

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
SUBDIRECCION GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO Y CAPACITACION

EFFECTOS DE LAS OBRAS DE CONTROL DE TORRENTES EN LOS
NIVELES DE TURBIDEZ DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RIO
NIMA, COLOMBIA

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico Académico del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

por

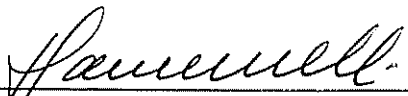
NESTOR RAUL VASQUEZ PEREZ

CATIE
Turrialba, Costa Rica
1990


Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE, y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

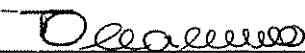
COMITE ASESOR:



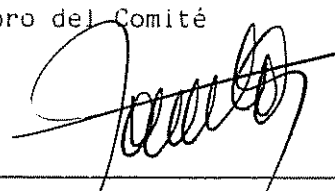
Jorge Faustino Manco, M. Sc.
Profesor Consejero



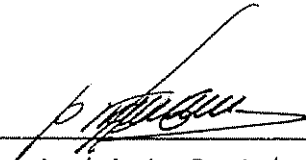
Enrique Blair Tórres, M. Sc.
Miembro del Comité



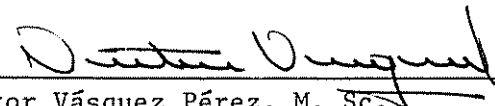
Rafael Oreamuno Vega, M. Sc.
Miembro del Comité

Miembro del Comité


Ramón Lastra Rodríguez, Ph.D.
Coordinador, Programa de Estudios de Posgrado



Dr. José Luis Parisí
Subdirector General Adjunto de Enseñanza



Néstor Vásquez Pérez, M. Sc.
Candidato

DEDICATORIA

A mis padres: Ninfa Pérez por su inmensa dedicación a los suyos, Raúl Vásquez por su ejemplo de honestidad y responsabilidad.

A mis hermanas: Fernando, María Eugenia, Beatriz, Nancy, Yolanda, Adriana y Monica.

A mis compañeras y compañeros de la promoción 88 - 90 por que hicieron mi estadía en CATIE más agradable.

A los miembros del comité: Jorge Faustino, Enrique Blair y Rafael Oreamuno, por que sin ellos hubiera sido imposible la realización del trabajo

A Luzelena Salazar por su comprensión y por alentarme a seguir adelante en mi superación y logro de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar sinceramente sus agradecimientos a las siguientes personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo:

Al señor Enrique Blair, miembro del comité, por su valiosa colaboración y apoyo durante mi estadía en CATIE.

Al señor Jorge Faustino, profesor consejero, por su gran interés y su siempre disposición de ayuda.

Al señor Rafael Oreamuno, miembro del comité, por sus sugerencias.

A la Corporación Autónoma Regional del Cauca, especialmente a los señores Lester Gutiérrez y Fernando Alvarez por su colaboración.

A todos los miembros del grupo de proyectos y de la sección de hidroclimatología por dedicar parte de su tiempo en facilitarme la información para el trabajo.

Al señor Jairo Arias, Jefe de la cuenca del río Nima por su valiosa información y amistad.

Al grupo de secretarias del proyecto de Cuencas del CATIE, y el personal de la biblioteca Orton, por su gran colaboración.

A mi hermana Nancy por haberme dejado compartir el calor de su hogar en estos dos años.

Muy especialmente a Luzelena Salazar quien me alentó a emprender esta labor y me proporcionó la confianza necesaria.

Al Gobierno de Holanda por el financiamiento para mi perfeccionamiento profesional.

A mis compañeras y compañeros de la promoción 88 - 90 por haber compartido tan grata experiencia.

A mis compañeros colombianos, Hector Libreros, José Pulido y M. León Escobar por su gran amistad

A toda la colonia Colombiana del CATIE por su acogida durante los dos años de estudios.

BIOGRAFIA

El autor nació en la ciudad de Cali, Colombia, el 31 de Agosto de 1961. Inició sus estudios primarios en 1969 en la Anexa Normal de Varones concluyéndolos en 1973.

Desde 1973 a 1979 desarrolla sus estudios secundarios en el colegio de Santa Librada de Cali y en Julio de 1979 ingresa a la Universidad del Valle donde realiza un año de estudios en matemática-física.

En 1981, ingresa a la Universidad del Cauca donde se gradúa como Ingeniero Civil en 1986.

A partir de Agosto de 1986 trabaja en entidades privadas y en Septiembre de 1988 ingresa al Programa de Estudios de Posgrado de CATIE, en el Departamento de Recursos Naturales Renovables, en el Area de Manejo de Cuencas Hidrográficas, obteniendo en Octubre de 1990 el grado de Magister Scientiae.

CONTENIDO

	Pagina
Resumen.	ix
Summary.	xi
Lista de cuadros.	xiii
Lista de figuras	xiv
1.- INTRODUCCION.	1
1.1.- Justificación del estudio.	2
1.2.- Area de estudio.	3
2.- REVISION DE LITERATURA.	7
2.1.- Consideraciones generales.	7
2.2.- Erosión, transporte de sedimentos y efectos producidos por los torrentes	9
2.3.- Propósitos del control de torrentes.	19
2.4.- La turbidez del agua y el uso del sulfato de aluminio en plantas de tratamiento.	24
3.- METODOLOGIA.	27
3.1.- Caracterización biofísica.	27
3.2.- Análisis de la problemática histórica del uso de la tierra.	28
3.3.- Análisis del impacto del uso de la tierra en la erosión de la cuenca.	29
3.4.- Análisis de la variación de la precipitación para antes y despues de la implementación de las obras.	29
3.5.- Análisis del impacto de la precipitación en la turbidez del agua.	29
3.6.- Análisis del impacto de la precipitación y la alteración de la turbidez sobre el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de agua.	30

3.7.-	Análisis del impacto económico de la alteración en el consumo de sulfato de aluminio atribuible a la implementación de las obras en el período 1979 - 1989.	31
4.-	ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION.	32
4.1.-	Elementos biofísicos.	32
4.1.1.-	Precipitación.	36
4.1.1.1.-	Distribución de las lluvias con la altitud.	41
4.1.2.-	Geología.	41
4.1.3.-	Geomorfología.	46
4.1.4.-	Suelos.	46
4.1.5.-	Hidrografía.	46
4.1.6.-	Distribución de la pendiente.	49
4.1.7.-	Zonas de vida.	51
4.2.-	Problemática del uso histórico de la tierra en la cuenca.	51
4.2.1.-	Capacidad de uso de los suelos.	51
4.2.2.-	Uso histórico de la tierra en la cuenca.	55
4.2.3.-	Sobreuso de la tierra en la cuenca.	62
4.3.-	Efecto del uso de la tierra en la cuenca.	62
4.3.1.-	Obras de control de erosión y torrentes en la cuenca.	68
4.4.-	Análisis de la variación de la precipitación para los dos períodos del estudio.	73
4.5.-	Análisis del impacto de la precipitación en la turbidez del agua.	73

4.6.- Análisis del impacto de la precipitación en la alteración de la turbidez sobre el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de agua.	83
4.7.- Análisis del impacto económico de la alteración en el consumo de sulfato de aluminio atribuible a la implementación de las obras en el período 1979 - 1989.	88
5.- CONCLUSIONES.	94
6.- RECOMENDACIONES.	97
7.- BIBLIOGRAFIA.	98
8.- ANEXO.	104
Descripción de las unidades y subunidades de la distribución de la capacidad de uso del suelo.	105

VASQUEZ P.,N.R. 1990. Efecto de las obras de control de torrentes en los niveles de turbidez del agua en la cuenca del río Nima, Colombia. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 108 p.

Palabras claves: Manejo de cuencas, torrente, turbidez, calidad de agua.

Efecto de las obras de control de torrentes en los niveles de turbidez del agua en la cuenca del río Nima, Colombia.

RESUMEN

La cuenca del río Nima ubicada en la vertiente occidental de la cordillera central de Colombia, en el departamento del Valle, comprende una superficie de 118 Km²; abastece de agua al acueducto del municipio de Palmira, produce entre 5000 y 7000 Kw-hora de energía en dos plantas hidroeléctricas y riega cerca de 3500 hectáreas de tierras agrícolas de primer orden, constituyéndose en un patrimonio de vital importancia para la región.

Las condiciones biofísicas de la cuenca caracterizadas por una precipitación promedio anual de 1830 mm, pendientes superiores al 50 % y una inestabilidad geológica, propiciada por el sistema de fallas Romeral, han hecho que el régimen de la cuenca sea torrencial.

Estas condiciones naturales, unido a una condición de sobreuso en una superficie del 34,2 %, han favorecido la aparición de fenómenos erosivos en la cuenca y el cauce del río y sus tributarios, de tal manera que en 1986 el 49 % de la superficie de la cuenca presenta signos de erosión en sus distintas fases.

La torrencialidad y la erosión son los desequilibrios biofísicos que mayor impacto negativo tienen sobre la

calidad del agua llegando a grados de turbidez de 25000 U.T. provocando aumento en los costos de tratamiento y a suspensiones del servicio de acueducto para la ciudad de Palmira lo que significa incomodidades para la población y pérdidas para la empresa.

Ante esta situación, la CVC a partir de 1979 empieza a implementar una serie de medidas mecánicas y biológicas que tienen como objetivo común reducir la turbidez del agua que llega a la planta de tratamiento del acueducto del municipio de Palmira.

El presente estudio demostró que las medidas tomadas desde 1979 cumplieron sus objetivos reduciendo en promedio un 33% los niveles de turbidez del agua, lo cual implica una reducción del 6,2% anual en el uso de químicos, principalmente sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$). De la misma manera, se demostró que el servicio de acueducto ha sido más estable al igual que hay una mejora en la calidad del agua que se suministra. Otros beneficios calificados son los relacionados con la disminución de la sedimentación en canales de irrigación, operación y mantenimiento de las plantas hidroeléctricas, recuperación de tierras, mejora en la calidad estética del área y el aprovechamiento e industrialización de la madera. Es opinión del Autor que los esfuerzos e investigaciones hechas por la CVC y otras organizaciones públicas y privadas han sido beneficiosos para lograr las metas propuestas, no obstante queda mucho por hacer.

VASQUEZ P., N.R. 1990. Assessment of the torrent control devices over the water turbidity levels in the Nima river watershed, Colombia. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 108 p.

Key words: Watershed management, torrent, turbidity, water quality.

Assessment of the torrent control devices over the water turbidity levels in the Nima river watershed, Colombia.

SUMMARY

The Nima river watershed (118 Km²), is located in the western side of Colombia, within the Valle province. It is the primary source of potable water for the city of Palmira (200.000 Inhabitants), produces some 7.000 Kw-Hr through two small hydroelectric power plants and irrigates approximately 3.500 Has of class I agricultural land. As such, the Nima river watershed is an invaluable resource for the area.

An annual precipitation of 1.830 mm/yr; an abrupt topography, with an average slope that exceeds 50% and a highly unstable geologic pattern, compose of a dense fault system (Romeral), characterizes the Nima river as a torrent stream.

In addition to these biophysical characteristics, 34,2% of the area is under intensive use, far exceeding its land use capacity. This situation promoted severe erosion problems, to the extend that in 1986, 49% of the area showed some signs of erosion.

This conditions have created a severe negative impact in the water quality, which has reach turbidity levels in the main stream over 25.000 T.U.; thus increasing the water treatment costs and generating greater inconveniences to the population and loses to the potable water agency.

It was this situation that promoted CVC to take an active roll in trying to mitigate such problems. Several mechanical and biological soil conservation/torrent control measures were taken, primarily oriented towards the reduction of the turbidity levels at the Palmira water treatment plant.

The present study, was able to proof that such measures taken since 1979, accomplished its objectives, reducing by 33% the average monthly turbidity levels in the stream, which in turn implied a 6,2% yearly reduction in the use of chemicals, primarily aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3$). It also demonstrated that since then, the water service has become more stable (up to 1989) and better water quality standards are provided to the system. Other benefits were assessed, such as those related to the sedimentation of irrigation channels, the operation and maintenance of the hydroelectric power plants, land reclamation, esthetic upgrade of the area and appropriate wood industrialization practices. It is the author's believe, that the efforts and investments provided by CVC and other government and private organizations were profitable and effective in attaining the target goals; even though, there is still quite a lot of work to carry out in the watershed.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N ^o	Página
1. Parámetros morfométricos de la cuenca superior del río Nima, Colombia.	33
2. Distribución de los materiales geológicos en la cuenca superior del río Nima, Colombia.	44
3. Distribución de subgrupos de suelos en la cuenca superior del río Nima, Colombia.	48
4. Distribución de las categorías de pendientes en la cuenca superior del río Nima, Colombia.	54
5. Distribución de la capacidad de uso de los suelos en la cuenca superior del río Nima, Colombia.	57
6. Cambios en el uso de la tierra. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	59
7. Areas críricas originadas por el sobreuso de la tierra en la cuenca superior del río Nima, Colombia.	63
8. Areas de erosión atribuibles a las distintas formas de sobreuso de la tierra en 1970 y 1986. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	69
9. Obras implementadas para el control de erosión y torrentes. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	70
10. Turbidez estimada y observada con y sin obras para el período 1979 - 1989. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	82
11. Disminución en el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento para el período 1979 - 1989 por la implementación de las obras. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	86
12. Ahorro producido por la disminución en el consumo de sulfato de aluminio en al planta de tratamiento de agua. Cuenca del río Nima, Colombia.	89

LISTA DE FIGURAS

Figura N ^o	Pagina
1. Localización. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	4
2. Variación de la capacidad de transporte de sedimento para una sección y un caudal dados en una corriente de agua.	14
3. Curva hipsométrica. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	34
4. Perfil longitudinal del río. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	35
5. Distribución anual de la precipitación, Cuenca superior del río Nima, Colombia.	38
6. Precipitación anual por estación. Polígonos de Thiessen. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	39
7. Isoyetas de precipitación anual. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	40
8. Mapa geológico. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	45
9. Mapa de suelos. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	47
10. Red de drenaje. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	50
11. Mapa de categorías de pendientes. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	52
12. Mapa topográfico. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	53
13. Mapa de capacidad de uso del suelo. Cuenca superior del río Nima Colombia.	56
14. Mapa de uso de la tierra. Cuenca superior del río Nima, Colombia. 1969.	60
15. Mapa de uso de la tierra. Cuenca superior del río Nima, Colombia. 1989.	61
16. Mapa de áreas críticas. Cuenca superior del río Nima, Colombia. 1969.	64

17. Mapa de áreas críticas. Cuenca superior del río Nima, Colombia. 1989.	65
18. Ubicación de las principales obras para el control de erosión y torrentes. Cuenca superior del río Nima. Colombia.	71
19. Precipitación promedia mensual. Cuenca superior del río Nima Colombia.	74
20. Variación mensual de la precipitación. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	75
21. Turbidez promedia mensual. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	76
22. Relación entre precipitación y turbidez para el período 1973 - 1978. Datos observados y curva de ajuste. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	78
23. Relación entre precipitación y turbidez para el período 1979 - 1989. Datos observados y curva de ajuste. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	79
24. Modelos de regresión entre precipitación y turbidez para ambos períodos del análisis. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	81
25. Consumo mensual de sulfato de aluminio por metro cúbico de agua tratada. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	84
26. Consumo mensual de cloro en al planta de tratamiento de agua. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	90
27. Turbidez del agua cruda y tratada frente al consumo de sulfato de aluminio. Cuenca superior del río Nima, Colombia.	92

1.- INTRODUCCION

En una cuenca hidrográfica, la explotación irracional de los recursos naturales, el uso inadecuado de la tierra, la ausencia de prácticas de conservación de suelos y aguas, la deforestación y el diseño e implantación inadecuada de diversas estructuras, entre otros factores, desencadenan una serie de procesos que generalmente comienzan con la alteración del ciclo hidrológico, continúa con la degradación de los suelos a través de diversos mecanismos erosivos y termina con el transporte y deposición de sedimentos. El impacto final de éste proceso, si bien deja una serie de efectos negativos en el lugar de origen, como la pérdida física o de fertilidad de los suelos, no son menos importantes que los efectos negativos en el lugar de depósito de los sedimentos, con graves consecuencias como la colmatación de embalses, pérdida de navegabilidad de los ríos, deterioro de lagos, bahías costeras y estuarios y además contaminación de las aguas (Leonard 1986).

Uno de los impactos más negativos del deterioro generalizado de una cuenca hidrográfica, como consecuencia de la alteración del régimen de caudales y el impacto del arrastre y depósito de sedimentos es la contaminación de aguas para consumo humano.

La acción torrencial del agua en las regiones tropicales, promueve generalmente procesos de erosión, transporte y deposición de materiales, avenidas e inundaciones de consecuencias catastróficas y una gran contaminación de aguas por el arrastre de sedimentos en suspensión originado, en gran parte por la falta de ordenación de los recursos de la cuenca (López Cadenas, 1988)

La calidad de las aguas está íntimamente ligada a las características geoquímicas del terreno, al uso que se hace del suelo en la cuenca y a las actividades del hombre (Branco, 1984). Así, el comportamiento de una vertiente está condicionado por la interrelación de muchos factores naturales y el efecto generado por la acción humana, los que en términos generales deberían mantener un equilibrio cuya resultante fuera un estado de regulación.

Los daños causados por los fenómenos torrenciales, están en estrecha relación con la densidad de población, las inversiones en infraestructura y en general con los niveles de desarrollo agrícola e industrial de las zonas de montaña. Las actividades del hombre y particularmente, el desarrollo de las zonas intermontanas y de planicies situadas aguas abajo de las cuencas en desequilibrio, cambian fundamentalmente el grado de incidencia del fenómeno torrencial.

Dentro de este contexto se a creído conveniente establecer la influencia que sobre el arrastre de sedimentos y la erosión ha tenido la implementación de obras para el control de los torrentes y la erosión en una cuenca y su impacto económico aguas abajo.

1.1.- Justificación del estudio

La cuenca del río Nima constituye un patrimonio de vital importancia de uno de los conglomerados humanos más importantes del departamento del Valle del Cauca, Colombia ya que sus recursos hídricos abastecen el acueducto de la ciudad de Palmira, del cual se beneficia una población de 200.000 habitantes, genera entre 5000 y 7000 Kw-hora en dos

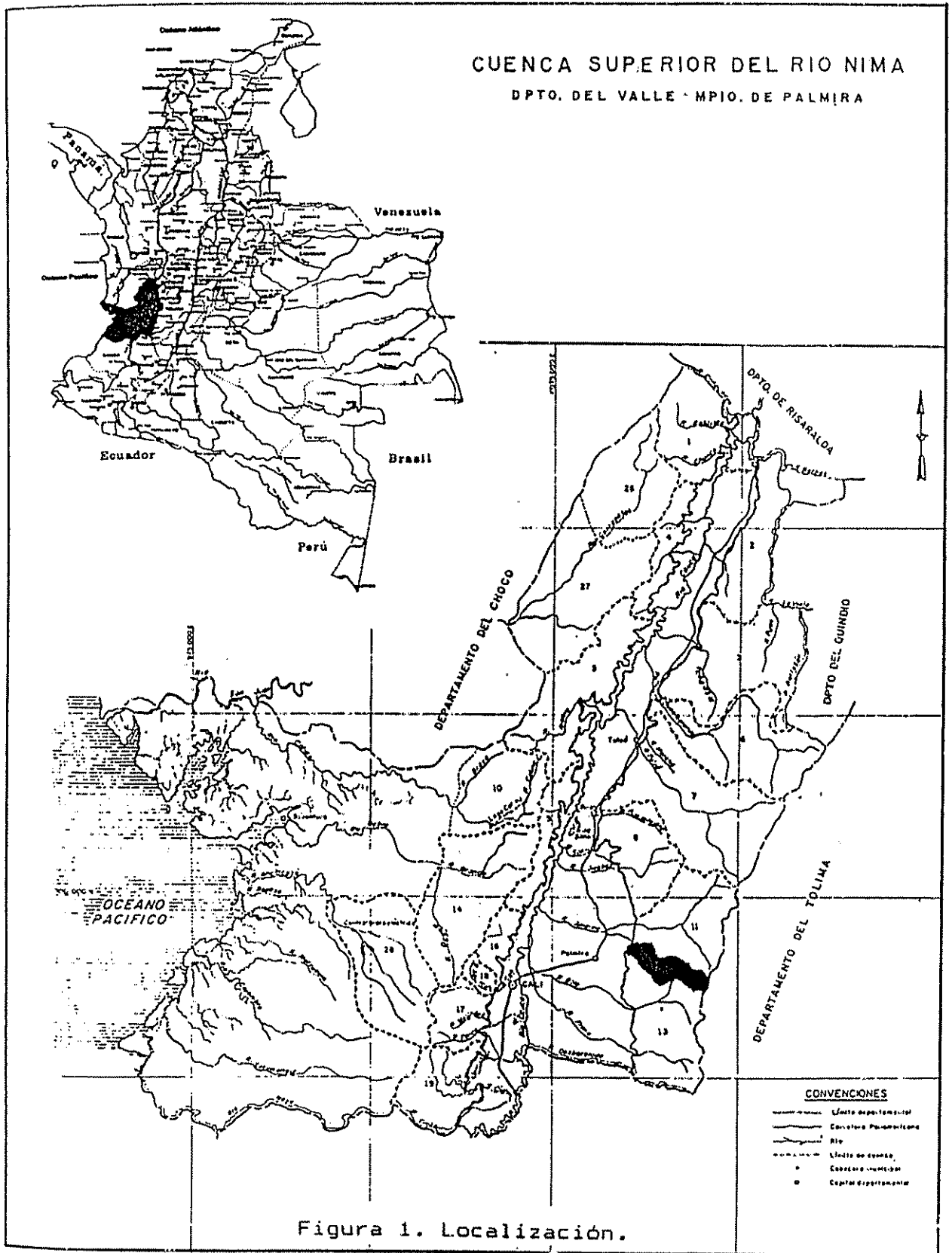
plantas hidroeléctricas y riegan cerca de 3000 hectáreas de tierras agrícolas de primer de ~~primer~~ orden.

No obstante, los recursos naturales de la cuenca han sufrido un proceso de degradación generado por el uso inadecuado que el hombre ha hecho de ellos: La deforestación, el pastoreo en pendiente, el mantenimiento deficiente de vías, mala ubicación de obras civiles y, en general, las formas inadecuadas de explotación han generado procesos de erosión crítica que sumado a las características torrenciales propiciaron un deterioro en el suministro de agua (Comité Protección y Mejoramiento, 1975).

La torrencialidad unida a la erosión constituyen el más grande desequilibrio biofísico de la cuenca del río Nima y es, al mismo tiempo, lo que mayor impacto negativo tiene sobre la calidad del agua y sobre los costos crecientes del tratamiento del agua para consumo humano, llegando a grados de 25000 unidades de turbidez (u.t.), lo que obliga a suspensiones del servicio de acueducto para la ciudad de Palmira, y en consecuencia significa serias incomodidades para la población y pérdidas para la Empresa dadas por menores ingresos por venta de agua, mayores costos de operación y mantenimiento y deterioro de la buena imagen ante la ciudadanía.

1.2.- Area de estudio

La cuenca del río Nima se encuentra ubicada en la vertiente occidental de la cordillera central de Colombia, en el departamento del Valle. Sus límites son: por el oriente con el departamento del Tolima, por el occidente con la planicie aluvial del río Cauca, por el Norte con la



cuenca del río Amaime y por el Sur con la cuenca del río Bolo.

De acuerdo a la planimetría del área estudiada, esta cubre una extensión de 11800 hectáreas, caracterizadas en su mayor parte por una pendiente pronunciada (70% con inclinaciones mayores del 50%) y escasez de tierras planas, semiplanas u onduladas.

La altitud de la cuenca fluctúa entre los 1100 y 4000 msnm., con temperaturas promedio anuales entre 8°C y 24°C (Comite de Protección y Mejoramiento, 1986).

Hipótesis

Las obras biológicas y mecánicas, como son la reforestación, regeneración natural, cultivos en contorno, asociación de cultivos, diques, espolones, trinchos, muros, gaviones y otros, han tenido un efecto positivo en la disminución de la producción, transporte y deposición de sedimentos en la cuenca del río Nima, dando como resultado una mejora en la calidad del agua para consumo humano, disminuyendo a su vez los costos del tratamiento.

Objetivos

- a) Analizar las relaciones del impacto de las obras para el control de torrentes, en función de los niveles de turbidez de las aguas en la cuenca superior del río Nima.
- b) Evaluar la relación entre la turbidez del agua y el consumo de sulfato de aluminio en la planta de

tratamiento, para establecer si se produce ahorro en el costo de tratamiento del agua.

- c) Establecer una calificación cualitativa de los impactos de estas obras, sobre la cuenca y su entorno.

2.- REVISION DE LITERATURA

2.1.- Consideraciones generales

La degradación ambiental de las cuencas hidrográficas comienza con la alteración del ciclo hidrológico al utilizarse las tierras en forma inadecuada (Hamilton y King, 1983)

Los ríos y cauces naturales, en zonas tropicales, se caracterizan por tener una variación grande de caudales, los cuales durante la época de fuertes lluvias pueden ser cientos de veces más grandes que durante la época seca, mientras que en zonas templadas la variación entre caudales máximos y mínimos es muchas veces menor. La situación ideal, es tener un río con caudal constante (Opdam, 1975).

Una razón importante, especialmente en cuencas menores, es la falta de capacidad suficientemente grande de almacenamiento, por lo cual, la precipitación frecuentemente escurre en forma instantánea, creando grandes crecientes de corta duración, seguidas por períodos de poco o nulo caudal (Opdam, 1975).

