

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

SUBDIRECCIÓN GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA

PROGRAMA DE POSGRADO

**IMPACTOS DEL USO DE LA TIERRA EN LA ALTERACION DEL
REGIMEN DE CAUDALES, LA EROSION Y SEDIMENTACION DE
LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO REVENTAZON Y LOS EFECTOS
ECONOMICOS EN EL PROYECTO HIDROELECTRICO DE CACHI,
COSTA RICA.**

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

ROLANDO RODRIGUEZ LEIVA

CATIE
Turrialba, Costa Rica
1989

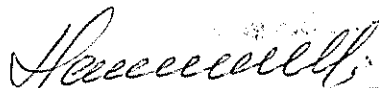
Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE, y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

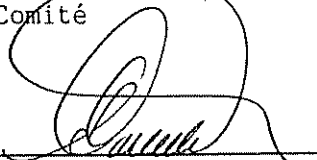
COMITE ASESOR:



Enrique Blair Torres, M.Sc.
Profesor Consejero



Jorge Faustino Maneo, M.Sc.
Miembro del Comité

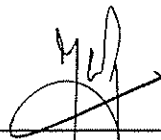


Sergio Castillo Martínez, Ph.D.
Miembro del Comité

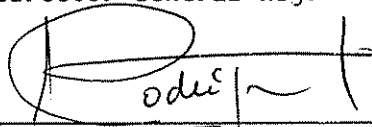
Miembro del Comité



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



Dr. José Luis Parisí
Subdirector General Adjunto de Enseñanza



Candidato

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar sinceramente sus agradecimientos a las personas e instituciones que se indican a continuación:

A DIOS y a NUESTRO SENOR JESUCRISTO, que en su misericordia, nos sostuvo con su gracia permanentemente durante nuestra estadía en Costa Rica.

Al señor Enrique Blair, que como profesor consejero nos brindó permanentes consejos y su valiosa ayuda.

A los señores Jorge Faustino y Sergio Castillo, que como miembros del comité, nos asesoraron continuamente en el desarrollo de la presente tesis.

Al señor Pedro Ferreira Rossi Ph.D., por habernos privilegiado con su incomparable amistad y valioso aporte en el enfoque estadístico de la presente tesis. Muchas gracias Dr. Ferreira.

A los señores Javier y Gustavo López, del Centro de Cómputo, por su generosa ayuda.

Al señor Fernando Domián, por su trabajo en la cartografía.

A Ronnie de Camino, por sus sugerencias.

A la Corporación Nacional Forestal y en especial al Sr. Director Ejecutivo, Don Iván Castro Poblete, por habernos dado la posibilidad de continuar estudios de posgrado.

Al Gobierno de Inglaterra y en particular a la Overseas Development Administration, por el financiamiento para el perfeccionamiento profesional.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, por su capacitación.

Al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y en particular, al señor Sadí Laporte Jefe del Departamento de Estudios Básicos y a mi compatriota Vania Morales, funcionaria del Laboratorio de Sedimentos, por su generosa ayuda en la entrega de antecedentes que se utilizaron en la presente tesis.

Al Programa Regional de Manejo de Cuencas y a su personal docente, por la capacitación y colaboración brindada.

A mi esposa y a mi hijo Cristián, por haberme hecho más grata la estadía en mi período de estudios de posgrado.

A mis hijos Elizabeth y Marvin, por haber soportado una separación tan larga.

Al pueblo de Costa Rica y a mis amigos costarricenses por habernos demostrado tanta amistad.

A mis compañeros de la promoción 1987-89, por su amistad y grato compañerismo latinoamericano.

DEDICATORIA

A mi adorada esposa: Mary Helen Grajales.

A nuestros hijos: Elizabeth Elena
 Marvin Cristian
 Cristián Javier

A mis padres: Juan Manuel y Juana Hortensia

A mis hermanos: Román, Reginaldo y Lina Oriana.

Con especial dedicación a mi recordado hermano Juan
Manuel, que descansa en la paz del Señor

BIOGRAFIA

El autor nació en la ciudad de Lota, Región del Bio-Bio, Chile, el 5 de Junio de 1947. Inició sus estudios primarios en la Escuela Matías Cousiño de Lota en 1955, concluyéndolos en 1960. Desde 1961 a 1966, desarrolla sus estudios secundarios en el Liceo Coeducacional de Coronel.

En 1967 ingresa al Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, donde se gradúa como Bachiller en Ciencias Forestales en 1971.

En 1971, ingresa a la Empresa Forestal Pilpilco S.A., donde desempeñó el cargo de Jefe de Explotación Forestal, cargo que mantuvo hasta 1973.

En 1973, ingresa a la Corporación Nacional Forestal en la Región de Coquimbo, con sede en la ciudad de La Serena, donde labora como jefe del Departamento de Programación y Control; en 1975 es trasladado a la ciudad de Ovalle, en la misma Región como Jefe Técnico del Area Limarí.

En 1979, es trasladado a la Región de Tarapacá, con sede en la ciudad de Arica, como encargado de los programas de hidrología forestal y corrección de torrentes; en 1981 asume el cargo de Jefe del Departamento Técnico de la misma Región y en 1985 es ascendido a Director Regional.

En Septiembre de 1987, ingresó al Programa de Estudios de Posgrado de CATIE, en el Departamento de Recursos Naturales Renovables, en el área de Manejo de Cuencas Hidrográficas, obteniendo en Julio de 1989 el grado de Magister Scientiae.

CONTENIDO

	Página
Resumen	x
Summary	xii
Lista de Cuadros.	xiv
Lista de Figuras.	xv
1. INTRODUCCION.	1
2. REVISION DE LITERATURA.	6
2.1 Efecto del uso de la tierra en el régimen hidrológico.	6
2.2 Efecto del uso de la tierra en la erosión y producción de sedimentos.	12
2.3 Transporte de sedimentos por corrientes de agua.	16
2.4 Efecto de la deposición de sedimentos en embalses.	18
2.5 Enfoques metodológicos para la investigación de cuencas hidrográficas y el empleo de modelos hidrológicos.	22
3. MATERIALES Y METODOS.	29
3.1 Delimitación del área de estudio y materiales.	29
3.1.1 Area de estudio.	29
3.1.2 El proyecto hidroeléctrico de Cachi.	29
3.1.3 Materiales y equipo.	30
3.2 METODOLOGIA.	31
3.2.1 Caracterización biofísica.	32
3.2.2 Análisis de la problemática histórica del uso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.	32
3.2.3 Análisis del impacto del uso de la tierra en la erosión de la cuenca.	33
3.2.4 Análisis del impacto del uso de la tierra en la alteración del régimen de caudales.	34

3.2.5	Análisis del impacto de la alteración del régimen de caudales y la sedimentación en la generación de energía firme.	35
3.2.6	Análisis del impacto económico de la pérdida de energía firme del embalse hidroeléctrico de Cachi, atribuibles a la mala gestión en el uso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.	40
4.	ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION.	41
4.1	Elementos biofísicos.	41
4.1.1	Climatología.	41
4.1.1.1	El transcurso de la precipitación.	41
4.1.1.2	Distribución general de la temperatura en la cuenca.	43
4.1.2	Geología.	45
4.1.3	Geomorfología.	48
4.1.4	Suelos.	51
4.1.5	Hidrografía.	51
4.1.6	Distribución de la pendiente.	56
4.1.7	Zonas de vida.	56
4.2	Problemática del uso histórico de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.	59
4.2.1	Capacidad de uso de los suelos de la cuenca.	59
4.2.2	Uso histórico de la tierra en la cuenca.	62
4.2.3	Problemática histórica del uso de la tierra en la cuenca.	68
4.3	Efectos del uso de la tierra en la erosión de la cuenca del río Reventazón.	69
4.3.1	Erosión laminar y por surcos.	71
4.3.2	Erosión por cárcavas.	71
4.3.3	Erosión por reptación.	71
4.3.4	Remoción en masa.	72

4.3.5 Taludes de erosión.	72
4.4 Efectos del uso de la tierra en el régimen de caudales.	75
4.4.1 Efecto del uso de la tierra en los caudales máximos.	75
4.4.2 Efecto del uso de la tierra en los caudales medios.	80
4.4.3 Efecto del uso de la tierra en los caudales mínimos.	87
4.5 Efecto de la sedimentación en la producción de energía hidroeléctrica. Análisis del proyecto hidroeléctrico de Cachí.	89
4.5.1 Relleno de estadísticas básicas.	89
4.5.2 Estimación del transporte de sedimentos en suspensión.	90
4.5.3 Determinación del volumen de sedimentos ingresados al embalse Cachí.	92
4.5.4 Efectos de la sedimentación en la producción de energía hidroeléctrica.	95
4.5.4.1 Datos de entrada al modelo.	95
4.5.4.2 Producción de energía firme.	95
4.5.4.3 Prueba de hipótesis.	98
4.6 Efectos económicos de la sedimentación en el proyecto hidroeléctrico de Cachí.	105
4.6.1 Determinación de costos atribuibles a la pérdida de energía por disminución de volumen.	105
4.6.1.1 Determinación de precios constantes.	107
4.6.1.2 Corrección de los valores de mercado.	107
4.6.1.3 Determinación de costos unitarios.	107
4.6.1.4 Costo por importación.	109

4.6.2 Costos atribuibles a la pérdida energética por paralización de la planta.	109
4.6.3 Pérdidas por aumentos de costos en faenas de mantención.	111
5. CONCLUSIONES.	114
6. RECOMENDACIONES.	118
7. BIBLIOGRAFIA.	120
8. ANEXOS.	129
. Proceso de cálculo de la energía y potencia firme.	130
I. Estimación del balance.	130
II. Estimación de la potencia.	131

RODRIGUEZ L., R. 1989 Impactos del uso de la tierra en la alteración del régimen de caudales, la erosión y sedimentación de la cuenca superior del río Reventazón y los efectos económicos en el proyecto hidroeléctrico de Cachí, Costa Rica. Tesis Mag.Sci. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 138 p.

Palabras claves: Manejo de cuencas, uso de la tierra, trópico, hidrología forestal, erosión, sedimentación, hidroelectricidad, efectos económicos.

Impactos del uso de la tierra en la alteración del régimen de caudales, la erosión y sedimentación de la cuenca superior del río Reventazón y los efectos económicos en el proyecto hidroeléctrico de Cachí.

RESUMEN

La cuenca del río Reventazón ubicada en la vertiente atlántica de Costa Rica, comprende una superficie de 795.6 km² y es la base del proyecto hidroeléctrico de Cachí. El uso de la tierra en la cuenca ha tenido una tendencia histórica de reemplazo del bosque natural, que disminuyó de un 60.2% a un 43.1% en 34 años, del mismo modo que aumentaron las tierras destinadas a la ganadería (de un 20% al 33.6%) y al urbanismo (0.6% al 2.7%), lo que ha determinado una condición de sobreuso histórico de la cuenca en una superficie del 15.8% de ella.

Esta condición de sobreuso, unido a condiciones biofísicas naturales, ha favorecido la aparición de fenómenos erosivos, de tal manera que hasta 1984, el 15% de la superficie de la cuenca presenta signos de erosión evidentes en sus distintas fases.

El aumento de la erosión acelerada, ha tenido como consecuencia una alteración del régimen de caudales, en el sentido que los caudales máximos y medios mensuales tuvieron una tendencia creciente hasta los quince años (1953-1968)

para disminuir paulatinamente hasta la actualidad. Del mismo modo la erosión acelerada ha provocado un aumento de la sedimentación y, por tanto una disminución del volumen útil del embalse Cachi, estimado en un 0.55% anual.

El efecto combinado de la alteración del régimen de caudales y la disminución del volumen útil del embalse Cachi por efecto de la sedimentación, tiene como consecuencia una disminución de la producción de energía hidroeléctrica estimada en una tasa anual de 696850 kilowatt-hora, que en conjunto con otros factores asociados a la sedimentación, provocan una pérdida neta para la sociedad de 23086430 colones, o bien, 154342 dólares americanos.

Esta exposición, lleva a concluir que resulta mucho más rentable para la sociedad, manejar integralmente los recursos naturales de la cuenca, que aminoraría los efectos de la sedimentación, con el beneficio adicional de asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas naturales y artificiales, para mejorar la calidad de vida de los habitantes de la cuenca.

RODRIGUEZ L., R. 1989. Impacts of land use in the alteration of streamflow, erosion and sedimentation of the watershed above the Reventazón river, and the economic effects on the hydro-electric power of Cachi, Costa Rica. Thesis MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 138 p.

Key words: watershed management, land use, tropics, forest hydrology, erosion, sedimentation, hydro-electricity, economic effects.

SUMMARY

The watershed of the Reventazón river is located in the atlantic zone of Costa Rica. It covers an area of approximately 795,6 km² and it is the foundation for the hydro-electric project of Cachi. The utilisation of land within this watershed have a historical tendency for replacement of natural forest, wich decreased from 60,2% to 43,1% within 34 years. This resulted in a concomitant increase in land utilisation for livestock rearing (from 20 to 33,6%) and urbanisation (0,6 to 2,7%). As a consequence, there was a historic overuse of the watershed in the vicinity of approximately 15,8%.

This condition of overuse together with natural biophysical conditions, favoured the appearance of erosive phenomena, in such away that up to 1984, 15% of the watershed area presented signs of evident distinct phases of erosion.

The increase in erosion acclerated, wich had as a consequence an alteration of the water cycle, in the sense that the peak flow and mean monthly discharge had a growing tendency for 15 years (1953-1968), there after there was a gradual decline up to the present day. Simultaneonsly, the effect of acclerated erosion provoked a decrease in the utilisable volume of the Cachi dam, estimated to be 0,55% annually.

The combined effect of alteration of water cycle and the decrease of the useful volume of the Cachi dam by the effect of sedimentation, have as consequence a decrease of hydro-electric energy estimated to be an anual rate of 696850 kilowatt-hour, wich in conjunction with others factors associated with sedimentation, resulted in a net loss for the society of 23086430 colones or 154342 american dollars.

The conclusions from this study are that it will be more profitable for the society, to practice integrated management of the natural resources of the watershed. This will reduce the detrimental effects of erosion and sedimentation, with the additional benfit of securing natural and artifical ecosystem sustainability, this resulting in improve living standars for the inhabitants of the watershed.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N ^o	Página
1. Distribución de los materiales geológicos en la cuenca superior del río Reventazón. Costa Rica.	46
2. Distribución en superficie de las formas geomorfológicas de la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.	49
3. Distribución de suelos en la cuenca superior del río Reventazón. Costa Rica.	52
4. Subcuencas del río Reventazón, Costa Rica.	55
5. Distribución de las características de pendientes en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.	57
6. Distribución de la capacidad de uso de los suelos en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.	60
7. Cambios de uso mayor de la tierra. Cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.	64
8. Areas críticas originadas por el sobreuso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.	69
9. Areas de erosión atribuibles a las distintas formas de sobreuso. Cuenca del río Reventazón. Costa Rica.	73
10. Pruebas de significancia de los parámetros de regresión de las precipitaciones medias mensuales.	82
11. Análisis de varianza del modelo de regresión de los caudales medios mensuales.	83
12. Estimación de los parámetros de la regresión que explica la tendencia de los caudales medios mensuales.	84
13. Prueba de medias de caudales mínimos anuales del río Reventazón, Costa Rica.	88
14. Determinación del volumen de sedimentos depositado en el Embalse Cachi. Período 1953-69.	93

15. Determinación del volumen de sedimentos depositado en el Embalse Cachi. Periodo 1970-86.	94
16. Producción de energía firme (MWH). Embalse Cachi.	96
17. Modelo de ajuste a las series de diferencias DA.	102
18. Modelo de ajuste a las series de diferencias DP.	103
19. Determinación del costo unitario de un kilowatt-hora de una planta térmica.	108
20. Determinación del costo unitario de un kilowatt-hora de una planta hidroeléctrica.	110
21. Impactos ambientales no valorados.	113

APENDICE

Cuadro N°

1A. Datos de entrada generales del embalse Cachi.	134
2A. Porcentaje de carga mínima vs eficiencia de la turbina.	135
3A. Tabla de valores mensuales.	135
4A. Caudales medios mensuales. Periodo 1953-69.	136
4A. Caudales medios mensuales. Periodo 1970-86.	136
5A. Curva hisométrica original.	137

LISTA DE FIGURAS

Figura N°	Página
1. Red de estaciones meteorológicas, pluviográficas e hidrometeorológicas. Cuenca Superior Río Reventazón. Costa Rica.	36
2. Distribución altitudinal de la temperatura para la Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica	44

3.	Transcurso de la temperatura por diferentes medias mensuales, en la Cuenca Superior del río Reventazón. Costa Rica.	44
4.	Mapa geológico. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	47
5.	Mapa de geomorfología. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	50
6.	Mapa de subgrupos de suelos. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	53
7.	Mapa de categorías de pendientes. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	58
8.	Mapa de capacidad de uso del suelo. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	61
9.	Mapa de uso de la tierra. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica. 1967.	65
10.	Mapa de uso de la tierra. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica. 1977.	66
11.	Mapa de uso de la tierra. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica. 1984.	67
12.	Mapa de áreas críticas. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	70
13.	Mapa preliminar de erosión. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.	74
14.	Efecto del uso de la tierra en el régimen de caudales máximos.	79
15.	Efecto del uso de la tierra en el régimen de caudales medios mensuales.	86
16.	Efecto de la sedimentación en la producción de energía hidroeléctrica.	100
17.	Procedimiento ARIMA para la serie A.	100
18.	Procedimiento ARIMA para la serie P.	100
19.	Procedimiento ARIMA para las diferencias de la serie A.	100
20.	Procedimiento ARIMA para las diferencias de la serie P.	100

1. INTRODUCCION

En una cuenca hidrográfica, la explotación irracional de los recursos naturales, el uso inadecuado de la tierra, la ausencia de medidas de conservación, la deforestación y el diseño e implementación inadecuada de diversa infraestructura, entre otros factores, desencadena toda una serie de procesos que 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 depósito de sedimentos. El impacto final de este proceso, si bien deja una serie de efectos negativos en el lugar de origen, como la pérdida física o la 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 (Leonard, 1986).

