdo con las características de cada material y con base en la revisión bibliográfica (TERKEL, 1987) se seleccionaron las muestras 1, 3, 4, 5, 9, 11, 14, 15 y 16 para realizar el análisis espectrográfico; los resultados obtenidos en esta parte se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2 ANALISIS ESPECTROGRAFICO MAGNESITAS BOLIVAR-VALLE Y SANTA MARTA

MUESTRA ELEMENTO	1	3	4	5	9	11	14	15	16
Fe %	0,7	1,5	0,5	N	N	1	1,5	L 0,05	1
Mg %	G10	G10	G10	G10	G10	G10	G10	G10	G10
Ca %	0,15	0,3	0,1	0,07	L 0,05	0,15	0,3	0,07	0,2
Ti %	0,005	0,005	L 0,002	N	N	0,02	0,01	N	0,01
Mn (ppm)	200	300	100	N	20	200	200	50	150
Ag (ppm)	N	N	N	0,5	N	N	N	N	N
As (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Au (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
B (ppm)	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10
Ba (ppm)	L 20	150	N	N	N	L 20	L 20	N	L 20
Be (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Bi (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Cd (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Co (ppm)	20	70	10	L 5	L 5	70	50	L 5	30
Cr (ppm)	500	700	300	L 10	10	1000	300	15	500
Cu (ppm)	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10	L 10
Ga (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
La (ppm)	N	N	N	N	N	20	N	N	N
Mo (ppm)	L 5	L 5	L 5	N	N	7	L 5	N	L5
Nb (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Ni (ppm)	150	200	70	20	50	500	300	70	300
Pb (ppm)	L 10	L 10	10	30	N	N	N	N	N
Pd (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Pt (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Sb (ppm)	H	H	H	N	N	H	H	N	H
Sc (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Sn (ppm)	N	L 10	N	N	N	N	N	N	N
Sr (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
V (ppm)	L 20	20	L20	N	N	20	20	N	20
W (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Y (ppm)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Zr (ppm)	N	N	N	N	N	150	N	N	N
Zn (ppm)	L 200	N	N	N	N	N	N	N	N

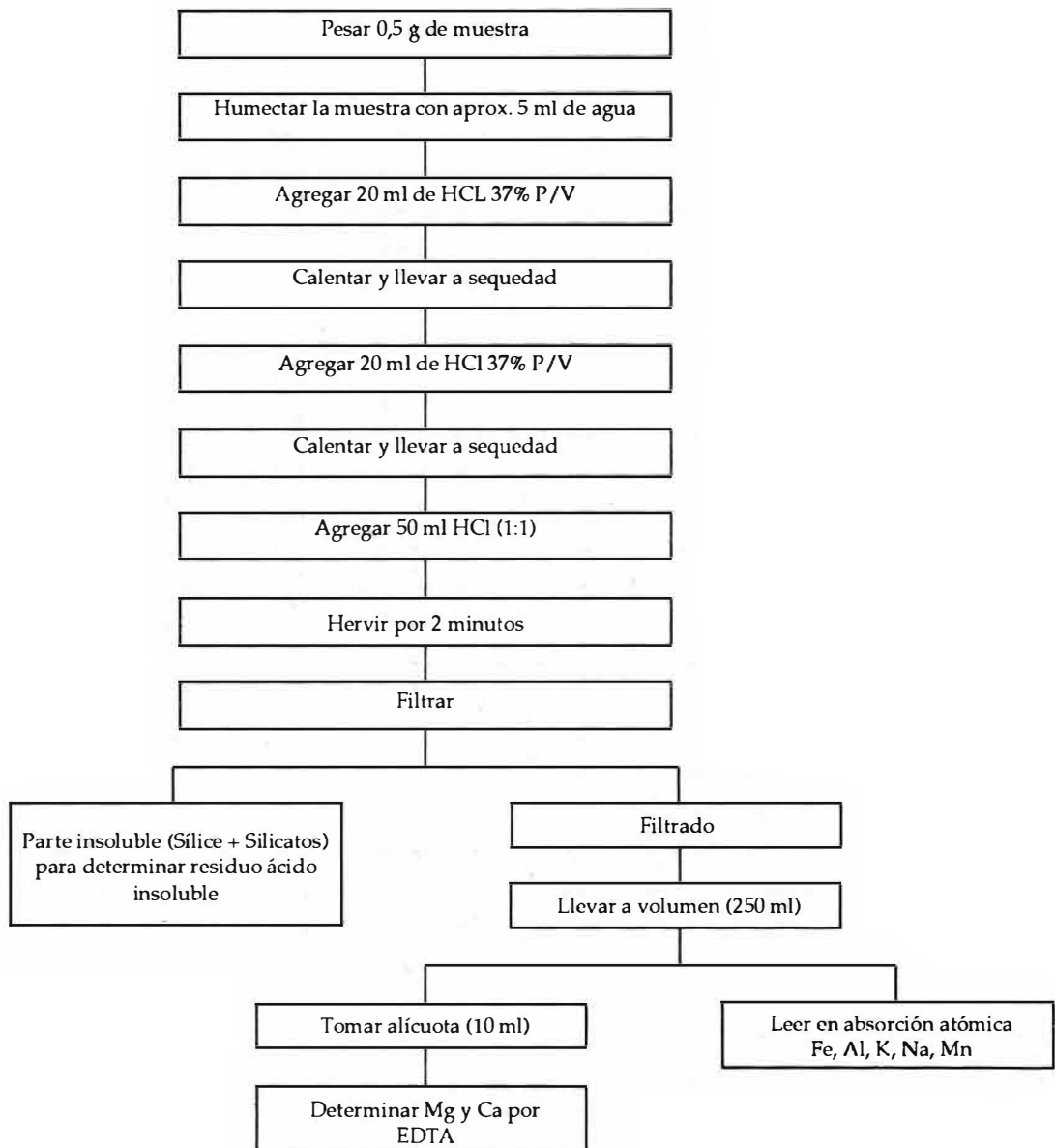
G = Mayor que el indicado a continuación de la G
 N = Elemento no detectado en el límite de detección
 L = Elemento detectado pero por debajo del límite de determinación o del valor indicado a continuación de la L
 H = Elemento no determinado por encontrarse interferida su longitud de onda
 - = Elemento no determinado por encontrarse en alta proporción

El objeto principal de este análisis es determinar las principales impurezas asociadas al mineral; esto permite seleccionar las muestras con mejores características para la obtención de sulfato de magnesio. Por tratarse de un método semicuantitativo, es necesario analizar cuantitativamente cada una de estas muestras mediante caracterización química.

3.3.2. Análisis químicos.

Estos análisis se realizaron por ataque con HCl; el objeto de esta técnica es colocar en solución todos los elementos que no estén asociados en forma de silicatos. El procedimiento seguido se muestra a continuación:

Diagrama de Flujo - Análisis químicos de magnesitas



Estos análisis se complementan con las determinaciones de humedad a 105°C y pérdidas por calcinación a 1000°C. En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos mediante este método. Con base en los resultados obtenidos en las tablas 2 y 3, se seleccionaron las muestras No. 5 y 9 las cuales representan cada yacimiento, teniendo en cuenta tres aspectos principales: su alto contenido de MgCO₃, su bajo porcentaje de Residuo Acido Insoluble y su bajo contenido de contaminantes (Fe, Al, Mn, K, Na, Ca).

TABLA 3 ANALISIS QUIMICOS CARACTERIZACION MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE Y SANTA MARTA. (resultados expresados como % en masa).

MUESTRA	CaO	CaCO ₃	MgO	MgCO ₃	P x C	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	R.A.I.	SUMATORIA
1			22,73	47,62	24,71	9,63	0,77	0,17	0,02	0,19	41,28	99,5
2			17,7	37	19,28	8,47	1,13	0,14	0,04	0,56	52,31	99,63
3			17,27	36,23	18,86	12,65	0,47	0,21	0,02	0,06	49,23	98,77
4			32,72	68,35	35,86	5,45	0,22	0,09	0,01	0,02	26,03	100,4
5			46,15	96,52	50,31	0,16	0,09	0,06			2,9	99,67
6			41,17	85,99	44,89	8,37	0,09	0,06			5,17	99,75
7			13,38	27,98	14,73	3,66	2,01	0,12	0,03	0,43	64,57	98,93
8			22,68	47,44	24,79	0,73	0,63	0,06	0,04	0,13	50,34	99,4
9			42,98	89,9	46,99	0,84	<0,05	0,03	0,01	0,05	8,4	99,3
10	0,28	0,5	22,93	47,96	25,37	7,46	0,47	0,1	0,02	0,37	42,82	100,32
11			20,54	42,99	22,52	5,68	0,55	0,1	0,25		49,96	99,6
12			22,76	47,59	24,93	5,95	0,53	0,08		0,2	45,23	99,68
13			26,29	54,98	29	5,07	0,43	0,05		0,11	38,27	99,22
14			24,17	50,54	26,47	5,95	0,3	0,1		0,04	42,32	99,35
15			42,28	88,36	46,12	0,87	0,09	0,03		0,01	9,93	99,93
16			21,65	45,27	23,71	5,58	0,44	0,06		0,11	47,11	98,66

3.3.3. Análisis granulométrico y análisis de contenidos.

Debido al alto contenido de MgCO₃, de las magnesitas seleccionadas (No. 5 para Bolívar - Valle y No. 9 para Santa Marta), en esta parte se buscó determinar la distribución en cuanto al tamaño de partícula, para cada una de las muestras; se realizaron dos ensayos para cada mineral. Los primeros se efectuaron con 300 g de los testigos provenientes del muestreo, los cuales se encontraban a malla 4.

Los resultados se pueden observar en las tablas 4 y 5.

TABLA 4. ANALISIS GRANULOMETRICO MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

Malla #	Diámetro Part. (mm)	Muestra (g)	% Ret.	% Acum.	% Paso	% MgCO ₃
+12	1,70	164	54,85	54,85	45,15	96,10
+35	0,50	70	23,41	78,26	21,74	95,50
+50	0,30	17	5,69	83,95	16,05	94,21
+80	0,18	17	5,69	89,64	10,36	96,55
+100	0,15	3	1,00	90,63	9,37	93,82
+120	0,125	4	1,34	91,98	8,02	93,57
FONDO		24	8,03	100,01	-----	94,15
TOTAL		299	100,01			

TABLA 5. ANALISIS GRANULOMETRICO MAGNESITAS SANTA MARTA

Malla #	Diámetro Part. (mm)	Muestra (g)	% Ret.	% Acum.	% Paso	% MgCO ₃
+12	1,700	191	63,88	63,88	36,12	87,70
+35	0,500	66	22,07	85,95	14,03	87,70
+50	0,300	12	4,01	89,96	10,04	83,45
+80	0,180	10	3,34	93,30	6,70	82,86
+100	0,150	2	0,67	93,97	6,03	73,20
+120	0,125	1	0,33	94,30	5,70	72,36
FONDO		17	5,69	99,99	-----	72,36
TOTAL		299	99,99			

Al apreciar los resultados obtenidos en las tablas 4 y 5 se observa que éste análisis granulométrico no es muy representativo, debido a que los materiales tanto de Bolívar - Valle como de Santa Marta son muy gruesos y tienden a quedar retenidos sobre los tamices de malla 12 y 35 (% ret = 78,26 y 85,95 respectivamente).

Debido a que estos tamaños de partícula presentan problemas de reactividad y no son manejables en la etapa de lixiviación, se procedió a realizar dos ensayos de granulometría adicionales, moliendo los minerales a malla 20 con el objeto de obtener un tamizado más representativo y poder establecer el tamaño de partícula que presenta mayor concentración de $MgCO_3$

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 6 y 7.