A nivel de cuenca hidrográfica, los procesos de erosión y sedimentación se interrelacionan dependiendo del material de arrastre, de tal forma que el aumento o distribución de la escorrentía superficial en las zonas altas, aumentará o disminuirá en correspondencia con la capacidad de desprendimiento del suelo y el transporte de sedimento en canales (Kirby y Morgan, 1983), fenómeno que está estrechamente ligado al uso de la tierra.

Slaymaker y Mc Pherson (1973), han establecido prácticas de uso de la tierra que tienen directa relación con la erosión y producción de sedimento. En el caso de las prácticas forestales, destacan la reforestación e intervenciones silvícolas, épocas de explotación y su relación con las épocas de crecidas, construcción de caminos forestales, distribución de canchas de carguio de trozas, quemas, repoblaciones artificiales y aplicación de herbicidas. En las prácticas agrícolas, aparecen relevantes: la época de la preparación de suelos, superficie y tipo de labranza, drenaje, disposición de los cultivos (especialmente si se diseñan en hileras), control mecánico o químico de malezas, manejo del pastoreo, riego y aradura en contorno.

El conjunto de factores ya señalados, que resultan de las diversas formas de uso de la tierra, tienen particular influencia sobre las tasas de meteorización y el arrastre de suelos (Strakov, 1967), erosión de riberas (Hammer, 1972) formación de cárcavas, flujos y deslizamientos (Heede, 1972), procesos que en definitiva determinan la producción de sedimentos en una cuenca (López y Blanco, 1968).

Se reconoce que el factor que más incide en el régimen de una cuenca, es el hombre que la habita. Si éste aprovecha la tierra adecuadamente, la cuenca mantendrá un régimen equilibrado en relación con sus condiciones naturales. Pero si el hombre, ya sea por necesidad o ignorancia, explota la tierra irracionalmente, agota los recursos existentes o los destruye con obras artificiales; el régimen de cada cuenca se tornará torrencial y en alto grado perjudicial para las partes bajas de la misma. Los efectos esperados pueden ser, sedimentación e inundaciones en invierno y escasez de agua en verano (Schrimpff y Durán, 1974).

2.2.- Erosión, transporte de sedimentos y efectos producidos por los torrentes.

La constitución geológica tiene una gran influencia en la formación de torrentes. Cuando las rocas son duras, de naturaleza poco propicia a la descomposición por los agentes atmosféricos, puede decirse que no hay torrentes. Si las rocas son blandas, fácilmente atacables por la erosión y de naturaleza adecuada a la disgregación por los agentes atmosféricos, entonces existe el riesgo de formación de torrentes, capaces de producir en un momento dado, grandes catástrofes; y en todo tiempo daños continuos y considerables (García 1962).

Torrentes son corrientes en terrenos montañosos, caracterizados por caudales muy desiguales y abundante transporte de material, que depositan en su tramo inferior. En general, su pendiente es elevada y en muchos puntos no difiere mucho del ángulo del talud natural del material de su lecho. El material procede de la socavación del cauce y de sus márgenes o de los materiales producto de la descomposición atmosférica de las rocas (Schoklitsch, 1935).

Gómez (1975), señala las investigaciones hechas por Smith y Wischmeier relacionadas con la longitud de la pendiente, la velocidad del agua de escorrentía y la pérdida de suelos. Los investigadores concluyeron que, "al aumentar cuatro veces la longitud de la pendiente, se duplica la velocidad del agua, su fuerza erosiva aumenta cuatro veces y la cantidad de material arrastrado aumenta 32 veces"; por el contrario, si se corta una pendiente en cuatro, la erosión disminuye 32 veces (Suárez, 1986).

De ésta manera, en condiciones de fuertes pendientes, el agua de lluvia escurre fácilmente en forma laminar o

concentrada, formando una red intensa de canales verticales que a su vez transportan el suelo, dejando al descubierto superficies rocosas. Se disminuye el tiempo de concentración de las aguas, propiciando que una corriente se torne torrencial. El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda la gota de lluvia caída en el punto más alejado para pasar por la estación de referencia, es una especie de constante física de la cuenca (Suárez, 1986).

A consecuencia de la gran pendiente de los torrentes, caudales relativamente pequeños ponen en movimiento grandes cantidades de sedimentos; en este caso no influye decididamente la fuerza de arrastre del agua, esta desempeña tan solo el papel de lubricante entre el suelo y los sedimentos que descienden hacia el valle. No puede decirse entonces que hay un transporte de sedimentos debido a la fuerza de arrastre de las aguas, sino solamente un deslizamiento de estos o avalanchas (Schoklitsch, 1961).

Para incorporar la variable vegetación, en este análisis, se puede considerar, que al caer la lluvia sobre una masa forestal, la primera influencia de ésta es la intercepción. Las variables asociadas de importancia son: el clima, humedad atmosférica, viento, temperatura, cantidad, intensidad y duración de las lluvias y la radiación solar (Zambrana, 1975), además del tipo de cubierta vegetal, en que es determinante la edad y densidad (Hewlett, 1969). La vegetación también ejerce una considerable influencia en la evaporación desde el suelo. La tasa de evaporación es controlada por el clima y modificada parcialmente por algunas características de la superficie evaporante y las características fisiológicas de la cobertura vegetal (Penman, 1965).

La escorrentía es retardada por la cobertura vegetal, no solo por una intercepción mayor, sino por el efecto

mecánico de aumento de la rugosidad; por la presencia de troncos y hojarasca (Murillo, 1978), que hace que el tiempo de concentración de las aguas sea mayor, evitando así las crecidas súbitas (García, 1962). La escorrentía superficial es un componente del ciclo hidrológico que se encuentra afectado por el uso de la tierra, las prácticas de manejo y la fisiografía en cuanto a pendiente y elevación (Mojica, 1967), además del clima (Lull y Sopper, 1965).

Hacia 1929 Bates y Henry inician estudios en la cuenca Wagon Wheel Gap, Estados Unidos (Slaymaker y Mc Pherson, 1973), en que se comparó una cuenca forestada con otra a la que se le eliminó totalmente la vegetación notándose un espectacular aumento en la escorrentía. En Estados Unidos, Estado de Carolina del Norte, los experimentos más completos y avanzados se llevan a cabo desde 1941 en el Coweeta Hydrologic Laboratory. Particularmente los estudios en la cuenca 17 han sido concluyentes en demostrar que la eliminación de la vegetación provoca significativos aumentos del caudal, hasta en un 60% al primer año de la eliminación de la vegetación (Gutiérrez, 1988). En este mismo tipo de experimentos, Nakano (1965), en estudios hechos en Japón, en cuencas que presentaban suelos de origen volcánico y graníticos con pendientes entre 26% y 36% concluyó que la remoción de la vegetación forestal incrementó la escorrentía anual de 8% a 24%, la escorrentía directa de 25% a 28% y el caudal pico de 69% a 114%, puesto que los caudales máximos después de la tala rasa del bosque aumentan o decrecen de acuerdo con la intensidad de la lluvia y la humedad antecedente del suelo. Las tormentas de intensidades de 20 a 30 mm/hora, son la causa directa del incremento de los caudales máximos.

La cubierta vegetal, es muy significativa en cuanto al control de arrastres sólidos, tanto en suspensión como en arrastre, ya que la fijación del suelo por las raíces y el

evitar que la lluvia golpee y circule en el manto, modifica las condiciones de estabilidad de las vertientes y la intercepción dificulta el recorrido de las partículas de suelo por la escorrentía; esto siempre y cuando se trate de pendientes moderadas. En altas pendientes y sobre rocas deleznales la vegetación contribuye, por el contrario, a su destrucción por una meteorización acelerada y un mayor grado de saturación (Murillo, 1978).

En cuanto al régimen de lluvia, como en las regiones húmedas tropicales de América Central y del Caribe, con precipitaciones durante todo el año, se puede clasificar como torrencial. Este rasgo y las características morfológicas de las cuencas, influyen en crecidas rápidas e inundaciones devastadoras. En un torrente originado por una tormenta tropical, la forma del hidrograma y el valor registrado durante el máximo flujo depende principalmente de la intensidad, duración y distribución de la lluvia y de las características de la cuenca (Díaz, 1983).

Estimaciones del caudal de crecidas, pueden hacerse usando métodos hidráulicos o hidrológicos, basados en la intensidad de la precipitación o la cantidad de precipitación en 24 horas. Pero no siempre es posible usar métodos convencionales para medir el caudal de los torrentes, debido a la alta velocidad de las aguas y el daño causado por la carga de material arrastrado.

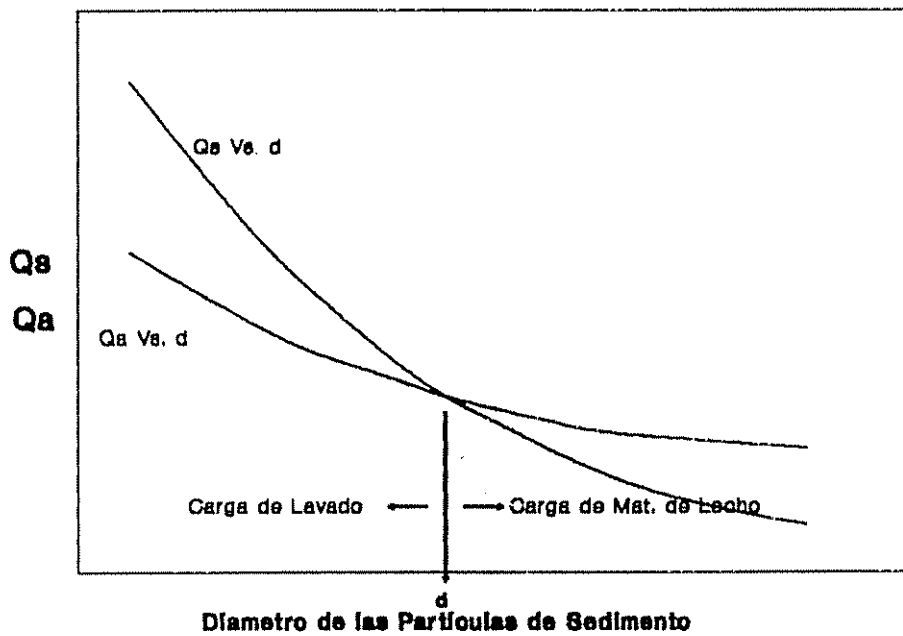
Desastres naturales causados por crecientes, son obstáculos serios para el desarrollo económico y social. Sin embargo, en muchos casos las respuestas a estos desastres han sido únicamente la de acometer medidas de rescate y emergencia. Ante tales desastres es posible realizar trabajos de rectificación de cauces y embalses de regulación; no obstante se trata de obras muy costosas. Medidas no estructurales, como la planeación y prevención y

el uso de mapas de inundación pueden tener buenos resultados (Díaz, 1983).

La variabilidad del régimen torrencial y la magnitud de las precipitaciones, en ciertas épocas del año, causan inundaciones, en otras épocas se torna escasa; reduciéndose a volúmenes insignificantes o nulos. Esta variación en el régimen hidrológico de las cuencas, marcha estrechamente relacionada con la calidad de las aguas, ya que el recurso en época de avenida tendrá una turbidez elevada, por el gran arrastre de sedimentos (Faustino, 1985).

En relación al transporte de sedimentos, se considera que; el material producido por los fenómenos erosivos es integrado a la cuenca hidrográfica, mediante la red de drenaje, y transportados al cauce del río por la acción de la escorrentía (Espinoza, 1985).

El transporte de material sólido por un río está controlado por dos funciones básicas inherentes al sistema de la cuenca del río: Una de las funciones indica la cantidad de material disponible para transporte y la otra indica la capacidad del sistema hidráulico para transportar el material. En forma simplificada, para un flujo y una localización dadas, estas funciones dependen del diámetro de las partículas de sedimento tal como se muestra en la figura 2. Las dos funciones deben cruzarse en algún diámetro d_s , que separa la denominada carga lavada o material fino para tamaños menores de d_s , y carga gruesa o material de lecho, para tamaños mayores. El transporte real de sedimento estará controlado por la función de disponibilidad para el rango de la carga lavada y por la función de capacidad de transporte en el rango de material de lecho (Villegas, 1982).



Q_s : Caudal de transporte de material sólido del río.

Q_a : Volumen de abastecimiento de material por unidad de tiempo

Figura 2. Variación de la capacidad de transporte de sedimentos para una sección y un caudal dados en una corriente de agua.

Cualquier obra que afecte el transporte de sedimentos, modifica la capacidad de transporte, incluyendo cambios en los procesos de sedimentación y erosión que ocurren en el tramo de influencia de las obras (Silva, 1985).

Cuando se presenta una creciente, la capacidad de transporte del río aumenta, pero el transporte real depende de la duración de la escorrentía superficial directa, del área donde se haya producido el aguacero causante de la creciente y de las características del sedimento que alcance a llegar hasta el río. Esto implica que la carga en suspensión no es función única del caudal, sino que depende además de la erosión pluvial de la cuenca.

Si el río puede transportar todo el material que le es aportado por la cuenca, se tiene un proceso de degradación del cauce (López y Blanco, 1968), puesto que éste tenderá a erosionar el cauce en busca del equilibrio energético del transporte de materiales (Strahler, 1983). Es posible que la corriente de agua tenga una menor capacidad de transporte de materiales que lo aportado por la cuenca, de tal forma que se tendrá un proceso de agradación, y el río tenderá a depositar materiales en su cauce (Espinoza, 1985).

El transporte de sedimentos por corrientes de agua comenzó a estudiarse a fines del siglo XIX, por el científico francés P.F.D. Du Boys (Graff, 1984) cuyos esfuerzos se concentraron en determinar una relación cuantitativa, expresada como tasa de transporte de una corriente en función de dos parámetros, flujo de transporte versus material transportado, por lo cual la fórmula de la tasa de transporte fue una simple expresión algebraica (Yalín, 1973).

Según Quintero (1985), el establecimiento de ecuaciones de transporte de material sólido dentro de un campo de

flujo, requiere de la definición de un estado de equilibrio morfológico dentro del mismo, en el cual todo material removido del lecho móvil debe ser repuesto por fuentes de material externo al volumen de control considerado. Sólo de esta manera es posible establecer una relación funcional para el flujo permanente, puesto que de lo contrario debe sufrir cambios y con ellos los parámetros hidráulicos del campo de flujo.

La investigación ha sido profusa en esta materia, existiendo dos enfoques básicos para definir relaciones cuantitativas del transporte de material por una corriente. El primero intenta definir el transporte de materiales por el enfoque bidimensional, que especifica una fase líquida, el material en suspensión y una fase sólida, el material de arrastre. Este enfoque contempla siete parámetros independientes, como son la densidad del líquido, viscosidad, peso específico del material del lecho, diámetro representativo del material del lecho, densidad del líquido con sedimentos, profundidad de la corriente y la velocidad del flujo. La tendencia actual de este enfoque es relacionar estos parámetros, por medio de la construcción de una familia de superficies que definan la tasa de transporte de material por una corriente (Yalin, 1973 y Mahmood, 1987).

Un segundo enfoque lo constituye el criterio probabilístico, que considera el transporte de materiales por una corriente, como un fenómeno aleatorio en su naturaleza, de manera tal, que el material que conforma la carga de fondo sigue también una relación probabilística. Con este enfoque, Gessler ha reemplazado la curva de Shields, por una familia de curvas para determinar la tasa de transporte.

Villegas (1.982), dice que la función de disponibilidad de material sólido no depende de las características

hidráulicas del río y de su cauce, sino de las funciones geológicas, del suelo, vegetación de la cuenca, de las lluvias y otros fenómenos que la afectan.

En consecuencia no pueden hacerse cálculos teóricos del transporte de sedimento fino aplicando fórmulas o métodos basados exclusivamente en la mecánica de fluidos, sino que se requiere ejecutar numerosas medidas en el campo para obtener una evaluación adecuada de la función.

En el caso de material de lecho, si es posible aplicar métodos basados en la mecánica de fluidos para calcular el transporte de material; sin embargo, también hay limitaciones importantes en los procedimientos por que aún no se han resuelto suficientemente bien problemas tales como: el rango de aplicabilidad y condiciones en que debe utilizarse un método, dado los efectos del flujo secundario del río; la influencia de la granulometría del material de lecho, especialmente cuando es bimodal o trimodal; el efecto del acorazamiento de la superficie del cauce y la importancia del material fino (Villegas, 1982).

Para la determinación práctica de la tasa de transporte se recomienda la medición periódica de la concentración del sedimento en suspensión y el arrastre de material de fondo, que es estimada en muchos casos como porcentaje del sedimento en suspensión (Linsley, 1979).

La producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica y el transporte de los mismos por el río y sus afluentes son algunos de los procesos fundamentales en la evolución del paisaje de la cuenca y como tales, constituyen aspectos íntimamente ligados con los estudios de geomorfología y geología.

El principal efecto de los torrentes es la erosión fluvial de muchos tipos (en canales, laderas, etc.), movimiento en masas (derrumbes, hundimientos, deslizamientos), sedimentación e inundaciones (Hattinger, 1976).

Los daños generados por los torrentes y producidos en las partes altas de las cuencas son debidos a la denudación mientras que los del valle son generalmente consecuencia directa del depósito (García, 1962).

La denudación del terreno causada por las aguas que corren por su superficie, cuando esta no se encuentra cubierta por una capa vegetal capaz de suministrarle una protección eficaz, es el daño principal en la parte más alta de la cuenca de un torrente. Este proceso hace que las laderas se vuelvan movedizas e inestables, atacadas cada vez con más intensidad por la acción erosiva de las aguas hasta formar cárcavas y dejar al descubierto la roca viva. Las tierras de labor o de pastos quedan así completamente inutilizadas para el cultivo y explotación (García, 1962).

Los daños producidos en las partes altas de las cuencas, sea en la cuenca de recepción o en la garganta, consisten en la desaparición de la tierra vegetal, substrayendo así el potencial de cultivo de extensiones de tierra cada vez mayores, con detrimento de la producción agrícola y ganadera. Los daños causados en los valles son debidos, en su inmensa mayoría, al depósito de los materiales. Las divagaciones en el lecho de deyección y los represamientos causantes de grandes inundaciones, así como la elevación del lecho de los ríos son debidos a los aludidos depósitos. En el momento en que el arrastre de sedimento disminuya, el torrente comenzará a encajarse en su lecho de deyección, realizando un trabajo de erosión. En

esta etapa es necesario realizar, un encausamiento adecuado (García, 1962).

2.3.- Propósitos del control de torrentes.

La cantidad de sedimentos que arrastran los cauces de agua depende principalmente de la erosión y del movimiento de masas. El combate a estos fenómenos es el elemento más importante en el control. En general, el control de torrentes puede ser definido como un sistema que incluye medidas ingenieriles y biológicas llevadas a cabo en la cuenca torrencial, así como un control del régimen hidrológico con lo cual se provee protección contra la erosión, el movimiento de masas y la escorrentía (Hattinger, 1976).

El propósito principal de la ingeniería de torrentes es la de prevenir la acción destructiva de las corrientes de agua, de los sedimentos del cauce y las pendientes (Mamak, 1964), fijando el terreno en la cuenca, para así regularizar el movimiento de materiales (Schoklitsch, 1935).

El ímpetu de las corrientes de los ríos de montaña, excava las orillas y promueve el deslizamiento de laderas causando daños a la propiedad y sus moradores. Luego, uno de los objetivos es la regularización y uniformidad de la tasa de escorrentía, para la estabilización del cauce (Mamak, 1964).

El canal de un torrente debe ser regulado para mantener el mismo transporte de aguas y sedimento sin erosión del fondo ni de las márgenes (Mamak, 1964). Una completa interrupción del transporte de sedimentos, sin embargo, no debe considerarse como el objetivo, puesto que aparte de que es prácticamente imposible el conseguirlo, producirá

transtornos en el río al cual afluyen. EL lecho será invariable solamente en el caso de equilibrio entre la afluencia de sedimentos provenientes desde las laderas y su evacuación por las crecidas. El exceso de sedimentos que lleva el cauce es perjudicial, pero lo es tanto a veces su insuficiencia porque entonces las avenidas arrastran del río los guijarros del lecho, produciéndose hoyas que, si pasan de cierto límite, además de provocar el descenso del nivel del agua subterránea en el valle, pueden ser causa de destrucción de márgenes y de las obras de defensa e incluso de presas y puentes (Schoklitsch, 1935). Este principio debe considerarse en las posibles modificaciones del equilibrio dinámico del sistema (Mamak, 1964).

Cuando en un río el estado de equilibrio se rompe, bien sea por sobrealimentación o por disminución del volumen de suministro de las fuentes externas por unidad de tiempo, o por cambios en la capacidad de transporte dentro del campo de flujo que no estén acompañados de un cambio proporcional en el abastecimiento, se inducen fenómenos de socavación o deposición sobre el contorno sólido (Quintero, 1985).

El estado de desequilibrio que induce la socavación puede ser local o generalizado. En el primer caso el desequilibrio ocurre, normalmente, por variaciones en el campo de flujo que producen aumentos de la capacidad de transporte, independientemente de la condición de suministro de sedimentos (Quintero, 1985). Aún cuando el término "local" se aplica usualmente a la dimensión de longitud, dentro del campo de flujo puede también referirse a la dimensión tiempo.

En el caso de un proceso generalizado de socavación, el desequilibrio tiene significado de continuo, tanto en el tiempo como en el espacio, a todo lo largo y ancho del campo de flujo considerado. Es el caso de un tramo largo de río o

quebrada, a lo largo del cual el abastecimiento es uniformemente inferior a la capacidad de transporte de la corriente para todas las condiciones de caudal. Cuando esto sucede, se habla también de un estado latente de socavación o degradación del lecho considerado (Quintero, 1985).

Al plantear la sistematización de un río hay que considerar que en forma natural conduce además de agua, materiales petreos y lodos, y que solamente puede existir equilibrio en el río cuando escurren de manera adecuada no sólo el agua, sino también los sedimentos (Schoklitsch, 1961).

Como se dijo anteriormente, si el lecho debe ser estable, tienen que entrar en cada tramo del río tanto material como sale. El lecho de un río estable, es solamente el camino donde se realiza el transporte de los materiales, la compensación proviene de la cuenca del río. Si en cualquier lugar el transporte de materiales queda contenido (por ejemplo por una presa), se produce una perturbación en la distribución de los materiales transportados por el río; aguas abajo el agua socava el fondo y arrastra materiales hasta lograr su punto de saturación. La profundización del lecho no se detiene hasta tanto vuelva a restablecerse la corriente natural de material a través de la presa.

De modo parecido a la obstrucción del transporte de material por una presa, actúa también la disminución de la corriente de material hacia el lecho del río ocasionada por la corrección de torrentes; la afluencia de material de los torrentes se debe moderar o impedir solamente si lo exige el régimen de arrastre en el río. La afluencia de material procedente de los torrentes debe impedirse solamente cuando el río no pueda arrastrarlos, es decir, si su fondo tiende a elevarse de una manera inconveniente (Schoklitsch, 1961).

La erosión ocurre cuando la fuerza de tracción del agua de escorrentía vence la resistencia del suelo. De aquí que las alternativas para reducir o prevenir la erosión son:

a) reducir la fuerza de arrastre del agua y b) incrementar la resistencia del suelo.

En la práctica las dos alternativas se combinan. La fuerza de arrastre depende principalmente del espesor de la lámina de agua, su velocidad y del gradiente del canal; reduciendo estos factores, puede reducirse la erosión. El incremento de la resistencia del suelo a la fuerza de arrastre, se logra aumentando la cohesión y el peso de las partículas que forman el lecho; principalmente en canales, se hace por medio de trabajos y medidas de ingeniería de protección, y con medidas biológicas en las laderas (Hattinger, 1976).

La erosión y los fenómenos torrenciales son dos fenómenos distintos, que presentan características propias y que pueden producirse sucesiva o simultáneamente, pero siempre con repercusiones recíprocas. Desde el punto de vista estricto de la conservación del suelo, el aumento del caudal de una cuenca puede que no tenga importancia, salvo en la medida en que este caudal excesivo pueda producir erosión lateral o vertical, lo que a su vez reduce la superficie utilizable de la cuenca.

En la ordenación de las cuencas torrenciales, las medidas biológicas tienen gran valor, especialmente la repoblación forestal, pero tienen que complementarse con obras de ingeniería, especialmente hasta que los árboles hayan alcanzado la densidad y el tamaño necesarios para atender la protección deseada (Comisión Forestal Europea, 1973).

La restauración hidrológico-forestal como respuesta sectorial al desafío de los fenómenos torrenciales, integra los trabajos biológicos de reforestación e introducción o mejora de otras coberturas vegetales, así como las obras de ingeniería de corrección de cursos torrenciales y aludes, y defensa de márgenes. Es una conjunción armónica de trabajos biológicos y obras de ingeniería, en que la reforestación ocupa un lugar destacado.

En cuanto a las obras de ingeniería hidráulica, toda la sistemática de la corrección en el cauce del curso torrencial está orientada a disminuir, anular o controlar los procesos de transporte de sólidos y la erosión en el lecho y sus márgenes, evitando que se incorpore a las aguas circulantes un considerable caudal sólido, ya que, independientemente de su procedencia, el efecto y el estado torrencial de un cauce es consecuencia del contingente de arrastre de material que presente la corriente.

Por otra parte, en las zonas de montaña de los países en desarrollo, con poblaciones e infraestructura en rápido crecimiento, los fenómenos torrenciales producen pérdidas cada vez más cuantiosas en vidas y bienes. Cada asentamiento humano, cada nueva carretera, ferrocarril o puente en zonas de montaña representa un reto frente a la erosión hídrica. Es de esperar, por lo tanto, que la corrección de torrentes tenga un campo de aplicación cada vez más amplio, tanto en países industrializados como en los países en desarrollo (López Cadenas, 1988).