Uno de los impactos más negativos del deterioro generalizado de una cuenca hidrográfica, en lo que dice relación a la alteración del régimen de caudales y el impacto del depósito de sedimentos, es la colmatación de embalses para uso hidroeléctrico, puesto que la generación de energía firme depende en lo fundamental del régimen de caudales, el volumen de agua almacenada en el embalse, la carga hidráulica y la eficiencia del sistema hidroeléctrico. Por esta razón, al perderse paulatinamente el volumen útil del embalse por efecto de la sedimentación y la alteración del régimen de caudales, un proyecto hidroeléctrico va perdiendo su capacidad de generación de energía y acortando su vida útil, con consecuencias económicas muy graves para un país como Costa Rica, donde el 99% de la electricidad del país es de origen hídrico y, donde ya se han estimado pérdidas financieras como resultado de ello, del orden de los US\$ 133 a US\$ 274 millones para el caso del proyecto

hidroeléctrico de Cachi en un periodo de 20 años (Leonard,1986).

Pero aún cuando la alteración del ciclo hidrológico, la erosión y sedimentación es un problema real y creciente, la investigación relativa a estos temas es escasa, así como las técnicas de control de erosión y los problemas de escorrentía de las aguas. Por otra parte, la investigación relevante e importante ha sido llevada a cabo en países de zonas templadas con condiciones climáticas y sociales distintas de la región tropical (Richter et al., 1986), por lo cual se ha considerado pertinente investigar, mediante la presente tesis, los impactos que tiene el uso de la tierra en la alteración del régimen de caudales, la erosión y la deposición de sedimentos en un embalse para la generación hidroeléctrica, así como, cuantificar los efectos económicos que se derivan de estos procesos. Para ello, se utilizará como área de estudio la cuenca superior del río Reventazón, base del Proyecto Hidroeléctrico de Cachi.

Parece importante señalar que por lo general, los planificadores del aprovechamiento de los recursos hídricos y en particular para proyectos de uso múltiple o de generación hidroeléctrica, no incorporan en el diseño de los proyectos el manejo integral de los recursos naturales en una cuenca. Además, le resulta muy difícil a estos planificadores, convencer a las autoridades acerca de la conveniencia de implementar políticas adecuadas de conservación de los recursos naturales, ya que, sólo se tiene una concepción intuitiva y a veces empírica de los efectos ambientales y económicos causados por el deterioro de las cuencas hidrográficas. Aún más, se hacen esfuerzos aislados, esporádicos, parciales y, por tanto ineficaces, en la conservación de los recursos naturales bajo la concepción generalizada, que resulta ineficiente y de baja rentabilidad social para un país, invertir en la restauración de cuencas

hidrográficas. Por ello, se ha creído conveniente tratar de demostrar las pérdidas económicas de un proyecto hidroeléctrico que no contemple en su diseño, operación y mantenimiento, el manejo de los recursos naturales en la cuenca respectiva, sobre la base de establecer relaciones cuantitativas claras, entre el uso de la tierra y la degradación de una cuenca hidrográfica, y el consecuente impacto en el proyecto hidroeléctrico.

Hipótesis

Los cambios de uso de la tierra, principalmente la deforestación, la conversión de tierras forestales a la ganadería y los cultivos en limpio y en pendiente, alteran los regímenes de caudales en una cuenca hidrográfica, de manera que se produce un incremento de los caudales picos en las épocas lluviosas y una reducción de los caudales mínimos en las épocas secas. Esta alteración de caudales genera una aceleración de los procesos erosivos y el aumento en el transporte de sedimentos por los cursos naturales de agua.

En el caso de las represas hidroeléctricas, la reducción y el aumento de variabilidad de los caudales de estiaje y la pérdida de volumen activo por la sedimentación, determina una pérdida de energía firme y un subuso de la potencia instalada, que se traduce en pérdidas económicas para este tipo de proyectos, al no prestarse atención al manejo integral de los recursos naturales en las cuencas altas.

Objetivos

- a) Estudiar y establecer relaciones cuantitativas del impacto del uso de la tierra en el régimen de caudales y la erosión, en la cuenca superior del río Reventazón.

- b) Estudiar y cuantificar el impacto de la sedimentación y la alteración del régimen de caudales, en la generación de energía firme en el embalse Cachi.
- c) Estudiar las pérdidas económicas, en el caso del proyecto hidroeléctrico de Cachi, atribuibles a los efectos de la degradación de la cuenca superior del río Reventazón.

Para comprobar la hipótesis propuesta y alcanzar los objetivos planteados, la presente tesis pretende estudiar cualitativa y cuantitativamente los efectos de la alteración de la relación agua-suelo-planta, a partir del análisis de la cuenca superior del río Reventazón, para lo cual, se establecerá una relación histórica y dinámica del uso de la tierra y el impacto en los procesos de la cuenca mediante mapas confiables de uso de la tierra ya existentes correspondientes a diferentes periodos y el uso de fotografías aéreas. De la misma forma, se medirán los efectos en el régimen hidrológico a través del análisis de series históricas de caudales mediante el uso de modelos estadísticos, puesto que es posible verificar cambios drásticos en el uso de la tierra en esta cuenca, en fecha posterior al emplazamiento y operación del embalse Cachi. Además, mediante el uso de modelos de simulación hidrológicos se inferirá el efecto combinado de la alteración del régimen de caudales y las tasas de sedimentación en la generación de energía firme. Dado que se espera una reducción en la producción de energía firme en función del tiempo, ésta se valorará en relación al costo de producción alternativo, además de otros daños atribuibles a la sedimentación.

Finalmente, se espera informar tanto a las instituciones responsables de estos aspectos como a la comunidad, acerca de la necesidad de manejar integralmente

los recursos naturales y de restaurar aquellas cuencas con alto deterioro ambiental, ya que de lo contrario los diversos países afectados por esta problemática, continuarán perdiendo la sostenibilidad de sus ecosistemas y dañando infraestructuras valiosas, con pérdidas irreparables para la sociedad.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Efecto del uso de la tierra en el régimen hidrológico.

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). En efecto, la vegetación natural ejerce una considerable influencia en el régimen hidrológico (Gutiérrez,1988), ya que, modifica la escorrentía superficial o subsuperficial, parte de la precipitación es interceptada, otra parte de la humedad es ocupada por las plantas en la transpiración o evaporada del suelo o follaje, mientras que el resto del agua fluye hacia las aguas subterráneas constituyendo el flujo base de los rios, por lo cual, la vegetación actúa sobre la distribución de la humedad y las condiciones hidrológicas de una cuenca (Molchanov,1963).

Al caer la lluvia sobre una masa forestal, la primera influencia de esta es la intercepción, que es definido como el proceso por el cual la lluvia es retenida por la cubierta vegetal y redistribuida como agua que atraviesa el follaje y alcanza el suelo, la que baja por los tallos al suelo y la que es retenida y evaporada por la vegetación. Los factores que influyen la intercepción 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 tipo de ésta (Hewlett,1969).

Las pérdidas por intercepción, han sido evaluadas en diversos lugares del mundo; para zonas templadas Helvey citado por Hewlett (1969) desarrolló una expresión

algebraica para estimar la intercepción, tanto para coníferas como para latifoliadas. En el caso de las estepas rusas, Molchanov (1963) estimó que los bosques del género *Pinus* interceptan el 20% de la precipitación con un máximo de 30%, dado que varía según la edad del rodal y la intensidad de la precipitación. En Costa Rica, Zambrana' (1975) comparó la intercepción en dos bosques, uno ubicado en Florencia sur y el otro en bajo Reventazón, obteniendo valores de 15 y 16% respectivamente; además, encontró que la lluvia dentro del bosque varió proporcionalmente con la precipitación fuera de él, mientras que el porcentaje de intercepción varió inversamente con la cantidad de lluvia. En la misma investigación, se encontró que la cantidad de lluvia que baja por los tallos representa una mínima parte, siendo menor al 1%.

Otra influencia importante de la vegetación en el ciclo hidrológico es la transpiración, que es definida como la pérdida de agua desde el suelo a través de las plantas (Swanson, 1965), siendo necesario este proceso para el crecimiento de los vegetales aunque desde el punto de vista hidrológico constituye una pérdida, puesto que, es agua que no llega a los cauces ni a las aguas subterráneas (Gutiérrez, 1988). Swanson (1965) midió el flujo de la savia en bosques de coníferas, como indicador de la transpiración, encontrando que este proceso tiene lugar a través de todo el año; en climas templados ocurren variaciones diarias de la transpiración en primavera, verano y otoño, como respuesta fisiológica de los vegetales a los factores climáticos, mientras que en invierno no se verifica este proceso, por lo cual, la transpiración varía con la estación del año y la especie.

La vegetación también ejerce una considerable influencia en la evaporación desde el suelo, la cual puede definirse como la vaporización del agua directamente desde

la superficie del suelo (Gutiérrez,1988). 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), sobre todo si la cobertura vegetal es densa, debido a que el bosque aísla la superficie del suelo de la radiación y previene el movimiento del aire sobre él (Gutiérrez,1988). En cuanto a la influencia de la cobertura vegetal en la evaporación, Penman (1965) informa que en verano la evaporación en bosques de coníferas es 13% mayor que en latifoliadas, mientras que en invierno es dos veces mayor, de acuerdo con mediciones realizadas en montañas altas y bosques de bambú en el este de Africa y bosques de coníferas en Holanda.

Sin embargo, desde una superficie con cubierta forestal es usualmente imposible separar los procesos de transpiración y evaporación desde el suelo, por lo cual, son procesos que se consideran conjuntamente bajo el término de evapotranspiración (Goodell,1965). A nivel de cuenca hidrográfica, la evapotranspiración depende de la actuación conjunta de la energía térmica irradiada sobre la superficie de la cuenca, la distribución espacial y temporal del agua (Goodell,1965), así como, del tipo de cobertura vegetal (Douglas,1965); de la misma forma, la precipitación puede causar importantes variaciones estacionales de la evapotranspiración, por el uso de agua en praderas y bosques (Douglas,1965).

El uso de la tierra influye en la infiltración, que es definido como el proceso por el cual el agua, pasa a través de la superficie del suelo, mientras que, la percolación es el avance del agua a través del perfil del suelo (Hewlett,1969). La infiltración está influenciada en un suelo no saturado, por los potenciales matriciales y gravitacionales del suelo, de manera que, cuando el

potencial matricial es mayor, el agua percola más profundamente, mientras que, cuando predominan las fuerzas gravitacionales el agua de saturación es aprovechada por las plantas, siendo la capacidad de infiltración la máxima tasa a la cual el agua puede ingresar a un suelo bajo condiciones dadas (Kass,1987). La infiltración está influenciada por las características físicas del suelo, humedad anterior, presencia de rocas, cantidad de materia orgánica incorporada, presencia de capas de humus superficial y mantillo, condiciones topográficas (pendiente, relieve, rugosidad del terreno y condiciones de microrrelieve), densidad y tipo de cobertura vegetal, duración e intensidad de la precipitación y temperatura del aire (Pierce,1965). Por lo general, en suelos con cubierta forestal hay mayor infiltración que en los suelos sin vegetación (Gutiérrez,1988), puesto que, el mantillo del bosque permite al agua penetrar a las capas de suelos minerales, por lo cual, la capacidad de infiltración de los suelos cubiertos de bosques es casi siempre más grande que la intensidad de la precipitación prevaleciente (Chang,1982), mientras que, la falta de infiltración es un problema de los suelos sobrepastoreados (Hewlett,1969).

La escorrentía superficial es otro componente del ciclo hidrológico que se encuentra afectado por el uso de la tierra y las prácticas de manejo, fisiografía en cuanto a pendiente y elevación (Mojica,1967), además del clima (Lull y Sopper,1965). La investigación para medir el efecto del uso de la tierra en la escorrentía superficial, es uno de los temas más ampliamente investigados en el campo del manejo de cuencas (Lull y Sopper,1965; Toebes y Ouryvaev,1973; Riedl y Zachart,1983). Hacia 1929, Bates y Henry inician este tipo de 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

de 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 y, particularmente la cuenca 17 ha sido concluyente en demostrar que la eliminación de la vegetación provoca significativos aumentos de caudal, hasta en un 60% al primer año de la eliminación de la vegetación (Gutiérrez,1988). En este mismo tipo de experimentos, Nakano (1965) para estudios hechos en Japon, en cuencas que presentaban suelos de origen volcánico y graníticos con pendientes entre 26% y 36%, concluyó que la remoción de la vegetación forestal al disturbar los suelos 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, entre otras causas, pero las tormentas de intensidades de 20 a 30 mm/hora, son la causa directa del incremento de los caudales máximos. Del mismo modo, Rosen (1984) informa de un aumento de la escorrentía del 119% cuando eliminaba totalmente la vegetación y 75%, cuando dejaba el sotobosque. Las conclusiones más relevantes de estas investigaciones, indican que cuencas con menor masa forestal tienen mayor escurrimiento, ya que, el consumo de agua por las plantas es menor (Mojica,1971), aunque la respuesta de la cuenca hidrográfica a distintos sistemas de uso de la tierra es altamente variable e impredecible (Hibbert,1965).

En cuanto a intervenciones antrópicas en bosques tropicales, conclusiones preliminares indican que las cuencas de estos ambientes presentan una intensa actividad en el ciclo hidrológico, ya que al intervenir este tipo de bosques, una alta proporción del flujo base se transforma en volumen de escorrentía (un 47,8% del flujo base en una cuenca intervenida y 46,3% en la cuenca no tratada), lo que contrasta fuertemente con respecto al 15 a 20% reportados

para cuencas de regiones húmedas de climas templados en Estados Unidos (Cassel et al.,1985).

Cuando la intervención antrópica es la explotación forestal, tienen gran importancia las operaciones forestales intensivas, ya que las intervenciones silvícolas disminuyen la evapotranspiración, disminuye la capacidad de almacenamiento de los suelos, se interrumpe el proceso de infiltración (debido a la acción mecánica de la maquinaria forestal) y se aumenta el área de drenaje puesto que se altera el microrrelieve (Benee et al.,1983).

En cuanto a los cambios hidrológicos como resultado de la conversión de bosques a praderas, se informa de estudios experimentales, que los principales efectos vienen dados por cambios en la intercepción, transpiración, infiltración lenta (Lusby,1970) y los efectos físicos en el suelo, debido al cambio de coberturas y especies de raíces profundas, en el caso de árboles, a especies de raíces poco profunda, como las hierbas (Hamilton y King,1983); a su vez, los efectos en el suelo se ven agravados en épocas de sequías y el sobrepastoreo. Por otra parte, la tasa de infiltración, disminuye de 3 a 2,2 cm. por hora, para el caso de Fiji y un aumento del caudal pico en un 100% para la misma región (Hamilton y King,1983). En el Laboratorio de Coweetta, el incremento fue de 200%, para estabilizar la relación escorrentía superficial y la producción de biomasa de la pradera 9 años después (Hamilton y King,1983). Lusby (1970), trabajando durante 14 años (1954-1968), en Grand Junction, Estados Unidos, informa de un incremento de un 300% en la escorrentía para las cuencas que habían sido sobrepastoreadas.

El papel de la reforestación sobre el ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas ha sido analizado en Checoslovaquia, durante un periodo lo suficientemente

extenso (1957-1968), como para obtener resultados más consistentes (Krecek y Balek, 1981). Las conclusiones fundamentales del estudio fueron, una disminución de un 12,6% del caudal pico y 18,6% en el volumen de escorrentía en el mes de máxima descarga, aunque las escorrentías, si bien se mantiene en una cantidad similar, se desplazaron hasta en dos meses.

Por lo expuesto, existe consenso que la vegetación, al aumentar la capacidad de infiltración de los suelos, alarga el tiempo de concentración de la escorrentía superficial, por lo cual el régimen de caudales es más regular en el tiempo (Riedl y Zachart, 1983; Gutiérrez, 1988).

De esta forma, si se mantiene una cobertura vegetal adecuada y se asigna un uso correcto a la tierra mediante la utilización de una tecnología adecuada, se disminuye apreciablemente la velocidad del agua de escorrentía, disminuyen los caudales máximos y aumentan los caudales de estiaje (Lee, 1980). En el caso específico de la cuenca del río Reventazón, Mojica (1971) encontró que en las subcuencas con mayor superficie de cobertura boscosa, había una mayor regularización del flujo hídrico, la escorrentía y la variación porcentual de las descargas, mostraron tendencia a disminuir a medida que la superficie de cubierta forestal aumentaba.

2.2 Efecto del uso de la tierra en la erosión y producción de sedimentos.

Con la alteración del ciclo hidrológico se desencadenan en una cuenca hidrográfica una serie de fenómenos, entre los que destacan por su magnitud e impacto, la erosión y producción de sedimentos.

La erosión como fenómeno existe en forma natural, cuando existe un equilibrio entre la velocidad de desgaste y la formación de suelo por efecto de la meteorización (Faustino,1986). Sin embargo, los procesos naturales pueden ser acelerados por la acción antrópica, mediante la transformación inapropiada de los ecosistemas naturales, sistemas tecnológicos inadecuados e infraestructura física mal diseñada. En ambientes tropicales, se presenta con mayor frecuencia la erosión hídrica, la cual ocurre por desprendimiento y arrastre de partículas de suelo por acción del agua (Faustino,1988), que puede observarse en la superficie terrestre en distintas fases de desarrollo, como escurrimiento difuso, laminar, surcos, cárcavas y distintas formas de remoción en masa (Contreras,1988) y que están en directa relación con factores climáticos, edáficos, topográficos y del hombre, a través de la remoción y manejo de la cobertura vegetal, así como, el uso de prácticas culturales (Wischmeir,1960).