TABLA 6. ANALISIS GRANULOMETRICO COMPLEMENTARIO MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

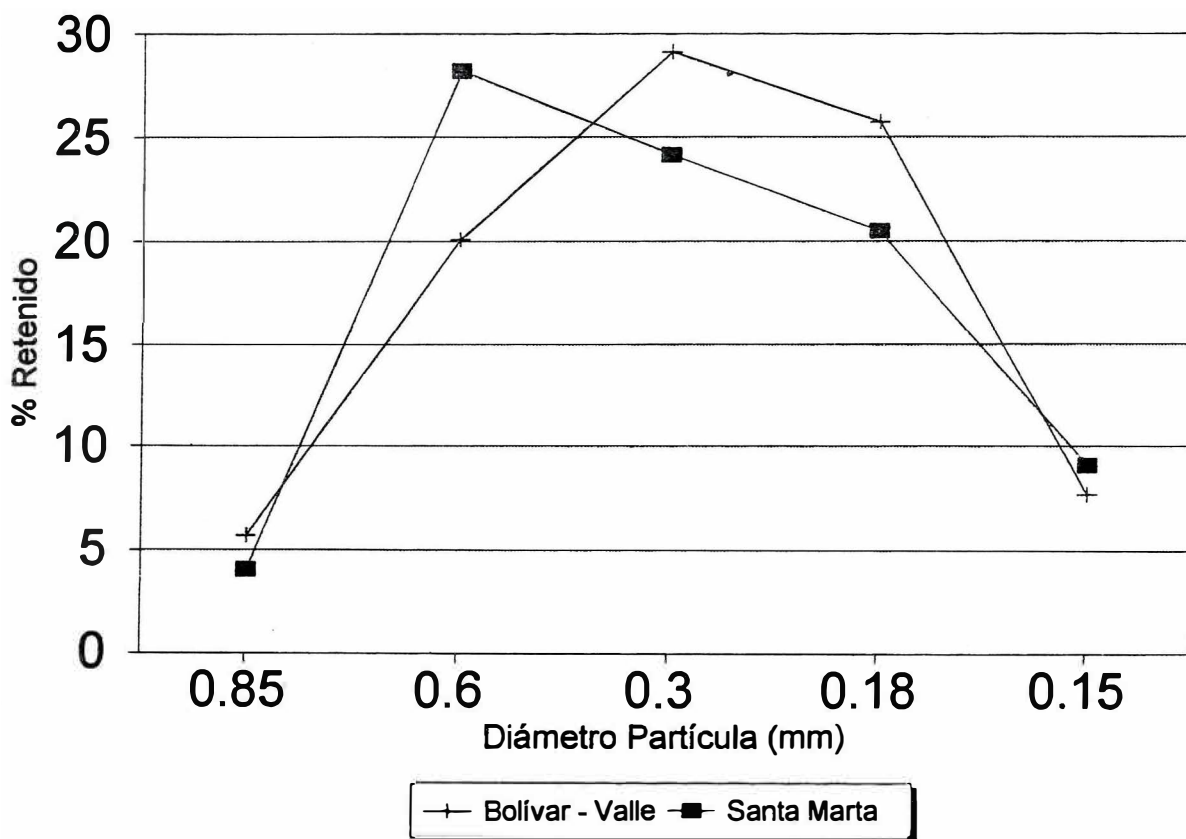
Malla #	Diámetro Part. (mm)	Muestra (g)	% Ret.	% Acum.	% Paso	% $MgCO_3$
+20	0,85	17	5,69	5,69	94,31	90,10
+30	0,60	60	20,07	25,76	74,24	89,18
+50	0,30	87	29,10	54,86	45,14	89,60
+80	0,18	77	25,75	80,61	19,39	87,35
+100	0,15	23	7,69	88,30	11,70	85,72
FONDO		35	11,71	100,01	-----	81,03
TOTAL		299	100,01			

TABLA 7. ANALISIS GRANULOMETRICO COMPLEMENTARIO MAGNESITAS SANTA MARTA

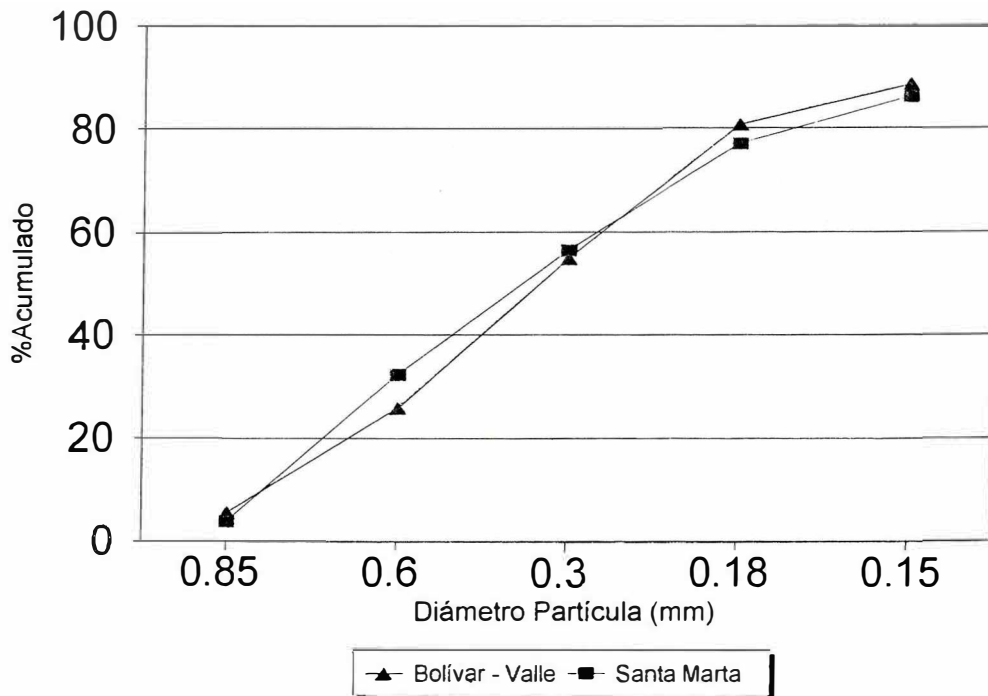
Malla #	Diámetro Part. (mm)	Muestra (g)	% Ret.	% Acum.	% Paso	% $MgCO_3$
+20	0,85	12	4,03	4,03	95,97	87,70
+30	0,60	84	28,19	32,22	67,78	87,70
+50	0,30	72	24,16	56,38	43,62	83,45
+80	0,18	61	20,47	76,85	23,15	77,50
+100	0,15	27	9,06	85,91	14,09	73,20
FONDO		42	14,09	100	-----	72,36
TOTAL		298	100			

En las tablas 6 y 7 se observa para las magnesitas de Bolívar - Valle y Santa Marta que las fracciones contenidas en las mallas 20, 30, 50 y 80 presentan los mayores porcentajes de retención y los mayores contenidos de $MgCO_3$.

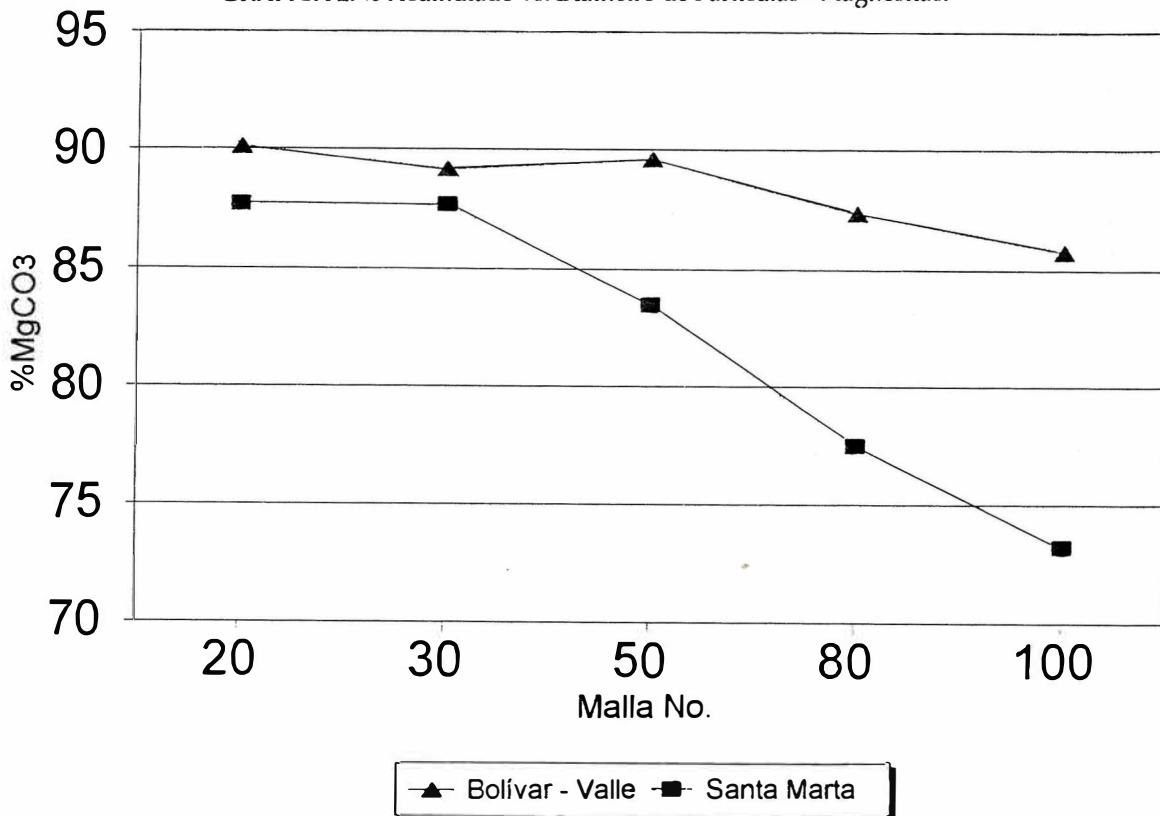
Las gráficas 1 (%Retenido vs. Diámetro Partícula mm), 2 (% Acumulado vs. Diámetro Partícula mm) y 3 (% $MgCO_3$ vs. No. Malla) muestran el comportamiento de cada uno de los minerales ; con base en los resultados obtenidos en el análisis granulométrico se puede inferir que las mallas 20, 30, 50 y 80 presentaron las mejores características, por lo tanto se consideraron para realizar el estudio de reactividad.



GRAFICA 1. % Retenido vs. Diámetro de Partícula - Magnesitas



GRAFICA 2. % Acumulado vs. Diámetro de Partículas - Magnesitas.



GRAFICA 3. % MgCO₃ vs. Número de Malla - Magnesitas.

3.4. ESTUDIO DE REACTIVIDAD.

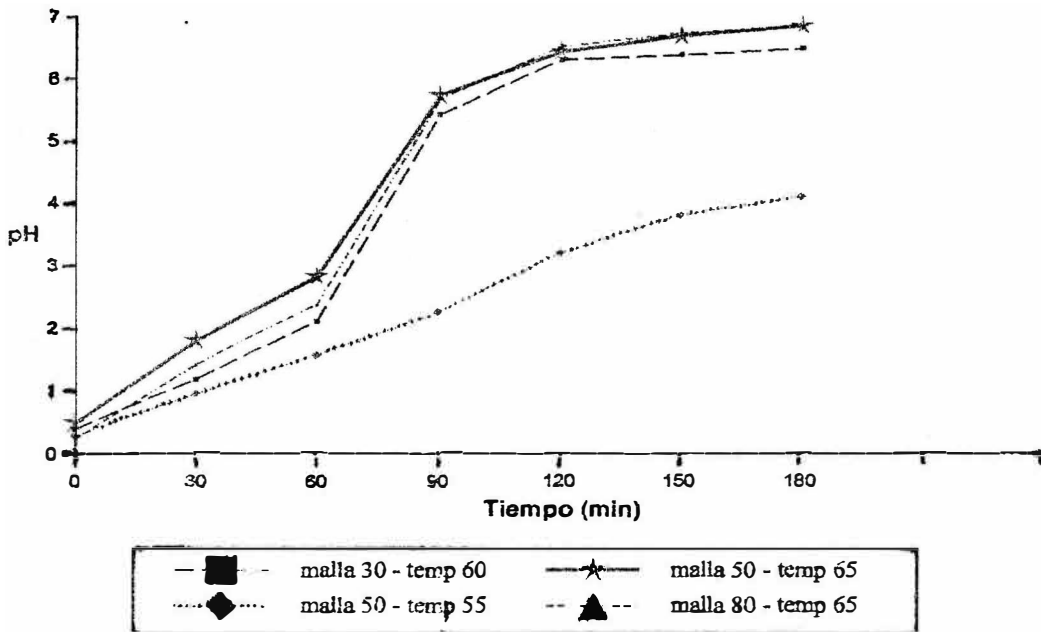
El objetivo principal de este estudio es determinar el comportamiento de los dos minerales considerados a diferentes mallas, para lograr establecer el tiempo de reacción en cada caso. Con esto se buscó además limitar el número de variables que intervendrían posteriormente en el diseño experimental. Se realizaron nueve ensayos con el objeto de establecer el tiempo de reacción; las condiciones y los resultados de estos ensayos se aprecian en las tablas 8 y 9 y el comportamiento se puede ver en las gráficas 4 y 5.