2.4.- La turbidez del agua y el uso de sulfato de aluminio en plantas de tratamiento.

La turbidez es un índice óptico del sedimento en suspensión que sirve para medir la concentración de sólidos en el agua (Kunkle y Comer, 1971). Es un parámetro fundamental para la caracterización del agua debido a que produce los mayores problemas de tipo práctico como son los volúmenes de lodo, enormes consumos de productos químicos y obstrucción de filtros en plantas de tratamiento entre otros. Además, el aumento de la turbidez es síntoma de contaminación ya que va acompañada por un deterioro de la calidad bacteriológica y por el aumento de otros contaminantes (Arboleda, 1973).

La producción de agua potable a partir de un abastecimiento de aguas contaminado por sustancias introducidas naturalmente o resultantes de las actividades del hombre y que producen turbidez, implican una serie de procesos sanitarios. Entre estos, uno de los más importantes es el de coagulación y floculación, los cuales son procesos de eliminación de la turbiedad del agua.

La sustancia química más empleada es el sulfato de aluminio (alumbre), que empezó a usarse desde 1881 en Balton, Inglaterra y aún es la sustancia más empleada para reducir la turbidez del agua.

Las investigaciones sobre el sulfato de aluminio en el tratamiento de agua comunicadas por D'Arret en 1838 y por Jeunet en 1865, fueron determinantes en despejar cualquier duda sobre la eficacia de la coagulación.

En 1885, Austin y Wilber, de la Universidad de Rutgers, publicaron los resultados de la primera investigación

científica norteamericana sobre la utilización del sulfato de aluminio como coagulante. Después de ensayar un gran número de sales, los autores llegaron a la conclusión de que ninguna de ellas ofrecía las ventajas de aquel. En el período de 1895 a 1897, George Warren Fuller y sus asociados realizaron en Louisville, Kentucky, diversos e importantes experimentos en las aguas turbias del río Ohio, en las que ensayaron una serie de coagulantes: alumbre o sulfato básico de alúmina, alumbre de potasa y cal. De todos ellos el alumbre se reveló como el más adecuado. Estos experimentos confirmaron la importancia de la coagulación como elemento importante en la eliminación de la turbidez.

Los contaminantes, resultantes de la erosión del suelo, siempre han estado presentes en proporciones muy variables en los cursos de agua, hecho que ha determinado la necesidad de eliminarlos para potabilizar estas aguas. La coagulación, es el proceso que más se emplea en la eliminación de aquellas sustancias que comunican turbiedad al agua las cuales suelen ser inorgánicas y se presentan en tamaños muy variables que oscilan entre los suficientemente grandes para que sedimenten con facilidad y aquellos que son lo suficientemente pequeños para permanecer en suspensión durante períodos largos de tiempo. La coagulación se realiza con relativa facilidad de acuerdo a las siguientes consideraciones (The American Water Works Association):

- a) Para cualquier concentración de turbiedad es preciso añadir una cierta cantidad mínima de coagulante con objeto de obtener una masa aprisionante de flóculos.
- b) Por regla general, a medida que aumenta la turbiedad es preciso añadir algo más de coagulante, pero la dosis de este no aumentará linealmente con el aumento de la turbiedad.

- c) Paradójicamente, en el caso de niveles muy elevados se requieren dosis de coagulante relativamente más pequeñas debido a las mayores probabilidades de colisión, por esta misma razón los niveles de turbidez muy bajos, suelen ser más difíciles de eliminar por coagulación.
- d) Es más fácil de coagular una distribución amplia de tamaños de partículas de arcilla, que una suspensión que contenga un sólo tipo de tamaño o una gama muy estrecha de estas.

La eficiencia del proceso de coagulación, no solo depende de la turbidez del agua. En él influyen diversos factores como el contenido de silicatos, el color, el pH y el carácter iónico de las partículas coloidales. Sin embargo, para un nivel de pH entre 5,5 y 8,0, el sulfato de aluminio a su vez presenta leves variaciones y aún fuera de ese rango, es posible ajustar el pH al rango deseado con la adición de cal o hidróxido de calcio.

Tanto los silicatos como el color inciden fuertemente sobre el carácter iónico de las partículas coloidales y evidentemente sobre la dosis de coagulante a emplear, motivo por el cual es usual el empleo de la "prueba de jarras" para determinar con precisión la dosis requerida (Clark et al, 1977).

El hecho antes descrito, puede explicar el porque existe una usual desviación entre turbiedad y dosis de coagulante, lo cual en la práctica se pretende corregir con la referida "prueba de jarras", la que coadyuva en el proceso de creación de una valiosa experiencia práctica en el operador del sistema de tratamiento

3.- METODOLOGIA

La evaluación de las obras de control de torrentes en la cuenca del río Nima se dificulta debido a que el área de influencia de cada obra es muy pequeña en relación al área de la cuenca, además no se definieron previamente los límites de corrección de caudales o sedimentos a los que debía llegarse y no se realizaron mediciones de caudales y sedimentos en el cauce antes, durante y después de la implementación de las obras. Sin embargo, existen en la planta de tratamiento de agua de la ciudad de Palmira, datos desde 1973 de turbidez y consumo de sulfato de aluminio, los que sirvieron para la realización de este trabajo.

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación y comprobar la hipótesis planteada, se consideró como enfoque metodológico general el contraste entre la situación de la cuenca superior del río Nima antes de la implementación de las obras con alta condición de erosión y sobre uso, representada por el periodo 1973 - 1978 comparándola con la condición en la que se empiezan a implementar obras biológicas y mecánicas representadas por el período 1979 - 1989.

A continuación se presenta una descripción de los pasos que se siguieron en la realización del trabajo.

3.1.- Caracterización biofísica.

La información relativa a estos factores se hace necesario ya que la respuesta de una cuenca hidrográfica, está constituida por el régimen hidrológico y el transporte de sedimentos, variables que a su vez están condicionadas por las características biofísicas de la cuenca.

Toda la información referida a estos factores se obtuvo de informes y estudios previos realizados por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CVC.

3.2.- Análisis de la problemática histórica del uso de la tierra.

Se consideraron áreas críticas, desde el punto de vista de la degradación del suelo, todas aquellas unidades de tierra que sobrepasan la capacidad de uso con respecto al uso dado en una época pasada o actual.

Para identificar las áreas críticas, en ambos períodos del estudio, se siguieron los siguientes pasos:

a) Uso de la tierra: Se utilizaron estudios hechos en 1969 y 1989, los cuales representan los dos períodos del estudio: antes y después de la implementación de las obras.

La información fue proporcionada por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, CVC. La escala utilizada de 1 : 25.000

b) Capacidad de uso: Los antecedentes y mapas, al igual que el punto anterior fueron suministrados por la CVC.

c) Determinación de áreas críticas. Mediante la superposición entre los mapas de uso de la tierra y de capacidad de uso se obtuvieron las áreas que se encontraban en sobreuso para los años 1969 y 1989.

3.3.- Análisis del impacto del uso de la tierra en la erosión de la cuenca.

Este análisis se hace con el fin de conocer como ha influido el uso de la tierra en la erosión de la cuenca. Para ello, se compararon los mapas de erosión realizados por la CVC en 1970 y 1986 los que tomamos como representativos de los dos periodos de análisis del trabajo para establecer como ha variado la erosión en sus distintos grados.

3.4.- Análisis de la variación de la precipitación para antes y después de la implementación de las obras.

Es importante conocer como ha sido la precipitación en cada uno de los meses para cada periodo del estudio ya que esta variable está en relación directa con la cantidad de sedimento que se produzca en la cuenca y a su vez de la turbidez del agua, independientemente de la implementación de las obras.

Para cada periodo y cada mes se estableció cuántos días presentaron precipitaciones entre 0mm - 5mm, 5mm - 10mm y 10mm - 15mm. Esta información se obtuvo de la sección de hidroclimatología de la CVC, además se calculó el coeficiente de variación para ambos periodos para establecer comparaciones.

3.5.- Análisis del impacto de la precipitación en la turbidez del agua

Puesto que interesa conocer el efecto de las obras sobre la turbidez debida a la producción de sedimentos

ocasionados por la precipitación, se analizó este aspecto sobre la base de la regresión turbidez versus precipitación para ambos períodos del estudio, de esta manera se obtuvo una curva para cada periodo las cuales se graficaron en un mismo eje de coordenadas para así observar la diferencia en la turbidez en los dos periodos del análisis.

Como el objetivo era averiguar como ha variado la turbidez del agua, una vez implementadas las obras, respecto al periodo 1973-1978, se estimó cual habría sido esta turbidez en el caso de no haberse implementado las obras. Para esto, el modelo de regresión precipitación versus turbidez, para el primer periodo se prolongó al segundo reemplazando en él los valores de precipitación observados en el periodo 1979-1989. De esta manera se obtuvieron valores estimados de turbidez promedio mensual para el segundo periodo de análisis los que se compararon con la turbidez real presentada

3.6.- Análisis del impacto de la precipitación y la alteración de la turbidez sobre el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento.

En este punto se estimó el consumo de sulfato de aluminio para el periodo 1979 - 1989, en el caso de no haberse implementado las obras, mediante un modelo de regresión simple entre consumo de sulfato de aluminio como variable dependiente y turbidez y precipitación como variables independientes y reemplazando, en este modelo, los valores de turbidez estimados para el periodo 1979 - 1989 y los de precipitación observados para este mismo periodo.

3.7.- Análisis del impacto económico de la alteración en el consumo de sulfato de aluminio atribuible a la implementación de las obras en el período 1979 - 1989.

El efecto económico de las obras sobre la planta de tratamiento se valora mediante la diferencia en el consumo de sulfato de aluminio antes y después de la implementación de las obras. Para cada año, esta diferencia se multiplica por los metros cúbicos de agua tratada y por el costo del kilogramo de sulfato de aluminio en dólares del año correspondiente.

4.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1.- Elementos biofísicos.

El conocimiento de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica es parte de la caracterización de la misma. Existe una relación entre las características físico-geográficas y la respuesta hidrográfica de la cuenca, en una región climatológica dada. Recíprocamente, el comportamiento hidrológico de una cuenca contribuye considerablemente a formar sus características físicas.

Como información, en el Cuadro 1 se listan los principales parámetros morfométricos de la cuenca.

El coeficiente de compacidad es indicativo de diferentes comportamientos hidrológicos de la cuenca en relación a la ocurrencia de crecidas. Valores cercanos a la unidad son característicos de cuencas con forma circular donde los tiempos de concentración son menores. Por el contrario, cuencas alargadas tendrán un valor cercano a 2, sin embargo, debe tenerse en cuenta otros factores como pendiente, cobertura y distribución e intensidad de la precipitación.

El número de orden de los cauces, la densidad de drenaje y el coeficiente de torrencialidad son parámetros que indican la rapidez o facilidad de evacuación de la escorrentía superficial. Para la cuenca del río Nima, estos parámetros son bajos, sin embargo existen otras condiciones de la cuenca que disminuyen los tiempos de concentración ya anteriormente mencionados, además hay que tener en cuenta que dependen en gran medida de la precisión de la escala de los mapas.

Cuadro 1. Parámetros Morfométricos de la Cuenca Superior del Rio Nima, Colombia.

PARAMETRO	MEDIDA
PROPIEDADES SUPERFICIALES	
Superficie de la cuenca.	118 Km ²
Perímetro.	65 km
Coefficiente de compacidad.	1,68
PROPIEDADES LINEALES.	
Número de orden de los cauces.	6
Densidad de drenaje.	1,69 Km/km ²
Coefficiente de Torrencialidad.	1,32 N ₁ /Km ²
PROPIEDADES DEL RELIEVE.	
Elevación media.	2712,66 msnm
Curva hipsométrica.	Ver figura 3
Pendiente media del río. Ver figura 4.	8,3 %
Pendiente media de la cuenca.	59 %

N₁: Número de segmentos de cauce de primer orden.

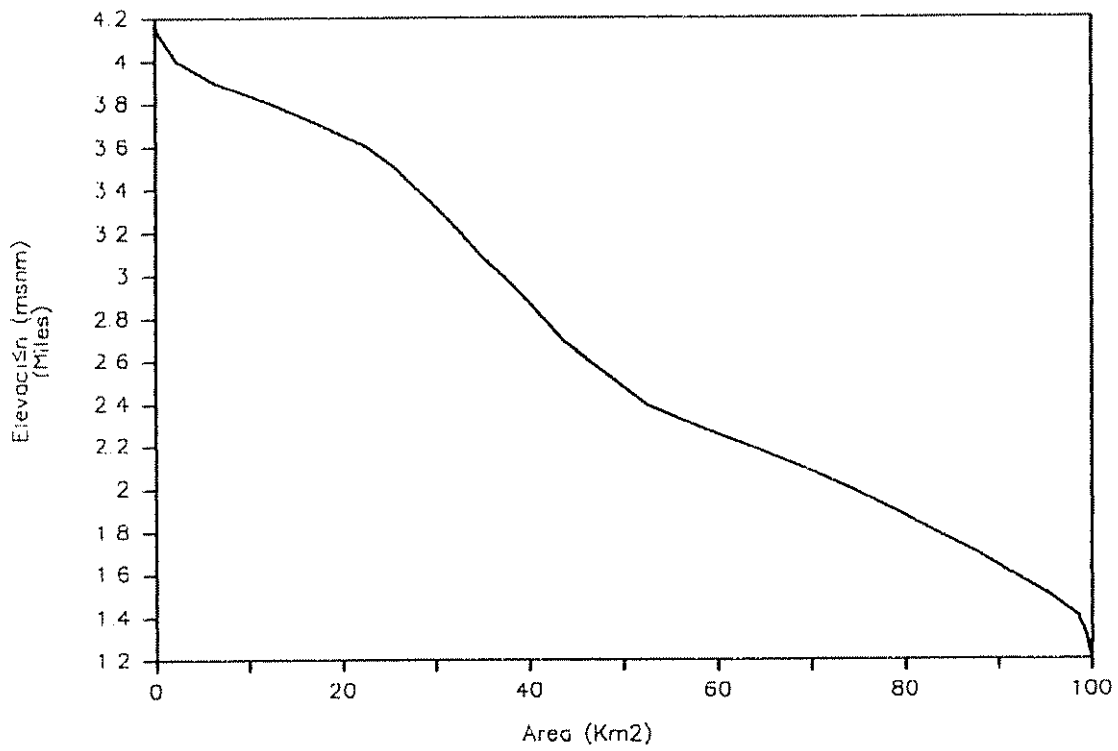


Figura 3. Curva Hipsométrica. Cuenca superior del Rio Nima, Colombia.

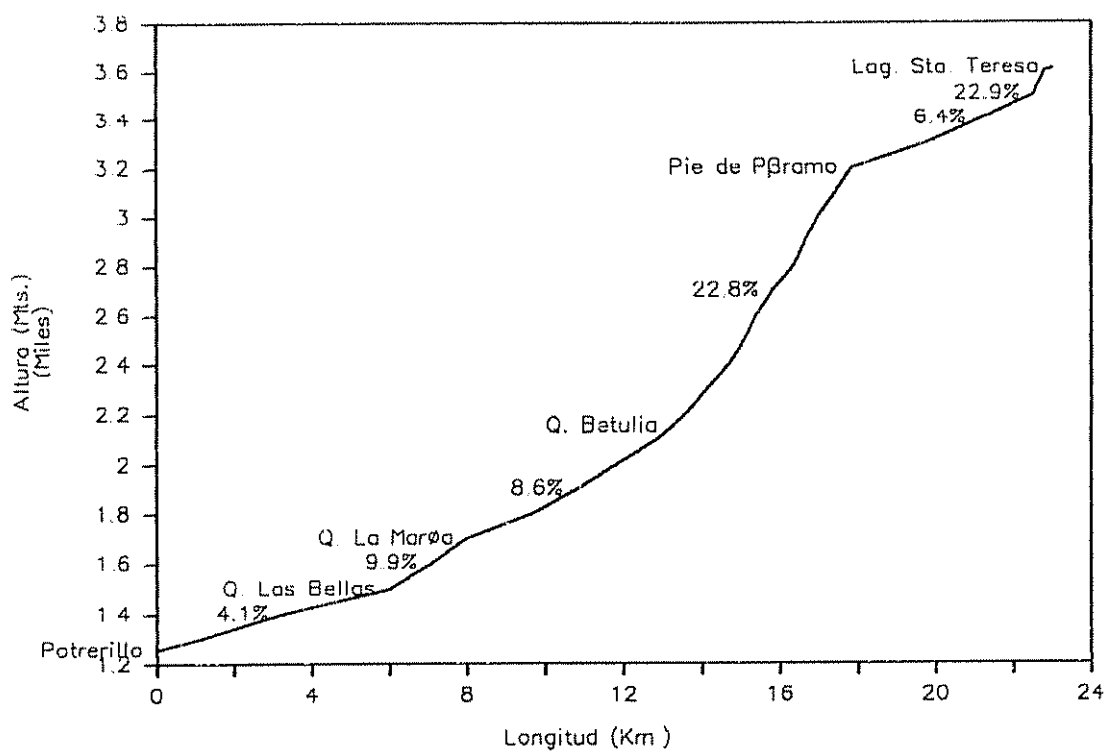


Figura 4. Perfil Longitudinal del Río. Cuenca superior del Río Nima, Colombia.

La curva hipsométrica representa las superficies de la cuenca que están situadas por encima (o por debajo) de cada elevación considerada. De esta manera, el 50% del área de la cuenca del río Nima se encuentra por encima de los 2500 msnm.

4.1.1.- Precipitación.

Se considera relevante para el fin del presente estudio, el análisis de la precipitación ya que este elemento es decisivo en el régimen de caudales e influye en el grado de erosión de una cuenca.

La génesis de lluvia en Colombia se explica por la formación del frente de interferencia intertropical (FII) o zona de calmas ecuatoriales, concomitante con la acción de los vientos Alisios tanto del NE como del SE, Ambos fenómenos tienen origen en el doble paso del sol por el zenit que se presenta en toda la zona ecuatorial y en el mayor calentamiento que ello provoca sobre la superficie terrestre expuesta más inmediatamente a los rayos solares.

Aunque la formación y disposición del FII no coincide estrictamente ni en el tiempo ni en el espacio con el paso del sol por el zenit de cada lugar, lo cierto es que tanto el frente mismo y su mecanismo propio de formación de nubes, así como los vientos del NE (Alisios), SE, y W, con sus aportes de humedad desde el mar Caribe, la planicie Amazónica y el océano Pacífico respectivamente, en juego con el sistema montañoso de tres cadenas muy altas orientadas S-N, dan lugar a un sistema pluvial de dos períodos de lluvias y dos de verano, que caracteriza casi todo el territorio y constituye uno de los ejemplos más rotundos en el mundo del régimen llamado ecuatorial (Murillo, 1978).

El Valle del Cauca está localizado dentro de la zona de influencia de la faja intertropical de convergencia donde se produce el encuentro de masas de aire de distinto origen y de distintas características meteorológicas que determinan abundante precipitación. En la mayor parte del valle, el fenómeno ocurre como una onda doble compuesta de dos épocas secas y dos lluviosas (Regalado, 1978).

A partir de lo anterior, la precipitación también está influenciada por los efectos de la circulación local, la cual está controlada por las condiciones generales del tiempo reinante.

La cuenca del río Nima, con una precipitación promedia anual de 1.830 mm. presenta dos períodos secos y dos lluviosos, variables en duración pero más o menos definidos.

Los meses de diciembre a enero y junio a septiembre corresponden a los periodos secos, siendo julio el mes de mayor estiaje con una precipitación en promedio de 51 mm. En los demás meses las lluvias son abundantes, siendo octubre el más húmedo con una precipitación promedio de 283 mm.; sin embargo, esto no es valedero para toda la cuenca ya que a partir de los 3.400 msnm. el fenómeno tiende a presentarse a la inversa, siendo el mes de julio el de mayor precipitación con 201 mm. y enero el más seco con 63 mm. en promedio.

En general las lluvias se caracterizan por ser de corta duración, alta intensidad y cubren áreas relativamente pequeñas, lo que imprime característica de alta torrencialidad a la cuenca (Revelo, D.; Carlos, F. 1972).

En la Figura 5 se puede apreciar como varía la precipitación durante el año.

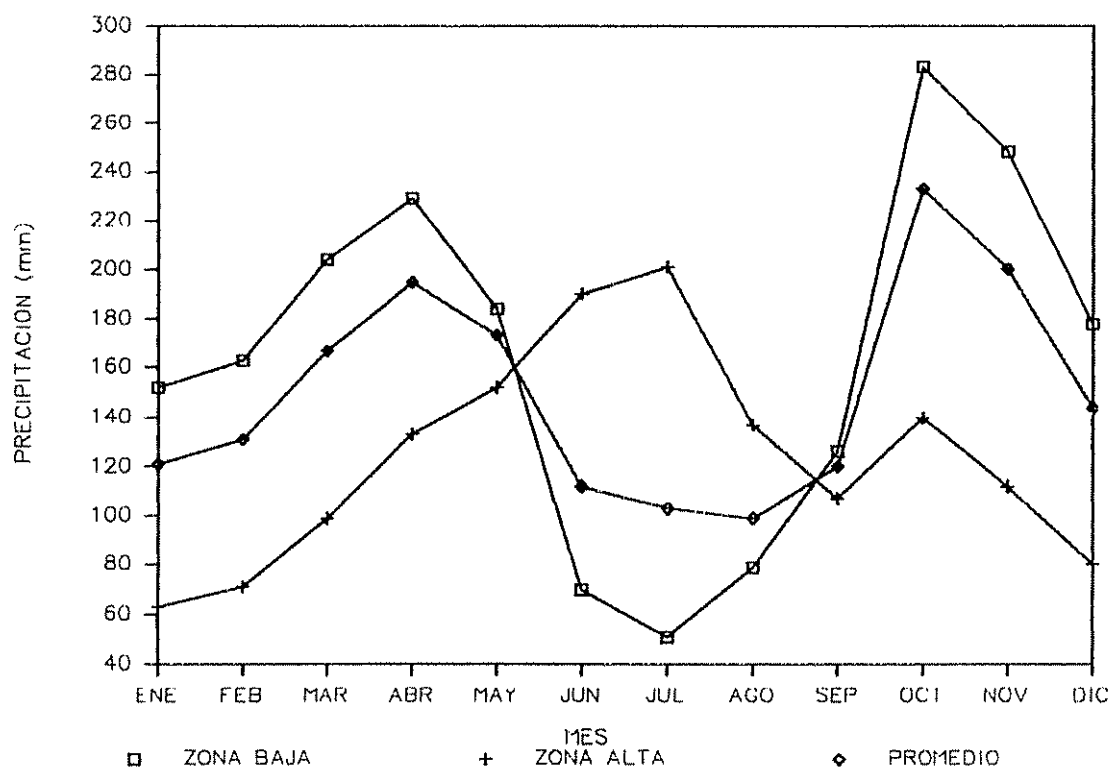


Figura 5. Distribución Anual de la Precipitación. Cuenca superior del Río Nima, Colombia.

ESTACION PRECIPITACION (mm)

1. La Virgen	1844
2. Sta. Teresa	1637
3. Sta Rita	1847
4. Caseteja	1407
5. El Pato	1729
6. La Selva	1740
7. Los Cuervos	1963
8. La Betulia	1730
9. Amberes	1746
10. Albania	1678
11. El Diamante	1649
12. San Nicolas	1982
13. Las Miras	2618
14. Tenjo	2234
15. La Montañita	2271
16. Austria	2401
17. Las Veraneras	1744
18. San Emigdio	1741

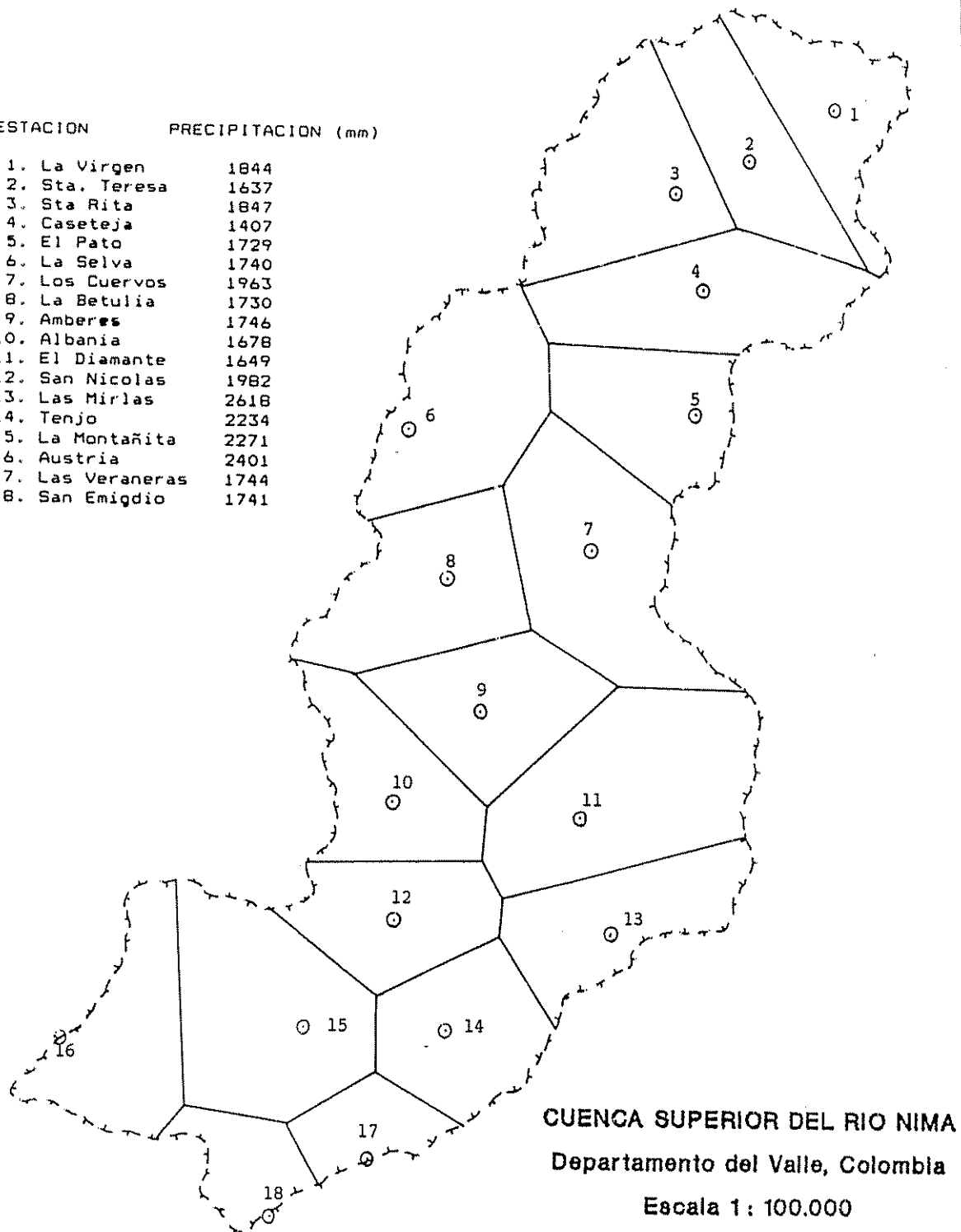


Figura 6. Precipitación Anual por Estación. (mm).
Polígonos de Thiessen.