La erosión como fenómeno físico ocurre cuando las fuerzas de arrastre de materiales, principalmente la salpicadura de las gotas de lluvia y transporte por el flujo hídrico del material disuelto, son mayores que las que ofrece éste a la remoción. Las fuerzas de resistencia, se basan fundamentalmente en propiedades hidráulicas (rugosidad de la superficie y condiciones de flujo superficial o subsuperficial, pendiente, relieve) e hidrológicas (capacidad de almacenamiento y tasa de infiltración). Estas propiedades, determinarán en definitiva la resistencia del suelo a las fuerzas de arrastre, puesto que, la precipitación excedente que no se infiltró, fluirá por la superficie, siendo capaz de arrancar materiales del suelo por la acción hidráulica de su flujo (Kirby y Morgan, 1983).

El material de suelo desprendido, es transportado y depositado mediante la acción de la escorrentía, fenómeno que se conoce como sedimentación (Faustino,1988), el cual es básicamente, función de los agentes de transporte, transportabilidad de las partículas y, la presencia de material que reduce las fuerzas de transporte cuando el problema se localiza a nivel del suelo (Faustino,1988).

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 disminución de la escorrentía superficial en las zonas altas, aumentará o disminuirá en correspondencia con la capacidad de desprendimiento del suelo y el transporte de sedimentos en canales (Kirby y Morgan,1983), fenómeno que está estrechamente ligado al uso de la tierra. Al respecto, Slaymaker y Mc Pherson (1973) han seleccionado las prácticas de uso de la tierra que tienen directa relación con la erosión y producción de sedimentos. 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 carguío de trozas, quemas, repoblaciones artificiales y aplicación de herbicidas; en tanto que, las prácticas agrícolas que aparecen como relevantes son la época de preparación de suelos, superficie y tipo de labranzas para el drenaje de fincas, disposición de los cultivos especialmente si se diseñan en hileras o cerrados, control mecánico o químico de malezas, manejo del pastoreo, riego y arado en contorno. Otro aspecto relevante lo constituye la urbanización, especialmente por la remoción de la vegetación previa a la urbanización, por las excavaciones mecánicas, la transformación de las vías de drenaje en ductos y acequias

artificiales y, los ajustes de la ciudad al ambiente fluvial.

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).

En cuanto a estudios específicos de evaluación de la erosión, se han llevado a cabo varios de ellos en Costa Rica, con la intención de relacionar el tipo de cubierta vegetal y la erosión. En Turrialba, Amézquita y Forsythe (1975) determinaron pérdidas de suelos entre 15 y 36 ton/há en seis meses, mientras que Bermúdez (1980) para la misma zona, encontró pérdidas de suelos de 0,0715 ton/há/año bajo cubierta de café (Coffea arabica) y Poró (Erythrina poeppigiana Walters OF) y en el sistema anterior más laurel (Cordia alliodora R.P. Cham) la pérdida de suelos fue de 0,1272 ton/há/año, mientras que en café (Coffea arabica) en limpio la pérdida de suelos fue de 0,4395 ton/há/año. Por otra parte, para la cuenca del Arenal, se determinó para el caso de bosque virgen una pérdida de 1,8 ton/há/año, para cultivos perennes 18,8, para pastos mejorados 109 y para cultivos anuales 840 ton/ha/año (Hartshorn ,1983). Para la cuenca del río Pejiballe, se encontraron pérdidas de suelos entre bajos y moderados (Mora,1987). Los valores de pérdida de suelos en Costa Rica, resultan muy variables y contrastan fuertemente con valores obtenidos en otras áreas tropicales del mundo, puesto que, para el caso de Filipinas se reportan valores de hasta 489 ton/ha/año.

En relación al efecto del pastoreo en la producción de sedimentos, se observó en un estudio de 12 años en Colorado,

Estados Unidos, un aumento de 270,2 ton/ha/año en cuencas sin pastoreo a 390,1 ton/há/año en cuencas con sobrepastoreo (Kirby y Morgan,1983).

2.3 Transporte de sedimentos por corrientes de aguas.

El material producto de los fenómenos erosivos es integrado a la cuenca hidrográfica, mediante la red de drenaje y transportados al cauce de un río por la acción de la escorrentía. El río puede transportar todo el material que es aportado por la cuenca, en cuyo caso 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), o bien, puede 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, puesto que, el río tenderá a depositar materiales en su cauce (Espinoza,1985).

El transporte de sedimentos por corrientes de agua comienza a ser investigado a fines del siglo pasado 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, como muchas de las usadas en ingeniería (Yalin,1973).

La investigación ha sido profusa en esta materia y, en la actualidad existen dos enfoques básicos para definir relaciones cuantitativas del transporte de material por una corriente. El primero, intenta definir el transporte de materiales por medio del 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 de líquido, viscosidad, peso específico del material del lecho, diámetro representativo del material del lecho, densidad del líquido con acarreo, 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 defina la tasa de transporte de material por una corriente (Yalin, 1973; Mahmood, 1987).

Un segundo enfoque, lo constituye el criterio probabilístico, que considera al 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 trayectoria probabilística. Con este enfoque, Gessler según lo cita Yalin (1973) ha reemplazado la curva de Shields, por una familia de curvas para determinar la tasa de transporte.

A pesar del intenso trabajo de investigación llevado a cabo, el conocimiento sobre la mecánica y estimación del transporte de materiales por una corriente de agua, es aún insuficiente, por lo que, cualquiera de las fórmulas actuales puede ser utilizada con fines prácticos (Mahmood, 1987); sin embargo, se recomienda actuar con mucho criterio en ríos con lechos de arena y gran cantidad de transporte de sedimentos. Además, ninguno de los métodos ha sido probado y validado para sedimentos de las proporciones, como los que se pueden encontrar en muchos ríos de Costa Rica (Herrera, 1978).

Lo que aparece como más recomendable en la determinación de la tasa de transporte y en efecto ha sido la norma para fines prácticos, es la medición periódica de la concentración del sedimento en suspensión y el arrastre de material de fondo, que es estimado en muchos casos como

porcentaje del sedimento en suspensión (Linsley et al.,1979).

2.4 Efecto de la deposición de sedimentos en embalses.

El movimiento de los sedimentos que son transportados por una corriente de agua a un embalse y el movimiento de éste dentro de él, está gobernado básicamente por dos fuerzas dinámicas que actúan sobre cada partícula; la componente horizontal, que actúa en el sentido del escurrimiento y la componente gravitacional. Además, intervienen las fuerzas de la turbulencia, produciendo fluctuaciones horizontales y verticales de las partículas, siguiendo básicamente las leyes de Fich (Seminario,1987).

Conforme va ingresando el flujo de agua al embalse, se incrementa la sección transversal del cauce, debido a la curva de remanso producto del ensanchamiento de la sección a la entrada del embalse. Por ello, disminuye la velocidad de la corriente de agua que unida a la ausencia de las fuerzas de la turbulencia posibilitarán la deposición de las partículas de material (Seminario,1987). Las partículas se irán depositando en el embalse, de acuerdo a su tamaño, de tal forma que los materiales mayores se irán depositando en la cola de éste conformando un delta, mientras que el material más fino lo hará lo más cerca de la presa (Wiebe y Drenan, 1973).

Los parámetros que intervienen en el proceso de deposición de sedimentos, son las características del material (forma, textura, tamaño y densidad o peso específico), el escurrimiento (velocidad del agua y turbulencia), tipo de flujo (uniforme, variado, permanente o no permanente), densidad y viscosidad del medio, que dependen a su vez de la temperatura y contenido de coloides; por último, interviene las características del reservorio

(tamaño y geometría) y la operación de éste en lo que se refiere a la relación de entrada y salida de volúmenes de agua (Seminario,1987).

Los métodos que se utilizan para evaluar la sedimentación de embalses son básicamente dos, siendo el primero:

- a) Los levantamientos topográficos sucesivos (levantamientos batimétricos) y,
- b) La medición directa a través de la red hidrográfica alimentadora del embalse, donde se pueden medir las cargas de fondo y en suspensión (Seminario,1987).

El segundo método, requiere de una metodología adicional más compleja, con el fin de determinar el volumen de sedimento efectivamente depositado y su distribución espacial. Para ello, se puede recurrir a metodologías como:

- a) Peso específico de los sedimentos; Lane y Kolzer hacia 1947, propusieron una ecuación general, basada en el tiempo de consolidación y el tamaño de los sedimentos (Chow,1964).
- b) Eficiencia de atrape; este enfoque, se basa en el supuesto que del total de sedimentos que llegan a un embalse, una parte de ellos queda retenido y el resto sobrepasa la presa (Lopez y Blanco,1968), de manera que la proporción retenida se conoce como eficiencia de atrape. Según Mahmood (1987), los métodos empíricos para medir la eficiencia de atrape fueron desarrollados por Churchill en 1947, Brune en 1953 y Meinichmann en 1981. De éstos, la curva de Brune es la más difundida entre los investigadores, por su simpleza y precisión, ya que, fue elaborada sobre la base de un índice de sedimentación

obtenido del análisis de 44 embalses que cubrieron cuencas, entre 4 y 480.000 km² de superficie receptora (Mahmood,1987).

- c) Distribución espacial de los sedimentos; para prever la distribución de sedimentos en embalses se han desarrollado dos enfoques similares. El primero, desarrollado por Cristófono se conoce como Area-Incremento y se basa en la hipótesis que los sedimentos se distribuyen en el vaso, de tal modo, que a partir de una cota inferior o inicial la superficie del embalse, se reduce la misma cantidad en cada nivel (Chow,1964); el otro, fue desarrollado por el U.S Bureau of Reclamation de Estados Unidos hacia 1977, basandose en clasificaciones de tipos de embalses de este país, que dispone en cada estrato de una curva que define la reducción del área del embalse a diferentes alturas después de la sedimentación; dicha reducción, aplicando la fórmula del prismoide, permite hacer una distribución del volumen de sedimentos en toda la profundidad del vaso (López y Blanco,1968; Mahmood,1987).

De esta forma, Chow (1964) indica la siguiente expresión para estimar la tasa anual de sedimentación del reservorio (S_m), si se especifica previamente la tasa de erosión (A_n), la eficiencia de atrape (T_m), la proporción liberada de sedimentos en porcentaje (D_{R_m}) y el peso específico de los sedimentos (Y_s).

$$S_m = E(w_1a_1 + w_2a_2 + \dots + w_nA_n) * D_{R_m} * T_m / 21.8 Y_s$$

A partir de la tasa de ingreso anual de sedimentos y la capacidad del reservorio (C), se puede estimar la pérdida anual de capacidad del reservorio (S), de acuerdo a la expresión siguiente (Chow,1964):

$$S = 100 * S_u / C$$

El efecto de la sedimentación en un embalse se manifiesta en la eficiencia de operación de éste en el aumento de turbidez y la eventual pérdida de calidad de las aguas que tiene impactos económicos, cuya importancia dependerá de la forma, tamaño y uso que se de al vaso; la distribución de los sedimentos en los diferentes estratos asignados a cada propósito y de la operación e importancia relativa de la obra dentro del sistema (Rodríguez, 1977).

Dentro de los programas de investigación en la sedimentación de embalses en Centroamérica, destaca por su importancia económica y ubicación geopolítica, la cuenca del canal de Panamá. En efecto, la sedimentación del Lago Alajuela ha sido estudiada desde 1929 por Kellog, y en la actualidad Alvarado (1987), determinó pérdidas de capacidad de almacenamiento de 4,7%, entre 1934 y 1983 con una tasa de deforestación del orden del 20% de la superficie boscosa de la cuenca en un periodo de 25 años, mientras que para el periodo 1983 a 1990, se alcanzaría una pérdida de 6,5% de la capacidad de almacenamiento del lago Alajuela, considerando una tasa de deforestación de 0,83% anual (Alvarado, 1987).

La capacidad de almacenamiento del Lago Alajuela que se pierde por la sedimentación, trae consigo efectos económicos que han sido estimados, por medio del cálculo de los costos alternativos para mantener las operaciones básicas del canal, entre las que destacan por su magnitud el traslado de barcos y la generación de energía hidroeléctrica. De acuerdo a datos proporcionados por la compañía del canal de Panamá, la limpieza del canal a una profundidad de 3 pies mediante dragado todos los años, permite habilitar unos 370 millones de m³ de almacenamiento adicional; sin embargo, la

habilitación de este volumen se hace a un costo de U.S.\$ 27,5 millones anuales (Gregersen et al.,1986).

2.5 Enfoques metodológicos para la investigación de cuencas hidrográficas y el empleo de modelos hidrológicos.

Para la investigación de los efectos del uso de la tierra en el régimen hidrológico y en la producción de sedimentos, se han utilizado básicamente tres enfoques (Slaymaker y Mc Pherson,1973).

- a) Un primer enfoque considera el uso de la tierra como un conjunto de parámetros dentro de una relación o modelo estadístico. De esta forma, se define un conjunto de variables como tipo de cultivo, sistemas silviculturales, construcción de caminos forestales, urbanización de terrenos, entre otras variables importantes de uso de la tierra, y luego, se relacionan con el régimen de caudales y la producción de sedimentos, que se miden a través de instrumentos colocados en la red de drenaje, para luego analizar estadísticamente mediante el análisis factorial o de regresiones lineales múltiples, la relación entre el uso de la tierra con los caudales y la producción de sedimentos.(Slaymaker y McPherson,1973; Bener et al.,1983).
- b) Un segundo enfoque, más popular al inicio de la investigación en el campo del manejo de cuencas, consiste en un control o monitoreo, mediante fotografías aéreas y un registro físico de variables hidrológicas y producción de sedimentos, por lapsos que varían entre 5 a 10 años, previos a cambios de uso mayor de la tierra en áreas seleccionadas. Este enfoque, que se inicia hacia 1929 en la cuenca Wheel Wagon Gap (Slaymaker y McPherson,1973) continúa en la actualidad (Krecek y Balek,1981).

c) El enfoque de cuencas pares o experimentales, subdivide una cuenca, en subcuencas adyacentes que presenten aproximadamente las mismas variables climáticas, vegetacionales, pedológicas, geológicas y morfológicas, de tal suerte que son determinadas por el mismo régimen hidrológico. Estas subcuencas son acondicionadas con instrumentos necesarios para medir la escorrentía y la producción de sedimentos (Toebes y Ouryvaeb,1970); las subcuencas deben ser previamente calibradas y homologadas por un período lo suficientemente extenso, entre 10 y 15 años (Reinhart,1965), para que luego una de ella sea intervenida con distintos usos de la tierra, de manera que a partir de la cuenca testigo se infieran los efectos hidrológicos de los usos que se quieren conocer y analizar.

Como alternativa para la medición de las pérdidas de suelos y la producción de sedimentos está la utilización de modelos de erosión, de los cuales Knisel (1980) y Faustino (1988) efectuaron una exhaustiva revisión, concluyendo que la ecuación universal de pérdida de suelos, constituye el elemento básico de los modelos. El modelo original, es una función de diversos factores como la erosividad, erodabilidad, longitud y gradiente de la pendiente, manejo de la vegetación y prácticas de control de erosión (Wischmeir,1960), Este modelo ha sido modificado por Williams (1975) para predecir la producción de sedimentos en tormentas individuales, incorporando el efecto del paso de sedimentos a través de cauces; otra modificación es la de Fogel (1980) para predecir la producción de sedimentos en sitios que hayan estado sujetos a la explotación minera y, destaca por último, la modificación de Renard (1980) para aumentar la precisión del modelo original en la predicción de pérdidas de suelos en terrenos de praderas, mediante un coeficiente que refleja la erosión a nivel de cauces.

Dado que el modelo de ecuación universal de pérdida de suelos y sus modificaciones, solo considera la pérdida de suelos in situ y el tipo de erosión en sus fases de escurrimiento difuso y laminar, se ha considerado dentro de los modelos, la producción de sedimentos en y entre surcos. (Faustino,1988).

A nivel de cuenca hidrográfica se propuso el modelo de degradación específica de cuencas por Fournier (1960), basado en el parámetro de concentración de lluvias dentro de un modelo de regresión, el cual tuvo bastante popularidad en Europa (López,1984), pero en Centroamérica, al ser utilizado en la cuenca superior del río Chixoy en Guatemala, el modelo no resultó satisfactorio ni representativo (Cabrera,1987).

En hidrología, el uso de modelos ofrece la posibilidad de comprender o explicar en mejor forma los fenómenos naturales, ya sea, bajo el enfoque determinístico o probalilístico, puesto que las predicciones pueden asemejarse bastante a la realidad (Seminario,1987).

En terminos conceptuales, los modelos en hidrología pueden ser materiales, cuando la base es la representación física simplificada mediante un prototipo que conserva las propiedades similares, el cual a su vez, puede ser icono si utiliza materiales del sistema real, o bien, análogo si utiliza otros materiales (Seminario,1987); además, cuando la representación física se hace por procedimientos matemáticos, los modelos se definen como formales (Seminario,1987) o matemáticos (Mahmood,1987), que han sido descritos ampliamente por Clarke (1973); estos modelos, pueden tomar en cuenta los principios teóricos (conjunto de relaciones descriptivas del fenómeno a estudiar) denominándose teóricos, o bien, omitir estas leyes limitándose a la representación de la información histórica

(Seminario,1987), en cuyo caso el modelo formal se denomina empírico.

Los modelos hidrológicos son ampliamente utilizados en la operación de obras hidráulicas, de manera que el planificador pueda anticiparse a eventos futuros y seleccionar la alternativa de opción que optimice el sistema de operación; en este sentido Crowfor citado por Jackson (1982), sugiere dos métodos con los cuales se puede trabajar, si se trata de diseños de tablas y/o gráficas, o bien, para calcular información que será utilizada en los problemas que presente la operación de la obra hidráulica, proporcionando una técnica simple para la toma de decisiones.

En lo que concierne a la sedimentación de embalses, se han desarrollado tanto modelos icono y formales, como empíricos y teóricos (Seminario,1987).

De acuerdo a lo informado por Mahmood (1987), un modelo icono bastante utilizado para predecir los patrones de deposición en embalses, sobre la base del enfoque bidimensional es el de Merrill. Por otra parte, López citado por Seminario (1987) y Mahmood (1987), desarrolló un modelo basado en la ecuación de continuidad, el que toma como característica, el sedimento, geometría del reservorio y la operación de éste.