TABLA 8. ESTUDIO DE REACTIVIDAD MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE. TIEMPO (MIN) - PH

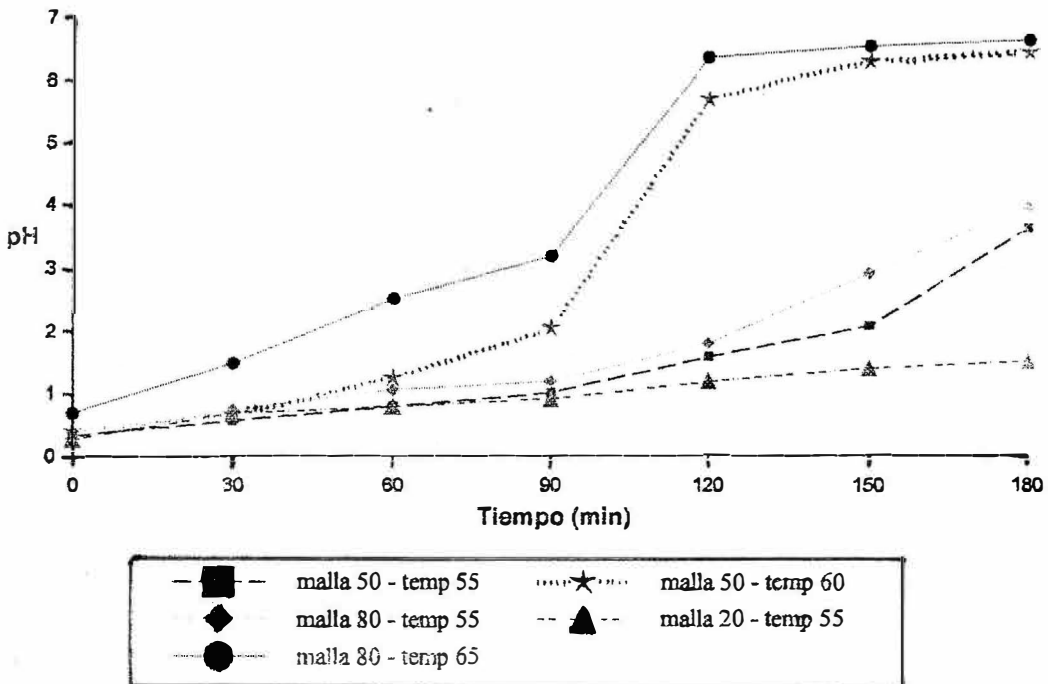
Ensayo No.	1	2	3	4
Tiempo (min)	pH T = 60°C Malla = 30 [H ₂ SO ₄ 7.5%]	pH T = 65°C Malla = 50 [H ₂ SO ₄ 5%]	pH T = 55°C Malla = 50 H ₂ SO ₄ 10%	pH T = 65°C Malla = 80 H ₂ SO ₄ 10% .
0	0,40	0,50	0,30	0,25
30	1,20	1,80	0,97	1,43
60	2,11	2,82	1,58	2,38
90	5,40	5,70	2,25	5,65
120	6,27	6,40	3,20	6,50
150	6,35	6,65	3,80	6,70
180	6,45	6,80	4,10	6,80

TABLA 9. ESTUDIO DE REACTIVIDAD MAGNESITAS SANTA MARTA. TIEMPO (MIN) - PH

Ensayo No.	5	6	7	8	9
Tiempo (min)	T = 55°C Malla = 50 [H ₂ SO ₄ 10 %]	T = 60°C Malla = 50 [H ₂ SO ₄ 10 %]	T = 55°C Malla = 80 [H ₂ SO ₄ 13 %]	T = 55°C Malla = 20 [H ₂ SO ₄ 13 %]	T = 65°C Malla = 80 [H ₂ SO ₄ 7%]
0	0,32	0,39	0,27	0,26	0,68
30	0,56	0,65	0,74	0,68	1,48
60	0,80	1,25	1,06	0,80	2,53
90	1,01	2,04	1,20	0,92	3,20
120	1,59	5,70	1,80	1,20	6,35
150	2,07	6,27	2,90	1,40	6,52
180	3,60	6,40	3,95	1,50	6,60



GRAFICA 4. Variación de pH con respecto al tiempo Magnesitas Bolívar - Valle.



GRAFICA 5. Variación de pH con respecto al tiempo Magnesitas Santa Marta.

Los ensayos 1, 2, y 4 para la magnesita de Bolívar reportaron los mejores resultados, es decir se logra la neutralización de la reacción en un tiempo inferior a los demás ensayos; sin embargo, el ensayo 1 permite trabajar a tamaños de partícula mayores (malla 30) y temperatura inferior (60°C) en comparación con los ensayos 2 y 4 los cuales trabajan a mayor temperatura y menor tamaño de partícula. Como se expresó anteriormente, las condiciones de operación del ensayo 1 son más convenientes por costos de operación del proceso. El ensayo 6 reportó las mejores condiciones de acuerdo con los criterios anteriores para la magnesita de Santa Marta.

Como conclusión de esta preexperimentación, se puede decir que para los dos tipos de magnesita es posible obtener la sal ($MgSO_4$) por lixiviación, variando la temperatura de reacción, el % de ácido sulfúrico y la malla de liberación; sin embargo, los ensayos permitieron determinar las zonas de mejor respuesta, las cuales se muestran a continuación para cada mineral.

Mineral	Temp. de reacción	[H_2SO_4 en %]	Malla(#)Serie U.S.Std.
Santa Marta	60°C	10%	50
Bolivalle	60°C	7,5%	30

Estas condiciones se obtuvieron después de efectuar un rastreo de temperatura, % H_2SO_4 y número de malla para cada mineral.

Como se observó, a pesar de que los dos minerales poseen un contenido similar de $MgCO_3$, en ellas, la concentración de H_2SO_4 y el número de malla varía; es menor para el mineral de Bolívar - Valle que para el mineral de Santa Marta.

Una de las causas que justifica este hecho, es el contenido y el porcentaje de impurezas debido al diferente origen de tipo geológico.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL.

Esta sección está encaminada a la consecución de las mejores condiciones para la obtención de sulfato de magnesio mediante técnicas de diseño de experimentos que conllevan a su vez a determinar las mejores variables a utilizar en el diseño de los diferentes equipos inherentes al proceso.

4.1. DEFINICION DE VARIABLES.

Las variables que intervienen en este diseño experimental son:

TABLA 10. DEFINICION VARIABLES DE LIXIVIACION DE MAGNESITAS

Variable	Tipo	Clasificación	Denominación
% Recup. MgO	Dependiente	Respuesta	Y (1 y 2)
Temperatura	Independiente	Variable	X ₁
Tiempo de reacción	Independiente	Constante	-----
[H ₂ SO ₄ en %]	Independiente	Variable	X ₂
Vel. de agitación	Independiente	Constante	-----
Relación S/L	Independiente	Constante	-----
pH	Dependiente	Constante	-----
Tamaño partícula	Independiente	Variable	X ₃

4.2. FORMULACION DE HIPOTESIS.

Como una manera de confrontar los resultados numéricos del diseño experimental y poder sacar conclusiones se tomaron dos hipótesis.

La hipótesis nula (H₀) : Se acepta cuando F⁶ (calculado por el método de Yates) sea menor que el Ft (tabulado) F<Ft y se interpreta: las variables (tamaño de partícula, temperatura y concentración de ácido) y/o sus interacciones no son significativas y no afectan la variable de respuesta con un 95% de confiabilidad.

La hipótesis alterna (H₁): Se acepta cuando F>Ft y se interpreta: las variables (tamaño de partícula, temperatura y concentración de ácido) y/o sus interacciones son significativas y afectan la variable de respuesta con un 95% de confiabilidad (COCHRAN, 1964).

4.3. DESARROLLO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.

La experimentación se desarrolló realizando ensayos con sus respectivos duplicados, en los cuales se tomaron en cuenta las variables que en la etapa de preexperimentación demostraron ser las más significativas en la extracción del magnesio. Se tomaron valores cercanos a los obtenidos en el estudio de reactividad para poder medir su significancia y la de sus interacciones; inicialmente se diseñó y realizó el modelo para la magnesita de Bolívar y posteriormente para la de Santa Marta.

En esta primera etapa se pretende mediante la organización del diseño de experimentos, encontrar las variables que más influyen sobre el porcentaje de magnesio extraído.

Uno de los tipos de diseño de experimentos más utilizados debido al menor número de experiencias y a la mayor información que suministra, son los del tipo (2^K), en el cual 2 significa que se trabaja cada variable en dos niveles y K significa el número de variables a controlar, en este caso 3.

Por lo tanto dan ocho experimentaciones en cada caso organizadas de la siguiente manera:

⁶ F corresponde a la distribución de Fisher.

TABLA 11. MATRIZ DISEÑO EXPERIMENTAL MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

Ensayo	X ₁	X ₂	X ₃	Temp. ° C (X ₁)	[H ₂ SO ₄ en %] (X ₂)	Tamaño Part. (X ₃)
1	-	-	-	55	5	10
a	+	-	-	65	5	10
b	-	+	-	55	10	10
ab	+	+	-	65	10	10
c	-	-	+	55	5	50
ac	+	-	+	65	5	50
bc	-	+	+	55	10	50
abc	+	+	+	65	10	50
0				60	7,5	30

Nota: -, + significan los niveles de cada variable; (-), en el valor inferior y (+), en el nivel superior.

Los rangos de trabajo se obtuvieron a partir de las mejores condiciones encontradas en la preexperimentación alrededor de los puntos centrales o valores óptimos obtenidos en esta parte (Nivel 0). Los ensayos se realizaron al azar y los resultados se presentan a continuación en la Tabla 12.

TABLA 12. RESULTADOS DISEÑO EXPERIMENTAL LIXIVIACION MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

Número Ensayo	Temp. °C	[H ₂ SO ₄] %	Malla #	pH Final	% Res. Insol.	% Res. Ac. Insol.	% MgO Ext.	Ensayo
1	65	10	50	6,05	9,21	49,85	95,56	abc
2	55	5	10	2,10	12,56	32,60	91,05	1
3	60	7,5	30	5,82	9,86	38,55	93,70	0
4	65	5	10	3,60	9,25	32,25	93,46	a
5	60	7,5	30	5,94	11,39	40,00	92,89	0
6	55	10	10	2,09	9,65	38,20	93,83	b
7	60	7,5	30	5,20	9,73	44,50	94,55	0
8	55	5	50	2,60	9,26	49,50	95,39	c
9	60	7,5	30	5,99	10,16	38,85	93,56	0
10	55	10	50	3,03	9,68	46,00	94,95	bc
11	60	7,5	30	5,95	9,74	40,25	94,06	0
12	65	5	50	6,05	9,67	43,09	94,48	ac
13	65	10	10	2,77	10,06	40,70	93,62	ab
14	55	5	10	2,10	11,33	33,80	91,55	1
15	55	10	50	3,20	9,22	47,00	95,19	bc
16	65	10	50	5,80	9,76	45,10	94,67	abc
17	65	5	10	3,70	9,92	33,10	93,04	a
18	55	10	10	2,27	10,30	41,85	93,67	b
19	55	5	50	2,20	11,93	40,30	92,40	c
20	65	5	50	5,80	9,50	45,70	94,76	ac
21	65	10	10	2,80	9,14	3,35	93,72	ab

Tiempo de reacción = 2 horas

Velocidad de agitación = 350 R.P.M.

En la Tabla 13 se presentan los resultados organizados según la matriz de experimentación.

TABLA 13. MATRIZ EXPERIMENTACION RESULTADOS MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

Ensayo	Variables			Variable Respuesta. (% MgO Ext.)		Valor Promedio \bar{Y}
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	
1	-	-	-	91,05	91,55	91,30
a	+	-	-	93,46	93,04	93,25
b	-	+	-	93,83	93,67	93,75
ab	+	+	-	93,62	93,72	93,67
c	-	-	+	95,39	92,40	93,90
ac	+	-	+	94,48	94,76	94,62
bc	-	+	+	94,95	95,19	95,07
abc	+	+	+	94,67	95,56	95,12

Con base en los resultados de la Tabla 13 se procedió a realizar el análisis de varianza para cada grupo de ensayos por dos métodos diferentes, (análisis factorial y Yates) encontrándose resultados iguales.

Los cálculos para realizar el ANAVA se muestran a continuación; los resultados y conclusiones de estos análisis se encuentran en las tablas 14 y 15.