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA
Departamento del Valle, Colombia
Escala 1 : 100.000

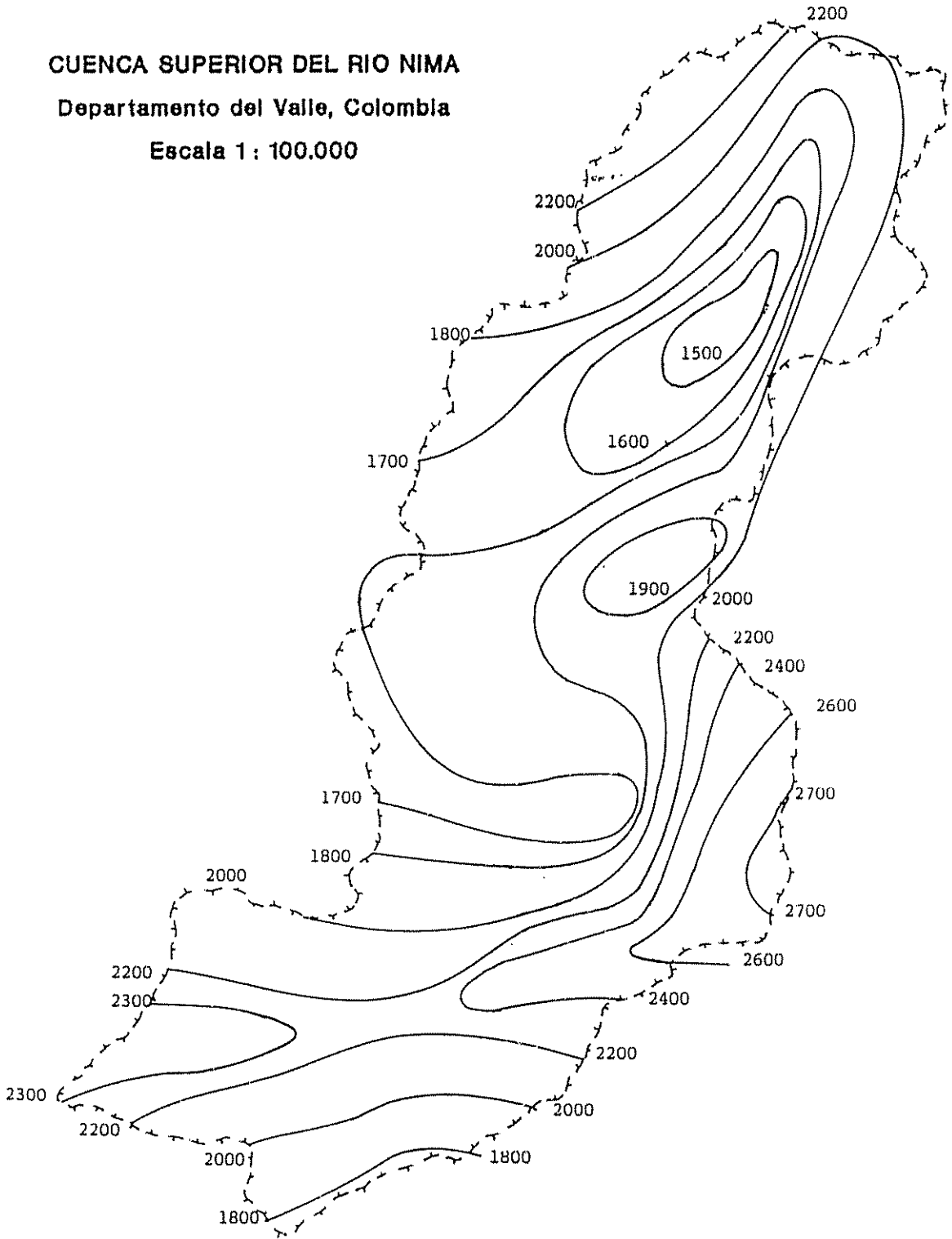


Figura 7. Isoyetas de Precipitación Anual (mm).

4.1.1.1.- Distribución de las lluvias con la altitud.

La precipitación gradualmente aumenta conforme se asciende en la cuenca hasta los 2.400 metros de altitud, luego desciende gradualmente la cantidad de lluvia si se sigue ascendiendo y sobre los 3200 metros de altitud la precipitación es comparable a la de la zona baja, obviamente se diferencia por la distinta evapotranspiración, la distribución diaria de las lluvias y el tiempo de ocurrencia. La franja de mayor humedad está comprendida entre los 1.600 y los 3.000 metros de altitud.

4.1.2.- Geología

Los diversos estudios de geología y geomorfología realizados en la cuenca reportan la presencia de materiales de litología diferente donde se alternan rocas metamórficas muy antiguas (esquistos, neises, filitas y anfibolitas), con rocas ígneas de origen más reciente (diabasas, basaltos, granitoides, tobas) y rocas sedimentarias. Estos materiales tienen distinta composición química, mineralógica y física por lo tanto, le imprimen a los suelos condiciones inestables, especialmente cuando están fracturados, meteorizados y/o mezclados (Suárez, 1986).

Las rocas metamórficas representan las rocas más antiguas de la Cordillera Central (H. W. Nelson). Estas rocas han sido afectadas por dos períodos orogénicos, los cuales produjeron el sistema de fallas reportado como "Romeral", predominante en la cuenca. (Muñoz, 1969). Dentro de estas rocas se encuentran las prasinitas, que son rocas más o menos compactas, del sector Los Cuervos y Santa Teresa, donde hay algunas cantidades de talco que por su untuosidad hace que los planos de esquistosidad se

conviertan en superficies resbalantes que favorecen deslizamientos por gravedad (Muñoz, 1969).

Otras rocas metamórficas son los esquistos grafíticos, relativamente blandas que por su alta exfoliación, fracturamiento y constitución liza facilitan la infiltración del agua, por este carácter representan zonas deleznales, fácilmente erodables, que pueden ser consideradas en la mayoría de los casos, especialmente donde hay fuertes pendientes o abundancia de escorrentía, como zonas de peligros geológicos (Muñoz, 1961).

Las rocas ígneas se encuentran en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Nima, compuestas por diabasas y suelos rojos de edad cretácea.

La presencia de cenizas volcánicas con abundante número de macro y microporos que permiten una alta infiltración, permeabilidad, percolación y retención de humedad, hace que en las épocas de lluvia el material aumente de peso y simultáneamente se comporte como una esponja que suelta agua, lubricando el material subyacente liso, facilitando las remociones masales en zonas críticas de deslizamientos, derrumbes y cárcavas.

Las rocas sedimentarias, están formadas por la acumulación de depósitos aluviales, coluviales y lacustres, originados por los despojos y detritus de la erosión en la cordillera durante el Pleistoceno y el Holoceno. Estos depósitos son en su mayoría, fluvioglaciares por su relación con las deglaciaciones del Cuaternario.

La parte superior de la cuenca está determinada por un modelo glacial de bajas temperaturas y con relieve de baja actividad morfodinámica que permite deducir una buena

estabilidad de los materiales (alturas superiores a 3.000 msnm).

La incidencia tectónica en la cuenca, es bastante notable debido al sistema de fallas "Romerol", de trayectoria Norte-Sur con marcadas dificultades para el manejo de los suelos. Se encuentra ubicado entre los 1.400 y 3.000 msnm., donde hay mayor precipitación, que por razón también de las fuertes pendientes, los efectos del tectonismo, la presencia de cañones profundos y de alteraciones químicas a grandes profundidades, debidas a la infiltración de agua por las fisuras, se producen grandes zonas de solifluxión, deslizamientos y derrumbes, que se repiten con mucha frecuencia en época de lluvia y transportan grandes cantidades de material sólido a las quebradas fenómeno conocido como dinámica torrencial (Suárez, 1986).

La falla Oriental o falla Cauca, es la más importante, tiene una dirección Norte-Sur. Esta falla pone en contacto las rocas metamórficas antiguas de las rocas Igneas más recientes (Suárez, 1986). Se extiende por más de 150 Km. y tiene un considerable desplazamiento vertical (Muñoz, 1969).

En el Cuadro 2 se presenta la distribución de los materiales geológicos en la cuenca superior del río Nima, y en la Figura 8 se presenta el mapa geológico.

Cuadro 2. Distribución de los materiales geológicos en la
cuenca superior del río Nima, Colombia.

Material Geológico	Símbolo	Superficie	
		Ha.	%
ROCAS SEDIMENTARIAS			
Aluviones	Qa	292,4	2,48
Aluviones y Coluvios	Qac	239,9	2,03
Coluvios (Material de talud)	Qc	124,9	1,06
Depósitos fluvio-glaciares y lacustres	Qlc	46,7	0,40
ROCAS IGNEAS			
Grupo diabásico (Diabasas y basaltos)	Kd	3658,3	31,00
Cuarzo y grano dioritas	It	154,8	1,31
Microgabros y diabasas cuarcíferas	Ig	3,6	0,03
Pórfidos (andesitas, etc.)	Ip	38,5	0,33
ROCAS METAMORFICAS			
Esquistos grafiticos	Pg	725,5	6,15
Hornfelsas	Ph	23,6	0,20
Neises y anfibolitas	Pn	1256,5	10,65
Esquistos cuarcíticos	Pz	2266,2	19,20
Esquistos cloríticos	Pcl	2969,1	25,16
Total		11800,0	100,00

Fuente CVC.

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA

Departamento del Valle, Colombia

Escala 1 : 100.000

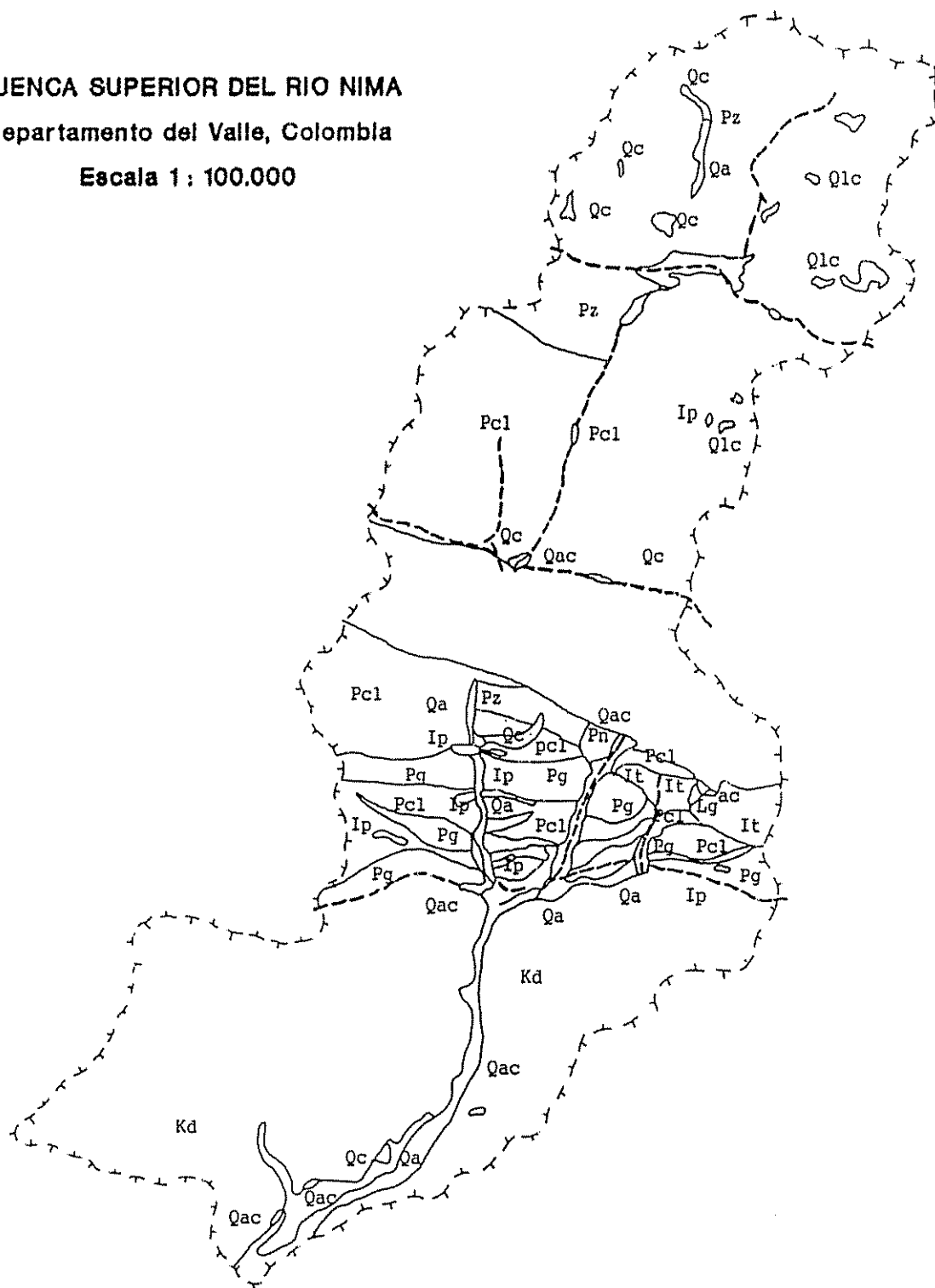


Figura 8. Mapa Geológico. (Ver cuadro 2.)

4.1.3.- Geomorfología.

La cuenca es una región montañosa y abrupta en su mayor parte. Sus valles presentan un estado morfológico juvenil y tan solo en la parte inferior se abren. Debido a la alta actividad de los glaciares durante el Cuaternario, algunos valles tienen una conformación típica, con vertientes casi verticales y cuchillas con los bordes rocosos dentados (Muñoz, 1969).

4.1.4.- Suelos.

Para los fines del presente estudio, se utilizó la clasificación realizada por Rodríguez y Forero (1990), que se presenta en la Figura 9 ; a la vez, en el Cuadro 3 se indica la distribución en superficie de los subgrupos de suelos de la cuenca.

En general los suelos de la cuenca poseen un drenaje natural bueno a excesivo, son superficiales a moderadamente profundos y están limitados por una capa de piedra.

4.1.5.- Hidrografía.

Debido a las condiciones climáticas y geomorfológicas la cuenca presenta un gran número de corrientes de agua que sirve de drenaje a los terrenos de ésta. El drenaje se desarrolla libremente en todas direcciones y está caracterizado por ramales irregulares de corrientes tributarias en todas direcciones. El desarrollo de esta

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA
Departamento del Valle, Colombia
Escala 1 : 100.000



Figura 9. Mapa de Suelos. (Ver cuadro 3.)

Cuadro 3. Distribucion de subgrupos de suelos. Cuenca superior del rio Nima, Colombia.

Unidad Cartográfica	Suelo	Simbolo	Superficie	
			Ha.	%
As. Arcadia (AC)	Ultic Haplustalf	ACbc1	299,4	2,54
	Ustic Dystropept	ACcd1	263,0	2,23
	Typic Dystrandept	ACef2	5,4	0,05
	Typic Haplustoll			
As. Amaime (AM)	Entic Hapludoll			
	Entic Haplustoll	AMbc	148,0	1,25
	Typic Ustorthent			
As. Villacolombia (VC)	Typic Dystropept			
	Andic Humitropept	VCef2	1746,9	14,80
	Ustic Dystropept			
	Typic Humitropept			
As. Fraile (FR)	Lithic Ustorthent	FRde2	40,8	0,35
	Ustic Dystropept	FRef2	42,8	0,36
	Typic Ustropept	FRf2	164,7	1,40
As. Nogales (NO)	Entic Dystrandept			
	Typic Eutropept	NOef1	1471,6	12,47
	Typic Hydrandept			
As. Orisol (OS)	Oxic Dystrandept			
	Andic Humitropept	OSf2	1801,0	15,26
	Fluventic Ustropept			
As. Cristales (CR)	Typic Dystrandept			
	Andic Humitropept	CRef2	2766,1	23,44
	Ustic Lithic Dystropept			
Miscelaneo de paramo (MP)		MP	651,5	5,25
Miscelaneo Rocoso (MR)		MR	2398,8	20,33
Total			11800,0	100,00

Fuente: CVC.

clase de patrón está influenciado por la litología y las características físicas de las rocas (Rodríguez, 1978).

El río Nima nace en la región de Santa Teresa en la laguna del mismo nombre, a una altura de 3.600 metros, se desliza casi en todo su recorrido por sobre abruptas rocas de oriente a occidente dibujando junto con sus afluentes una red de drenaje dendrítica como se observa en la Figura 10.

Por su margen izquierda recibe, entre otras, las quebradas de Los Cuervos, Amberes, La María, Aguazul, Las Mirlas y Los Añascos; por la margen derecha Los Cusumbos, El Rincón, Albania, Esmeralda, Las Bellas, Los Negros, Aguabonita y la Quisquina para mencionar las principales.

El río Nima tiene un caudal menor de $2 \text{ M}^3/\text{seg}$. en tiempo de máximo estiaje y en crecidas, tiempo de invierno, un promedio de más de $15 \text{ M}^3/\text{seg}$.

El tiempo de concentración de la cuenca, obtenido de la formula empírica del Bureau of Reclamation, es de 2.04 horas lo que indica que es una cuenca propensa a crecidas súbitas e inundaciones.

4.1.6.- Distribución de la pendiente.

El 70% del área de la cuenca corresponde a vertientes y colinas con relieve en su mayor parte escarpado y pendientes largas y pronunciadas.

La pendiente promedio de la cuenca es del 59%, evidentemente este tipo de relieve es decisivo en la torrencialidad. La sola consideración de relieve y pendiente independientemente de otros factores, se convierte

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA
Departamento del Valle, Colombia
Escala 1 : 100.000

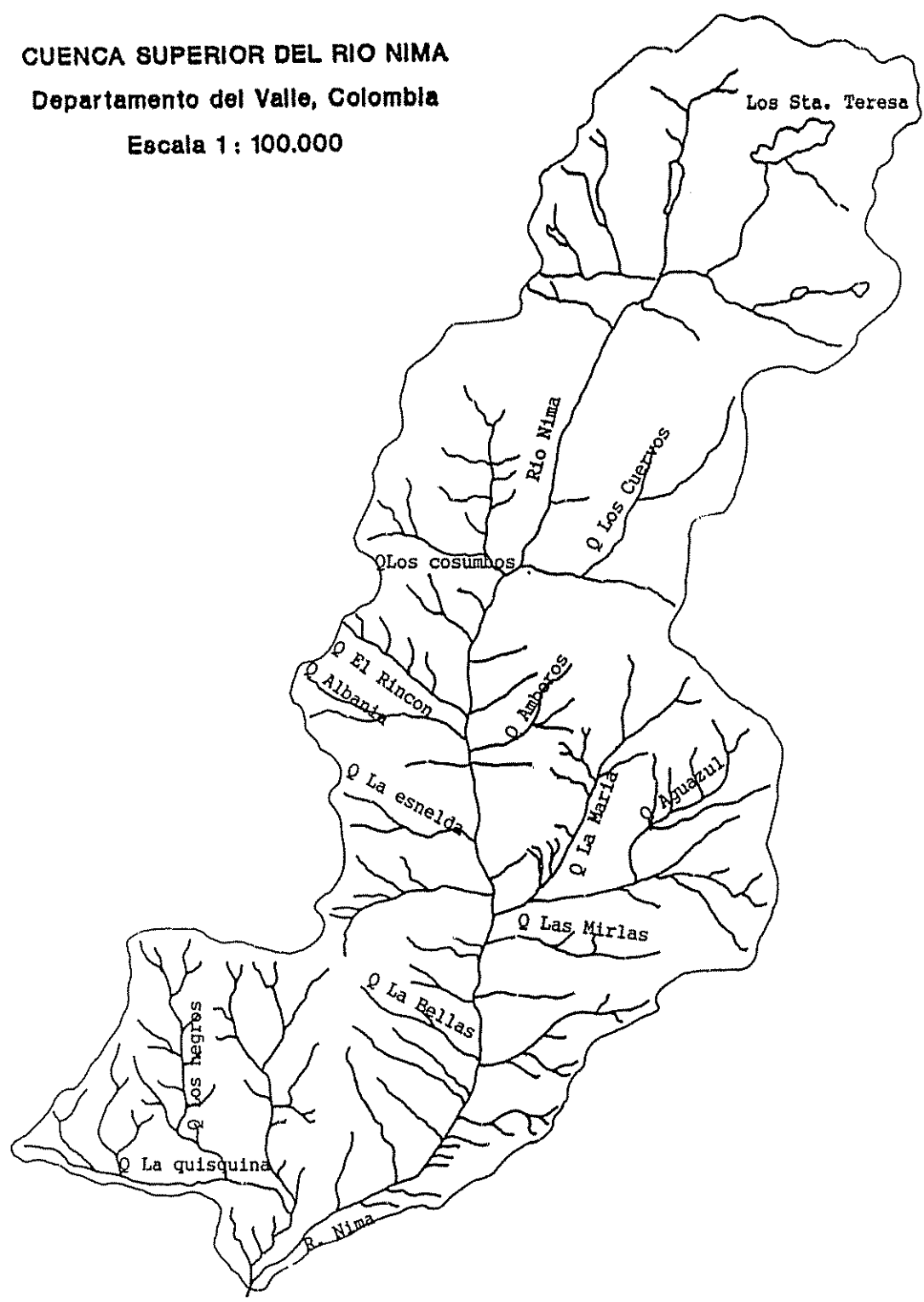


Figura 10. Red de Drenaje.

en un limitante drástico para el desarrollo agrícola y pecuario.

En el Cuadro 4 y las Figuras 11 y 12 se presentan las categorías de pendientes y el mapa topográfico de la cuenca. En el referido cuadro, se puede observar que el relieve general de la cuenca es de pendientes muy fuertes y sólo un 7,7% presenta condiciones planas a onduladas, mientras que el 80% posee pendientes mayores del 50%.

4.1.7.- Zonas de vida.

Espinal (1968), realizó la clasificación ecológica en base a la metodología de Holdrige. De acuerdo con ésta, en la cuenca se distinguen cinco zonas de vida las cuales corresponden a: Bosque Húmedo Premontano, Bosque Muy Húmedo Premontano, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo, Bosque Pluvial Montano Bajo y Bosque Pluvial Montano.





4.2.- Problemática del uso histórico de la tierra en la cuenca.