Según lo informa Quesada (1983), en los Estados Unidos, Hall propuso el modelo RELPOWER, basado en la ecuación del balance de masas o hidrológico y que puede ser utilizado, para estudiar el impacto de la alteración del régimen de caudales y la sedimentación en la producción de energía firme.

En efecto, puesto que el diseño de un embalse de propósito único para demanda de agua consiste en un balance de masas mensual, en que se trata de optimizar el almacenamiento en función de la demanda $S(X)$ o la demanda en función del almacenamiento $X(S)$ a través de un proceso de búsqueda directa, Hall citado por Quesada (1983) plantea el siguiente modelo de balance de masas:

$$B_i = q_i + y_i - \alpha_i X - k_i A_i(q_i)$$

Donde:

- B_i = balance de volúmenes mensuales
- q_i = volumen de agua almacenada en el embalse al principio del mes i
- y_i = volumen de aportes anticipados durante el mes i
- $\alpha_i X$ = volúmenes de demanda durante el mes i , como un porcentaje de la demanda total anual
- α_i = coeficientes porcentuales de demanda para definir los requerimientos del mes i
- k_i = tasa de evaporación neta por unidad de área superficial A durante el tiempo i . Es una función aproximada de la cantidad de agua almacenada al inicio del mes i .

Si se define S_{\max} como el máximo almacenamiento disponible y se aplican las siguientes condiciones (Quesada, 1983):

Si $B_i \leq S_{\max}$ y $B_i \geq 0$, entonces $q_{i+1} = B_i$ y los cálculos se repiten.

Si $B_i > S_{\max}$ el embalse no puede almacenar el volumen de aportes en exceso y por lo tanto:

$q_{i+1} = S_{\text{máx}}$, definiéndose $L_i = B_i - S_{\text{máx}}$ como el volumen desechado por el vertedor de demasías durante el período i .

Si $B_i < 0$, esto significa que el sistema ha fallado puesto que la demanda firme no puede satisfacerse con un embalse de capacidad $S_{\text{máx}}$, aún partiendo inicialmente con un embalse lleno. Se procedería entonces a buscar un nivel mayor y en pruebas sucesivas se ajustaría el valor de $S_{\text{máx}}$ a la demanda estimada X , aunque en la práctica el proceso también podría darse al revés.

Basándose en el modelo de balance de masas o hidrológico, Hall citado por Quesada (1983), plantea el modelo RELPOW (Release Power), para el cálculo de la potencia o energía firme. El modelo especifica como parámetros la potencia (Kw), flujo de agua (q_i), la carga hidráulica hasta las turbinas (h_i) y la eficiencia de las turbinas a un nivel de almacenamiento y potencia dadas (n_i). El modelo según Hall y citado por Quesada (1983) es:

$$Kw = 9.8 * x_i * h_i(q_i) * n_i(q_i, Kw)$$

Si se considera el período de tiempo equivalente a un mes, se puede convertir la unidad de potencia a energía (Kilovatios a Kilovatios-hora), con lo cual, la ecuación de balance de masas se transforma en.

$$\beta_i E_f = 9,8 K x_i * h_i(q_i) * \overset{\eta}{n}_i(q_i)$$

Donde, β_i es un coeficiente de demanda de energía mensual, expresado como porcentaje de la energía firme anual, E_f es la energía firme anual, K es una constante que mantiene la igualdad de unidades en ambos lados y x_i es el caudal mensual.

Si se sustituye x_t en la ecuación de balance de masas mensual, se tiene,

$$\beta_t = q_t + y_t - \beta_t * E / 9.8 * K * h(q_t) * n(t) - k_t * A(q_t)$$

Con la condición siguiente de optimización :

$$q_{t+1} = \beta_t \quad S_t \quad \beta_t < S_{\text{máx}} \quad \text{y} \quad \beta_t > 0$$

$$q_{t+1} = S_{\text{máx}} \quad S_t \quad \beta_t > S_{\text{máx}}$$

La solución al problema consistirá en obtener la máxima cantidad de energía firme sin violar el rango de niveles de operación que definen el embalse activo (Quesada, 1983).

3. MATERIALES Y METODOS.

3.1 Delimitación del área de estudio y materiales.

3.1.1 Area de estudio.

La cuenca superior del río Reventazón se ubica entre los meridianos $83^{\circ}33'$ y $84^{\circ}02'$ de longitud oeste y entre los paralelos $9^{\circ}33'$ y $9^{\circ}58'$ de latitud norte insertándose en la región geográfica denominada vertiente Atlántica. Por el sureste la cuenca está limitada por la cordillera de Talamanca, desde el Tobosí hasta unos 10 kilómetros al sur de Cerro Mills, con elevaciones entre los 1500 y 3000 msnm. Por el norte, está limitada por la Cordillera Volcánica Central con elevaciones que van desde 1500 a 3400 msnm (Volcán Irazú) y por el este, una cadena montañosa la separa del río Pacuare. El área de la cuenca considerada hasta la elevación 930 msnm donde se ubica el embalse Cachí, es de 795,6 km².

La ubicación administrativa de la cuenca es la provincia de Cartago y comprende los cantones de Cartago, Paraíso, San Rafael de Oreamuno y El Guarco.

3.1.2 El proyecto hidroeléctrico de Cachí.

Se ubica a 4 kilómetros de la localidad de Juan Viñas, distrito de Tucurrique, provincia de Cartago, en el sitio denominado Cachí, en el valle de Ujarrás.

El embalse de regulación de la planta Cachí cubre un área de 323,6 hectáreas y fue proyectado para almacenar 54 millones de metros cúbicos. El manejo del embalse se hace de tal manera, que al entrar la estación seca, se encuentra con el máximo de capacidad para que la planta genere la energía durante dicha estación sin dificultad.

La presa es una estructura de hormigón armado tipo arco, con una altura máxima de 79 metros, de los cuales 68,5 dan la profundidad al embalse en este sitio; debajo del fondo del embalse, la presa tiene una penetración de 7 metros. El grosor de la base es 5 metros y el de la cresta es de 2,5 siendo la longitud total de 184 metros. Cuenta con cuatro compuertas, ubicándose la primera dentro de un túnel construido en la base y la segunda en un extremo de éste, que es utilizada para vaciar el embalse y extraer sedimentos; las puertas tres y cuatro son radiales y permiten la regulación del nivel del embalse.

Las turbinas son de reacción, tipo Francis y giran a razón de 514 rpm, presentando una caída aprovechable de 246 metros. La capacidad instalada de los generadores es de 36.000 kW en las unidades 1 y 2, siendo la unidad 3 de 36.800 kW; la subestación elevadora permite elevar el voltaje de 13.800 a 138.000 voltios.

La planta Cachi entró en generación comercial en una primera etapa en Mayo de 1966 y con la primera unidad generó 32.000 kW. La capacidad instalada se duplicó cuando entró en servicio la segunda unidad en Enero de 1967, que concluyó con la segunda etapa en Agosto de 1978, con lo cual, la capacidad instalada de la planta Cachi es de 100.800 kW.

3.1.3 Materiales y equipo.

- a) Equipo de fotointerpretación que consistió en un estereoscopio de espejos marca Topcon y Stereo Zoom.
- b) Equipo de planimetría, consistente en un planímetro digital marca Lasíco.

- c) Microcomputadora IBM modelo PS 30 con capacidad de 640 kilobytes de memoria RAM, impresora Epson y calculadora marca Casio modelo 785 p.
- d) Información cartográfica-temática.
- e) El procesamiento de la información se efectuó por medio del empleo del modelo de simulación DOPEM y DOPEMEN para el cálculo de la energía firme según el modelo RELPOWER, programas SAS y PALMER para los cálculos estadísticos, el procesador de textos WORD y la hoja electrónica LOTUS 123.
- f) Cinta métrica, brújula, clinómetro, altímetro, curvimetro, mesa de luz y vehículo.
- g) Fotografías aéreas del Proyecto Costa Rica/BID, infrarroja a color, escala 1:80.000, del año 1984, correspondientes a las fotos 8-10-12-13-14-15-16-17-18 - 19 de la línea de vuelo 8 y 118-119 de la línea de vuelo 9. Como mapa base se utilizó el 73-09-06 elaborado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La interpretación de éstas, se rectificó en Stereo Zoom.

3.2 Metodología.

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación y comprobar la hipótesis planteada, se consideró como enfoque metodológico general, el contraste del proyecto hidrológico de Cachí, entre la situación de la cuenca superior del río Reventazón, con baja condición de sobreuso y erosión atribuible principalmente a condiciones geológicas de la cuenca, representada por el período 1953-69 versus una condición de sobreuso más intensa de la cuenca, en que se ha alterado el régimen de caudales y se han

profundizado los fenómenos de erosión acelerada, representada por el periodo 1970-86.

3.2.1 Caracterización biofísica.

Las variables de respuesta de una cuenca hidrográfica, están constituidas por el régimen hidrológico y el transporte de sedimentos, que a su vez están condicionadas por diversos factores biofísicos, por lo cual, se hace necesario conocer la información relativa a estos factores.

La información biofísica como el clima, geología, geomorfología, suelos, hidrografía, relieve y zonas de vida presentes en la cuenca se obtuvo de diversos informes y estudios previos, realizados por instituciones públicas, privadas y universitarias del país.

3.2.2 Análisis de la problemática histórica del uso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.

Cuando se analiza el uso de la tierra, desde el punto de vista de evaluar la degradación del recurso suelo, se considera que un área en estado crítico, es altamente susceptible a la erosión; por ello, se consideraron áreas críticas 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 periodos, se siguieron los siguientes pasos metodológicos.

- a) Uso de la tierra. El uso de la tierra tuvo distintos períodos de análisis; el primer periodo consideró la información de 1953, 1955 y 1967, que fue obtenida de tesis de posgrado. El segundo periodo se caracterizó a través de información proporcionada por organismos públicos en 1977 y elaboración propia en el caso de 1984, a través de un mapa elaborado mediante fointerpretación. La escala utilizada en estos mapas fue de 1:100.000 y fue reducida por medios fotográficos con fines de presentación .
- b) Capacidad de uso. Los antecedentes y mapas de capacidad de uso de la tierra, se obtuvo a partir de estudios realizados por instituciones nacionales.
- c) Determinación de áreas críticas. Mediante la técnica de superposición entre el mapa de uso de la tierra y de capacidad de uso, se obtuvieron las áreas que se encontraban en condición de sobreuso para los años 1967, 1977 y 1984. Para los periodos de 1956 y 1961 que no se contó con mapas históricos, se determinó sobre la base de las diferencias encontradas entre la capacidad de uso y el uso histórico.

3.2.3 Análisis del impacto del uso de la tierra en la erosión de la cuenca.

Es interesante conocer el impacto que las condiciones de sobreuso han provocado en la cuenca. Para ello, se estimó necesario elaborar un mapa que señalara los distintos fenómenos erosivos de origen antrópico y su ubicación espacial en la cuenca; además se consideró necesario identificar y cuantificar las principales áreas que se constituyen en fuentes de sedimentos.

Para este análisis, se interpretaron las fotografías aéreas infrarroja a color ya señaladas comprobándose posteriormente en terreno, los fenómenos erosivos observados.

3.2.4 Analisis del impacto del uso de la tierra en la alteración del régimen de caudales.

En este caso, interesa conocer el efecto del uso de la tierra en las tendencias que pueden observarse en el régimen de caudales máximos, medios y mínimos. Para ello, se analizó el régimen de caudales mediante diversos modelos matemáticos descritos por Clarke (1973) y particularmente, se utilizaron modelos de regresión. En las variables utilizadas para el caso de los caudales máximos, fue la precipitación antecedente que se obtuvo con los volúmenes precipitados los dos días previos a que se verificara el evento máximo, mediante el método de Thiessen; en el caso de los caudales medios mensuales, se utilizó, la precipitación media mensual para explicar la estacionalidad y si ésta fue significativa en este tipo de regimenes hidrológicos. Los caudales mínimos, se analizaron por un contraste de medias (Kite, 1985). En cuanto a los antecedentes relativos a las precipitaciones, la información provino de las estaciones Sanatorio Durán, Cachí, Tapantí y Villa Mills de propiedad del ICE y El Guarco de propiedad del Instituto Meteorológico Nacional

La información fluviométrica utilizada corresponde a la obtenida por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en las estaciones Palomo (nº 73-09-19), Navarro (nº 73-09-16) y Cachí (nº 73-09-06). Puesto que la estación fluviométrica de Cachí fue reemplazada en 1973 por las estaciones Palomo y Navarro, se tuvo que rellenar la estadística básica de Cachí a partir de una regresión lineal

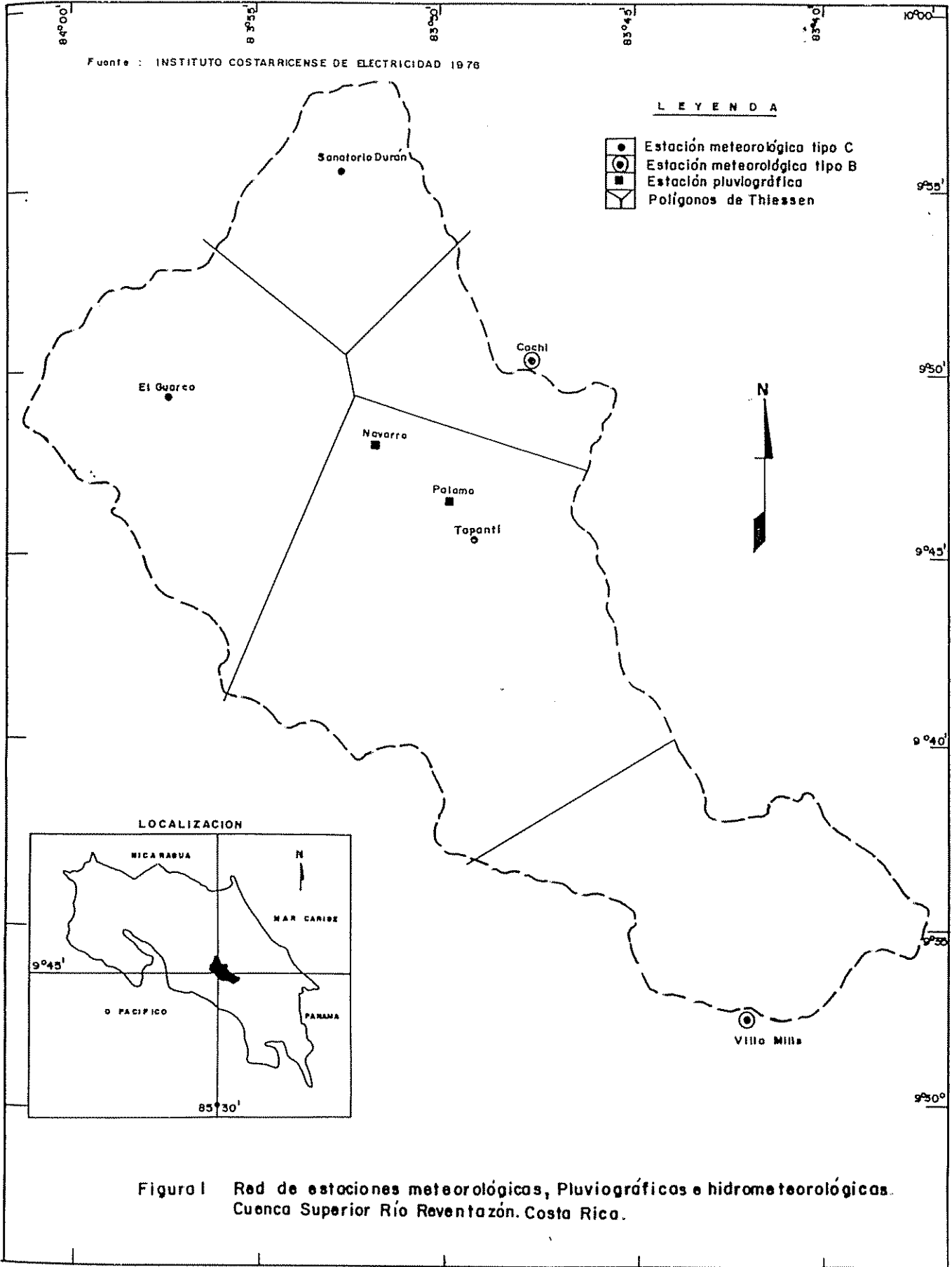
múltiple, con la información fluviométrica de los períodos 1971-1972 y 1972-1973 de las tres estaciones. Las estaciones meteorológicas y fluviométricas indicadas, así como los polígonos de Thiessen se muestran en la figura 1.

3.2.5 Análisis del impacto de la alteración del régimen de caudales y la sedimentación en la generación de energía firme.

Puesto que interesa conocer el efecto combinado de la variación del régimen de caudales y la pérdida de volumen en el embalse activo, por efecto del uso de la tierra en la generación de energía, se analizará este aspecto sobre la base de la ecuación de balance de masas o balance hidrológico reseñado en la revisión de literatura y que fuera desarrollado mediante el modelo hidrológico denominado DOPEM y DOPEMEN en la Universidad de Costa Rica por Jiménez y Núñez (1984).

Para la utilización del modelo fue necesario entregar diversos antecedentes que se especifican a continuación.

- a) Datos generales. Estos antecedentes corresponden a la cantidad de años para los que se tiene registros de caudales, que en la presente tesis corresponde a los 17 años de cada período de estudio; además es necesario ingresar el primer año de registro que correspondieron a 1953 y 1970 respectivamente.
- b) Alturas. Se refiere a la altura máxima, la altura mínima de operación del embalse y la altura de turbina de éste, expresada en metros sobre el nivel del mar. Mediante la última altura el programa obtiene la altura de carga externa.