Cálculo Factor Corrección:

$$C = G^2 / 16 = 140876,36$$

$$S.C \text{ factores} = \frac{(COLEFE)^2}{R \cdot 2^K}$$

$$16 = 2^K R$$

Donde:

K = Número de variables

S.C = Suma de Cuadrados

R = Réplicas = 2

COLEFE = Columna Efecto

TABLA 14. DISEÑO EXPERIMENTAL LIXIVIACION MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

ENSAYO	Y_1	Y_2	\bar{Y}	TRATM.	COL 1	COL 2	COLUMNA EFECTO	SUMA DE CUADRADOS	Y_1^2	Y_2^2
1	91,05	91,55	91,3	182,6	369,1	743,94	1501,34		8290,1	8381,4
a	93,46	93,04	93,25	186,5	374,84	757,4	5,28	1,74	8734,77	8656,44
b	93,83	93,67	93,75	187,5	377,03	3,74	9,08	5,15	8804,07	8774,07
ab	93,62	93,72	93,67	187,34	380,37	1,54	-5,42	1,84	8764,7	8783,44
c	95,39	92,4	93,9	187,79	3,9	5,74	13,46	11,32	9099,25	8537,8
ac	94,48	94,76	94,62	189,24	-0,16	3,34	-2,2	0,3	8926,47	8979,46
bc	94,95	95,19	95,07	190,14	1,45	-4,06	-2,4	0,36	9015,5	9061,14
abc	94,67	95,56	95,12	190,23	0,09	-1,36	2,7	0,46	8962,41	9131,71
	751,45	749,89	1501,34						70597,27	70305,46

Cálculo suma cuadrados del total = $S_c = (Y_1^2 + \dots + Y_2^2) - C = 26,37$

Cálculo suma cuadrado de los tratamientos = $(\text{sum}(t_1^2 / 2) - C = 21,18$

Cálculo suma cuadrados de los bloques = $S_{c\ bl} = ((B_1^2 + B_2^2) / 8) - C = 0,15$

Cálculo suma cuadrados del error = $S_{c\ err} = S_{c\ tot} - S_{c\ trat} - S_{c\ bl} = 26,37 - 21,18 - 0,15 = 5,04$

TABLA 15. ANAVA MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F calculado	F tabulado	
					0,05	0,01
Bloques	0,15	1	0,15			
Tratamientos	21,17	7	3,02			
a	1,74	1	1,74	2,42	5,59	12,25
b	5,15	1	5,15	7,15*	5,59	12,25
ab	1,84	1	1,84	2,56	5,59	12,25
c	11,32	1	11,32	15,72**	5,59	12,25
ac	0,30	1	0,30	0,42	5,59	12,25
bc	0,36	1	0,36	0,50	5,59	12,25
abc	0,46	1	0,46	0,64	5,59	12,25
ERROR	5,02	7	0,72			
TOTAL	26,34	15				

Para que la variable o su interacción sea representativa, se debe cumplir que el F calculado sea mayor al F tabulado encontrado en tablas con el número de grados de libertad del error y del tratamiento; por lo tanto los tratamientos que contienen asterisco (*) son significativos en un 95% y doble asterisco (**) en un 99%.

De acuerdo con lo anterior, las variables más representativas son b (concentración de ácido sulfúrico) y c (#malla) lo cual se puede observar en los resultados de la Tabla 13, ya que al aumentar la concentración del 5% al 10% se produjo un aumento de la respuesta del 91.30% (Ensayo1) a 93.75% (Ensayo b) estando X₁, X₃ en el nivel inferior y del 94.62% (Ensayo ac) al 95.12% (Ensayo abc) con X₁, X₃ en el nivel superior.

Estos incrementos en la respuesta no son tan significativos, como los que se obtienen con la disminución en el número de malla del #10 al #50. Es así como cuando X_1, X_2 están en el nivel inferior la respuesta cambia del 91.30% (Ensayo 1) al 93.90% (Ensayo c) y cuando X_1, X_2 están en el nivel superior la respuesta cambia del 93.67% (Ensayo ab) al 95.12% (Ensayo abc).

De este análisis se concluye lo siguiente:

Teniendo en cuenta que la temperatura, según el ANAVA es el parámetro que presenta menor influencia en la variable de respuesta, en la etapa de optimización se decidió mantenerla constante. Se trabajó en el valor superior (65°C), ya que en este nivel se encontraron los mejores valores de respuesta.

La optimización se va a efectuar únicamente con dos variables (concentración de ácido sulfúrico y número de malla).

4.3.1. Optimización Diseño Experimental, Magnesitas Bolívar - Valle

Después de conocer que las variables que más afectan el proceso de lixiviación son la concentración de H_2SO_4 y el tamaño de partícula, se procedió a determinar los valores óptimos de cada una de ellas por diferentes métodos. Se seleccionó el modelo rotacional central compuesto, por ser el más adecuado para manejar los datos; este modelo se basa en la determinación de otros ensayos, mediante los puntos estrella (∞), dados por la relación $2^{(k/4)}$, para las variables que se van a optimizar $K = 2$ por lo consiguiente $\infty \approx 1,4142$, la matriz experimental y los niveles de las variables quedaron de acuerdo con el análisis de varianza, estructurado de la siguiente forma:

TABLA 16. MATRIZ OPTIMIZACION MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE. [T = 65°C (CTE)]

Ensayo	Variable		[% H_2SO_4] X_1	Tamaño Part. X_2
	X_1	X_2		
1	-	-	5	10
a	+	-	10	10
b	-	+	5	50
ab	+	+	10	50
	∞	0	11	30
	$-\infty$	0	4	30
	0	∞	7,5	60
	0	$-\infty$	7,5	4
	0	0	7,5	30
	0	0	7,5	30
	0	0	7,5	30
	0	0	7,5	30
	0	0	7,5	30

Los resultados de estos ensayos realizados al azar se presentan en la Tabla 17.

TABLA 17. RESULTADOS OPTIMIZACION MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE

Ensayo #	Temp. °C	[H ₂ SO ₄] %	Malla #	pH	%Residuo Insol.	%Residuo Ac. Insol.	%MgO Ext.
1	65	5	10	2,60	11,80	34,50	92,47
2	65	7,5	30	6,00	10,89	26,15	92,20
3	65	4	30	6,41	9,53	26,70	93,26
4	65	5	50	6,43	10,61	26,65	92,16
5	65	10	50	6,32	9,86	29,50	93,37
6	65	11	30	6,39	9,31	30,60	93,06
7	65	7,5	30	6,30	9,38	29,56	93,64
8	65	10	10	6,12	10,46	28,60	92,40
9	65	7,5	30	6,30	10,74	27,55	92,15
10	65	7,5	60	6,20	10,70	36,50	93,43
11	65	7,5	30	6,34	10,56	28,15	92,59
12	65	10	10	5,90	11,50	31,65	92,44
13	65	7,5	30	6,50	10,55	25,95	92,96
14	65	7,5	4	1,25	26,43	43,20	74,09
15	65	11	30	6,40	10,31	27,00	92,67
16	65	10	50	6,30	10,41	30,30	93,46
17	65	5	50	6,50	10,29	25,25	93,03
18	65	4	30	6,40	9,35	29,65	93,67
19	65	5	10	2,50	13,22	27,75	91,00
20	65	7,5	60	6,41	10,65	38,65	94,08
21	65	7,5	4	1,53	22,70	34,95	75,63

TABLA 18. MATRIZ OPTIMIZACION RESULTADOS MAGNESITAS BOLIVAR - VALLE. [T = 65°C]

Ensayo	Variables		Variables Respuestas (% MgO Ext.)		Valor Promedio \bar{Y}
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₁	
1	-	-	92,47	91,00	91,74
a	+	-	92,44	92,40	92,42
b	-	+	92,16	93,03	92,60
ab	+	+	93,37	93,46	93,42
	∞	0	93,06	92,67	92,87
	-∞	0	93,26	93,67	93,47
	0	∞	93,43	94,08	93,76
	0	-∞	74,09	75,63	74,86
	0	0	92,20		
	0	0	93,64		
	0	0	92,15		
	0	0	92,59		
	0	0	92,96		

Después de obtener los resultados se procedió a plantear el modelo de primer orden de la siguiente forma:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2$$

Para obtener cada uno de los coeficientes (b_0 , b_1 , b_2) se utilizó el método Doolittle (8), para el cual hay que resolver el siguiente sistema:

			ΣXY
4	∅	∅	370,18
∅	4	∅	1,50
∅	∅	4	1,86

De donde:

$$b_0 = \frac{370,18}{4} = 92,545$$

$$b_1 = \frac{1,5}{4} = 0,375$$

$$b_2 = \frac{1,86}{4} = 0,465$$

Con estas constantes, el modelo lineal que se propone es el siguiente:

$$Y = 92,545 + 0,375X_1 + 0,465X_2$$

Para observar si el modelo se ajusta o no a un comportamiento lineal de los ensayos encontrados a nivel experimental, hay que efectuar un análisis de varianza:

TABLA 19. ANAVA MODELO LINEAL

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio
Suma bruta de cuadrados	34259,7404	4	
Debida a b_0	34258,3081	1	34258,3081
Debida a b_1	0,5625	1	0,5625
Debida a b_2	0,8649	1	0,8649
Residual	0,0049	1	0,0049
Desajuste	-1,45895	-7	0,2084
Error	1,46385	8	0,1830

TABLA 20. COMPROBACION MODELO LINEAL

X ₁	X ₂	Y calc.	Y exp.
-1	-1	91,71	91,74
+1	-1	92,46	92,42
-1	+1	92,64	92,60
+1	+1	93,39	93,42
1,4142	∅	93,08	92,87
-1,4142	∅	92,01	93,47
∅	1,4142	93,20	93,76
∅	1,4142	91,89	74,86

Cálculo del Cuadrado del Coeficiente de Determinación Múltiple R²

$$R^2 = \frac{\text{SC asociados a los } b_1}{\text{Suma Bruta de Cuadrados}} * 100 = \frac{34259,7355}{34259,7404} * 100 \quad R^2 = 99,99\%$$

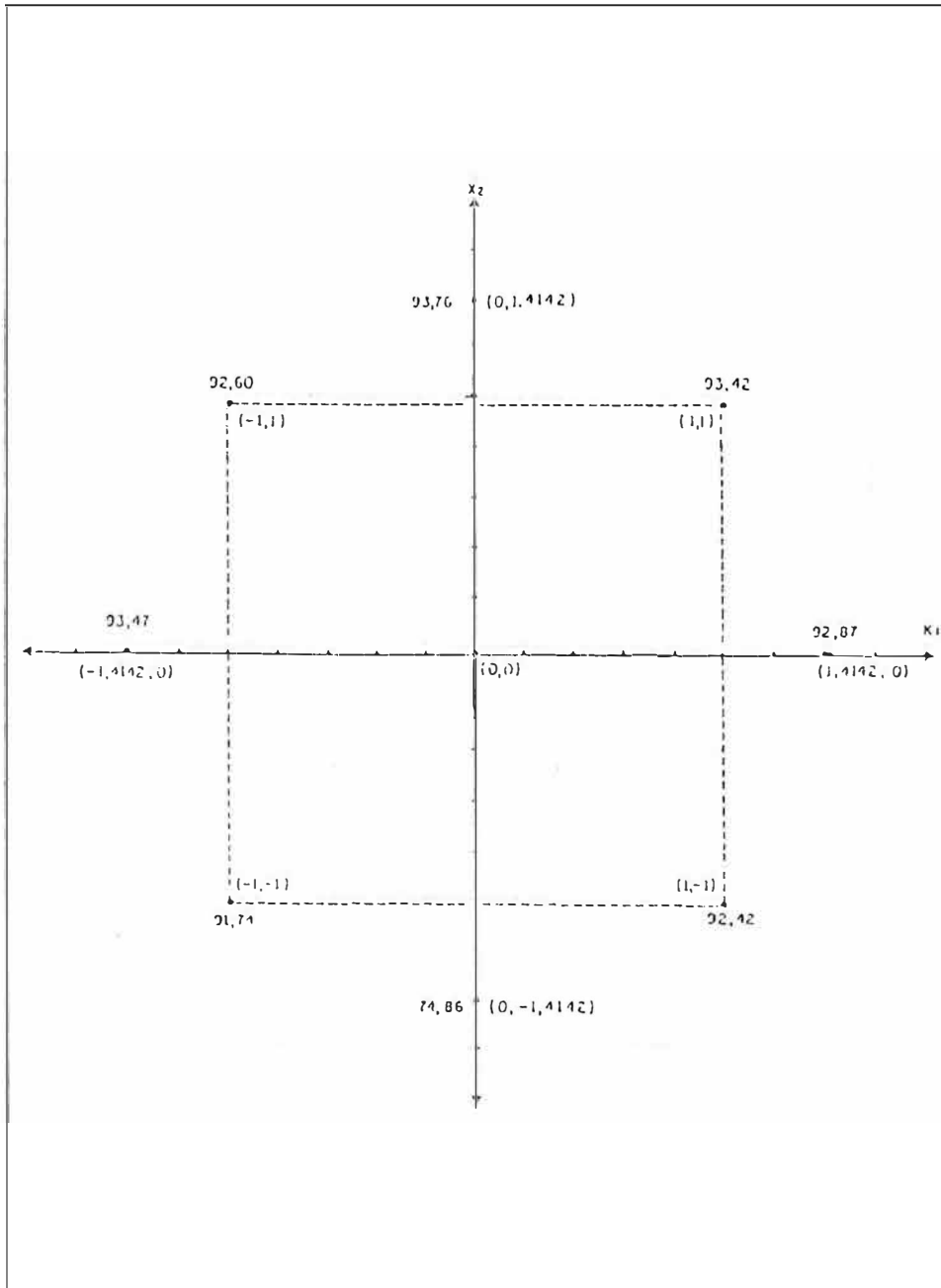
Lo cual quiere decir que la ecuación encontrada explica el 99,99% de variación de los datos con respecto al modelo, sin tener en cuenta los puntos estrella.

Para este caso se trató de encontrar un modelo lineal que cubriera todo el rango de experimentación (-1,4142 a 1,4142) sin mucho éxito, ya que éste método no permitió descartar el ensayo (∅ - 1,4142), el cual está muy alejado del valor promedio encontrado para los demás ensayos.