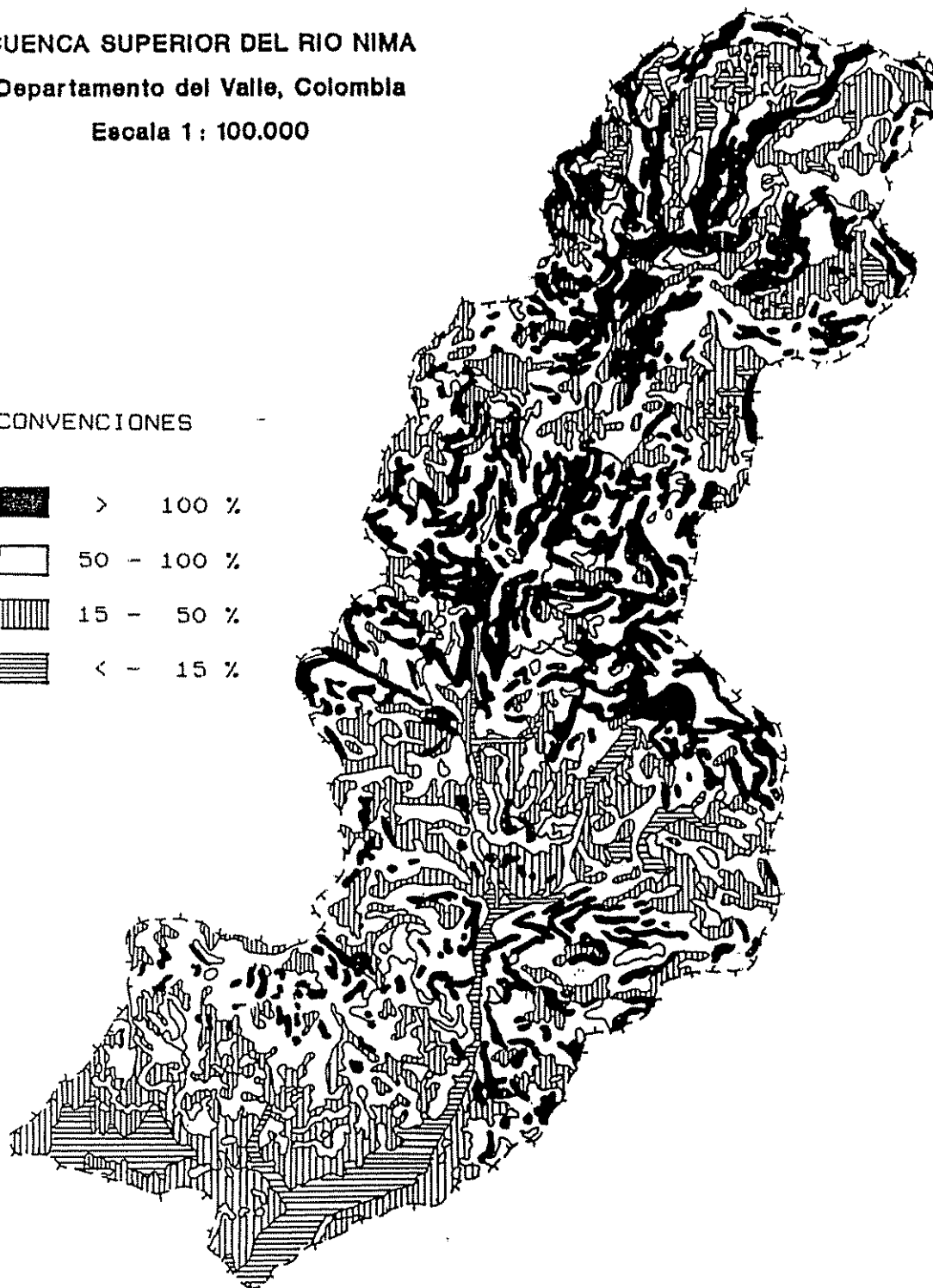
Se hace necesario estudiar la problemática histórica del uso de la tierra, a fin de determinar las áreas críticas en los distintos períodos de análisis. Esto implica el análisis de las unidades de tierras que se encontraron en condiciones de sobreuso transformándose en áreas de fuente de abastecimiento potencial de sedimento.

4.2.1.- Capacidad de uso de los suelos.

La capacidad de uso de la tierra es un factor que no puede desligarse de otros que determinan el estado erodable

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA**Departamento del Valle, Colombia****Escala 1 : 100.000****CONVENCIONES**

	> 100 %
	50 - 100 %
	15 - 50 %
	< 15 %

**Figura 11. Mapa de Categorías de Pendientes.**

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA
Departamento del Valle, Colombia
Escala 1 : 100.000

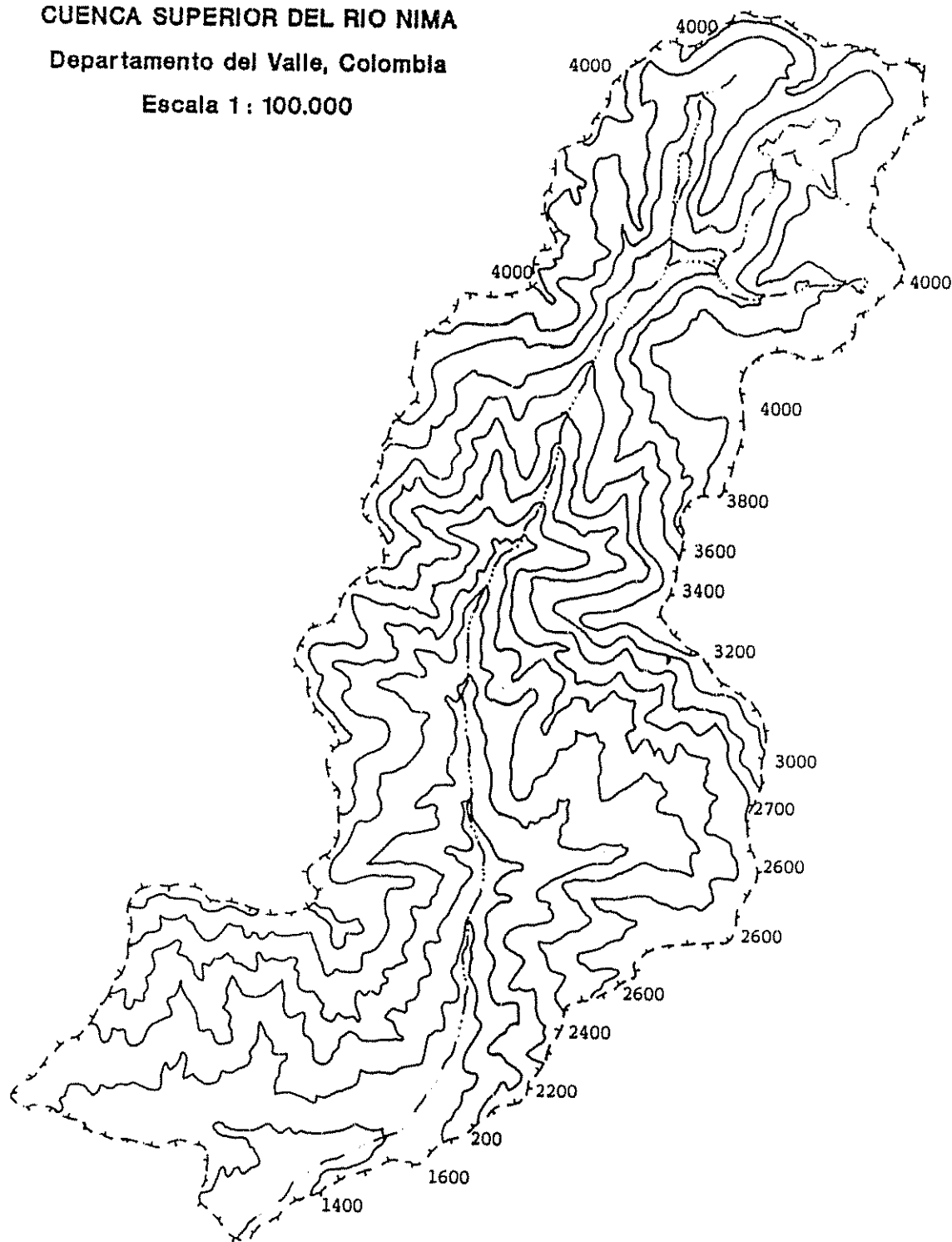


Figura 12. Mapa Topográfico. (msnm).

Cuadro 4. Distribución de las categorías de pendientes en la cuenca superior del río Nima, Colombia.

Pendiente (%)	Descripción	Area (Km ²)	%
< 15	Plano ondulado	8,36	7,7
15 - 50	Accidentado	29,31	24,8
50 - 100	Quebrado	51,80	43,90
>100	Muy quebrado	27,85	23,60
Total		118,00	100,00

y la potencialidad torrencial de las cuencas hidrográficas, tanto como la distribución y clase de materiales pétreos subyacentes y su estrecha relación con los suelos que soportan, así como los tipos y estado de la cobertura vegetal interactuante con ellos. Esta determinación de las tierras contribuye significativamente en la selección de alternativas lógicas y combinación de criterios básicos para diagnosticar los diferentes estados de susceptibilidad torrencial (Rodríguez, 1978).

Burgos y García (1986) han determinado las unidades de capacidad de uso del suelo en base a la metodología propuesta por T.C. Sheng cuya descripción puede apreciarse en la Figura 13 y la superficie de los mismos en el Cuadro 5. De aquí podemos inferir que el 65% tiene aptitud forestal y que el 26% debe ser mantenido en la categoría de reserva natural debido a la infraestructura eléctrica y de agua para consumo humano y riego que posee la cuenca.

También podemos observar que sólo el 7,2% tiene aptitud para la agricultura y un 2,1% para pastos, actividades que deben ir acompañadas de prácticas de conservación de suelos y aguas.

4.2.2.- Uso histórico de la tierra en la cuenca.

En general en la cuenca el hombre ha inducido un uso de la tierra orientado principalmente a la sustitución del bosque y la ampliación de tierras destinadas a la ganadería con una ausencia casi total de prácticas conservacionistas de suelos por lo que las principales prácticas de los cambios de uso de la tierra habían sido la deforestación, la agricultura migratoria, la ganadería y el uso de leña con fines energéticos hasta el año de 1969, cuando se le asigna a la CVC la administración de la cuenca.

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA
Departamento del Valle, Colombia
Escala 1 : 100.000

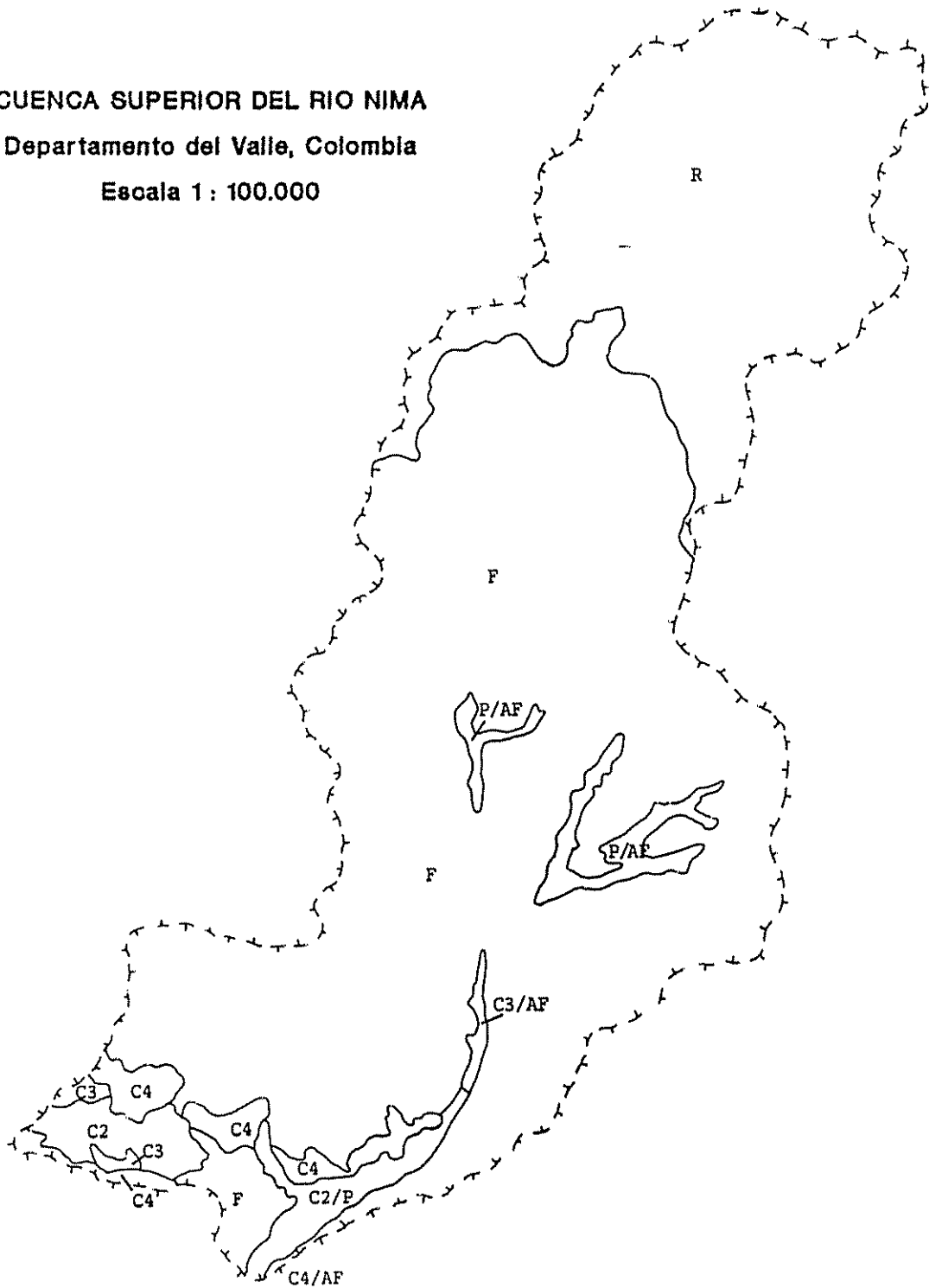


Figura 13 Mapa de Capacidad de Uso del Suelo.
(Ver cuadro 5.)

Cuadro 5. Distribución de la capacidad de uso de los suelos en la cuenca superior del río Nima, Colombia.

Unidad	Sub-unidad	Superficie Ha.	%
Tierras cultivables	C2	206	1,75
	C3	47	0,40
	C4	312	2,64
Tierras cultivables con alternativa para praderas	C2/P	232	1,97
Tierras cultivables con alternativa para árboles frutales y/o forrajeros	C3/AF	44	0,37
	C4/AF	13	0,11
Tierras para praderas con alternativa para árboles frutales y/o forrajeros	P1/AF	248	2,10
Tierras Forestales	F	7668	64,96
Zonas de reserva natural	R	3030	25,68
Total		11800	100,00

Fuente: CVC.

En el anexo se describen cada una de las unidades y subunidades de la distribución de la capacidad de uso del suelo.

Para los fines del presente estudio se determinaron los siguientes patrones de uso de la tierra en la cuenca:

- a) Bosque: Se refiere a bosque natural primario o secundario y bosque artificial productivos o no.
- b) Rastrojos: Areas que se encuentran en estado de bosque en sucesión secundaria en su fase inicial. Son áreas que se encuentran en descanso para un uso posterior, o bien, abandonados por ser tierras improductivas.
- c) Pastos: Se refiere a los terrenos utilizados permanentemente para forrajes herbáceos naturales o artificiales.
- d) Cultivos Permanentes: Son tierras destinadas a cultivos que ocupan el terreno durante largos períodos y no necesitan ser replantados después de una cosecha.
- e) Cultivos en limpio: Tierras destinadas a cultivos donde el suelo está sometido prácticamente a la acción directa de los agentes erosivos durante todo o parte del año.
- f) Páramo: Zonas con alturas mayores a los 3900 msnm y en donde la vegetación existente se compone de pastos naturales o arbustos pequeños. También hay afloramientos rocosos.

Los patrones históricos del uso de la tierra para los dos períodos del estudio se pueden observar en el Cuadro 6, así como en las Figuras 14 y 15.

Del Cuadro 6, podemos inferir que el uso de la tierra se ha mantenido prácticamente invariable excepto en la categoría de rastrojo, la que ha aumentado en 3,18% , lo que podría

Cuadro 6. Cambios en el uso de la tierra en la cuenca superior del río Nima, Colombia.

	1969		1989	
	Ha.	%	Ha.	%
Bosque	3775,2	31,99	3672,6	31,12
Rastrojo	438,8	3,72	813,8	6,90
Pastos	4622,4	39,17	4200,8	35,60
Cultivos permanentes	389,6	3,30	642,9	5,45
Cultivos en limpio	108,0	0,92	3,9	0,03
Páramo	2399,0	20,33	2399,0	20,33
Espejos de Agua	67,0	0,57	67,0	0,57
Total	11800,0	100,00	11800,0	100,00

Fuente: CVC.

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA**Departamento del Valle, Colombia****Escala 1 : 100.000**

Símbolo

Uso

1	Bosque
2	Pastos
3	Cultivos Permanentes
4	Cultivos en Limpio
5	Rastrojo
6	Páramo

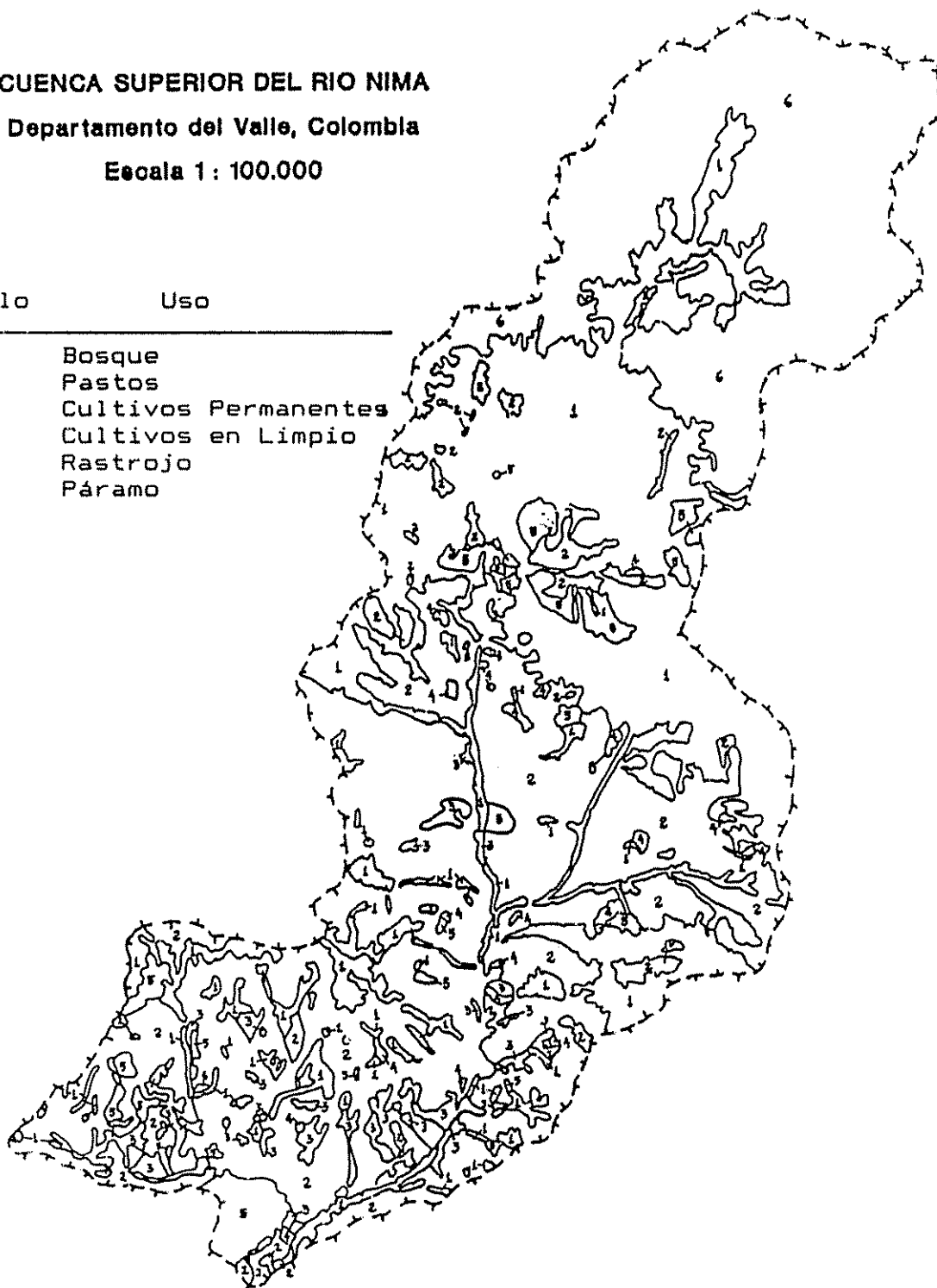


Figura 14. Mapa de Uso de la Tierra, 1969

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA

Departamento del Valle, Colombia

Escala 1 : 100.000

B	Bosque
P	Pastos
Cp	Cultivos Permanentes
Cl	Cultivos en Limpio
R	Rastrojo
Pa	Páramo

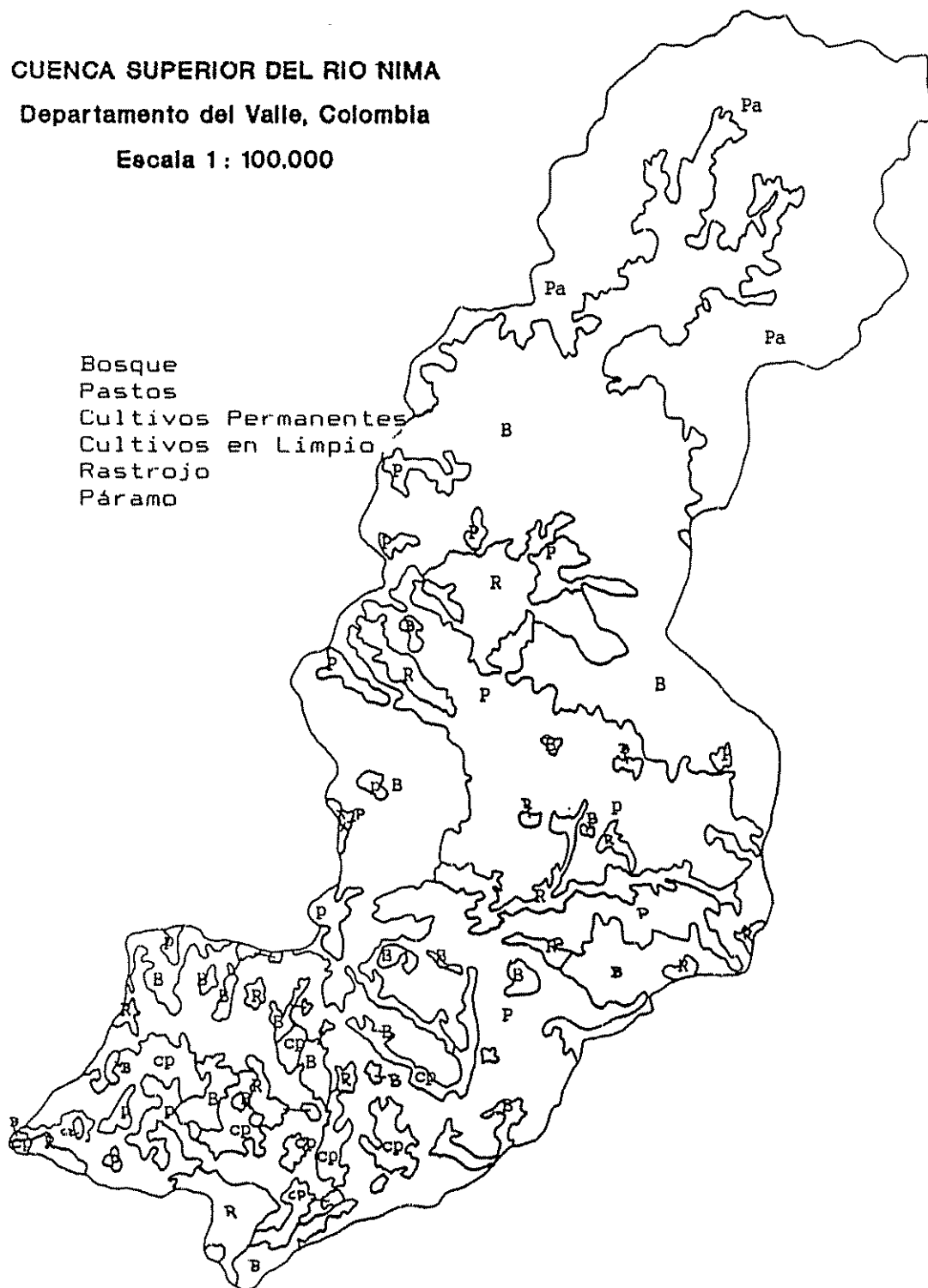


Figura 15. Mapa de Uso de la Tierra, 1989.

indicar que son áreas dedicadas a alguna actividad agropecuaria abandonada por degradación del suelo.

4.2.3.- Sobreuso de la tierra en la cuenca.

De acuerdo con lo señalado en la metodología, la evaluación de la problemática del uso histórico de la tierra en la cuenca se definió a partir de la superposición del mapa de capacidad de uso con cada uno de los mapas de uso de la tierra en el período correspondiente. Este método permitió definir las áreas de sobreuso, es decir, aquellas unidades de tierra que fueron sobrepasadas por el uso que se le dió a la tierra en el período correspondiente. De esta forma se pudo delimitar las áreas que presentan un alto riesgo de erosión. En el Cuadro 7 y las Figuras 16 y 17 se presentan las áreas con sobreuso para los dos períodos.

Se puede advertir que las formas de sobreuso presentes en la cuenca están dadas sobre todo por el uso de pastos en pastoreo extensivo en áreas con vocación forestal, además, la frontera agrícola entre 1969 y 1989 no ha tenido una variación significativa por lo que se podría pensar que el aporte de sedimentos de la cuenca al río Nima por lo menos debería haberse mantenido constante sin la implementación de las obras de control de erosión y torrentes.

4.3.- Efecto del uso de la tierra en la erosión de la cuenca.

En la región existen factores naturales que limitan en forma drástica el uso y manejo de los suelos. Con estas condiciones, el hombre ha intervenido modificando la

Cuadro 7. Areas críticas originadas por el sobreuso de la tierra en la cuenca superior del río Nima, Colombia.