- c) Eficiencias. Deben especificarse dos medidas de eficiencia que deben expresarse como un número entre 1 y 0. La primera, es la de conducción, que corresponde a la eficiencia del sistema de conducción y la segunda, es la eficiencia de generación.
- d) Porcentajes. Se tiene en primer término el porcentaje de caudal promedio y se utiliza para calcular el caudal promedio que se usa en la estimación de la potencia firme inicial. En segundo término, se tiene el porcentaje de falla y representa la confiabilidad del sistema, es decir, el número de años que se permitirá que el sistema falle; un 0 indica que no se permitirá ninguna falla, mientras que un 100 implica que todos los años pueden fallar. En último lugar, se tiene el porcentaje de error, que define la precisión con que se hará la estimación de volumen de cada mes.
- e) Coeficiente de demanda de energía. Corresponde a la relación entre la demanda promedio de un cierto período y la demanda anual; los factores mensuales, fueron estimados a partir de registros de 10 años de generación de energía bruta informados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).
- f) Tasa de precipitación, evaporación y evapotranspiración. Las tasas de precipitación y evaporación se obtuvieron de la estación hidrometeorológica de Cachí, fue necesario corregir los datos de evaporación con el factor de tanque, de acuerdo al criterio sugerido por Schulz (1980). La tasa de evapotranspiración se estimó de acuerdo con Penman (Schulz, 1980).

- g) Caudal mensual. Se utilizó la información ya especificada en el párrafo correspondiente a la obtención de información fluviométrica.
- h) Curva de eficiencia de la turbina. Corresponde a la eficiencia de la turbina según el porcentaje de carga mínima. Al respecto se utilizó la curva determinada por el Instituto Costarricense de Electricidad.
- i) Curvas hipsométricas. El programa DOPEM permite medir el efecto de la sedimentación en la producción de energía, alterando la curva hipsométrica original. Para ello, se alteró la curva original de diseño del embalse Cachi, según el procedimiento que se indica a continuación.
- i.1) En primer lugar, se completó la estadística básica correspondiente a los caudales mínimos diarios durante el período 1953-1970 a partir de regresiones simples, obtenidas del período común de estadística básica de las estaciones Palomo, Navarro y Cachi.
- i.2) A partir de datos de concentración de sedimentos medidos diariamente durante el período 1961 a 1967 para la Estación Navarro y entre 1962 y 1963 para la Estación Palomo, se obtuvieron las ecuaciones de transporte de sedimento en suspensión, utilizando el modelo $Q_s = \alpha Q_l^n$, donde Q_s , es el caudal de sólidos en suspensión, Q_l es el caudal líquido, mientras que α y n son parámetros de la regresión (Linsley et al., 1982).
- i.3) Aplicando las regresiones obtenidas para los ríos Navarro y Palomo a los caudales medios diarios se obtuvo el sedimento en suspensión que es transportado al embalse Cachi. Para el período 1972-1986, se utilizó

- . la información de sedimentación entregada por el Instituto Costarricense de Electricidad.
- i.4) Posteriormente, se obtuvo el sedimento depositado en el Embalse Cachi anualmente entre 1953-69 y 1970-86, utilizando el método de Brune (Linsley et al.,1977; Mahmood,1987)
- i.5) La alteración de la curva hipsométrica original se hizo por periodos de dos años, a excepción del período octavo que fue de tres años. Esta alteración consistió en trasladar los puntos originales de la curva en forma proporcional al sedimento que ingresaba en el período.
- i.6) Posteriormente, se corrió el modelo DOPEM (Jiménez y Núñez, 1984), para calcular la energía y potencia firme para cada curva hipsométrica dentro del mismo período de análisis.
- i.7) La prueba de hipótesis consistió en comprobar si hay diferencias significativas entre las tasas de pérdida de energía entre los dos períodos, para lo cual, se utilizó el modelo ARIMA para la identificación del modelo y modelos autorregresivos para el análisis de las series de cada período. La determinación de la tasa de pérdida de energía atribuible al mal uso de la tierra, se hizo mediante una recta de regresión para cada período.

3.2.6 Análisis del impacto económico de la pérdida de energía firme del embalse hidroeléctrico de Cachi, atribuibles a la mala gestión en el uso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.

La sedimentación en el sistema hidroeléctrico produce una disminución de la energía disponible que debe ser compensada mediante la generación propia de energía térmica o mediante la importación de energía. El efecto económico de la sedimentación por lo tanto, se valorará mediante los costos unitarios de la energía térmica o importada que necesita ser introducida al sistema para compensar la pérdida atribuible a la sedimentación. A estos valores, se le deben agregar los costos sumergidos a consecuencia de la sedimentación. Puesto que, los precios de mercado usados para evaluar los efectos económicos, no necesariamente reflejan adecuadamente la escasez de recursos de una sociedad, se deberán ajustar los precios de mercado y reemplazarlos por precios sombras en la determinación de los costos unitarios de producción de la energía térmica o importación y en los costos sumergidos.

4. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1 Elementos biofísicos.

4.1.1 Climatología.

Se considera relevante para los fines del presente estudio, el análisis de la precipitación y la temperatura, ya que, estos elementos son decisivos en las distintas formas de uso de la tierra (tanto por las formaciones forestales presentes como las posibilidades de cultivos), como en el régimen de caudales.

4.1.1.1 El transcurso de la precipitación.

Los regímenes de precipitación en los trópicos están relacionados con la circulación general de la atmósfera, siendo de importancia las zonas de convergencia tropical, ya que, alrededor de éstas se reciben las mayores precipitaciones; además, estos regímenes están influenciados por células tropicales de alta presión, que inhiben las precipitaciones, las cuales son trasladadas al Ecuador por los vientos alisios

Las máximas precipitaciones ocurren aproximadamente un mes después de los equinoccios, cuando la zona de convergencia intertropical se sitúa directamente sobre el Ecuador; a estos periodos de fuertes lluvias, parece seguir el desplazamiento estacional de la posición zenital del sol. No obstante, es la convergencia de las masas de aire la que produce las lluvias (Mojica,1967); las masas de aire provenientes del Atlántico, Golfo de México y Norteamérica (Lombo,1963), a lo que habría que agregar las condiciones particulares de la cuenca superior del río Reventazón (Mojica,1967).

Se estima que, a comienzos de Mayo y Noviembre se presentan las máximas precipitaciones en que cae un 84,5% de la precipitación media total anual que se estimó en 2153,2 mm., mediante el método de Thiessen. Durante este período la precipitación se caracteriza, en general, por ser de tipo convectivo debido al debilitamiento del flujo alisio del este; las lluvias de este tipo se caracterizan por ser de corta duración, alta intensidad y cubren áreas relativamente pequeñas, lo que imprime características de alta torrencialidad a algunas áreas de la cuenca.

En el período de Diciembre a Abril, la componente norte de los vientos alisios se intensifican, debido a su asociación con las masas de aire polar provenientes del interior de Norte América, que se desplazan hacia el sur del mar Caribe. En este desplazamiento, las masas de aire se cargan de humedad, las que al chocar con el relieve abrupto de la cordillera de Talamanca, provoca lluvias orográficas que suelen durar varios días. En general, la zona de estudio presenta cuatro meses secos, Enero a Abril, considerándose mes seco a aquel que tiene menos de 80 mm de precipitación mensual; el resto de los meses son húmedos y lluviosos, presentándose hasta 750 milímetros de precipitación mensual en determinadas áreas de la cuenca (Mojica,1971).

Estas condiciones, determinan una gran irregularidad en el monto y distribución espacial de las precipitaciones en la cuenca, por lo cual, se presenta una gran variedad de situaciones microclimáticas, que dan origen en la cuenca distintas formaciones vegetales.

4.1.1.2 Distribución general de la temperatura en la cuenca.

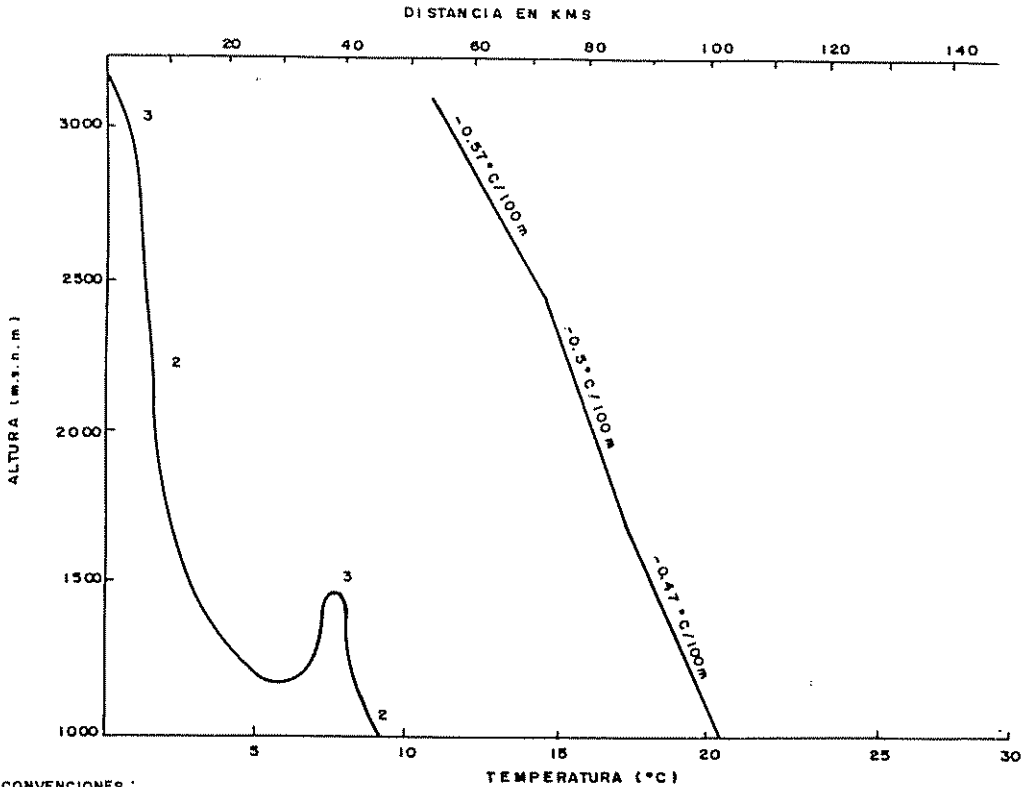
El régimen de temperatura también presenta dos estaciones bien diferenciadas, una más cálida entre Mayo y Noviembre; la otra, más fría entre Septiembre y Abril, debido al regreso de los vientos de circulación intertropical, hacia fines de septiembre.

Mojica (1967) representó gráficamente la temperatura promedio de cada una de las estaciones de la cuenca, en relación con la altura sobre el nivel del mar, de manera que obtuvo la distribución promedio altitudinal de la temperatura para la cuenca superior y el conocimiento del ciclo de temperatura, en las diferentes áreas de la misma.

De esta forma, se encontró una gradiente térmica promedio de $0,58^{\circ}\text{C}$ por cada cien metros, tal como lo muestra la figura 2; del análisis de esta gradiente térmica se concluyó que la variación mensual de temperatura es ínfima y los resultados obtenidos para cada mes no difieren sustantivamente de la media general resultante. Asimismo, se puede observar que los cambios de temperatura son diferentes en los valles, laderas y cimas, por lo cual la temperatura se constituye en un elemento decisivo en el uso de la tierra, en cuanto determina la variedad de cultivos que es posible desarrollar en la cuenca.

Por otra parte, los primeros meses del año, la temperatura tiende a ascender y coincide con la época lluviosa de este período para la misma zona, tal como lo muestra la figura 3 ; además, se observa que los cambios térmicos están muy relacionados con los períodos de iniciación y finalización de los períodos secos y lluviosos.

Fuente : MOJICA, 1967
Tesis MAG Sc



CONVENCIONES :

- Gradiente de temperatura.
- Perfil de la cuenca
- 2 Ciclo diario promedio de temperatura para laderas.
- 3 Ciclo diario promedio de temperatura para alturas

ESCALAS :

- Horizontales :
 - Temperatura 1°C = 5m.
 - Distancia 1:700.000
- Vertical : 1:2000

Figura 2 : Distribución altitudinal de la temperatura para la Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.

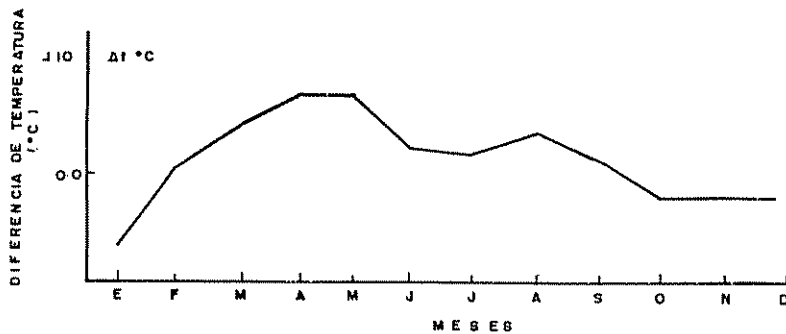


Figura 3 Transcurso de la temperatura por diferentes medios mensuales, en la Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.

4.1.2 Geología.

De acuerdo con Weyl (1957), las formaciones geológicas que se encuentran en la cuenca son formadas recientemente, entre el Mioceno y el Pleistoceno (terciario Superior). La historia geológica se remonta al plegamiento principal de la cordillera de Talamanca, de relativamente poca intensidad al que siguió un plutonismo que produjo magmas ácidos y básicos; a consecuencia de movimientos corticales se retiró el mar, por lo cual, se depositaron en el mioceno medio y superior los sedimentos alrededor del núcleo emergente de la cordillera. Relacionado con plegamientos más recientes, debe estar otro levantamiento de la cordillera, a principio del Mioceno, la cual ya se encontraba denudada hasta el nivel de intrusión. Un período de relativo reposo tectónico en el plioceno inferior, indujo formaciones de relieve plano, en alturas de poca elevación.

En la última fase evolutiva, plioceno superior, la cordillera se levantó a lo largo de fallas, abundantes en la zona media de la cuenca, con encorvaduras de amplia extensión, por lo cual se reactivó la erosión y el relieve plano formado previamente, comenzó a ser destruido abriéndose valles profundos hasta la cresta de la cordillera. Paralelamente, se reaniman los movimientos tectónicos como consecuencia de la actividad magmática; el volcanismo subsiguiente condujo a la formación de grandes volcanes. La formación de volcanes, se encuentra en íntima relación en causa y espacio, con las grandes fallas a lo largo de la costa del Pacífico, por lo cual, se le considera un volcanismo subsecuente, con respecto a los procesos orogénicos de la cordillera de Talamanca.

Cuadro 1. Distribución de los materiales geológicos en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.

Material Geológico	Símbolo	Superficie (Km ²)	(%)
Cuaternario-Sedimentario			
Depósitos fluviales, coluviales y costeras recientes.	Qa1	78,4	9,9
Mioceno-Oligoceno			
Formación indiferenciada	Tmi	54,4	6,8
Formación térraba: lutitas oscuras hasta negras, limolitas, areniscas tobáceas, conglomerados y turbiditas.	Tom(t)	135,6	17,0
Oligoceno			
Formación Senosri: calizas brechoides, organógenos, lutitas y calcarenitas	To(t)	6,8	0,9
Cuaternario-Volcánicos			
Edificios volcánicos recientes y actuales y piroclásticos asociados	Qv2	129,6	16,3
Terciario-Volcánico			
Formación doan: conglomerados volcánico-clásticos brechosos de andesita y basalto; lutitas lodolitas, siltitas y conglomerados finos.	Tva(d)	390,8	49,1
Total		795,6	100,0

Adaptado de: Sandoval, F. (1982)

Dirección de Geología, Minas y Petróleo

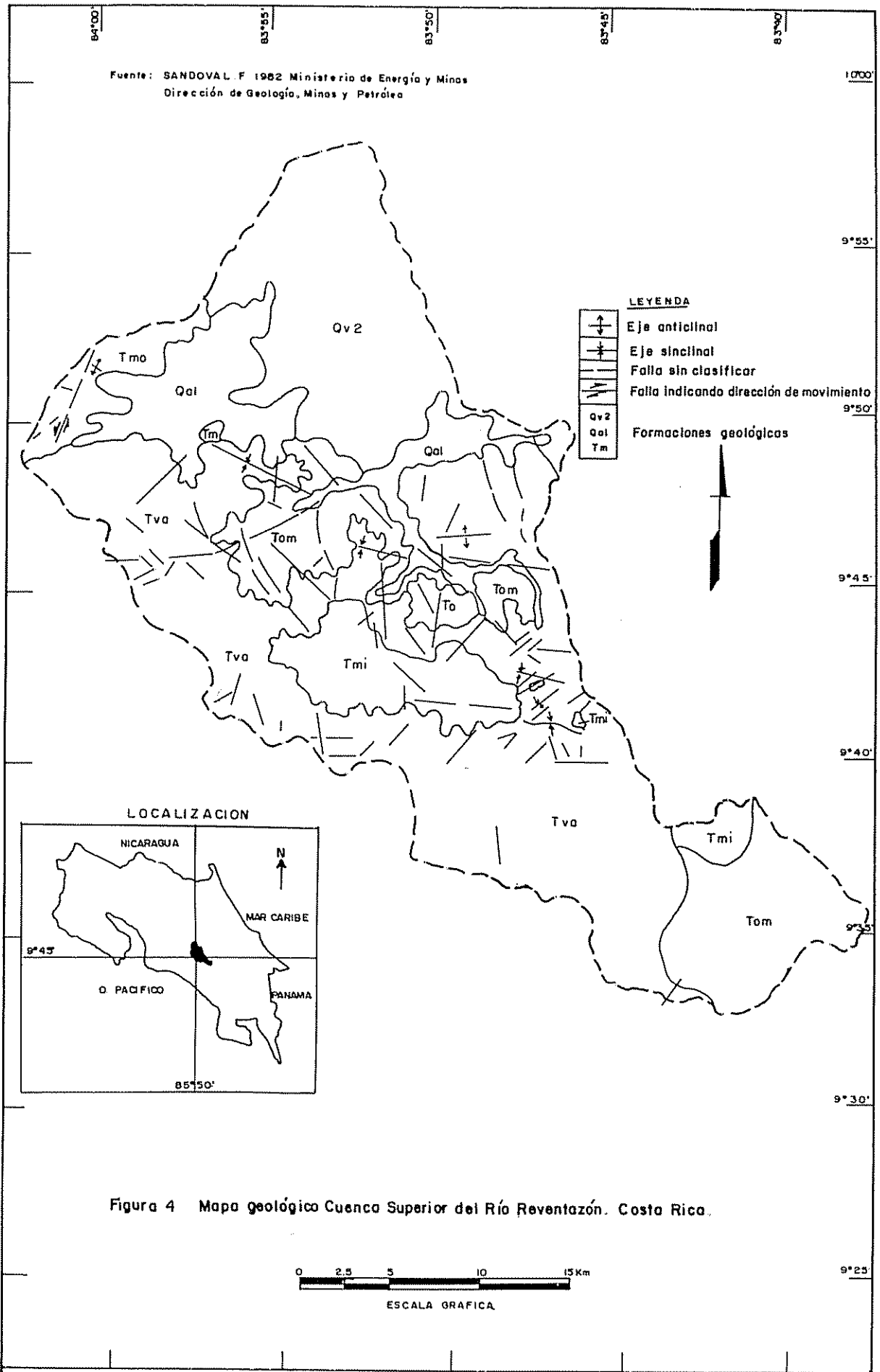


Figura 4 Mapa geológico Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.