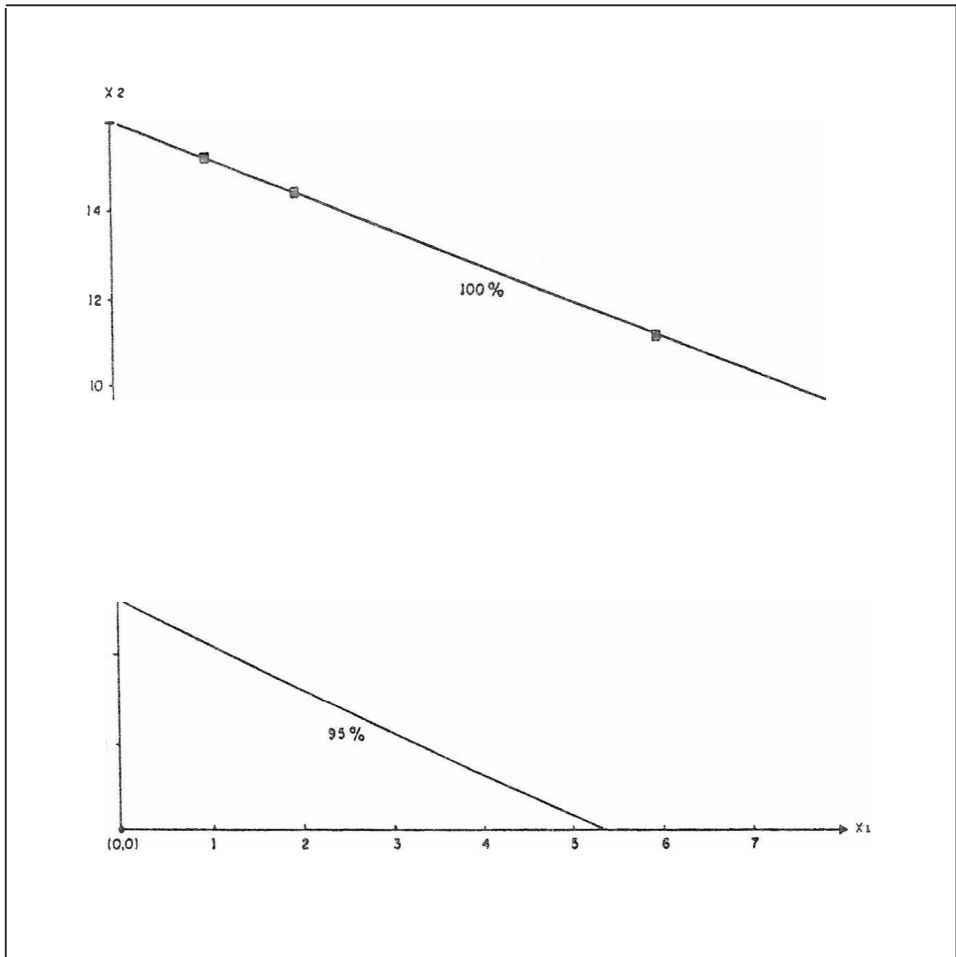
Como conclusión, del análisis de varianza se puede observar que al ser el cuadrado medio de la falta de ajuste muy cercano al del error experimental, la desviación de un comportamiento lineal es muy poca, y es poco probable que se correlacione con modelos de orden superior.

Con el fin de encontrar los mejores valores de respuesta para el tratamiento con la magnésita de Bolívar - Valle, se procedió a ubicar la zona del cuadrante en donde era más probable encontrar estos resultados.

A continuación se presenta la Gráfica 6, en la que se puede observar que el promedio de respuestas es ligeramente mayor para el primer cuadrante que para los demás; para comprobarlo se procedió a tomar el modelo matemático y a partir de él encontrar la zona con porcentaje de recuperación por encima del 95%, como se puede ver en la Gráfica 7.

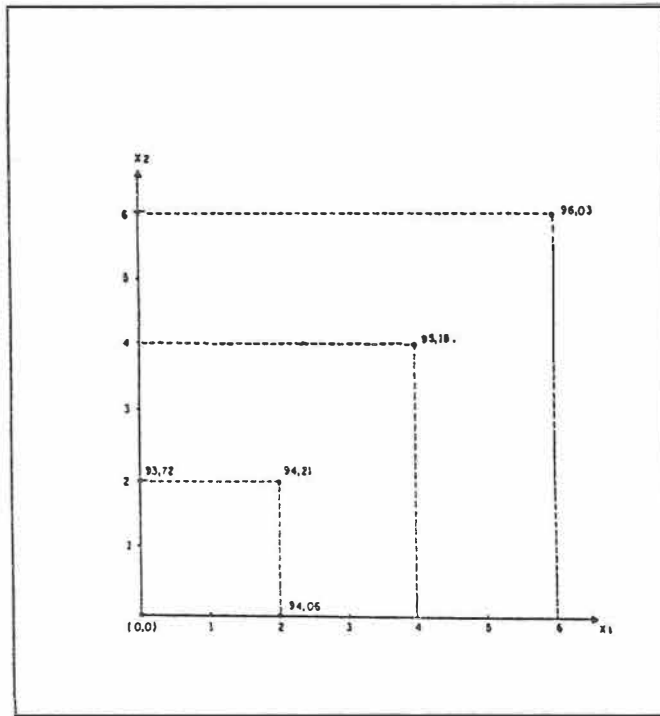


GRAFICA 6. Representación gráfica de los Resultados Optimización Magnesitas Bolívar-Valle



GRAFICA 7. Superficie de Respuesta Magnesitas Bolívar-Valle, Cuadrante I

Según el método estadístico hay una zona bastante amplia en donde es posible encontrar porcentajes de recuperación mayores que los hasta aquí reportados, por lo que se decidió utilizar el método gráfico simplex para determinar esta región óptima, partiendo del punto central para el primer cuadrante, y a su vez comprobar en éste el modelo lineal encontrado para el primer rango de trabajo.



GRAFICA 8. Representación Gráfica de los Resultados por el Método SIMPLEX
Magnesitas Bolívar - Valle

Se tomó la base del triángulo equilátero con un lado equivalente a 2, con el fin de explorar una región más amplia.

Los nuevos ensayos corresponden a las coordenadas

Ensayo	X1	X2	Y1	Y2	Y
	∅	∅			
1	∅	2	93,85	93,59	93,72
2	2	∅	94,15	93,97	94,06
3	2	2	94,21		94,21

De acuerdo con los resultados anteriormente expuestos, no se pudieron encontrar porcentajes de recuperación mayores al 94%, por lo que se decidió explorar en regiones más alejadas (4,4); (6,6)

4	4	4	95,28	95,01	95,15
5	6	6	96,15	95,91	96,03

Como se necesita un mayor consumo de ácido y moler más finamente para obtener porcentajes de recuperación mayores, se decidió primero confrontar los resultados obtenidos con el modelo lineal que se encontró anteriormente, con el fin de observar el comportamiento de esta ecuación en zonas alejadas del rango inicial para el cual fué determinado.

Estos valores se relacionan a continuación:

TABLA 21. COMPROBACION MODELO DE OPTIMIZACION

Ensayo	Y exp.	Y calc.
1	93,72	93,48
2	94,06	93,30
3	94,21	94,23
4	95,15	95,91
5	96,03	97,59

Y exp. = Valor de respuesta encontrada a nivel experimental.

Y calc. = Valor de respuesta determinado por el primer modelo lineal.

Como se observa en la tabla anterior, se pierde un poco la correlación con la ecuación previamente encontrada, por lo que se decidió plantear un nuevo modelo lineal con los resultados obtenidos:

TABLA 22. ENSAYOS NUEVO MODELO LINEAL

X ₀	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	\bar{Y}	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₁ X ₂
1	0	2	93,85	93,59	93,72	0	4	0
1	2	0	94,15	93,97	94,06	4	0	0
1	4	4	95,28	95,01	95,15	16	16	16
1	6	6	96,15	95,91	96,03	36	36	36
$\Sigma 4$	$\Sigma 12$	$\Sigma 12$				$\Sigma 56$	$\Sigma 56$	$\Sigma 52$

El procedimiento se presenta a continuación

1. Planteamiento de las ecuaciones:

$$\sum X_0 X_0 + \sum X_0 X_1 + \sum X_0 X_2 = \sum X_0 Y$$

$$\sum X_1 X_0 + \sum X_1 X_1 + \sum X_1 X_2 = \sum X_1 Y$$

$$\sum X_2 X_0 + \sum X_2 X_1 + \sum X_2 X_2 = \sum X_2 Y$$

2. Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$4b_0 + 12b_1 + 12b_2 = 378,96$$

$$12b_0 + 56b_1 + 52b_2 = 1144,90$$

$$12b_0 + 52b_1 + 56b_2 = 1144,22$$

3. Al resolver el sistema se tiene el siguiente modelo lineal:

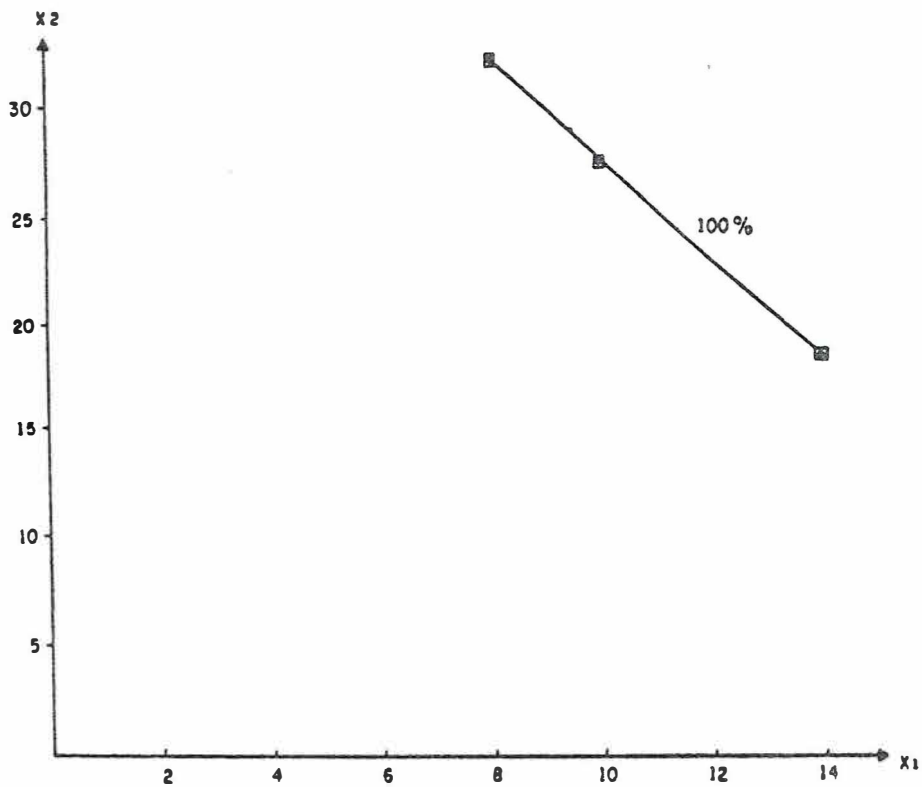
$$Y = 93,4602 + 0,2982 X_1 + 0,1284 X_2$$

Con un coeficiente de determinación de 99,74% para el rango : (Ver Gráfica 9)

$$2 < X_1 < 6$$

$$2 < X_2 < 6$$

Para los ensayos efectuados en la parte de optimización, la ecuación más adecuada es la planteada anteriormente, por lo que con este nuevo modelo se obtiene la siguiente superficie para un valor de respuesta del 100 %:



GRAFICA 9. Representación gráfica de la Superficie de Respuesta 2o. Modelo Lineal Magnesitas Bolívar - Valle