PERIODO	SUREFICIE	
	Km ²	%
1969	43,9	37,2
1989	40,3	34,2

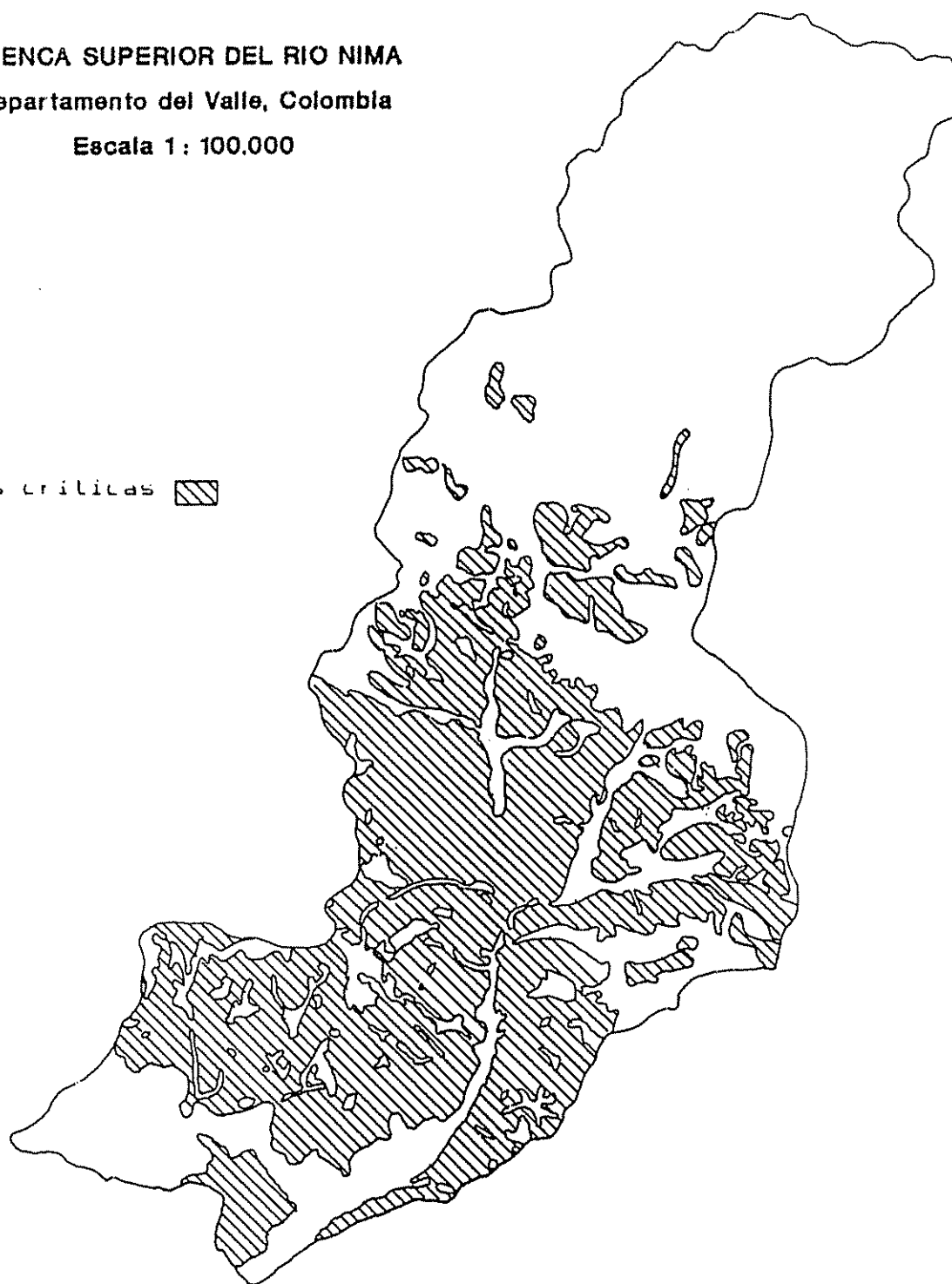

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA**Departamento del Valle, Colombia****Escala 1 : 100.000**áreas críticas 

Figura 16. Area en Sobreuso, 1969.

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA
Departamento del Valle, Colombia
Escala 1 : 100.000


áreas críticas 



Figura 17. Area en Sobreuso, 1989.

dinámica de los procesos naturales y acelerando la degradación de las tierras.

Los factores naturales que más han influido en la degradación de los suelos son: topográficos, climáticos, geológicos y edáficos, mientras que los antrópicos determinantes en el proceso erosivo son los relacionados con el uso y manejo de la tierra.

Independientemente de la topografía, en la cuenca domina el arrastre superficial de sedimentos, debido principalmente a la mala distribución de las lluvias en suelos con poca cobertura vegetal.

En la parte baja y media de la cuenca es frecuente encontrar cárcavas de gran tamaño y deslizamientos, asociados al sistema de fallas geológicas Romeral que son las que aportan la mayor cantidad de sedimentos a las aguas de los ríos y consecuentemente a los acueductos de las poblaciones. Sobresalen las cárcavas El Diamante, La Albania y Los Negros que sedimentan al río Nima, y son comunes en aquellos sitios donde se presenta uso impropio del suelo o cambios en los niveles de base de las corrientes, en especial por la construcción de la vía Palmira-Ataco, por falta de obras de drenaje y en terrenos no aptos para ello. Guzmán y Fernández (1985), citando a Leopold, et al (1966) y Glymph(1951), mencionan que la cantidad total de sedimentos que se produce por cárcavas, aunque es grande, por lo general es menor que el producido por la erosión laminar, aunque las pérdidas económicas de la disección de las tierras de ladera, daños a vías y estructuras de drenaje y la deposición de aluviones gruesos sobre las llanuras de inundación, son desproporcionadamente grandes.

En las partes más húmedas, las remociones en masa son los fenómenos dominantes, especialmente por condiciones litológicas y geoestructurales inestables. Se presentan a lo largo del sistema de fallas Romeral, acelerándose por el mal uso del suelo y las vías rurales. Comprenden una franja extensa, afectada por la máxima intensidad de las lluvias que produce gran erosividad de los suelos. Estos movimientos masivos, al aumentar el grado de turbidez del agua, han afectado la calidad de la misma para el consumo humano y por lo tanto el costo de su tratamiento (Guzmán y Fernández, 1985).

Un aspecto importante es la extracción de material en el lecho del río, esto proporciona un control para las inundaciones, pero las extracciones exageradas en los ríos provocan la profundización de sus cauces, causando erosión remontante y el socavamiento de cimientos de estructuras tales como puentes, bocatomas, muros longitudinales y espolones.

El aspecto principal y que merece una especial atención es el efecto de alteración de la red fluvial de la cuenca superior. Este efecto se produce por la profundización del nivel de base local de la cuenca en el cono de deyección, lo cual ocasiona el descenso de toda la red fluvial de la cuenca superior, causando erosión de fondo por acción remontante, y la acción dinámica aguas arriba aumenta los derrumbes de orillas y desequilibrios en los pies de taludes, formando afluentes colgados sin sustentación de fondo.

El río Nima por extracciones mecanizadas y manuales excesivas, en el corregimiento de Tienda Nueva, profundizó su cauce y descendió el nivel de base del ápice de abanico, ubicado en el antiguo puente de la vía Palmira-Potrerrillo. Se estima que aproximadamente el 70% de su longitud, el río

Nima ha profundizado el cauce, dejando en su trayectoria afluentes colgados (Suárez, 1986).

En el Cuadro 8 se observa que la erosión ligera, que se refiere a la laminar se ha disminuido drásticamente mientras que los grados de erosión severa y moderada se han incrementado fuertemente a pesar de que el uso de la tierra se ha mantenido casi invariable en la cuenca. Este fenómeno se puede estar presentando posiblemente debido a la agresividad de las lluvias en zonas sin protección y de fuertes pendientes, creando en estos sitios deslizamientos y cárcavas, incrementadas por la litología de la zona.

4.3.1.- Obras de control de erosión y torrentes en la cuenca.

A partir de 1979 la CVC ha construido, en la cuenca del río Nima, una serie de obras de control de erosión y torrentes en forma independiente o con otras entidades oficiales o particulares. En el Cuadro 9 se lista la relación de las principales obras y en la Figura 18 su ubicación espacial.

Algunas obras se refieren al tratamiento de cárcavas y torrentes, por problemas específicos generados por la construcción de vías de tercer orden. Estas, así como las construidas sobre las quebradas Balsillas, La Albania, El Cofre y La Esmeralda, tienen como objetivo reducir la turbidez del agua que va a la planta de tratamiento del acueducto del municipio de Palmira, la cual se aumenta con las altas concentraciones de sedimento fino producidas por la zona de esquistos grafiticos (Balsillas y Albania) y otros de suelos rojos diabásicos, originados en las quebradas El Cofre, La Esmeralda y otras.

Cuadro 8. Areas de erosión atribuibles a las distintas formas de sobreuso de la tierra en 1970 y 1986. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

GRADO	1970		1986	
	AREA (Ha)	%	AREA (Ha)	%
Muy severa	103,1	0,9	436,5	4
Severa	17,0	1,0	3165,2	27
Moderada	1034,6	8,8	2147,5	18
Ligera	6506,2	55,1	746,1	6
Erosión natural	4039,0	34,2	5304,7	45
TOTAL	11800,0	100,0	11800,0	100

Fuente: CVC.

Cuadro 9. Obras implementadas para el control de erosión y torrentes. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

OBRA	TRATAMIENTO EFECTUADO	OBRAS Y MEDIDAS UTILIZADAS
BALSILLAS	Obras mecánicas Repoblación Vegetal	Presas de fondo Zanjas de coronación Drenaje subsuperficial Reforestación
ALBANIA	Obras mecánicas Repoblación vegetal Aislamientos	Presas de fondo Zanjas de coronación Drenajes y subdrenajes
LA ESMERALDA	Cambio en el drenaje Aislamiento	Estructura de caída Alcantarillas
EL COFRE	Obras mecánicas	Presas de retención
LOS NEGROS	Obras mecánicas Repoblación vegetal	Terrazas Barreras vivas Reforestación Trinchos
AÑAZCOS	Obras mecánicas Obras biológicas Cambio en el drenaje	Trinchos Aislamientos Zanjas de coronación Barreras vivas
CALUCE	Obras mecánicas	Espolones
Km. 26	Cambio en el drenaje Obras biológicas	Canales de desviación Barreras vivas
EL CRIOLLO	Obras mecánicas	Trinchos
CAREPERRO	Obras mecánicas	Estructura de caída Muros en gaviones
VILLA CLAUDIA	Obras biológicas	Barreras vivas Cultivos en contorno
ALTO BELLO	Obras biológicas	Barreras vivas
LAS MERCEDES	Obras mecánicas	Muros en gaviones Trinchos

Fuente: CVC.

CUENCA SUPERIOR DEL RIO NIMA

Departamento del Valle, Colombia

Escala 1 : 100.000

- 1.- BALSILLAS
- 2.- ALBANIA
- 3.- LA ESMERALDA
- 4.- EL COFRE
- 5.- LOS NEGROS
- 6.- AÑAZCOS
- 7.- CALUCE
- 8.- Km. 26
- 9.- ELCRIDLO
- 10.- CAREPERRO
- 11.- VILLA CLAUDIA
- 12.- ALTO BELLO
- 13.- LAS MERCEDES

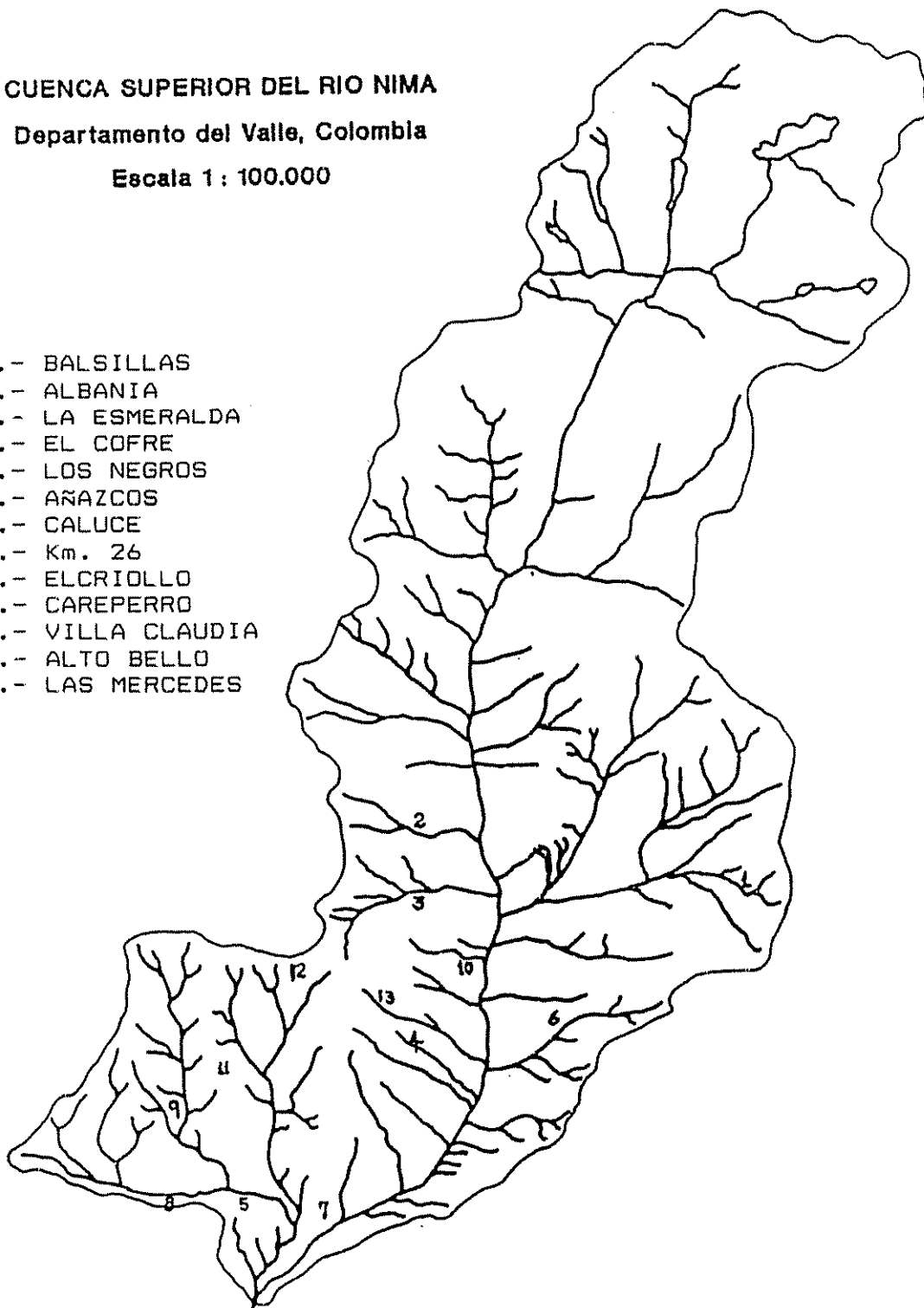


Figura 18. Principales Obras para el Control de la Erosión y los Torrentes.

Los tratamientos efectuados en las cárcavas y torrentes incluyen prácticas culturales y mecánicas, con las cuales se busca restablecer el perfil de equilibrio de la corriente, a partir de un nivel de referencia establecido y de un mejoramiento en las condiciones del escurrimiento de la cuenca de recepción. Para ello se ha utilizado el tratamiento convencional que consiste en (Guzman y Fernandez, 1985):

- Obras de estabilización del fondo de la garganta.
- Plantación de una cubierta vegetal en la cuenca de recepción y en las laderas de la garganta.
- Manejo hidráulico de las aguas superficiales y subsuperficiales que afectan el área y sus vecindades.
- Aislamiento del área problema.

Las estructuras más utilizadas en las obras han sido:

- Presas de fondo en concreto, gaviones, madera, de pared sencilla y de pared doble; cantos rodados, guadua, etc.
- Terrazas y banquetas en zonas secas y suelos permeables.
- Cunetas de desviación de concreto, suelo-cemento, tierra, cubiertas de vegetación, gaviones, piedra, pegada, etc.
- Alcantarillas.
- Drenes de tubería perforada.
- Espolones de concreto, gaviones, madera, etc.

4.4.- Análisis de la variación de la precipitación para ambos períodos del estudio.

Como se dijo anteriormente, este análisis es importante dado que la precipitación influye de manera decisiva en la cantidad de sedimento producido por la cuenca.

Al graficar la precipitación promedia mensual contra el tiempo para los dos períodos de análisis, se observa la gran variabilidad de ésta (ver Figura 19), de aquí que los coeficientes de variación sean de 45,89% y 54,24% para el primer y segundo período respectivamente. Sin embargo, la tendencia en ambos períodos se ha mantenido dado que la diferencia entre los coeficientes de variación es de sólo 8%, además la Figura 20 nos confirma lo anterior, de tal manera que aunque algunas fracciones del registro puedan sugerir una tendencia al aumento o a la disminución, existirá siempre una tendencia a regresar hacia la media (Linsley et al, 1977), las cuales son de 148 mm y 147,54 mm para el primer y segundo período respectivamente.

4.5.- Análisis del impacto de la precipitación en la turbidez del agua.

En la Figura 21 se muestra como ha sido la variación de la turbidez promedio mensual para el período 1973 - 1989. Se observa que a partir del año en que se empiezan a implementar las obras hay una disminución en la turbidez así como en la variación de esta. Los picos que se presentan corresponden a meses con precipitaciones promedias excesivas, lo que demuestra la gran influencia que tiene la precipitación sobre la turbidez.

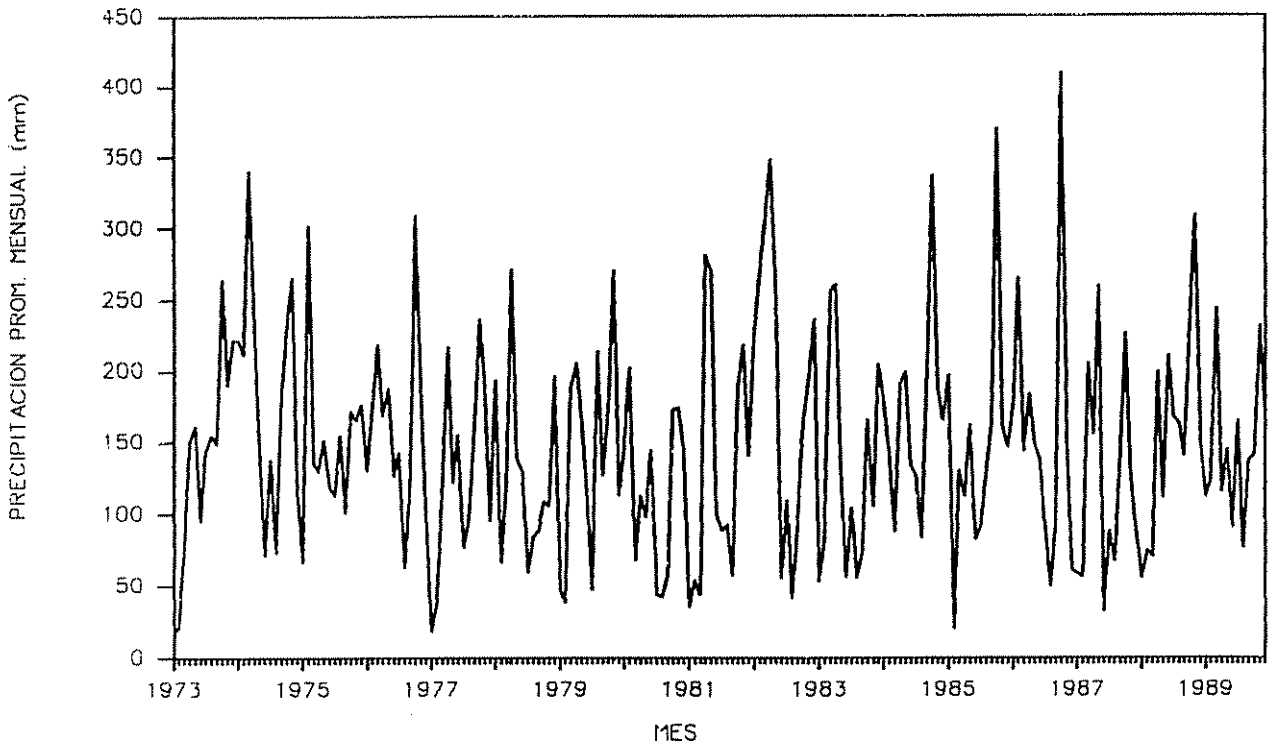


Figura 19. Precipitación promedio mensual. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

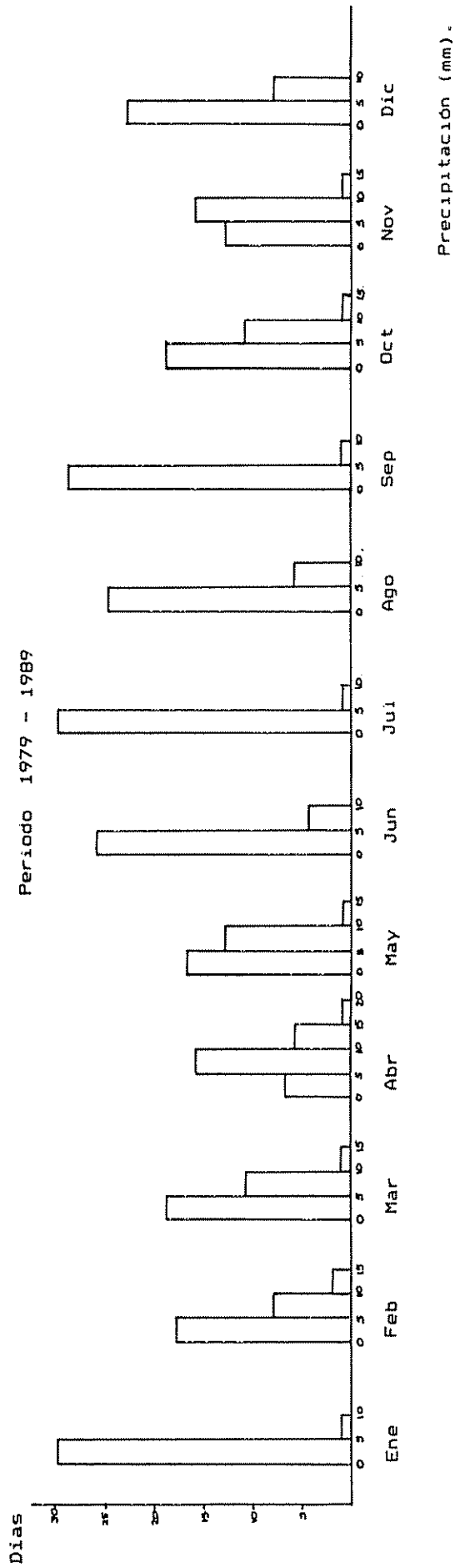
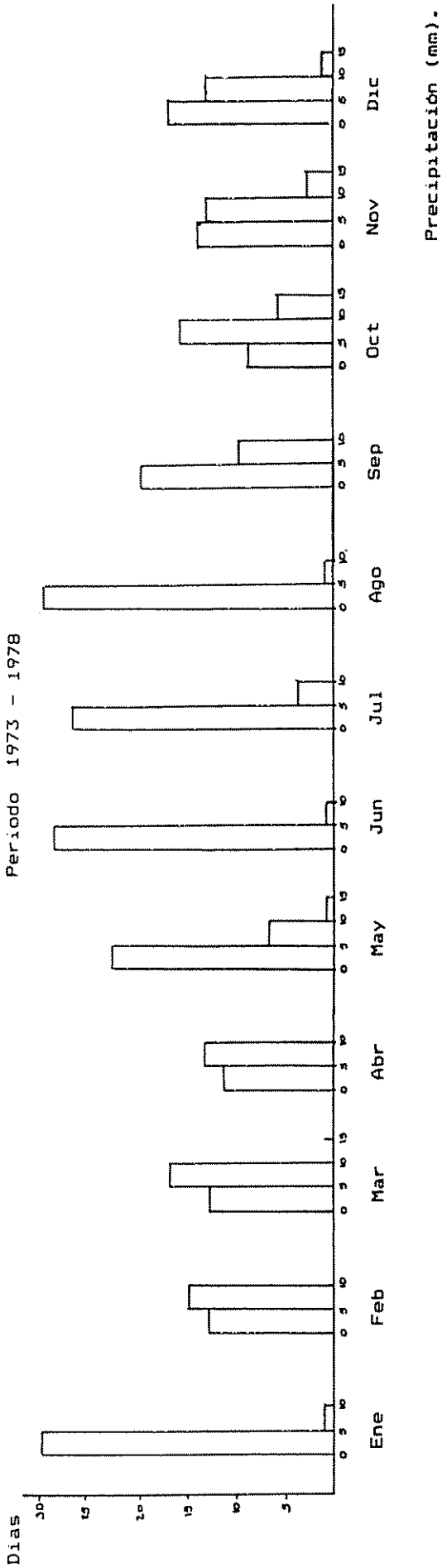


Figura 5. Distribución Anual de la Precipitación.