De acuerdo con el manual de geología de Costa Rica (Sprechmann,1984), en la cuenca es posible distinguir las formaciones geológicas, que se detallan en el cuadro 1 y en la figura 4.

Cabe destacar, que el relativo reposo tectónico en el plioceno inferior, indujo formaciones de relieve plano que ha sido determinante para la conformación de un paisaje de relieves poco ondulados, lo que unido al volcanismo activo subsiguiente, tanto en el terciario como en el cuaternario que han afectado un 16,9% de la cuenca ha sido determinante en la formación de suelos de cenizas volcánicas en pendientes suaves de alta productividad en la zona de Paraiso y Cartago. La formación de terrazas fluviales por su conformación, ha constituido la base de cultivos de café de alta calidad en la zona de Orosí. En cambio, una vasta superficie de la cuenca presenta condiciones de alta inestabilidad, propia de los fenómenos de vulcanismo.

4.1.3 Geomorfología.

La cuenca del río Reventazón se inserta en el sistema montañoso del sur de América Central, constituyendo una unidad compleja tanto por el relieve como por la estructura geológica ya descrita. De acuerdo a lo informado por Dengo (1968), el relieve actual es el resultado los movimientos orogénicos del Mioceno y el levantamiento durante el Plioceno, lo que dió origen, a un relieve abrupto y de fallas escalonadas como es en general la cordillera de Talamanca, a la cual pertenece como unidad fisiográfica la cuenca superior del río Reventazón (Bergoeing y Malavassi,1982).

La cuenca presenta unidades geomórficas bien características y diferenciadas que de acuerdo a lo informado por Madrigal y Rojas (1980), se pueden observar en la figura 5 y en el cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución en superficie de las formas geomorfológicas de la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica..

Símbolo	Forma Geomorfológica	Superficie	
		(Km ²)	(%)
A	Sedimentación	74,8	9,4
B	Origen volcánico	134,6	16,9
C	Remoción en masa	5,6	0,7
D	Origen Tectónico y Erosión	580,6	73,0
	Total	795,6	100,0

Adaptado de: Madrigal y Rojas (1980)

Secretaría de Planificación Sectorial Agropecuaria.

Fuente: MADRIGAL Y ROJAS 1978
Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria

L E Y E N D A

- A FORMAS DE SEDIMENTACION ALUVIAL
- B FORMAS DE ORIGEN VOLCANICO
- C FORMAS ORIGINADAS POR REMOCION EN MASA
- D FORMAS DE ORIGEN TECTONICO Y EROSIVO

↙ ↘ Área de abanico aluvial indicando la presencia de corrientes de lodo.

~ Irregularidad del terreno producido por un frente de lava o una corriente de lodo

→ Dirección de una colada de lava



LOCALIZACION

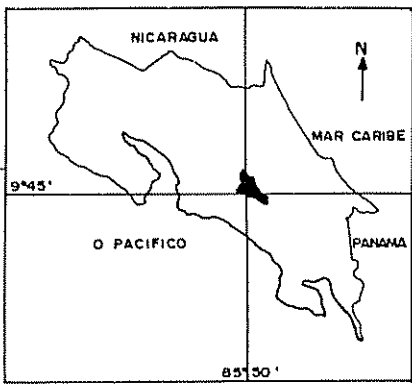


Figura 5 Mapa de geomorfología. Cuenca Superior del Río Revantazón. Costa Rica.



ESCALA GRAFICA

Se puede señalar que la cuenca presenta condiciones naturales, para la formación de torrentes de gran energía, por la presencia de abanicos aluviales cuyos vértices contienen bloques de gran tamaño. Destaca entre estos procesos geomorfológicos, los deslizamientos del río Reventado, desde su cabecera hasta cerca de la carretera auxiliar de entrada a Cartago, que resultan de gran peligro para la población, puesto que las ciudades más grandes de la cuenca como Cartago, Paraíso y Cervantes se ubican en abanicos aluviales y coladas de barro

4.1.4 Suelos.

En Costa Rica, se han realizado diversas clasificaciones de suelos, sin embargo por ser la más reciente, completa y de una escala adecuada para los fines de este estudio, se utilizó la clasificación realizada por Pérez et al. (1978), que se presenta en la figura 6; a la vez, en el cuadro 3, se indica la distribución en superficie de los subgrupos de suelos de la cuenca.

En este cuadro además, se puede observar que el 16,1% de la superficie de la cuenca corresponde a suelos de alta productividad, que se pueden utilizar en una gran variedad de cultivos, mientras que, un 26% presenta limitantes susceptibles de superarse mediante técnicas de conservación de suelos o utilizarse en ganadería. Dado el tipo de relieve abrupto que presenta una vasta superficie de la cuenca, una superficie importante (70%) presenta suelos de gran inestabilidad.

4.1.5 Hidrografía.

Debido a las condiciones climáticas y geomorfológicas, la cuenca presenta en su área un gran número de corrientes de agua que sirve de drenaje a los terrenos de ésta. De

Cuadro 3. Distribución de subgrupos de suelos en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.

Símbolo	Suelo Principal	Suelos Asociados	Superficie	
			(Km ²)	(%)
H ₃	Lythic tropofolist	Lythic placandept Lythic tropofibrist	16,6	2,1
I ₄	Typic placandept	Typic distrandept	153,6	19,3
I ₆	Typic distrandept	Typic vitrandept Typic hydrandept	64,2	8,1
I ₁₂	Typic humitropept	Andic humitropept Oxic dystropept	110,6	13,9
I ₁₄	Andic humitropept	Entic dystrandept Andic tropohumult	179,4	22,5
I ₁₅	Andic ustic humitropept	Aeric tropaquept	53,4	6,7
I ₂₆	Typic dystropept	Lytic dystropept Typic troporthent	52,4	6,6
I ₃₀	Lythic dystropept	Typic dystropept	116,2	14,6
U ₄	Typic tropohumult	Typic humitropept	49,2	6,2
Total			795,6	100,0

Adaptado de: Pérez, Alvarado y Ramírez. (1978)

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria

Fuente: PEREZ, ALVARADO, Y RAMIREZ. 1978
Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria

LEYENDA	
Símbolo	Suelo
H-3	Lythic tropofolst
I-4	Typic plancansept
I-6	Typic distrandsept
I-12	Typic humitropept
I-14	Andic humitropept
I-15	Andic humitropept
I-26	Typic dystropept
I-30	Lythic dystropept
U-4	Typic tropohumult

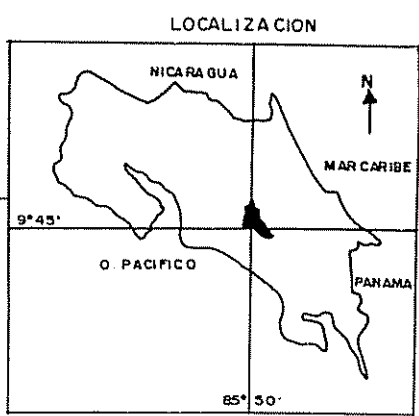
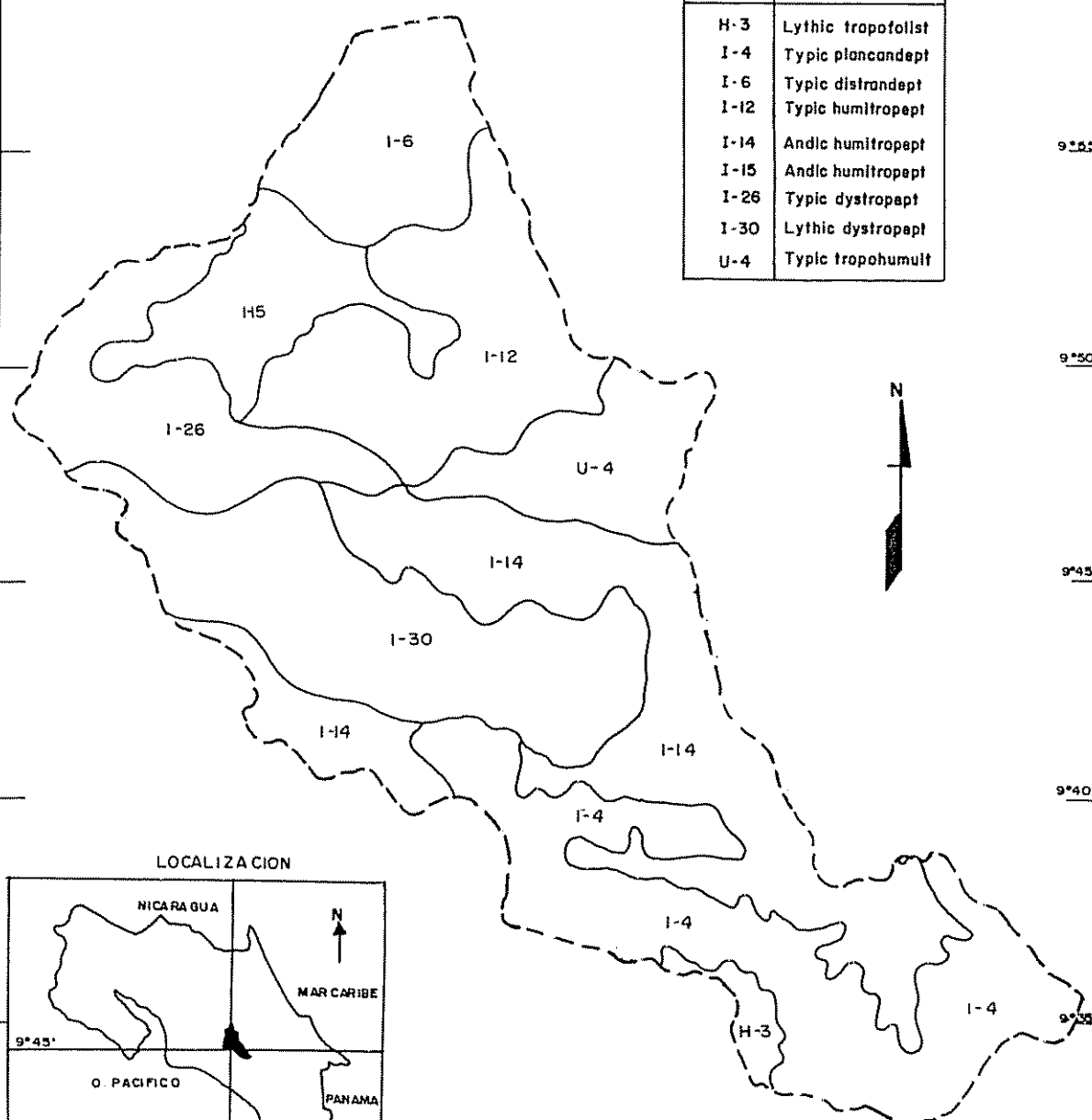
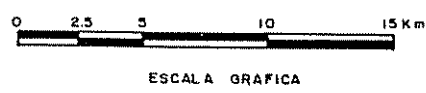


Figura 6 Mapa de subgrupos de suelos. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica. 1978.



acuerdo con Bergoeing y Malavassi (1982) los principales sistemas de drenaje del Valle Central Oriental de Costa Rica, nacen al sur de ésta, de tal suerte que el río Reventazón se constituye en el colector principal.

El río Reventazón nace en las estribaciones septentrionales del cerro Cuericí (3345 msnm) bajo el mismo nombre, para luego pasar a llamarse río Grande de Orosí y el nombre de Reventazón lo recibe después de la confluencia con el río Humo, todavía en la cuenca superior. Este río y sus afluentes, dibujan en el área una trama de drenaje dendrítica, debido al gran manto de lateritas que recubre el relieve eminentemente arcilloso de la cuenca; sin embargo, los ríos afluentes están condicionados en su recorrido por importantes alineamientos tectónicos.

Hasta la represa de Cachi, el río Reventazón recibe importantes afluentes entre los que destacan el Cuericí, Humo, Grande de Orosí, Villegas, Negro, Macho, Estrella, Empalme, Navarro, Naranjo, Navarrito, Aguas Calientes, Pucares, Loaiza, Birrisito, Purires, Reventado, Taras, Toyogres y Paso Real.

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), utiliza una nomenclatura propia para las cuencas hidrográficas de Costa Rica, para los fines de organizar los trabajos de acuerdo a sus intereses, de tal forma, que cada cuenca tiene un nombre vernáculo, un primer número que indica la fecha de instalación de alguna estación pluviográfica y un segundo número identifica las subcuencas por separado. De esta forma, la cuenca del Reventazón tiene el N° 9 y se conforma de las subcuencas señaladas en el cuadro 4.

Cuadro 4. Subcuencas del río Reventazón, Costa Rica.

Subcuenca	Superficie	
	(Km ²)	%
Aguas Calientes y Navarro	371,8	46,7
Superior del río Macho	19,0	2,5
Media del río Macho	46,0	5,8
Humo	64,6	8,2
Gato	95,0	11,9
Cuerici	190,0	23,9
Parte del Atirro	8,1	1,0
Total	795,6	100,0

Fuente:Elaboración propia(1989)

4.1.6 Distribución de la pendiente.

Casi toda la cuenca presenta fuertes pendientes, que dan origen a relieves accidentados a muy quebrados, debido fundamentalmente a la geomorfología del área, presentando por lo general una topografía difícil por lo escarpado de la cuenca. La excepción a esta condición, la presenta la zona aluvional donde se ubica la ciudad de Cartago hasta Paraíso, que presenta un relieve ondulado, con pendientes de 5 a 15%. De acuerdo a lo informado por Van Gineken y Calderón (1978), se presentan en la cuenca las categorías de pendientes que se muestran en el cuadro 5 y en la figura 7.

En este cuadro, se puede observar que el relieve general de la cuenca es de pendientes muy fuertes y sólo un 6.8% presenta condiciones planas a onduladas. Evidentemente, este tipo de relieve es decisivo en la torrencialidad que presentan algunos ríos de la cuenca, así como, en el régimen general de escorrentía de la cuenca.

4.1.7 Zonas de vida.

De acuerdo con el mapa ecológico de Costa Rica (Tosi, 1969), en la cuenca se distinguen las siete zonas de vida, las que se encuentran ampliamente descritas por el mismo autor. Estas zonas corresponden al Bosque Muy Húmedo Tropical, Bosque Pluvial Premontano, Bosque Húmedo Premontano Tropical, Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Tropical, Bosque Pluvial Montano Bajo Tropical y Bosque Muy Húmedo Montano Tropical.

Cuadro 5. Distribución de las categorías de pendientes en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.