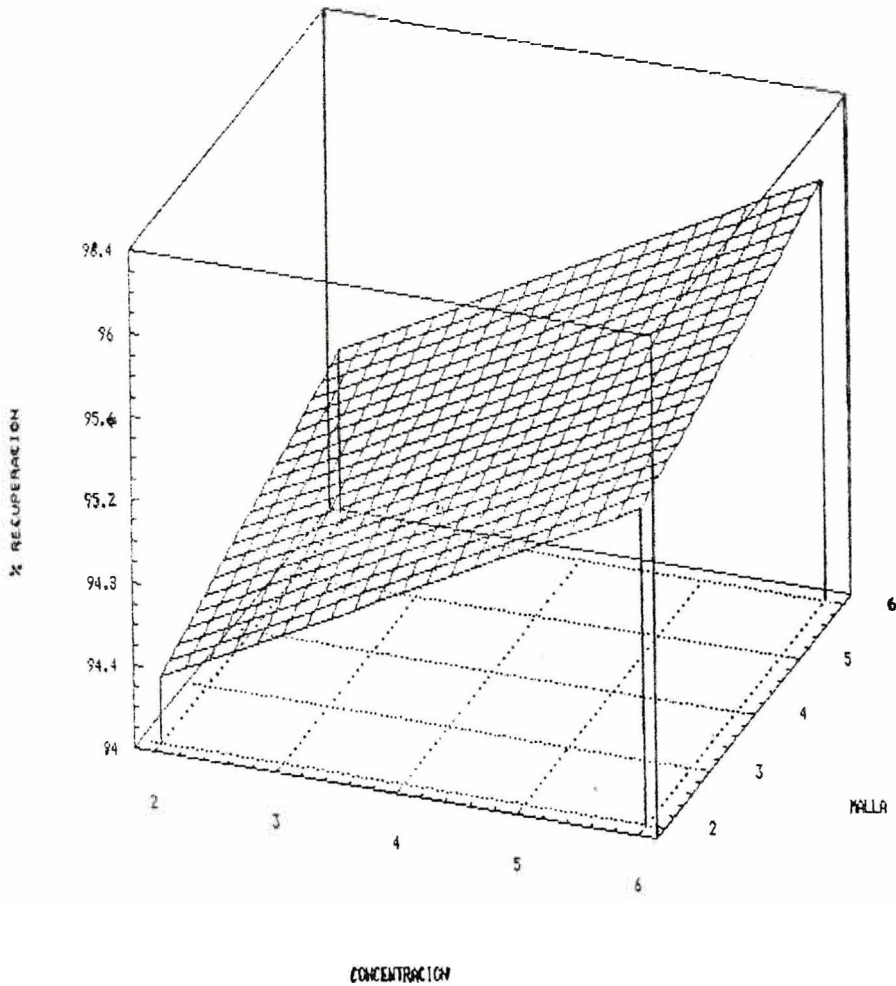
Con esta nueva superficie encontrada a nivel teórico, se decidió efectuar ensayos para observar y analizar el comportamiento con lo real. La discusión de estas gráficas se presenta a continuación.

Discusión Superficie de Respuesta Bolívar. El modelo matemático de las respuestas en la reacción de lixiviación de la magnesita de Bolívar - Valle no suministra una explicación del mecanismo del proceso, pero es una descripción matemática muy aproximada del comportamiento de los datos obtenidos. Por lo tanto, la interpretación de este modelo de lixiviación requiere de un cuidadoso análisis, el cual puede ser desarrollado mediante la representación gráfica de los resultados en dos y tres dimensiones.

Las gráficas de respuestas individuales en dos dimensiones de (Y) contra diferentes variables de proceso ($X_1, X_2 \dots X_n$) pueden detectar los efectos y las tendencias más importantes; sin embargo, las gráficas en tres dimensiones permiten la visualización de los efectos de las interacciones entre pares de variables del proceso sobre la variable de respuesta. Esto facilita el establecimiento de correlaciones dinámicas entre varios factores y la identificación de la ruta para la optimización del proceso.

La Gráfica 10 muestra una representación típica en tres dimensiones de la superficie de respuesta estimada para la lixiviación de la magnesita de Bolívar - Valle; esto es, el porcentaje de MgO extraído en función de la concentración de ácido sulfúrico y el tamaño de partícula (número de malla), para

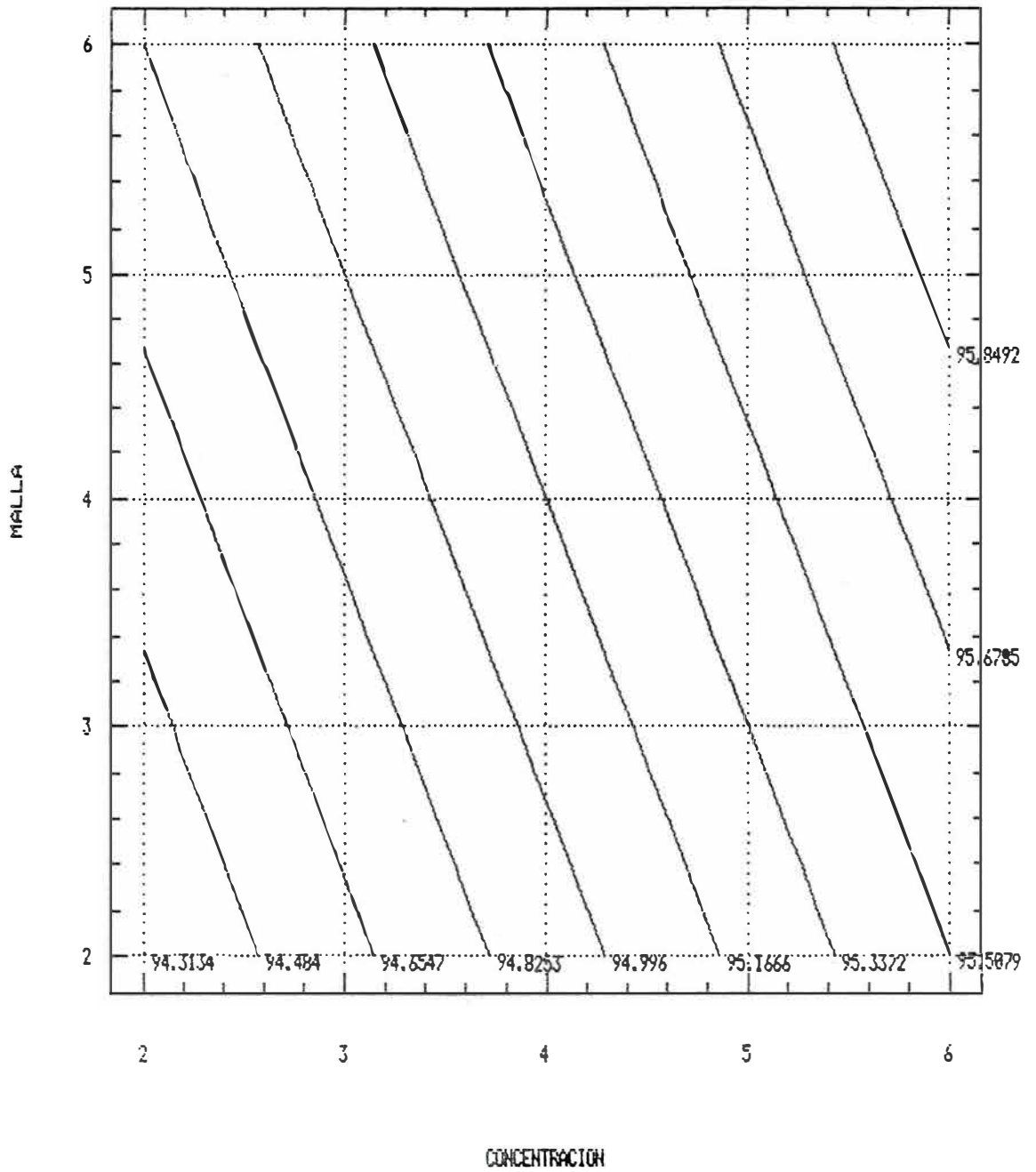
valores constantes de temperatura, velocidad de agitación y tiempo de reacción. La Gráfica 10 confirma la evidencia de la naturaleza planar de la superficie de respuesta y muestra un efecto de interacción importante entre la concentración de ácido y el tamaño de partícula, ya que el incremento en los niveles de estas dos variables de 2,2 a 6,6 aumenta el porcentaje de MgO extraído desde 94,35 hasta 95,85 % dentro de la región considerada en este estudio. Aparentemente la cinética y el equilibrio de la extracción de MgO se ven favorecidos al incrementar los niveles de las variables, ya que por una parte se aumenta el área superficial de las partículas de MgCO₃ al disminuir el tamaño de partícula y de otro lado se cuenta con suficiente cantidad de ácido sulfúrico para facilitar la disolución.



GRAFICA 10. Superficie de Respuesta Magnesitas Bolívar - Valle

La Gráfica 11, muestra un corte típico de la superficie de respuesta discutida anteriormente; aquí se observan las diferentes regiones en donde es posible obtener los porcentajes de extracción de MgO, señalados en este gráfico.

Las decisiones acerca de cuál región deberá ser seleccionada, dependen en general de las facilidades de operación con que se cuente y del estudio comparativo de costos del proceso.



GRAFICA 11. Corte de la Superficie de Respuesta Magnesitas Bolívar - Valle

De acuerdo con la forma de la línea recta, hay dos alternativas: Trabajar con valores bajos de concentración de ácido sulfúrico y un número de malla muy grande o trabajar con altas concentraciones de ácido y un número pequeño de malla. Se decidió trabajar con esta última alternativa, ya que con la primera el número de malla se salió de los límites de la serie Tyler. Los nuevos ensayos programados fueron los siguientes:

TABLA 23. RESULTADOS DISEÑO EXPERIMENTAL

[H ₂ SO ₄] %	# MALLA	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	\bar{Y}
51,25	230	17,5	10	96,71	96,48	96,60
45,75	325	15,4	15	95,97	96,09	95,03

Con estos resultados se puede concluir que por más que se incremente el número de malla y la concentración de ácido sulfúrico, no es posible aumentar en forma apreciable el porcentaje de recuperación; por lo tanto no vale la pena consumir ácido en altos niveles de concentración y moler muy finamente, lo cual conlleva a altos consumos de energía, para obtener un incremento en la respuesta de sólo una décima. Cuando se llevan a cabo lixiviaciones con reacción química es muy difícil obtener rendimientos por encima del 95%, ya que la presencia de inertes que reaccionan con el disolvente pueden enmascarar la acción de éste sobre el soluto a extraer, porque se cierran a nivel interno de las partículas los canales (capilares, espacios vacíos) por los cuales el soluto se difunde hacia el disolvente. Desde este punto de vista, se puede concluir que para la magnesita de Bolivalle el rendimiento de la reacción es del 95 %; por lo tanto es satisfactorio a nivel experimental de laboratorio trabajar con el siguiente rango: $2 < X_1 < 4$; $2 < X_2 < 4$, lo que equivale a decir que se recomienda trabajar en un rango de concentración de ácido sulfúrico entre 12,5 % y 17,5 % y un número de malla entre 70 y 100; con esto se asegura un bajo consumo de ácido y energía en la operación de molienda a una temperatura constante de 65°C.

Para la obtención del MgSO₄.7H₂O a nivel de laboratorio, se procedió a realizar la purificación y la cristalización de la solución proveniente de la lixiviación bajo las condiciones encontradas anteriormente en el diseño experimental.

La purificación consistió esencialmente en eliminar el exceso de hierro proveniente de la etapa de lixiviación, mediante calentamiento de la solución a 60°C, durante 30 minutos, con lo cual se logró flocular gran parte del hierro a pesar de que su contenido no era muy alto pero sí sobrepasaba los requerimientos de la norma ICONTEC I 794; el hierro floculado fué filtrado y el licor que contenía el MgSO₄ fué sometido a evaporación controlada, con el objeto de obtener el MgSO₄.7H₂O. Los cristales resultantes fueron caracterizados químicamente; los resultados se aprecian a continuación:

Magnesio (expresado como MgSO ₄)	99,10%
Pérdidas por calcinación (contenido de agua)	50,75%
Materia insoluble en agua	0,06%
Hierro (expresado como Fe ₂ O ₃)	0,04%

Aluminio (expresado como Al_2O_3)	0,06%
Plomo (expresado como PbO)	0,01%
pH Solución (1:20)	6,20

Estos parámetros serán la base para definir los ensayos a nivel piloto.

4.3.2. Optimización del Diseño Experimental, Magnesitas Santa Marta.

Para el diseño experimental de la magnesita de Santa Marta se procedió a hacer el mismo tratamiento matemático que para la de Bolívar (Valle) y los resultados se pueden observar a partir de la Tabla 24.

TABLA 24. MATRIZ DISEÑO EXPERIMENTAL MAGNESITAS SANTA MARTA

Ensayo	X_1	X_2	X_3	Temp. ° C (X_1)	[H_2SO_4 en %] (X_2)	Tamaño Part. (X_3)
1	-	-	-	55	7	20
a	+	-	-	65	7	20
b	-	+	-	55	13	20
ab	+	+	-	65	13	20
c	-	-	+	55	7	80
ac	+	-	+	65	7	80
bc	-	+	+	55	13	80
abc	+	+	+	65	13	80
0				60	10	50

Nota: -, + significan los niveles de cada variable; (-), en el valor inferior y (+), en el nivel superior.