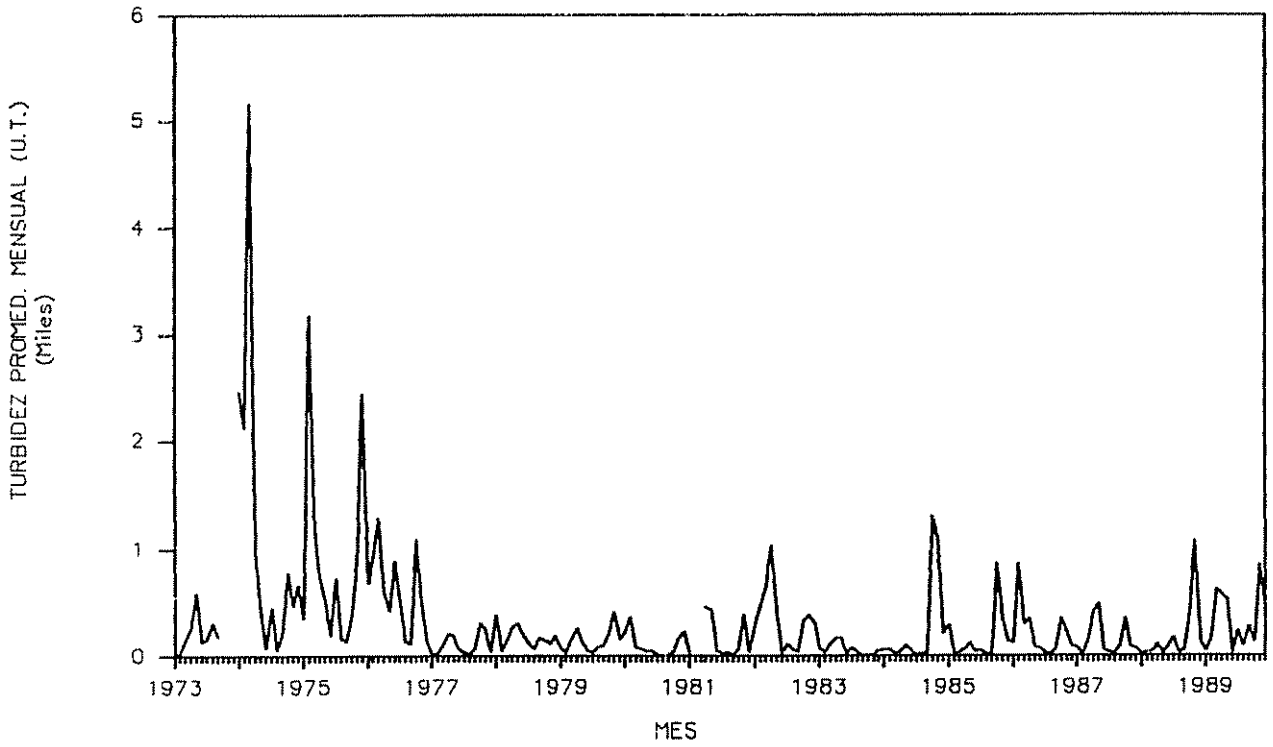


Figura 21. Turbidez promedio mensual. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

La relación entre estas dos variables se ha obtenido, para antes y después de la implementación de las obras, mediante un modelo de regresión simple donde la variable independiente es la precipitación promedio mensual en mm y la variable dependiente es la turbidez promedio mensual en U.T.

De esta manera, para el período 1973 - 1978 la ecuación de regresión que se obtuvo fue la curva logarítmica:

$$\text{Log T} = 1,51087529 + 0,00616617 * P.$$

El modelo obtenido arrojó un $R^2 = 0,544012$ y resultó altamente significativo ($\text{Pr} > 0,0001$).

En la Figura 22 se han graficado los datos observados, así como la curva de ajuste.

De la misma manera para el período 1979 - 1989 la ecuación de regresión fue:

$$\text{Log T} = 1,17987018 + 0,00524901 * P$$

La que arrojó un $R^2 = 0,534944$ siendo altamente significativo ($\text{Pr} > 0,0001$).

En la Figura 23 se muestran los puntos observados y la curva de ajuste para este período.

Para ambos períodos se observa claramente, que a medida que aumenta la cantidad de precipitación, aumenta con una mayor rapidez la turbidez del agua, como también la dispersión de los puntos se hace mayor lo que hace que los R^2 sean bajos.

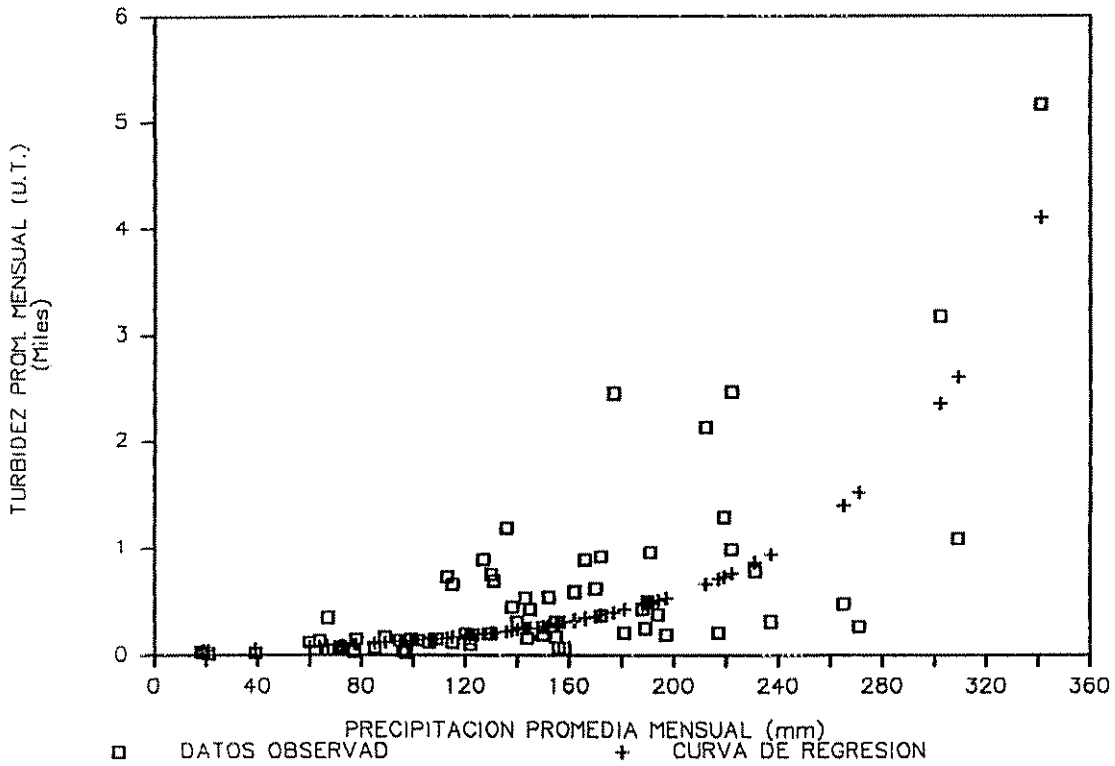


Figura 22. Relación entre precipitación y turbidez para el periodo 1973-1978. Datos observados y curva de ajuste. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

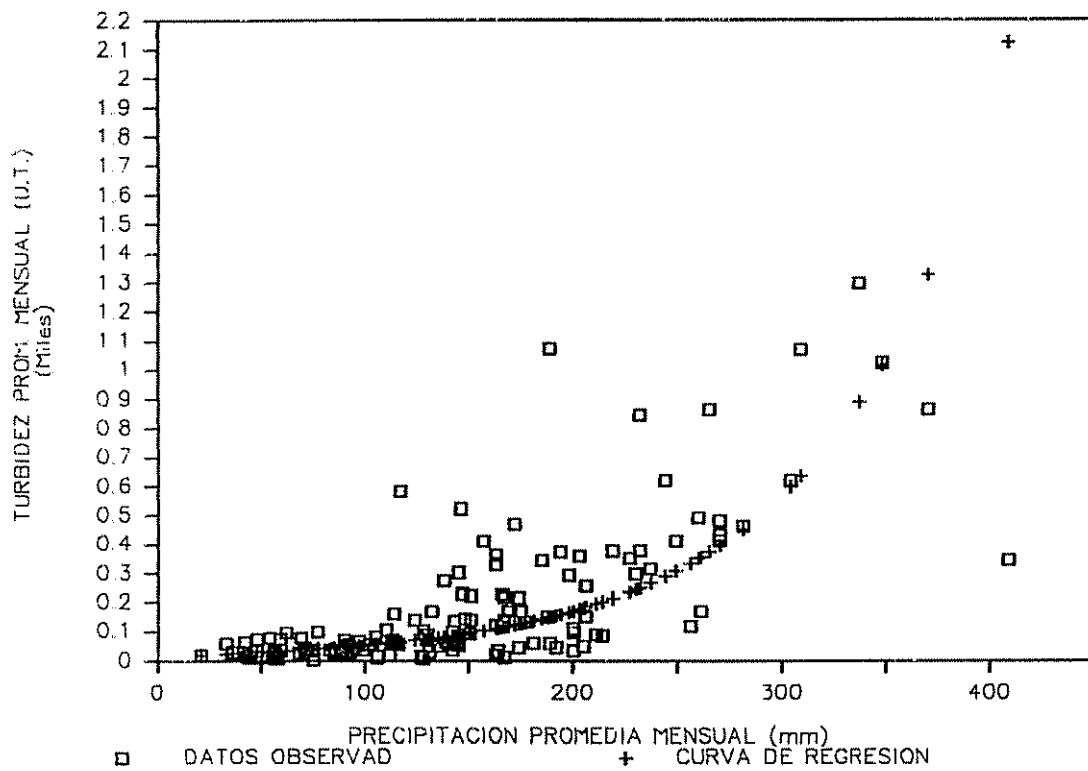


Figura 23. Relación entre precipitación y turbidez para el período 1979-1989. Datos observados y curva de ajuste. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

Al superponer las dos curvas sobre un mismo eje de coordenadas se puede deducir que la turbidez después de la implementación de las obras se ha disminuido en forma sustancial y mientras mayor es la precipitación, la diferencia en la turbidez entre las dos condiciones es aún mayor.

Por otro lado, para precipitaciones bajas, menores a 100 mm mensuales y según lo que se observa en la Figura 24, prácticamente las obras no tienen ningún efecto sobre la turbidez ya que bajas precipitaciones no producen erosión pues parte es interceptada y el resto se infiltra.

Como se quiere cuantificar el impacto de las obras en la turbidez del agua, se estimó cuál hubiera sido esta turbidez para el segundo período en el caso de no haberse implementado las obras y dado que la precipitación y el uso de la tierra no tuvieron una variación sustancial entre uno y otro período del análisis, es lógico pensar que la turbidez hubiera seguido la misma tendencia sin las obras. Teniendo en cuenta la anterior, los valores de precipitación observados en el segundo período se reemplazaron en la ecuación de regresión precipitación versus turbidez del primer período y así obtener valores estimados de turbidez para el segundo período en el caso de no haber obras, los que se compararon con la turbidez real presentada.

Lo anterior se puede apreciar en el Cuadro 10 que muestra que para cada año entre 1979 y 1988 hubo una disminución de la turbidez del agua del 37,1% en promedio. Sin embargo para el último año del segundo período de análisis la turbidez por el contrario se aumentó en 8,74%. Para tratar de explicar este fenómeno se revisaron los datos de precipitación para este último año encontrándose que no hay un incremento de esta para provocar aumento en la turbidez.

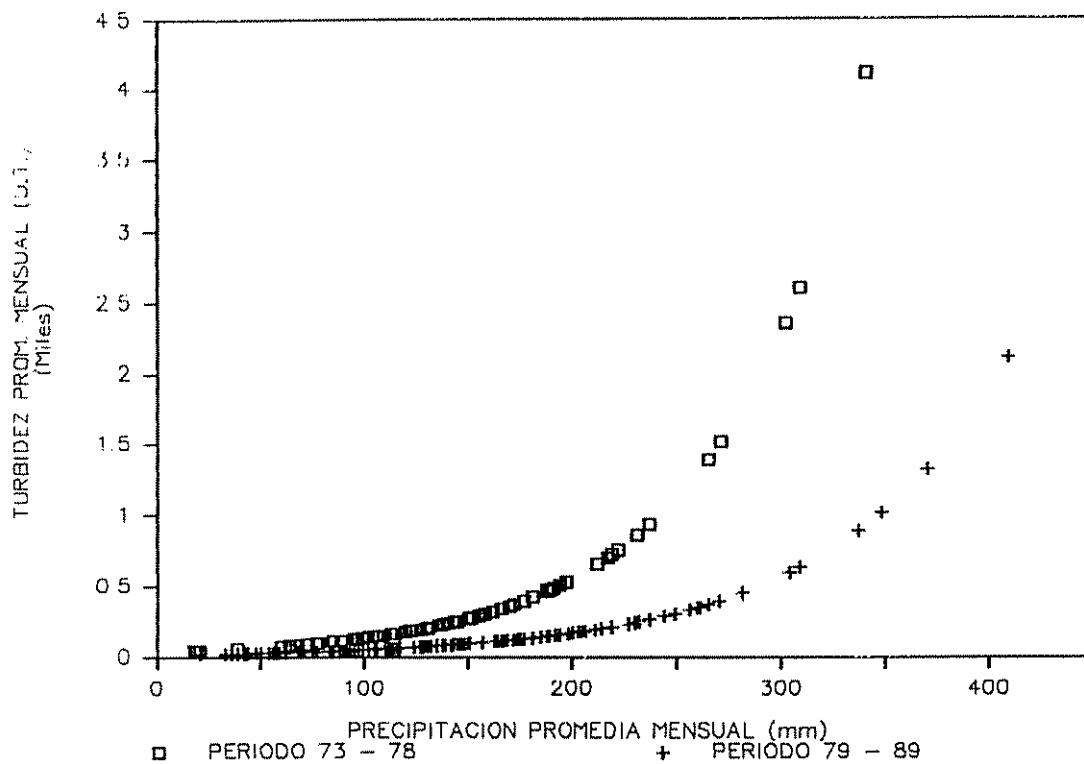


Figura 24. Modelos de regresión entre precipitación y turbidez para ambos periodos del análisis. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

Cuadro 10. Turbidez observada y estimada con y sin obras para el período 1979 - 1989. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

año	precipitac. observ.mm	turbidez con obras	turbidez sin obras	% de disminución
1979	143	142,30	246,97	42,38
1980	118	107,30	173,17	38,04
1981	131	150,12	208,28	27,92
1982	192	340,56	495,20	31,23
1983	130	64,06	205,34	68,80
1984	170	247,20	362,35	31,78
1985	148	167,78	265,14	36,70
1986	160	212,62	314,39	32,37
1987	126	154,24	194,00	20,49
1988	158	179,34	305,58	41,31
1989	147	284,26	261,40	-8,74
Promedio				32.93

Hay varias posibles causas para este hecho, una es que puede ser causado por precipitaciones con intensidades extremas lo cual no se pudo comprobar por falta de información.

Puede ser también que algunas obras están llegando al término de su vida útil por lo que ya no ejercen un control efectivo sobre la retención de sedimentos, sin embargo no hay una tendencia al aumento de la turbidez en los años anteriores.

Otra razón puede ser que el diseño e implementación de las obras y proyectos hidráulicos pierden relevancia ya que las condiciones básicas de estos diseños son alteradas por la gestión que se haga de los recursos naturales.

4.6.- Análisis del impacto de la precipitación en la alteración de la turbidez sobre el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento.

Al graficar el consumo promedio mensual de sulfato de aluminio en Kg/M^3 de agua tratada con respecto al tiempo para el período comprendido entre 1973 y 1989, se observa una gran variabilidad en este consumo (ver Figura 25). En esta relación, los picos corresponden a alta turbidez y ésta a su vez a eventos de alta precipitación, lo que indica la relación entre estas tres variables.

A pesar de esta relación y de la disminución en la turbidez con la implementación de las obras ya establecida, no se aprecia en este Figura una disminución en consumo de sulfato de aluminio en el segundo período. Dada esta situación, se estableció un modelo de regresión múltiple de acuerdo con lo descrito en la metodología, el cual dio:

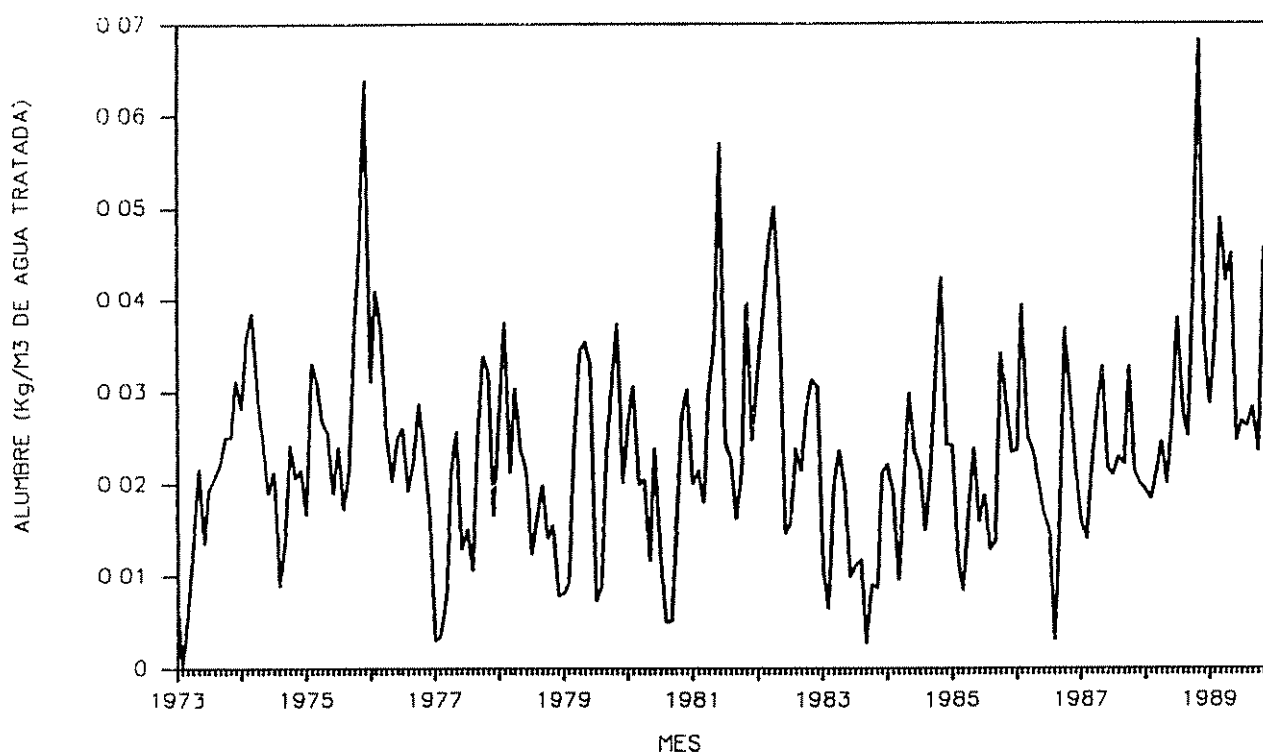


Figura 25. Consumo mensual de sulfato de aluminio por metro cúbico de agua tratada. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

$$A = -0,023315729 + 0,00380383 * \text{Ln } T + 0,00582717 * \text{Ln } P$$

Donde "A" es el consumo de sulfato de aluminio en Kg/m^3 de agua tratada, "T" es la turbidez promedio mensual en U.T. y "P" la precipitación promedio mensual en mm.

El modelo obtenido arrojó un $R^2 = 0,507143$ y tanto el intercepto como cada uno de los parámetros resultaron altamente significativos ($\text{Pr} > 0,0001$).

Mediante este modelo se estimó el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento en el caso de no haberse implementado las obras, tal como se indica en la metodología, para compararlo con el consumo real del segundo período del análisis. Los resultados para cada año se presentan en el Cuadro 11.

En este cuadro se aprecia una disminución en el consumo de sulfato de aluminio por metro cúbico de agua tratada, para cada año del período 1979 - 1988 en promedio de 6,96% mientras que para el último año, 1989 por el contrario se incrementó el consumo en 1.2% debido al aumento de la turbidez en este año.

En los modelos de regresión presentados, puede observarse que algunos R^2 son bajos debido a diversas causas (Linsley et al., 1978; Mahmood, 1987). Los pares de puntos que se obtienen a partir de series de aforos líquidos y sólidos simultáneos presentan siempre una gran dispersión alrededor de las curvas teóricas de ajuste que se calculan por métodos numéricos. Para poder explicar la causa de esta dispersión es necesario tener en cuenta otras variables que se derivan de los procesos erosivos en la cuenca y del régimen de transporte del río (Silva, 1985) como por ejemplo:

Cuadro 11. Disminución en el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento para el período 1979 - 1989 por la implementación de las obras. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

año	consumo $Al_2(SO_4)_3$ con obras	consumo $Al_2(SO_4)_3$ sin obras	disminucion en consumo de alumbre	% de ahorro
1979	0,02462120	0,02671830	0,00209710	7,8
1980	0,02242759	0,02424837	0,00182077	7,5
1981	0,02431396	0,02555948	0,00124552	4,9
1982	0,02965760	0,03108164	0,00142403	4,6
1983	0,02102990	0,02546082	0,00443091	17,4
1984	0,02772973	0,02918433	0,00145459	5,0
1985	0,02544801	0,02718860	0,00174058	6,4
1986	0,02680326	0,02829099	0,00148772	5,3
1987	0,02419018	0,02506267	0,00087249	3,5
1988	0,02608246	0,02810967	0,00202721	7,2
1989	0,02741402	0,02709509	-0,0003189	-1,2
			promedio	6,2

El consumo de $Al_2(SO_4)_3$ está dado en Kg/M^3 de agua tratada.

- a) La concentración de sedimentos, puede ser el resultado de precipitaciones de diferente intensidad, por lo cual el transporte de sedimentos y por lo tanto la turbidez, varía enormemente.
- b) La distribución espacial de la precipitación puede ser una causa importante en las altas tasas de variación, ya que los distintos sectores de la cuenca presentan diferentes tipos y tasas de producción de sedimentos.
- c) En investigación en manejo de cuencas, muchos factores de una predicción no pueden ser explicados suficientemente por los modelos, por cuanto no se trata de experimentos controlados por lo que muchos de estos factores son aleatorios.
- d) En hidrología, no ha sido posible investigar lo suficiente en modelos que expliquen y definan cuantitativamente las tasas de transporte de sedimentos por un curso de agua.
- e) El consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento no sólo depende de la turbidez sino también de otra serie de variables como color y pH, que no se tomaron en cuenta, (el pH se encontró siempre dentro del rango óptimo: 5,5 - 8,0).
- f) La medida de la turbidez está influenciada por la subjetividad o experiencia de la persona que hace el análisis.

4.7.- Análisis del impacto económico de la alteración en el consumo de sulfato de aluminio atribuible a la implementación de las obras en el período 1979 - 1989.

El efecto de la torrencialidad y la erosión trae consecuencias económicas sobre la planta de tratamiento que se analizarán en el presente capítulo dado que ya ha sido estimado el efecto de las obras sobre la turbidez.

En el Cuadro 12 se presenta el ahorro en dólares americanos para cada año debido al menor consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento el cual fue de 49.220,54 dólares de 1989, así como la inversión que se ha realizado por concepto de las obras tanto mecánicas como biológicas en la cuenca que ascendió a 382.909,98 dólares de 1989.

No se pretende que el ahorro en la planta de tratamiento cubra las inversiones hechas en la cuenca, pues los beneficios de estas obras no sólo están dados por este ahorro sino que cubren otros factores que se mencionarán más adelante. Sin embargo la relación beneficio/costo de 0,13, indica que el sólo ahorro en consumo de sulfato de aluminio está cubriendo el 13% de la inversión, sin contar con otros beneficios en la misma planta como mejora en la calidad bacteriológica del agua (Arboleda, 1973), aunque la Figura 26 muestra un aumento en el consumo de cloro por metro cúbico de agua tratada.

Cuadro 12. Ahorro producido por la disminución en el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de agua. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

año	disminución en consumo sulfato de aluminio	M ³ de agua tratada por año	ahorro en \$	inversión en \$
1979	0,00209710	18'444.410	7426,06	152345,03
1980	0,00182077	19'460.400	8601,27	39932,13
1981	0,00124552	20'703.260	3724,66	8413,84
1982	0,00142403	19'676.460	3123,34	68414,06
1983	0,00443091	20'995.032	9408,18	91762,01
1984	0,00145459	20'458.584	2799,70	1620,27
1985	0,00174058	20'769.552	3664,24	13303,39
1986	0,00148772	21'036.828	3516,60	1228,97
1987	0,00087249	21'156.744	2145,96	1401,01
1988	0,00202721	20'574.168	6005,31	925,61
1989	-0,00031890	20'852.244	-1194,78	3563,66
total			49220,54	382909,98

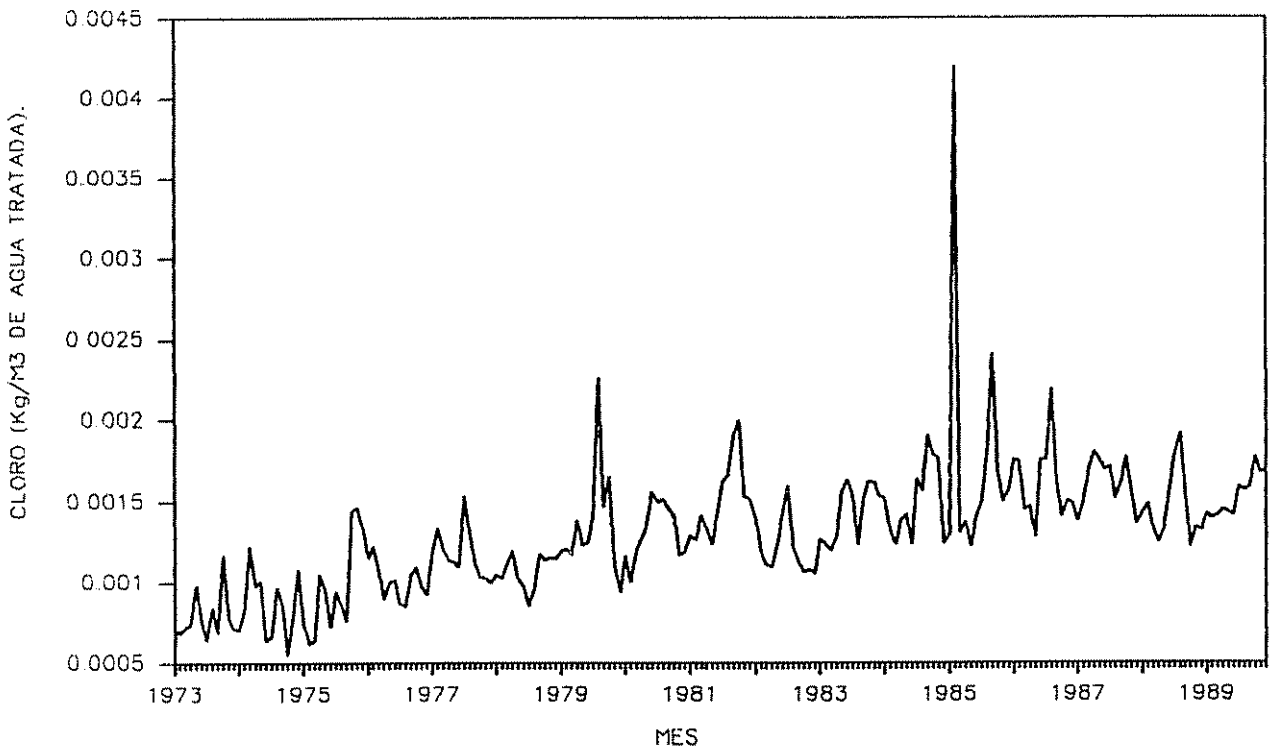


Figura 26. Consumo mensual de cloro en la planta de tratamiento de agua. Cuenca superior del río Nima, Colombia.