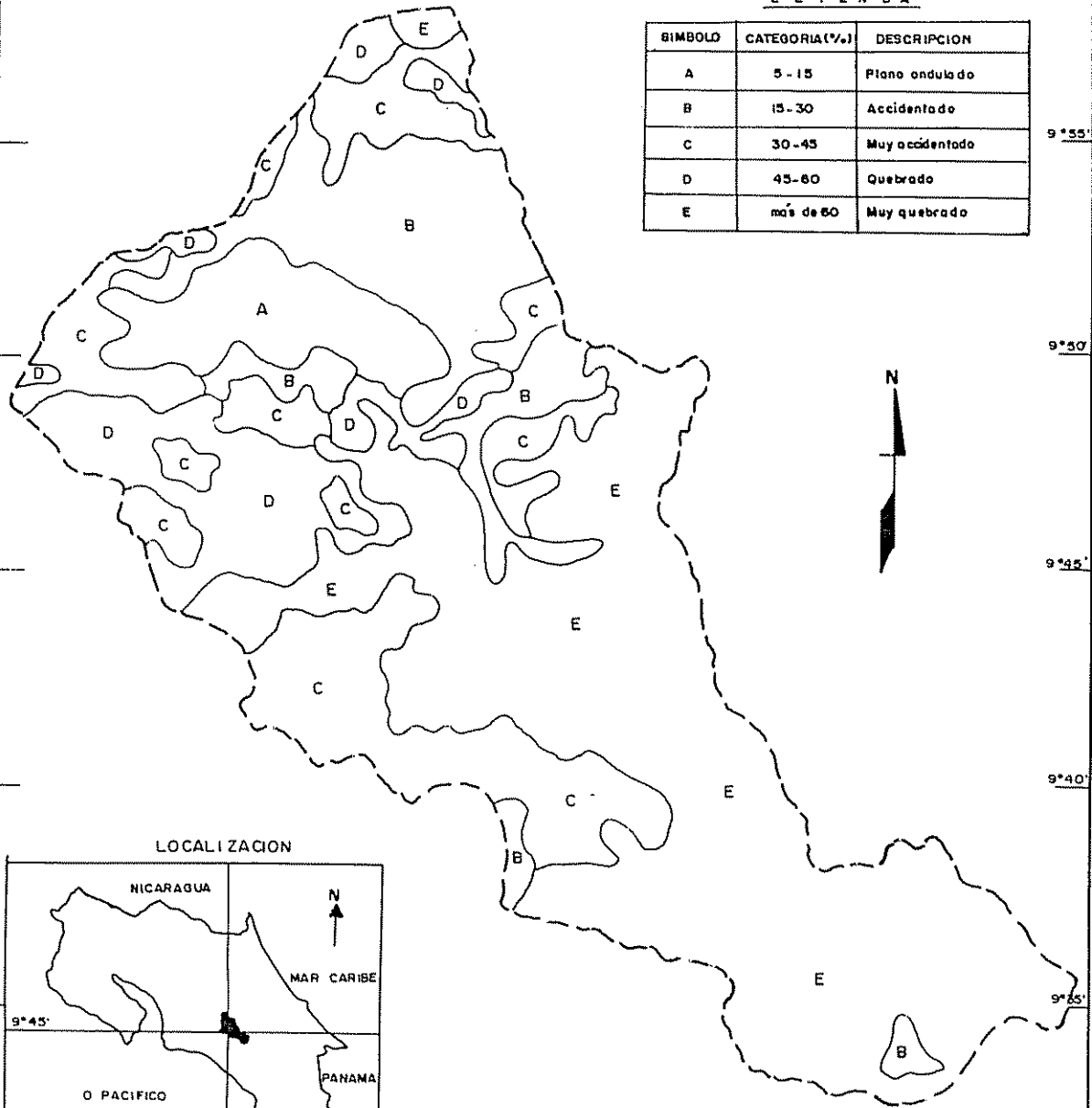
Símbolo	Pendiente(%)	Descripción	Superficie	
			(Km ²)	(%)
A	5-15	Plano ondulado	54,4	6,8
B	15-30	Accidentado	120,8	15,2
C	30-45	Muy accidentado	156,0	19,6
D	45-60	Quebrado	85,6	10,8
E	>60	Muy quebrado	378,8	47,6
Total			795,6	100,0

Adaptado de: Van Ginneken y Calderon (1978)
 Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria

Fuente : Van Dinneken y Calderón
Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria . 1978

L E Y E N D A

SIMBOLO	CATEGORIA(%)	DESCRIPCION
A	5 - 15	Plano ondulado
B	15 - 30	Accidentado
C	30 - 45	Muy accidentado
D	45 - 60	Quebrado
E	más de 60	Muy quebrado



LOCALIZACION

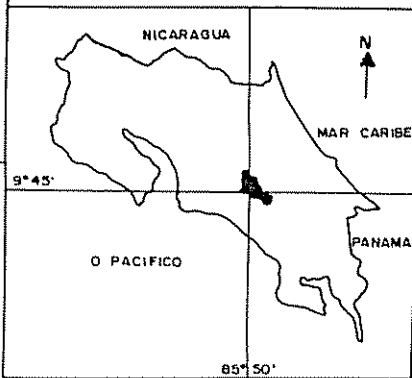
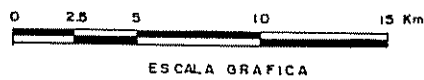


Figura 7 Mapa de categorías de pendientes. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.



4.2 Problemática del uso histórico de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.

Se hace necesario estudiar la problemática histórica del uso de la tierra en la cuenca, a fin de identificar las áreas críticas en los distintos periodos de análisis. Esto implica, el análisis de las unidades de tierras que se encontraron en condiciones de sobreuso, sobrepasando la capacidad de uso y estuvieron, por tanto, con fuerte riesgo de deterioro ambiental y pérdida de su capacidad productiva, transformándose en áreas de fuente de abastecimiento potencial de sedimentos.

4.2.1 Capacidad de uso de los suelos de la cuenca.

Con base al uso apropiado de la tierra, se elaboró por parte de la Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria (Pérez et al., 1979), el mapa de capacidad de uso de los suelos de Costa Rica. Este estudio ha sido la base de información que se utilizó para definir la capacidad de uso del suelo en la cuenca, que se detalla en el cuadro 6 y en la figura 8. De este cuadro, se puede inferir que alrededor de un tercio de la superficie de la cuenca (32,1%) tiene aptitud para una agricultura que debiera ser practicada racionalmente, lo que indica un alto potencial productivo de esta cuenca, lo que unido a la alta calidad de algunos tipos de suelos presentes confiere a algunas áreas de ésta cuenca, una particular importancia en la economía agrícola costarricense. Sin embargo, es dable destacar además que una alta superficie (30%) debiera ser destinada a la protección, sobre todo por la infraestructura hidroeléctrica que posee la cuenca.

Cuadro 6. Distribución de la capacidad de uso de los suelos en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.

Clase	Limitantes	Superficie Km ²	Subclase %	Superficie Km ²	Clase %
2	2pfm ₁	48,4	6,1	48,4	6,1
3	3p	108,6	13,7	110,4	13,9
	3s	1,8	0,2		
4	4p	62,4	7,8	96,2	12,1
	4pe	31,2	3,9		
	4i	2,6	0,3		
6	6pt	6,4	0,8	116,7	14,7
	6t	2,8	0,9		
	6p	16,2	2,0		
	6tm ₃	9,2	1,2		
	6se	10,2	1,3		
	6s	59,3	7,5		
	6st	11,0	1,4		
	6m ₃	1,6	0,2		
7	7p	127,5	16,0	198,5	24,9
	7se	2,4	0,3		
	7s	47,8	6,0		
	7m ₃	0,8	0,1		
	7sm ₃	19,2	2,4		
	7et	0,8	0,1		
8	8t	0,8	0,1	225,4	28,3
	8s	33,0	4,1		
	8sm ₃	36,4	4,6		
	8sll	27,4	3,4		
	8m ₃	10,4	1,3		
	8e	75,6	9,5		
	8et	31,4	4,0		
	8st	10,4	1,3		
Total		795,6	100,0	795,6	100,0

Adaptado de: Pérez, Van Ginneken, Protti y Ramírez (1979).
Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria

Fuente: PEREZ, VAN GINNEKEN, PROTTI y RAMIREZ, 1978
Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria

Clase	Agricultura anual	Agricultura permanente	Ganadería	Forestal	Protección
1	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X
6		X	X	X	X
7				X	X
8					X

FACTORES LIMITANTES

- Pendiente (p)
- Suelos de menos de 50cm profundidad(s)
- Alta susceptibilidad a la erosión(e)
- Drenaje lento (D)
- Drenaje nulo (DN)
- Fertilidad media a muy baja
- Precipitación media anual entre 3500 y 5000 mm (L)
- Precipitación media anual mayor de 5000 mm (LL)
- De tres a cinco meses secos al año (m₁)
- Más de cinco meses secos al año (m₂)
- De cero a un mes seco al año (m₃)
- Temperatura media anual entre 9 y 12°C (t)
- Temperatura media anual menor de 9°C (T)

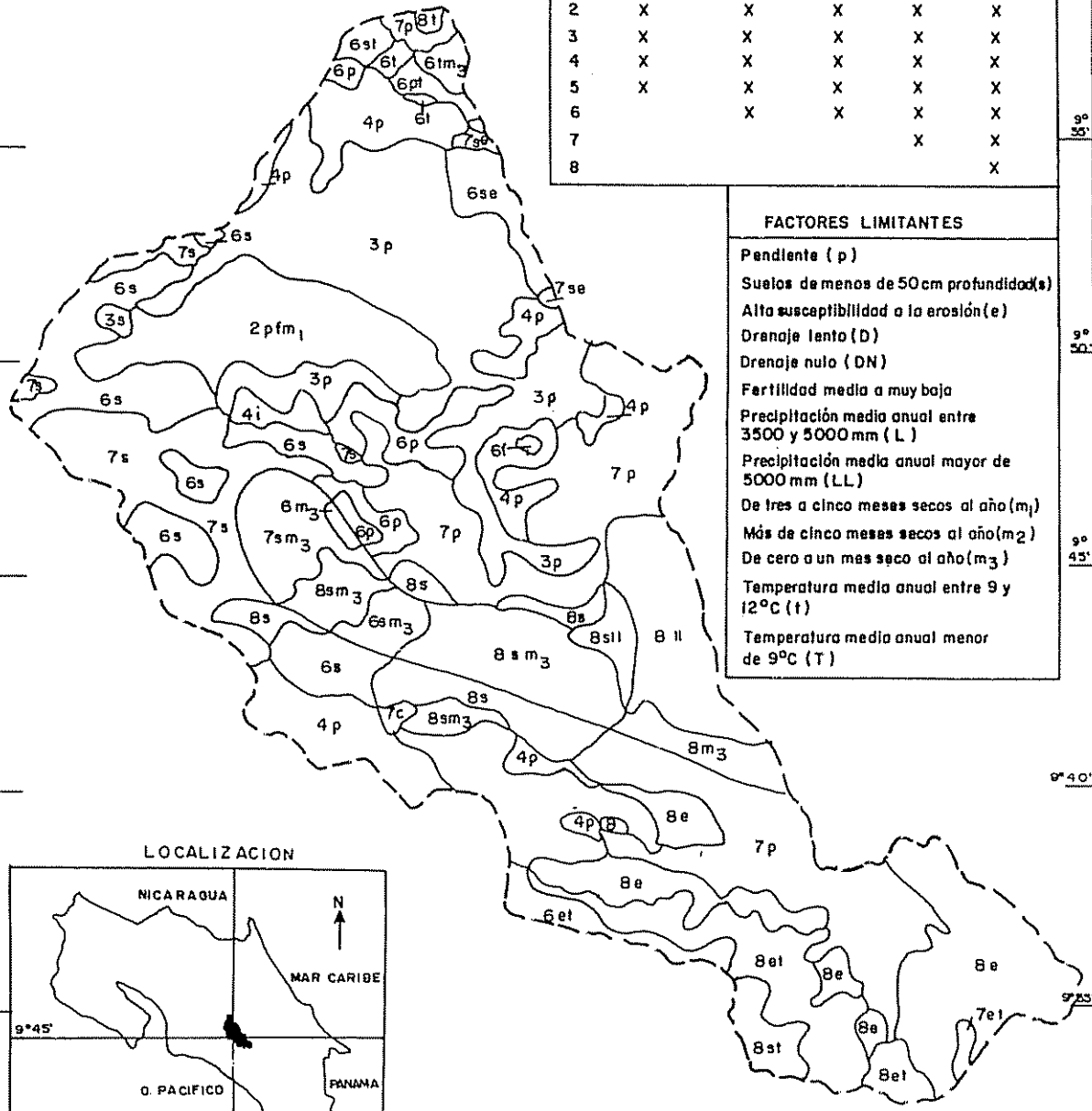
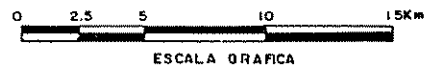


Figura 8 Mapa de Capacidad de Uso del suelo. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.



4.2.2 Uso histórico de la tierra en la cuenca.

En general, en Costa Rica se ha inducido un uso de la tierra orientado principalmente a la sustitución del bosque y la ampliación de tierras destinadas tanto a la ganadería como a cultivos permanentes (Hartshorn,1982), de manera que a 1979 se agota la frontera agrícola del país (Lizano,1980; Oficina de la Presidencia de la República,1979). Del mismo modo, se ha notado una ausencia casi total de prácticas conservacionistas de suelos y aguas, dado que el mercado no ha estimulado a los productores en la protección de sus recursos agrícolas, asumiendo el estado un papel neutral en materias de conservación (Corrales,1985), por lo que las principales prácticas de los cambios de uso de la tierra han sido la deforestación, la agricultura migratoria y el uso de leña con fines energéticos (Maldonado,1986), situación que ha afectado también a la cuenca del río Reventazón.

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

- a) Bosque primario o muy poco intervenido. Son masas de árboles naturales, productivos o no, en el cual destacan las asociaciones con dominancia de roble blanco (Quercus copeyensis C.H. Muller) y encino (Quercus guaglielmitreleasi Mull); asociación de Magnolia poasere Dandy y Weinmannia chamaedora Standl; asociación de Prunus sp y Chusquea sp., así como diversas asociaciones donde la dominancia se reparte entre varias especies nativas.
- b) Bosque secundario. Son áreas que se encuentran en estado de bosque en sucesión secundaria en su fase inicial; se denominan comúnmente estas áreas como charral y se encuentran en descanso para un uso posterior, o bien,

están abandonados por ser tierras improductivas como consecuencia de la agricultura migratoria.

- c) Ganadería. Se refiere, a los terrenos utilizados permanentemente para forrajes herbáceos en estado silvestre.
- d) Cultivos perennes. Son tierras destinadas a cultivos que ocupan el terreno durante largos periodos y no necesitan ser replantados después de cada cosecha. Se distingue especialmente en este tipo de uso, el café.
- e) Cultivos anuales. Comprende las tierras bajo cultivos temporales, huertos y tierras en barbecho. En este tipo de uso se destaca el cultivo de caña, hortalizas diversas y la floricultura.
- d) Urbano. Son tierras destinadas en lo fundamental a viviendas y diversa infraestructura urbana.

Los patrones históricos de uso de la tierra, se pueden observar en el cuadro 7, así como en las figuras 9, 10 y 11.

Del cuadro citado, se puede inferir que el uso de la tierra en la cuenca ha sido un proceso histórico de reducción del bosque primario, dando lugar a una expansión de los terrenos ganaderos, cultivos perennes y terrenos urbanos, puesto que la superficie de bosque primario se redujo del 60,2% al 43,1%, mientras que las tierras destinadas a la ganadería creció desde un 20% hasta un 33,6% y los urbanos desde el 0,6% hasta un 2,7%. Del mismo modo, los terrenos destinados a cultivos anuales han permanecido casi invariables en término de superficies y tipo de cultivos (café), y han constituido un 9% de la superficie total de la cuenca. Además, la reducción del bosque por medio de talas selectivas, ha dado origen a áreas con

Cuadro 7. Cambios de uso mayor de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica.

Categoría de uso mayor de la tierra.	1956*		1961*		1967**		1977***		1984****	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Bosque primario	479,2	60,2	458,4	57,6	406,8	51,1	376,6	47,3	342,8	43,1
Bosque secundario	71,2	8,9	79,2	10,0	16,6	2,1	18,2	2,3	41,5	5,3
Ganadería	159,1	20,0	169,5	21,3	267,0	33,6	230,0	28,9	267,0	33,6
Cultivos perennes	14,9	1,9	17,1	2,1	18,6	2,3	38,0	4,8	45,7	5,8
Cultivos anuales	71,2	9,0	71,4	9,0	81,7	10,3	122,0	15,3	75,3	9,5
Urbano y otros					4,9	0,6	10,8	1,4	21,5	2,7
Total	795,6	100,0	795,6	100,0	795,6	100,0	795,6	100,0	795,6	100,0

*Adaptado de: Mojica (1971)

Effects of changes in the land use on the streamflow of the Reventazn River, Costa Rica

**Adaptado de: Matos (1967)

Ensayo comparativo de tres sistemas fisionómico estructurales para la descripción de la vegetación.

***Adaptado de: OFIPLAN (1977)

****Elaboración Propia.

Fuente : Motos F. 1967

Ensayo comparativo de tres sistemas fisionómico-estructurales para la descripción de la vegetación.

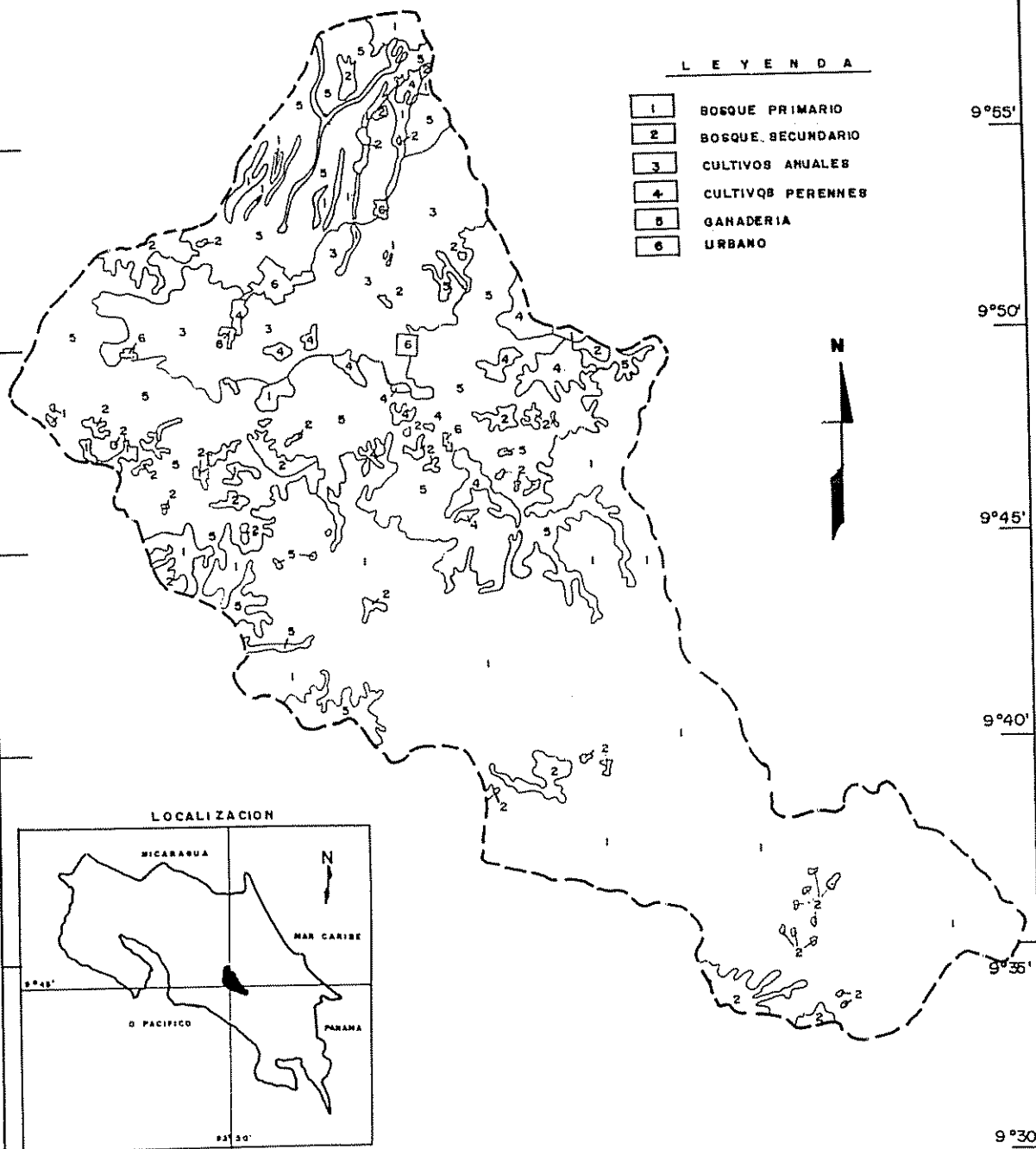


Figura 9 Mapa de uso de la tierra. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica. 1967.