TABLA 25. RESULTADOS DISEÑO EXPERIMENTAL MAGNESITAS SANTA MARTA

No. Ensayo	Temp. °C	[H ₂ SO ₄] %	Malla #	pH (2h)	R.A.I. (%)	% MgO Ext.	Ensayos
5	55	7	20	1,30	38,49	86,16	1
8	65	7	20	1,94	57,06	92,60	a
10	55	13	20	1,50	52,06	90,21	b
12	65	13	20	1,24	64,97	96,66	ab
2	55	7	80	1,94	39,64	80,59	c
13	65	7	80	6,40	41,32	81,13	ac
6	55	13	80	1,58	44,70	85,71	bc
3	65	13	80	2,66 3,10	48,26 48,10	87,33 87,60	abc
11	60	10	50	1,83	40,34	86,72	0
1	60	10	50	4,71 4,77	36,76 35,41	83,96 83,71	0
7	60	10	50	5,45	34,03	85,46	0
4	60	10	50	4,80	37,49	84,46	0
9	60	10	50	6,25	40,94	85,21	0
2	55	7	80	1,90	42,66	83,83	c
3	65	13	80	2,78	50,16	88,95	abc
5	55	7	20	1,24	48,84	90,21	1
6	55	13	80	1,46	48,30	83,02	bc
8	65	7	20	1,71	54,16	91,89	a
10	55	13,7	20	0,92	59,56	94,75	b
12	65	13,7	20	1,46	42,56	92,36	ab
13	65	7,26	80	3,09	63,84	92,72	ac
6	55	13,7	80	1,79	38,94	80,05	bc
3	65	13,7	80	5,80	41,02	81,40	abc
3	65	13,7	80	5,06	46,54	84,91	abc
6	55	13,7	80	1,74	38,98	80,05	bc
10	55	13,7	20	1,12	50,30	90,45	b
13	65	13,7	20	3,25	38,05	91,41	ab

En la Tabla 26 se presentan los resultados organizados según la matriz de experimentación.

TABLA 26. MATRIZ EXPERIMENTACION RESULTADOS MAGNESITAS SANTA MARTA

Ensayos	Variables			Variables Rta. % MgO Ext.	Variables de Rta. % MgO Ext.	Valor Promedio
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y
1	-	-	-	86,16	90,21	88,19
a	+	-	-	92,60	91,89	92,25
b	-	+	-	90,21	90,45	90,33
ab	+	+	-	91,41	92,36	91,89
c	-	-	+	80,59	83,83	82,21
ac	+	-	+	81,13	92,72	86,93
bc	-	+	+	85,71	83,02	84,37
abc	+	+	+	87,33	87,60	87,47

TABLA 27. DISEÑO EXPERIMENTAL LIXIVIACION MAGNESITAS SANTA MARTA

Y ₁	Y ₂	\bar{Y}	TRAT. T	COL. 1	COL. 2	COL. EFECTO	Suma de cuadrados	Y ₁ ²	Y ₂ ²
86,16	90,21	88,19	176,37	360,86	725,29	1407,22		7423,55	8137,84
92,60	91,89	92,25	184,49	364,43	681,93	26,86	45,09	8574,76	8443,77
90,21	90,45	90,33	180,66	338,27	11,23	8,96	5,02	8137,84	8181,20
91,41	92,36	91,89	183,77	343,66	15,63	-8,24	4,24	8355,79	8530,37
80,59	83,83	82,21	164,42	8,12	3,57	-43,36	117,51	6494,75	7027,47
81,13	92,72	86,93	173,85	3,11	5,39	4,40	1,21	6582,08	8597,00
85,71	83,02	84,37	168,73	9,43	-5,01	1,82	0,21	7346,20	6892,32
87,33	87,60	87,47	174,93	6,20	-3,23	1,78	0,20	7626,53	7673,76
695,14	712,08		1407,22					53268,76	63483,73

TABLA 28. ANAVA MAGNESITAS SANTA MARTA

	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F calculado	F tabulado	
					0,10	0,05
Bloques	196,08	1				
Tratamientos	173,48	7	24,78			
a	45,08	1	45,08	1,25*	3,59	5,59
b	5,02	1	5,02	0,14		
ab	4,24	1	4,24	0,12		
c	117,51	1	117,51	3,25*		
ac	1,21	1	1,21	0,03		
bc	0,85	1	0,85	0,02		
abc	0,77	1	0,77	0,02		
ERROR	252,86	7	36,12			
TOTAL	622,42	15				

Según el análisis de varianza, ningún tratamiento alcanza a ser significativo ni aún con un 90% de confianza, lo cual quiere decir que ningún cambio en el nivel de las variables, alcanza a afectar en forma significativa el valor de la respuesta y esto puede ser causado en parte por el error experimental.

Efectuando un análisis a los resultados de la Tabla 25, las variables que más afectan la respuesta son la temperatura (X_1) y el número de malla (X_3) siendo muy poco significativa la concentración de H_2SO_4 , por lo que se deja esta variable para la etapa de optimización en un valor constante del 7%, por razones de costos.

Optimización. Después de conocer cuáles son las variables que más afectan el proceso de lixiviación, se procedió a determinar los valores óptimos de cada una de ellas.

Entre todos los métodos, se seleccionó el Modelo Rotacional Central Compuesto, por ser el más adecuado para manejar los datos. Este modelo se basa en la determinación de otros ensayos mediante los puntos estrella (∞), dados por la relación $2^{K/4}$.

Para las dos variables que se van a optimizar $K = 2$, entonces $\infty = 1,4142$.

La matriz queda construída de la siguiente manera:

TABLA 29. MATRIZ OPTIMIZACION MAGNESITAS SANTA MARTA [(H₂SO₄) 7% CTE.]

Ensayo	Variable		[% H ₂ SO ₄] X_1	Tamaño Part. X_2
	X_1	X_2		
1	-	-	65	20
a	+	-	75	20
b	-	+	65	50
ab	+	+	75	50
	∞	0	77	35
	$-\infty$	0	63	35
	0	∞	70	60
	0	$-\infty$	70	16
	0	0	70	35
	0	0	70	35
	0	0	70	35
	0	0	70	35
	0	0	70	35

TABLA 30. RESULTADOS OPTIMIZACION MAGNESITAS SANTA MARTA
[(H₂SO₄) 7 %]

Ensayo No.	Temperatura °C	Malla #	% Residuo Insoluble	% Residuo Acido Insoluble	% MgO Ext.
1	65	20	14,69	72,06	97,17
2	63	35	16,06	74,50	97,38
3	75	20	14,45	73,20	97,49
4	77	35	15,89	74,05	97,56
5	75	50	23,07	70,60	96,28
5'	75	50	21,70	69,90	96,58
6	70	60	25,04	69,95	96,35
6'	70	60	26,47	68,65	95,68
7	65	50	22,09	67,20	95,67
8	70	16	14,96	61,35	95,41
1'	65	20	16,78	65,20	95,85
2'	63	35	17,74	68,00	96,49
3'	75	20	15,60	69,60	97,37
4'	77	35	19,39	68,15	96,93
5''	75	50	24,81	71,05	95,87
6''	70	60	20,06	71,90	96,43
7'	65	50	20,56	68,30	96,05
8'	70	16	14,17	56,80	95,22
0	70	35	16,41	71,72	97,32
0	70	35	16,48	73,85	97,55
0	70	35	17,59	69,61	96,70
0	70	35	16,41	72,40	9,24
0	70	35	16,78	71,40	97,01

Nota: n' y n» son duplicados y 0 es el punto central.

TABLA 31. MATRIZ OPTIMIZACION RESULTADOS MAGNESITAS SANTA MARTA

Ensayo	Variables		Variables Respuesta % MgO Ext.		Valor Promedio \bar{Y}
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	
1	-	-	97,17	95,85	96,51
a	+	-	97,49	97,37	97,43
b	-	+	95,67	96,07	95,86
ab	+	+	96,28	96,58	96,43
	∞	0	97,56	96,93	97,25
	- ∞	0	97,38	96,49	96,94
	0	∞	96,35	96,43	96,39
	0	- ∞	95,41	95,22	95,32
	0	0	97,32		
	0	0	97,55		
	0	0	96,70		
	0	0	97,24		
	0	0	97,01		

En vista de que no se ajustan los datos a un modelo lineal, entonces se propone uno de segundo orden dado por la siguiente expresión:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1X_2 + b_4X_1^2 + X b_5X_2^2$$

Para encontrar cada uno de los coeficientes se utilizan las siguientes ecuaciones, dadas por el método Doolittle:

$$b_0 = 0,2 (OY) - 0,1 \sum (i \ i \ y)$$

$$b_i = 0,125 (i \ Y)$$

$$b_{ii} = 0,125 (i \ i \ Y) + 0,01875 \sum (i \ i \ Y) - 0,1 (OY)$$

$$b_{ij} = 0,25 (i \ j \ Y)$$

Cada uno de los términos entre paréntesis se determinan al expandir la matriz principal.

TABLA 32. MODELO DE SEGUNDO ORDEN

X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	Y	Y calc2.	Y calc3.
1	-	-	+	+	+	96,51	96,20	96,47
1	+	-	-	+	+	97,43	96,86	97,24
1	-	+	-	+	+	95,86	96,34	95,67
1	+	+	+	+	+	96,43	96,65	96,39
1	1,4142	0	0	2	0	97,25	97,48	96,05
1	-1,4142	0	0	2	0	96,94	96,80	95,74
1	0	1,4142	0	0	2	96,39	95,87	97,52
1	0	-1,4142	0	0	2	95,32	95,92	96,45
1	0	0	0	0	0	97,32	97,16	97,164
1	0	0	0	0	0	97,55	97,16	97,164
1	0	0	0	0	0	96,70	97,16	97,164
1	0	0	0	0	0	97,24	97,16	97,164
1	0	0	0	0	0	97,01	97,16	97,164
1	1,9284	-0,1368	-0,35	774,61	769,61	1257,95		

Y real = 96,765

Y calc. = 96,76

$$\sum_{i=1}^K i i Y = i i Y = 774,61 + 769,65 = 1544,26$$

$$b_0 = 0,2 (1257,95) - 0,1 (1544,26) = 97,164$$

$$b_1 = 0,24105$$

$$b_2 = 0,0171$$

$$b_3 = b_{12} = -0,0875$$

$$b_4 = b_{11} = 0,125 (774,61) + 0,01875 (1544,26) - 0,1 (1257,95) = -0,01388$$

$$b_5 = b_{22} = 0,125 (769,65) + 0,01875 (1544,26) - 0,1 (1257,95) = -0,63388$$

Por lo tanto la ecuación queda expresada de la manera siguiente:

$$Y = 97,164 + 0,24105X_1 - 0,01710X_2 - 0,0875X_1X_2 - 0,01388 X_1^2 - 0,63388 + 0,01875 X_2^2$$

TABLA 33. ANAVA FORMULACION MODELO DE SEGUNDO ORDEN

	Suma de Cuadrados	θ
Términos 1er. orden	$\sum_{i=1}^K b_i (iY)$	K
Términos 2do. orden	$b_0 + \sum_{i=n}^K b_{i.i} (i i Y)$	$K(K+1)/2$
Error Experimental	$\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2$	Puntos. centrales $n_1 - 1$
TOTAL	$\sum_{i=N}^K Y_i^2 - G^2/N$	$n_1 + n_2 - 1$

TABLA 34. RESULTADOS MODELO DE SEGUNDO ORDEN

	S.C.	GL	CM = SC/GL
Términos 1er. orden	$0,24105(1,9284) - 0,1368 (- 0,017) = 0,467185$	2	0,23359
Términos 2do. orden	$97,164 + (-0,01388 \times 774,61 + (-0,63388 \times 769,65) = 401,4573$	3	
Error Exp.	0,4182	4	0,1046
Falta de Ajuste	406,02	3	135,339
TOTAL	$121731,1627 - 121726,0156 = 5,14713$	12	0,4289

Como el cuadrado medio de la falta de ajuste es mayor que el del error experimental, el modelo no se ajusta, por lo que hay que proponer uno de tercer orden.