Además de los beneficios anteriores en la planta de tratamiento, la calidad del agua que se entrega a la población se mejora debido a que se distribuye con una menor turbidez después de la implementación de las obras. Esto se deduce de la Figura 27 que muestra las curvas de ajuste para el consumo de sulfato de aluminio y la turbidez del agua antes y después del tratamiento.

Antes de la implementación de las obras el agua llegaba a la planta con una turbidez elevada y se distribuía, después del tratamiento, con una turbidez ya muy reducida. Sin embargo, al implementarse las obras, el agua que llega a la planta con una turbidez menor, es distribuída a la población con valores de turbidez menores que en el primer período. Obviamente, los valores de turbidez del agua que se entrega a la población, para antes y después de la implementación de las obras, son tan bajos que prácticamente son imperceptibles. A esto es necesario añadir que dada una menor turbidez, la planta deja de operar por períodos de tiempo menores, logrando mejorar su eficiencia y pudiendo tratar más agua.

Además de los beneficios en la planta de tratamiento, las obras aportan otra serie de beneficios cuantificables que no son objeto de este trabajo por lo que sólo se hará mención de los más importantes:

- a) Disminución en costos de mantenimiento y operación en las plantas hidroeléctricas, pues a menor arrastre de material disminuye el desgaste de las piezas en contacto con éstos.
- b) Disminución en costos de mantenimiento de canales de irrigación por una menor sedimentación, lo que produce una mayor eficiencia.

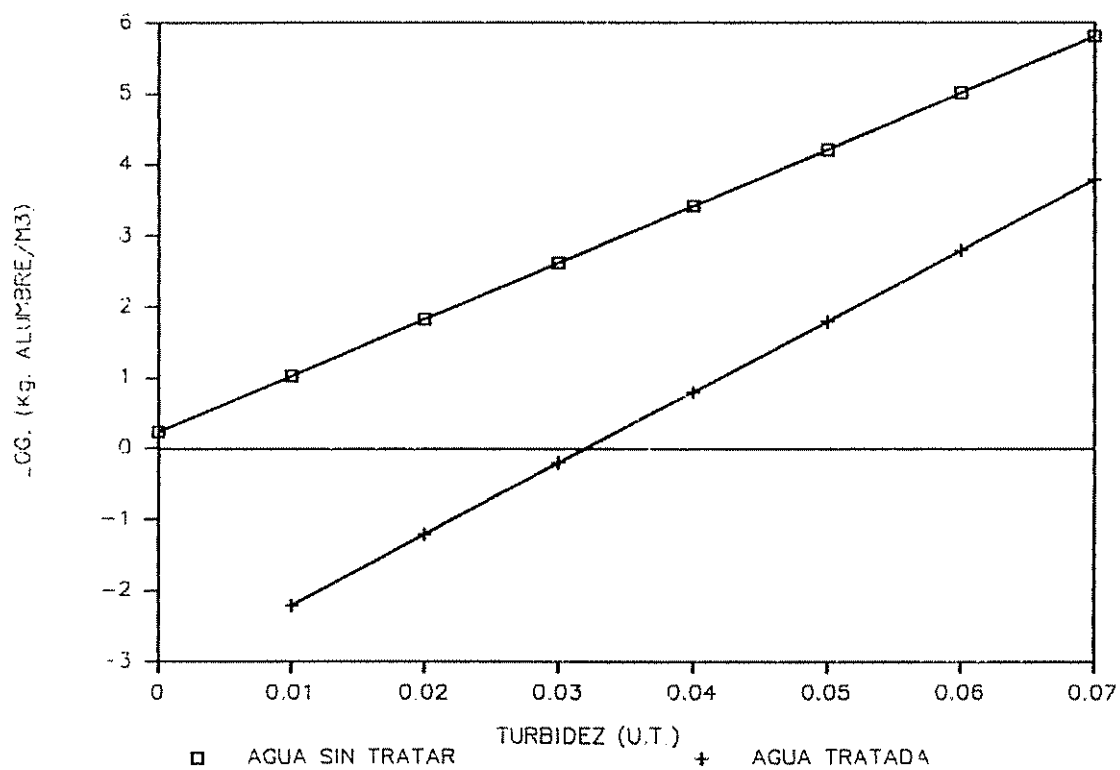


Figura 27. Turbidez del agua cruda y tratada frente al consumo de sulfato de aluminio. Cuenca superior del río Nima, Colombia

- c) Aumento en el precio de la tierra por las mejoras inducidas mediante la corrección del problema torrencial. (por este motivo no se tomo en cuenta en el cálculo de la inversión).

- d) El restablecimiento de la estética del paisaje es otro beneficio, aunque difícil de cuantificar.

- e) La implementación de reforestaciones comerciales proporciona beneficios económicos además de disponibilidad de madera y fuentes de empleo.

5.- CONCLUSIONES.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

1- A pesar de que el uso de la tierra no ha sufrido grandes cambios entre 1969 y 1989 y por ende las áreas críticas originadas por el sobreuso (disminución de sólo el 3%), de que la cantidad de precipitación ha conservado la misma tendencia, la erosión originada por la formación de cárcavas, deslizamientos y derrumbes se ha incrementado mientras que la áreas con erosión laminar se han disminuido del 55,14% a sólo el 6%.

2- El régimen torrencial y diversas condiciones como el sobreuso de la tierra, la alteración del régimen hídrico, las fuertes pendientes, la alta inestabilidad de algunos suelos y condiciones geológicas y geomorfológicas naturales han favorecido fenómenos erosivos en detrimento de la calidad de las aguas.

3- Para el período comprendido entre 1979 y 1988 se encontró una disminución en la turbidez del 37,1% lo que indica de que las obras están cumpliendo un papel importante en cuanto a la disminución de sedimentos provocados por erosión. Lo anterior, sin embargo, no se cumple para el último año (1989) del análisis dado que por el contrario hubo un aumento en la turbidez del 8,74% en relación al supuesto de no existir las obras. Este fenómeno puede deberse a que las obras mecánicas ya cumplieron con su período de vida útil por lo tanto ya no ejercen un control efectivo sobre la retención de sedimentos que llegan a la planta de tratamiento. Otra causa puede ser también de que la precisión y esfuerzos que se emplean en el diseño e

implementación de las obras y proyectos hidráulicos pierden relevancia ya que las condiciones básicas de estos diseños son alterados por la gestión que se haga de los recursos naturales; por último, queda la interrogante de si las obras biológicas fueron claramente diseñadas para ejercer un control luego de que las mecánicas cumplieren con su vida útil.

4- Existe una relación directa entre la turbidez y el consumo de sulfato de aluminio en la planta de tratamiento dada por las referidas ecuaciones de regresión para antes y después de la implementación de las obras de tal manera que a medida que aumenta la turbidez, aumenta también el consumo de sulfato de aluminio.

5- Existe una relación directa entre la precipitación y la turbidez de tal manera que un aumento en la precipitación hace que la turbidez crezca en forma logarítmica. De estas relaciones se pudo establecer que para precipitaciones promedias mensuales mayores de 100 mm la turbidez del agua ha tenido una disminución promedio del 35% lo que indica que las obras están aportando un beneficio en lo que se refiere a la calidad de las aguas.

Para precipitaciones promedias mensuales inferiores a 100 mm la turbidez es relativamente baja y no tiene una variación significativa entre uno y otro período del estudio, lo que indica que es una turbidez originada por la erosión natural de la cuenca y que bajas precipitaciones no producen una elevación de la turbidez ya que es interceptada e infiltrada por lo que no se produce escorrentía.

6- Las ecuaciones de regresión entre consumo de alumbre, turbidez y precipitación, permitieron comprobar que hubo una consistente disminución en el consumo de sulfato de aluminio

en promedio del 7% a causa de la implementación de las obras para el control de la erosión y los torrentes.

7- La implementación de las obras influyó en la disminución del consumo de sulfato de aluminio lo que trajo como consecuencia directa a la planta de tratamiento un ahorro anual en promedio de U\$ 41.024,15 y por consiguiente una mejora en la calidad del agua y un mejor servicio para la ciudad de Palmira por parte del acueducto de esta ciudad.

8- La creación del parque natural Páramo de las Hermosas ha ejercido probablemente una influencia decisiva en el régimen de caudales, pues actúa como regulador natural de las precipitaciones, y en el control de los fenómenos erosivos de la cuenca superior del río Nima en razón a que se ha efectuado una protección eficiente.

Lo anterior, sumado a otros beneficios calificados en el trabajo, permiten afirmar la hipótesis del estudio y fortalecer los programas de control de erosión que desarrolla la CVC; no obstante, estos deberán en lo sucesivo seguir un plan de desarrollo secuencial, sobre la base de la vida útil de las diferentes obras y para las diferentes actividades que existen en la cuenca, armonizando la conservación con el aprovechamiento.

6.- RECOMENDACIONES.

1- Es conveniente llevar un registro continuo de caudales, así como también registros de producción de sedimentos para tener mejores elementos para el diseño y seguimiento de las medidas a tomar para el control de la erosión y los torrentes.

2- Dado el aumento de la turbidez en el último año del análisis (1989) se hace necesario realizar estudios para el año de 1990 para establecer si sigue o no esta tendencia y tomar medidas al respecto.

3- Un estudio de energía tanto del río Nima como de sus afluentes, permitirá determinar cuál es la capacidad de arrastre de estos y así tomar medidas más eficaces, que mitiguen el problema torrencial y de los afluentes colgados a causa de la extracción de materiales del lecho del río.

4- A la luz del presente estudio y de la valiosa información que posee la CVC, es conveniente la valoración integral, secuencial y de prioridades de acción en cuanto a torrentes, estableciendo las externalidades e internalidades de los costos y beneficios.

BIBLIOGRAFIA

- ARBOLEDA, J. 1973. Teoría, diseño y control de procesos de clasificación del agua. *In*. Notas del curso sobre tecnología del tratamiento de agua para países en desarrollo, Lima, Perú, 1977. Lima, CEPIS. (serie técnica. Manual Nº 13)
- BRANCO, S.M. 1984. Limnología sanitaria. Estudio de la polución de las aguas continentales. Washington, Secretaría General de la Organización de Estados Americanos. 120 p.
- BURGOS, A.; GARCIA, A. 1986. Estudio de zonificación de la cuenca del río Nima. Cali, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Cauca. 47 p.
- CLARK, J.W.; VIESSMAN, W.; HAMMER, M.J. 1971. Water supply and pollution control. *In* International Textbook Co. Pennsylvania, USA. p. 412 - 421.
- COHEN, J.M.; HANNAH, S.A. 1975. Coagulación y floculación. Control de calidad y tratamiento del agua. *In* Manual de abastecimientos públicos de aguas. Traducido por Federico de Lora. Madrid, Instituto de Estudios de la Administración Local.
- COMISION FORESTAL EUROPEA. GRUPO DE TRABAJO SOBRE ORDENAMIENTO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS DE MONTAÑA. 1973. Informe Final, décima reunión, Oslo, Noruega, 1972. Roma, FAO. p. 6 -7.
- COMITE DE PROTECCION Y MEJORAMIENTO DE LA CUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO NIMA. 1986. Principales logros durante el período 1980 - 1985. Palmira, Colombia. Empresas Públicas Municipales de Palmira, Corporación Autónoma Regional del Cauca, Gobernación del Departamento del Valle. 28 p.
- COMITE DE PROTECCION Y MEJORAMIENTO DE LA CUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO NIMA, 1988. Informe de actividades. Palmira, Colombia, Gobernación del Valle, Municipio de Palmira, Corporación Autónoma Regional del Cauca, Empresas Públicas Municipales de Palmira. 28 p.
- DIAZ, A.A. 1983. Tropical storms in Central America and the Caribbean. Characteristic rainfall and forecasting of flash floods. *In* Hydrology of humid tropical region. Ed. R. Keller. Hamburg, Federal Republic of Germany, IAHS. P. 39 - 51. (Publication Nº 140).

- ESPINAL, T. 1968. Visión ecológica del Departamento del Valle. Cali, Colombia, Universidad del Valle. 103 p.
- ESPINOSA, J. 1985. Uso del modelo hec-6 en la cuantificación de procesos erosivos Urra-río Sinú; un caso práctico. In Congreso Colombiano de Cuencas Hidrográficas (3,1985, Cali, Colombia). Memoria. Cali, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Cauca. p. 25 - 104.
- FAUSTINO, J. 1985. Informe de consutoría en calidad de aguas, Panamá. Primera parte. Panamá, CATIE.
- GARCIA, J.M. 1962. Principios de hidráulica torrencial; su aplicación a la corrección de torrentes. 2 ed. Madrid, Ministerio de Agricultura. 350 p.
- GOMEZ, A.A. 1975. Manual de conservación de suelos de ladera. Chinchina, Colombia, CENICAFE, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 259 p.
- GRAF, W.H. 1984. Hydraulics of sediment transport. Chelseu, USA, Water Resources Publications. 513 p.
- GUTIERREZ, C. 1988. Potencialidad hídrica y el uso de la tierra en el manejo de cuencas. In Curso Planificación del Uso de la Tierra en el Manejo de Cuencas (1988, Turrialba, Costa Rica). [Informe]. Turrialba, CATIE. 19 p.
- GUZMAN, F.; FERNANDEZ, C. 1985. Evaluación preliminar de las obras y medidas de control de erosión en la CVC. In Congreso Colombiano de Cuencas Hidrográficas (3, 1985, Cali, Colombia). Memoria. Cali, Corporación Autónoma Regional del Cauca. 41 p.
- HAMILTON, L.S.; KING, P.N. 1983. Tropical forested watersheds. Hydrological and soil response to major uses or conversions. Boulder, Colorado, Westview Press. 188 p.
- HAMMER, T.R. 1972. Stream channel enlargement due to urbanization. Edmonton, Canada. Regional Science Research Institute. 41 p.
- HATTINGER, H. 1976. Torrent control in the mountains with reference to the tropics. In Hydrological techniques for upstream conservation. FAO. Conservation Guide Nº 2. p. 119 - 134.
- HEEDE, B.H. 1972. Influences of a forest on the hydraulic geometry of two mountain stream. Water Resources Bulletin (EE. UU.) vol: 523 - 530.

- HEWLETT, J.D. 1969. Principles of forest hydrology. Athens, University of Georgia Press. 183 p.
- KIRBY, M.J.; MORGAN, R.P.C. 1983. Erosión de suelos. Trad. por José Hurtado Vega. México, D.F., Limusa. 375 p.
- KUNKLE, S.H.; COMER, G.H. 1971. Estimating suspended sediment concentration in streams by turbidity measurements. Journal of Soil and Water Conservation (EE.UU.) 26: 18-20.
- LEONARD, H.I. 1986. Recursos naturales y desarrollo económico en América Central: Un perfil ambiental regional. Trad. por Gerardo Budowski y Tirso Maldonado. San José, C.R., CATIE. 268 p.
- LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. 1977. Hidrología para ingenieros. 2 ed. Trad. por Alejandro Deeb, Jaime Ordoñez y Fabio Castrillón. Bogotá, Col., Mac Graw Hill. 386 p.
- LOPEZ, F.; BLANCO, M. 1968. Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte de materiales. Madrid, Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. 190 p.
- LOPEZ CADENA DE LLANO, F. 1988. Corrección de torrentes y estabilización de cauces. FAO. Fomento de tierras y aguas Nº 9. 182 p.
- LULL, H.W.; SOPPER, W.E. 1965. Prediction of average annual and seasonal streamflow of physiographic units in the northeast. In forest hydrology. Ed. by W.E. Sopper; H.H. Lull. Oxford, Pergamon Press. p. 507 - 526.
- MAHMOOD, K. 1987. Reservoir sedimentation. Washinton, World Bank. 118 p. (technical paper Nº 71).
- MAMAK, W. 1964. River regulation Traslated by Jerzy Rzewuski, Andrzej Machalski and Josef Budziakowski. Washington, US. Departament of Commerce. 379 p.
- MOJICA, I.H. 1971. Effects of changes in land use on the streamflow of the Reventazon River, Costa Rica. PhD. Thesis. Washington, University of Washington. 185 p.
- MOLCHANOV, A.A. 1963. The hidrologycal role of forest. Translated from Russian by A. Gorevitch. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translation. 407 p.

- MUÑOZ, M.V. 1969. Inventario geológico en la cuenca superior del río Nima. Palmira, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Cauca, Administración Cuenca del Río Nima. Vol 1, 76 p.
- MURILLO, J. 1978. Inundaciones. In Curso sobre Integración de Aprovechamientos Fluviales. Vol. IV. Bogotá, Colombia, Proyecto Colombo-Holandés, Plan de Regulación Fluvial y Defensa contra las Inundaciones en la Cuenca Magdalena-Cauca, Universidad de los Andes, INDERENA.
- NAKANO, H. 1965. Effects of changes of forest conditions on water yield, peak flow and direct runoff of small watershed in Japan. In Forest hydrology. Ed. by W.E. Sopper; H.H. Lull. Oxford, Pergamon Press. p. 557 - 563.
- PENMAN, H.L. 1965. Evaporation from forest: a comparison of theory and observation. In Forest hydrology. Ed. by W.E. Sopper; H.H. Lull. Oxford, Pergamon Press. p. 373 - 389.
- QUINTERO, P.L. 1985. Metodología para la planificación y gestión de recursos hídricos mediante el uso de metodologías adelantadas. Modelo IDRO-ITALECO. In Congreso Colombiano de Cuencas Hidrográficas (3, 1985, Cali, Colombia). Memorias. Cali, Corporación Autónoma Regional del Cauca. 25 p.
- REGALADO, G. 1978. Recursos hídricos en el Valle del Cauca. In Curso sobre integración de aprovechamientos fluviales: Vol. 6. Bogotá, Colombia, Proyecto Colombo-Holandés, Plan de Regulación Fluvial y Defensa Contra Inundaciones en la Cuenca Magdalena-Cauca, Universidad de los Andes.
- REVELO, D.; CARLOS, F. 1972. Estudios químicos y de fertilidad en los suelos de las hoyas hidrográficas del Nima y Amaime. Cali, Col., CVC, Depto Agropecuario, Sección Suelos. 81 p.
- RODRIGUEZ, I.; FORERO, J. 1990. Estudio general unificado de suelos de la zona de ladera de jurisdicción de la CVC. Cali, Colombia, CVC, Subdirección de Recursos Naturales, División de Asistencia Técnica, Sección Suelos.
- RODRIGUEZ, Y. 1978. Diagnóstico global del problema torrencial de seis subcuencas del país, tributarias del río Lempa. Sotapango, Hoduras, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Recursos Naturales Renovables, Servicio de Ordenación de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos. 135 p.

- SCHOKLITSCH, A. 1935. Tratado de arquitectura hidráulica. Tomo 1. Barcelona, Editorial G. Gili. 583 p.
- SCHOKLITSCH, A. 1961. Arquitectura hidráulica. Tomo 2. 2 ed. Barcelona, España, Editorial G. Gili. 428 p.
- SCHRIMPF, M.; DURAN, A. 1974. Plan de desarrollo y manejo cuenca superior del río Nima. Palmira, Colombia, CVC, Departamento Agropecuario, Sección Recursos Naturales. (Informe N° 74-6).
- SILVA, M.G. 1985. Relación entre la erosión pluvial y el transporte de sedimentos en ríos. *In* Congreso Colombiano de Cuencas Hidrográficas (3, 1985, Cali, Colombia). Memoria. Cali, Corporación Autónoma Regional del Cauca. 12 p.
- SLAYMAKERS, H.O.; McPHERSON, H.J. 1973. Effects of land use on sediment production. *In* Hydrology Simposium (1973, Edmonton, Canada). Proceedings. Edmonton, National Research Council. p. 159 - 183.
- STRAHLER, A.N. 1983. Geografía física. 8 ed. Barcelona, Omega. 767 p.
- STRAKOV, N.M. 1967. Principles of lithogenesis. Edinburgh, G.B., Consultant Bureau. 145 p.
- SUAREZ, F.M. 1986. Estudio semidetallado de erosión de las cuencas de los ríos Bolo, Fraile, Desbaratado, Nima, Amaime, Guadalajara, Sonso, Guabas y San Pedro. Cali, Colombia, CVC, Subdirección de Recursos Naturales, División de Asistencia Técnica Agropecuaria, Sección Suelos. 85 p.
- VILLEGAS, G.F. 1982. Evaluación del transporte de sedimentos por métodos geomorfológicos. *In* Seminario sobre Hidrología con Énfasis en el Problema de la Información Escaza (1982, Medellín, Colombia). [Informe]. Medellín, Col., Universidad Nacional.
- WISCHMEIR, W.H.; SMITH, D.D. 1960. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *In* International Congress of Soil Science. (1960, Madison, EE.UU.) Proceedings. Madison. p. 418-425.
- YALIN, M.S. 1973. Research contribution to mechanics of sediment transport. *In* Hydrology Simposium (1973, Edmonton, Canada). Proceedings. Edmonton, National Research Council. p. 699 - 711.

ZAMBRANO, H.A. 1975. Comparación y evaluación de la intercepción de las lluvias en dos tipos de bosques tropicales. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 61 p.

ANEXO

Descripción de las unidades y subunidades de la distribución de capacidad de uso del suelo. (Burgos, A.; Garcia, A. 1986)

1.- TERRENOS CULTIVABLES.

Areas aptas para la explotación agrícola donde las prácticas de cultivo, manejo y conservación de suelos varía de acuerdo a las características físicas de la unidad (pendiente, profundidad del suelo, clima, etc.).

De acuerdo a las características de la cuenca y la clase de agricultura que puede establecerse en ella esta unidad se divide en tres subíndices:

a.- Subunidad C2.

Se encuentra sola y asociada con la unidad P. Los suelos son derivados de sedimentos coluvio aluviales medios y moderadamente finos, mezclados con piedras de diferentes tamaños y naturaleza, también hay suelos derivados de arcillas y provenientes de la meteorización de las rocas ígneas (diabasas) con algo de influencia de cenizas volcánicas.

b.- Subunidad C3

Se encuentra sola y asociada con la unidad AF.

Son suelos desarrollados a partir de materiales coluviales finos, de relieve moderadamente inclinado a inclinado con pendientes de 3% a 12%; de texturas finas a moderadamente finas; bien estructurados; drenaje natural moderando a bien drenado; son profundos a moderadamente

profundos, limitados por estratos arcillosos, presentan erosión laminar ligera.

c.- Subunidad C4.

Igual que la anterior, se encuentra sola y asociada con la unidad AF.

Esta subunidad se encuentra en áreas donde el relieve puede variar desde fuertemente ondulado hasta fuertemente quebrado, con pendientes de 12-25 y 50% y puede haber erosión por escorrentía hasta el grado moderado.

2.- TIERRAS PARA PRADERAS (P).

Se encuentra sola y asociada a la unidad AF.

Se incluyen en esta unidad todas aquellas tierras cuyo relieve varía desde plano hasta fuertemente quebrado con pendientes desde 1 hasta 40%, que presentan limitaciones en la profundidad efectiva por la presencia de horizontes arcillosos y compactos (horizontes argílicos); abundante pedregosidad o presencia de estratos rocosos y deficiencias de drenajes, factores que impiden la normal penetración de las raíces y por tal razón se recomienda dedicarlas al cultivo de raíces superficiales como los pastos.

3.- TIERRAS PARA ARBOLES FRUTALES Y/O FORRAJEROS (AF).

Esta unidad se encuentra asociada con la subunidades C3 y C4 y con la unidad P.

Comprende todas aquellas áreas que contienen suelos profundos pero afectados por inestabilidad geológica siendo por ello muy susceptible a erosionarse.

4.- TIERRAS FORESTALES (F).

Comprende todas aquellas áreas que tienen pendientes mayores de 50% o suelos de menor pendiente pero que han sufrido fuerte degradación.

Esta unidad comprende la mayor parte del área de la cuenca del río Nima y se extiende desde los 1400 hasta los 3500 metros de altura sobre el nivel del mar.

Los suelos se caracterizan por ser desarrollados a partir de rocas ígneas (diabasas), rocas metamórficas (esquistos, anfibolitas y migmatitas) y cenizas volcánicas. La profundidad efectiva varía de superficial a muy profunda, siendo las principales limitantes, la pedregosidad, rocosidad y estratos arcillosos de baja fertilidad; bien drenados con pocas excepciones de drenaje moderado. Los suelos presentan erosión por escurrimiento, por pisoteo del ganado y en la parte media y superior del área ocupada por la unidad, se observan movimientos de suelo en masa, debido principalmente a la influencia de las fallas del sistema Romeral.

5.- TIERRAS DE RESERVA NATURAL (R).

Se encuentra por encima de los 3000 metros de altura sobre el nivel del mar, comprende aquellas áreas en las cuales los factores climáticos, tales como baja temperatura, alta humedad relativa, alta precipitación y frecuente

nubosidad son las mayores limitantes para el uso agropecuario.