Coefficiente de Correlación:

$$y = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y_{est.} - Y_{real})^2}{\sum (Y_{prom. real} - Y_{real})^2}} = \sqrt{\frac{3,3297}{5,147}} = 0,804$$

Modelo de tercer orden.

$$Y_0 = b_0 + b_1X_1 - b_2X_2 - b_3X_1X_2 + b_4 X_1^2 - b_5X_2^2 + b_5X_2^2 + b_5X_2^2 b_5X_2^2 b_5X_2^2$$

Para encontrar los valores de los coeficientes se expande el modelo por mínimos cuadrados de la siguiente manera:

- $13b_0 + b_1 \sum X_1 + b_2 \sum X_2 + b_3 \sum X_1^2 + b_4 \sum X_2^2 + b_5 \sum X_1 X_2 + b_6 \sum X_1^2 X_2 + b_7 \sum X_1 X_2^2 + b_8 \sum X_1^3 + b_9 \sum X_2^3 = \sum Y$
- $b_0 \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1 X_2 + b_3 \sum X_1^3 + b_4 \sum X_1 X_2^2 + b_5 \sum X_1^2 X_2 + b_6 \sum X_1^3 X_2 + b_7 \sum X_1^2 X_2^2 + b_8 \sum X_1^4 + b_9 \sum X_1 X_2^3 = \sum X_1 Y$
- $b_0 \sum X_2 + b_1 \sum X_1 X_2 + b_2 \sum X_2^2 + b_3 \sum X_1^2 X_2 + b_4 \sum X_2^3 + b_5 \sum X_1 X_2^2 + b_6 \sum X_1^2 X_2^2 + b_7 \sum X_1 X_2^3 + b_8 \sum X_1^3 X_2 + b_9 \sum X_2^4 = \sum Y X_2$

4. $b_0 \sum X_1^2 + b_1 \sum X_1^3 + b_2 \sum X_1^2 X_2 + b_3 \sum X_1^4 + b_4 \sum X_1^2 X_2^2 + b_5 \sum X_1^3 X_2 + b_6 \sum X_1^4 X_2 + b_7 \sum X_1^3 X_2^2 + b_8 \sum X_1^5 + b_9 \sum X_1^2 X_2^3 = \sum Y X_1^2$
5. $b_0 \sum X_2^2 + b_1 \sum X_1 X_2^2 + b_2 \sum X_2^3 + b_3 \sum X_1^2 X_2^2 + b_4 \sum X_2^4 + b_5 \sum X_1 X_2^3 + b_6 \sum X_1^2 X_2^3 + b_7 \sum X_1 X_2^4 + b_8 \sum X_1^3 X_2^2 + b_9 \sum X_2^5 = \sum Y X_2^2$
6. $b_0 \sum X_1 X_2 + b_1 \sum X_1^2 X_2 + b_2 \sum X_1 X_2^2 + b_3 \sum X_1^3 X_2 + b_4 \sum X_1 X_2^3 + b_5 \sum X_1^2 X_2^2 + b_6 \sum X_1^3 X_2^2 + b_7 \sum X_1^2 X_2^3 + b_8 \sum X_1^4 X_2 + b_9 \sum X_1 X_2^4 = \sum Y X_1 X_2$
7. $b_0 \sum X_1^2 X_2 + b_1 \sum X_1^3 X_2 + b_2 \sum X_1^2 X_2^2 + b_3 \sum X_1^4 X_2 + b_4 \sum X_1^2 X_2^3 + b_5 \sum X_1^3 X_2^2 + b_6 \sum X_1^4 X_2^2 + b_7 \sum X_1^3 X_2^3 + b_8 \sum X_2^5 X_2 + b_9 \sum X_1^2 X_2^4 = \sum X_1^2 X_2$
8. $b_0 \sum X_1 X_1^2 + b_1 \sum X_1^2 X_2^2 + b_2 \sum X_1 X_2^3 + b_3 \sum X_1^3 X_2^2 + b_4 \sum X_1 X_2^4 + b_5 \sum X_1^2 X_2^3 + b_6 \sum X_1^3 X_2^3 + b_7 \sum X_1^2 X_2^4 + b_8 \sum X_1^4 X_2^2 + b_9 \sum X_1 X_2^5 = \sum Y X_1 X_2^2$
9. $b_0 \sum X_2^3 + b_1 \sum X_1^4 + b_2 \sum X_2 X_1^3 + b_3 \sum X_1^5 + b_4 \sum X_1^3 X_2^2 + b_5 \sum X_1^4 X_2 + b_6 \sum X_1^5 X_2 + b_7 \sum X_1^4 X_2^2 + b_8 \sum X_1^6 + b_9 \sum X_1^3 X_2^3 = \sum Y X_1^3$
10. $b_0 \sum X_2^3 + b_1 \sum X_1 X_2^3 + b_2 \sum X_2^4 + b_3 \sum X_1^2 X_2^3 + b_4 \sum X_1^5 + b_5 \sum X_1 X_2^4 + b_6 \sum X_1^2 X_2^4 + b_7 \sum X_1 X_2^5 + b_8 \sum X_1^3 X_2^3 + b_9 \sum X_1^6 = \sum Y X_2^3$

Para encontrar los valores de los coeficientes hay que expandir la matriz principal, tal como se muestra en la tabla siguiente:

TABLA 35. MODELO DE TERCER ORDEN

X_0	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$	$X_1^2 X_2$	$X_1 X_2^2$	X_1^3	X_2^3
1	-	-	+	+	+	-	-	-	-
1	+	-	+	+	-	-	+	+	-
1	-	+	+	+	-	+	-	-	+
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1	1,4142	0	2	0	0	0	0	2,8283	0
1	-1,4142	0	2	0	0	0	0	-2,8283	0
1	0	1,4142	0	2	0	0	0	0	2,8283
1	0	-1,4142	0	2	0	0	0	0	-2,8283
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ø
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ø
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ø
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ø
1	0	0	0	0	0	0	0	0	ø
	$\sum 0$	$\sum 0$	$\sum 8$	$\sum 8$	0	ø	0	ø	ø

$X_1^3 X_2$	$X_1^3 X_2^2$	X_1^4	$X_1 X_2^3$	X_2^4	$X_1^4 X_2$	$X_1^3 X_2^2$	X_1^5	$X_1^2 X_2^3$	$X_1 X_2^4$
+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
-	+	+	-	+	-	+	+	-	+
-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
∅	∅	4	0	0	0	∅	5,657	0	0
∅	∅	4	0	0	0	∅	-5,657	0	0
∅	∅	0	0	4	0	∅	0	0	0
∅	∅	0	0	4	0	∅	0	0	0
∅	∅	0	0	0	0	∅	0	0	0
∅	∅	0	0	0	0	0	0	0	0
∅	0	0	0	0	0	0	0	0	0
∅	0	0	0	0	0	0	0	0	0
∅	0	0	0	0	0	0	0	0	0
∅	∑4	∑12	∅	∑12	∅	0	∅	∅	∅

X^5	$X_1^4 X_2^2$	$X_1^3 X_2^3$	$X_1^5 X_2$	$X_1^2 X_2^4$	$X_1 X_2^5$	X_1^6	X_2^6
-	+	+	+	+	+	+	+
-	+	-	-	+	-	+	+
+	+	-	-	+	-	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+
0	0	0	0	0	0	8	0
0	0	0	0	0	0	8	0
5,657	0	0	0	0	0	0	8
-5,657	0	0	0	0	0	0	8
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	∑4	∅	∅	4	∅	20	20

Al reemplazar los valores de las sumatorias, se obtienen las siguientes ecuaciones:

1. $13b_0 + 8b_3 + 8b_4 = 1257,95$
2. $8b_1 + 4b_7 + 12b_8 = 1,9284$
3. $8b_2 + 4b_6 + 12b_9 = -0,1368$
4. $8b_0 + 12b_3 + 4b_4 = 774,61$
5. $8b_0 + 4b_3 + 12b_4 = 769,65$
6. $4b_5 = -0,35$
7. $4b_2 + 4b_6 + 4b_9 = -1,65$
8. $4b_1 + 4b_7 + 4b_8 = 1,49$
9. $12b_1 + 4b_7 + 20b_8 = 2,3667$
10. $12b_2 + 4b_6 + 20b_9 = 1,3763$

Al resolver las ecuaciones se obtiene el siguiente modelo matemático:

$$Y = 97,1640 - 1,8904X_1 - 1,6217X_2 - 0,0139X_1X_2 - 0,6339X_1^2 - 0,0875X_2^2 + 0,0875X_2^2 - 0,2092X_1^2X_2 + 1,2629X_1X_2^2 + X_1^3 + X_2^3$$

El modelo matemático posee el siguiente coeficiente de correlación:

$$y = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y_{est.} - Y_{real})^2}{\sum (Y_{prom. real} - Y_{real})^2}} = \sqrt{\frac{4,6794}{5,147}} = 0,95$$

Al obtener un coeficiente de correlación ($Y = 0,95$), más cercano a la unidad, se toma el modelo de 3er. orden, como el más representativo del diseño experimental. Lo anterior se debe corroborar al comparar los valores de la respuesta obtenida al reemplazar los valores de X_1 y X_2 en el rango de trabajo, con los reales, determinados a partir de la experimentación.

El siguiente paso consiste en determinar los valores óptimos de X_1 y X_2 para lo cual se deriva la ecuación de tercer orden, con respecto a cada variable y se iguala a cero.

$$\frac{\delta Y}{\delta X_1} = 0 = -1,8904 - 0,0139X_2 - 1,2678X_1 + 0,4184X_1X_2 + 1,2629X_2^2 + 3X_1^2$$

$$\frac{\delta Y}{\delta X_2} = 0 = -1,6217 - 0,0139X_1 - 0,175X_2 + 0,2092X_1^2 + 2,5258X_1X_2 + 3X_2^2$$

Al despejar los valores X_1 y X_2 se encontraron los siguientes óptimos:

- | | | |
|----|---------------|----------------------------|
| 1. | $X_1 = -0,38$ | $X_1 = 60,5^\circ\text{C}$ |
| | $X_2 = 0,95$ | $X_2 = 29,95$ Malla 30 |
| 2. | $X_1 = 0,95$ | $X_1 = 94^\circ\text{C}$ |
| | $X_2 = 0,42$ | $X_2 =$ Malla 50 |

Por razones de costos de operación se decidió trabajar los ensayos de purificación y cristalización empleando la solución obtenida a las siguientes condiciones:

Temperatura = $60,5^\circ\text{C}$

Malla No. = 30

La metodología empleada en esta parte fué la misma que se utilizó para la magnesita de Bolívar - Valle.

Los resultados de los análisis químicos de caracterización del $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ obtenido se aprecian a continuación:

Magnesio (expresado como MgSO_4)	98,30%
Pérdidas por calcinación (contenido de agua)	50,35%
Hierro (expresado como Fe_2O_3)	0,12%
Potasio (expresado como K_2O)	0,01%
Sodio (expresado como Na_2O)	0,03%
pH Solución (1:20)	5,91

5. CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos, tanto en la caracterización química como en los ensayos de reactividad se puede decir que los yacimientos de Bolívar - Valle y Santa Marta presentan buenas características tecnológicas para ser usados en la obtención de sulfato de magnesio, grado técnico.
- El estudio de reactividad junto con los ensayos de liberación, mostraron que los tamaños de partícula más adecuados para realizar estudios de lixiviación fueron: malla 50 para la magnesita de Santa Marta y malla 30 para la de Bolívar - Valle.
- Las variables más importantes encontradas en el diseño de experimentos son, para Bolívar - Valle: la concentración de ácido sulfúrico y número de malla a temperatura constante. Para Santa Marta: el número de malla y la temperatura a concentración de ácido sulfúrico fija.
- De acuerdo con la optimización del diseño experimental, el modelo matemático representativo para la lixiviación de la magnesita de Santa Marta es de tercer orden mientras que para la magnesita de Bolívar - Valle es de primer orden.
- Las condiciones óptimas encontradas en la experimentación para la lixiviación de las magnesitas estudiadas fueron:

Bolívar - Valle:	Concentración de ácido sulfúrico:	12,5%
	Temperatura de Reacción:	65°C
	Malla #:	70
	Tiempo de Reacción:	2 horas

Santa Marta:	Concentración de ácido sulfúrico:	7%
	Temperatura de Reacción:	60,5°C
	Malla #:	30
	Tiempo de Reacción:	2 horas

La calidad de los sulfatos de magnesio obtenidos con las dos magnesitas estudiadas a escala de laboratorio, cumplen con los requerimientos de la norma ICONTEC 1794.

BIBLIOGRAFIA

- AREVALO V, 1993, *Factibilidad Técnico Económica de la Producción de Sulfato de Magnesio Heptahidratado a partir de Dolomita* (Tesis Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. 260 p, Santafé de Bogotá.
- CIRCULO DE LECTORES, 1980 *Diccionario Enciclopédico Lexix 22 - Mineralogía y Geología*, 1ª Edición, Círculo de Lectores S.A., 288 p, Valencia.
- COCHRAN W, 1964. *Experimental Designs*, 2nd Edition. John Wiley and Sons, 225 p, New York.
- ESCOBART A, 1991. *Génesis y Evaluación del Depósito de Magnesita de Bolívar, Valle, Cordillera Occidental de Colombia* (Tesis Geología). Universidad Nacional de Colombia, 50 p, Santafé de Bogotá.
- INGEOMINAS, 1987. *Recursos Minerales de Colombia*, Vol. I y II, 2ª edición. Publicaciones Geológicas Especiales, INGEOMINAS, 1112 p, Bogotá.
- MENDEZ R. LANDEAZABAL G. 1983, *Obtención de Oxido de Magnesio a partir de Dolomita* (Tesis Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. 140 p, Bogotá.
- PROSKE O. ENSSLIN F, 1966, *Toma de Muestras*, 2ª Edición, Aguilar S.A., 478 p, Madrid.
- TERKEL R, 1987. *Fundamentos de Metalurgia Extractiva*. 1ª Edición, editorial LIMUSA, 564 p, Mexico.
- VAN ARSDALE G, 1965. *Hidrometalurgia de Metales Comunes*, 1ª Edición, Mc. Graw Hill Co., 381 p, New York.