ESCALA GRAFICA

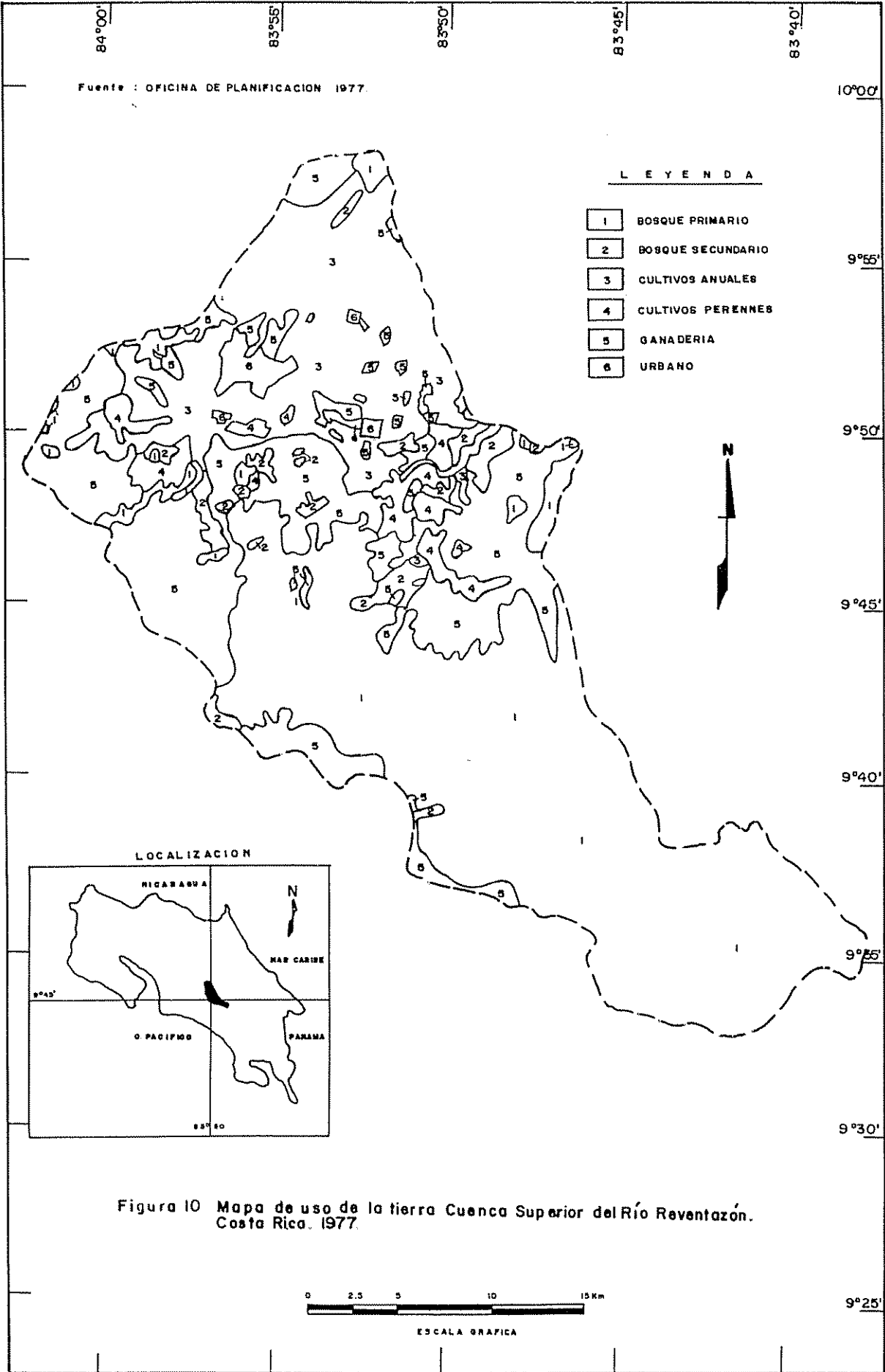
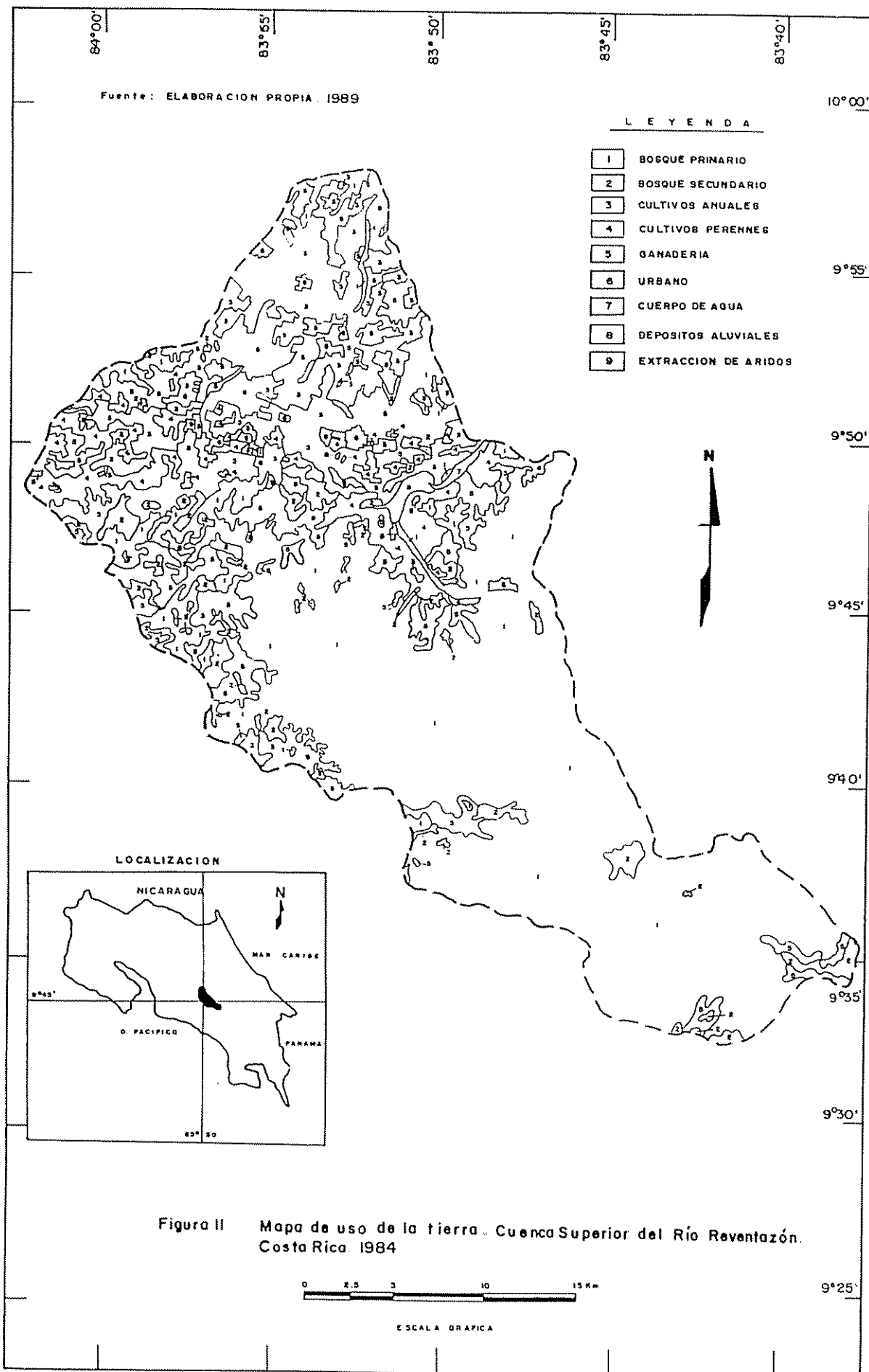


Figura 10 Mapa de uso de la tierra Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica. 1977.



bosques abiertos y dispersos, mientras que la tala rasa se ha desarrollado en áreas frágiles o críticas de la cuenca.

Cabe destacar además, que la expansión urbana, se ha desarrollado en los mejores suelos de la cuenca y probablemente del país, los cuales, se destacan por su alta calidad edafoclimática para el cultivo del café, así como de una serie de cultivos de alta rentabilidad económica y social.

Por último, es necesario destacar que los patrones de uso de la tierra en la cuenca, fueron influenciados notoriamente por la creación de la Reserva Forestal Río Macho en Enero de 1964, que ha impedido exitosamente la corta irracional del bosque nativo.

4.2.3 Problemática histórica del uso 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 tierras que históricamente 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 presentaron un alto riesgo de degradación y de pérdida de capacidad productiva, en razón del uso dado a las tierras. En el cuadro 8 y en la figura 12, se presentan las áreas con sobreuso para los distintos períodos.

Cuadro 8. Areas criticas originadas por el sobreuso de la tierra en la cuenca superior del rio Reventazón, Costa Rica.

Período	Superficie	
	Km ²	%
1956	42,8	5,4
1961	52,8	6,6
1967	125,9	15,8
1977	114,8	14,4
1984	98,4	12,4

Fuente: Elaboración Propia (1989)

En general, se pudo advertir que las formas de sobreuso presentes en la cuenca, están dadas por el cambio de uso forestal a ganadería, cultivos anuales y urbanismo; además, se puede concluir que estas formas de sobreuso, están en directa relación a la degradación ambiental de una vasta superficie de la cuenca.

El aumento de la superficie de tierras en condición de sobreuso observado en el cuadro precedente, explica que la expansión de la frontera agrícola de la cuenca debido a los problemas socioeconómicos, fue desarrollada básicamente en terrenos no aptos para la práctica de la ganadería y cultivos temporales.

4.3. Efectos del uso de la tierra en la erosión de la cuenca del río Reventazón.

En el capítulo anterior, se ha demostrado que la cuenca históricamente ha presentado distintas condiciones y tasas de sobreuso; por ello, es lícito atribuir a las distintas condiciones de sobreuso del suelo, la aparición de los

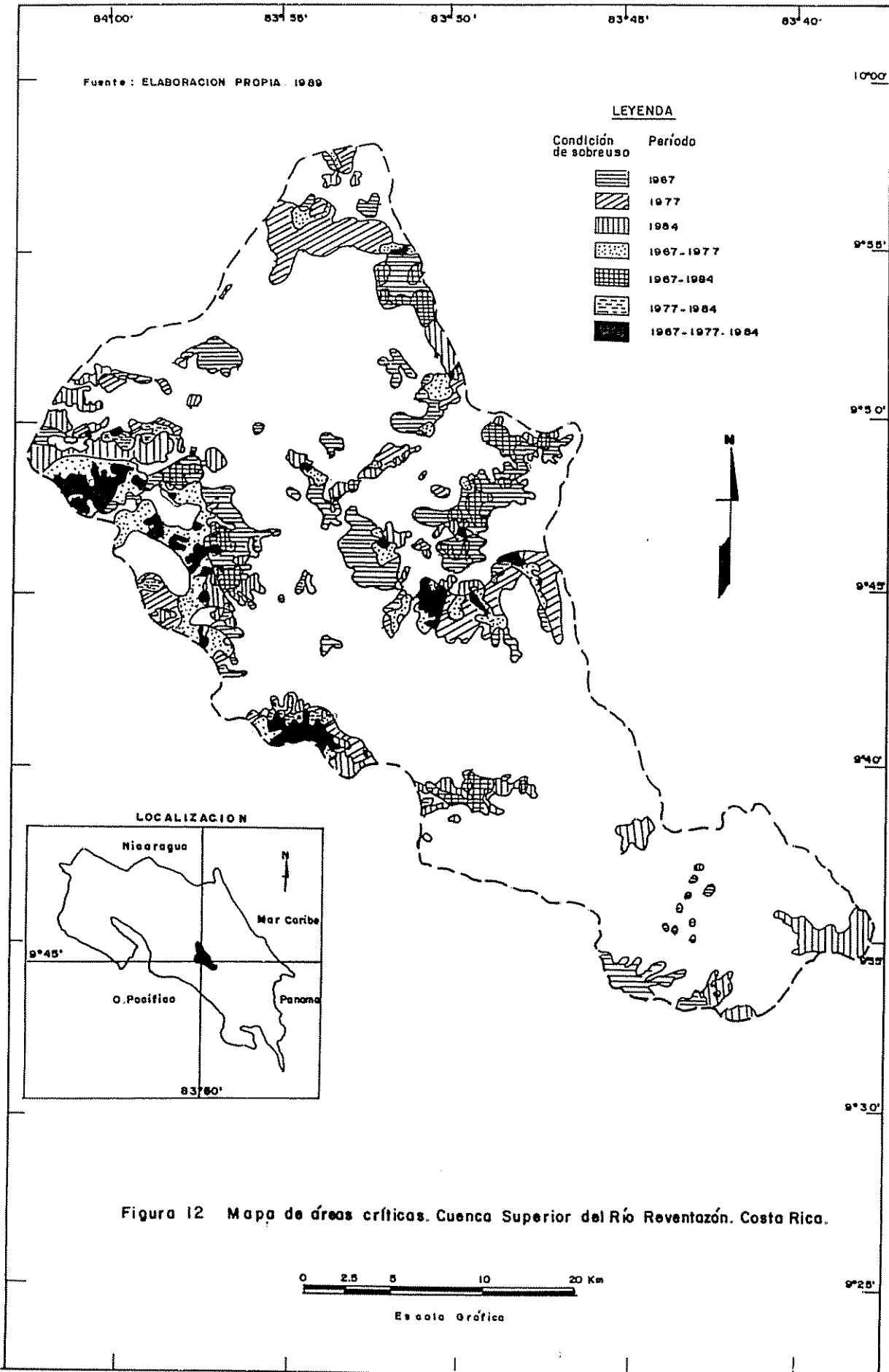


Figura 12 Mapa de áreas críticas. Cuenca Superior del Río Reventazón. Costa Rica.

distintos procesos erosivos presentes en la cuenca que se detallan a continuación.

4.3.1 Erosión laminar y por surcos.

La erosión laminar es el arrastre uniforme y casi impérfceptible de delgadas capas de suelo por láminas de agua, lo cual, es el producto del desprendimiento de partículas y elementos constituyentes del suelo por acción de la escorrentía superficial. Se observa en la cuenca, como una red de microsurdos después de iniciada la escorrentía superficial, asociada a la agricultura estacional y café, cuando se cultiva descubierto.

Por otra parte, la erosión por surcos consiste esencialmente en el arrastre de partículas de suelo, debido a la concentración de la escorrentía superficial en surcos más o menos paralelos, independientes y durables. Se asocia principalmente al cultivo del café, cuando está descubierto. La cuenca está afectada en 48,9 Km² (6,15%) con este tipo de erosión (Ver cuadro 9).

4.3.2 Erosión por cárcavas.

Ocurre cuando hay una mayor concentración del escurrimiento, debido a que las irregularidades del terreno permiten la unión de varios surcos, formándose zanjás de gran tamaño o cárcavas. Este tipo de erosión comprende 13,6 km² (1,71%) en la cuenca y localizada en puntos específicos.

4.3.3 Erosión por reptación.

Constituyen desprendimientos por gravedad, dejando aleros y nichos al descubierto, así como, diversas cicatrices por efecto de los desprendimientos. Estos procesos erosivos, se asocian generalmente al sobrepastoreo

y por la magnitud de la superficie afectada 74 km² (9,3%) indica que la práctica de la ganadería merece una atención especial.

4.3.4 Remoción en masa.

Se distingue fundamentalmente los deslizamientos por solifluxión, que es un proceso típico de suelos arcillosos sobresaturados de agua en un medio tropical. Las fuertes pendientes unida a la fuerza de gravedad hace que la masa se comporte plásticamente, provocando movimientos descendentes de diferente intensidad. Además se presentan coladas de barro, que afectan principalmente la subcuenca del río Reventado y a la ciudad de Cartago.

Si bien en términos de superficie la remoción en masa no pudiera parecer como relevante, puesto que afecta 9,5 km² de la cuenca (1,19%), no es menos cierto que este tipo de fenómeno erosivo es lo suficientemente intenso como para provocar catástrofes impredecibles para la población, así como una fuente importantísima de sedimentos a los cauces naturales.

4.3.5 Taludes de erosión.

Corresponden a sectores de vertientes, que por su pendiente son inestables y por ello sujetas a intensa erosión en sus distintas fases.

Los distintos fenómenos erosivos presentes en la cuenca, se presentan en la figura 13 y en el cuadro 9.

De los procesos erosivos mencionados, merecen especial atención la formación de cárcavas, la reptación y la remoción en masa, por ser áreas relevantes como fuente de abastecimiento de sedimentos. Además, por las formas de

Cuadro 9. Areas de erosión atribuibles a las distintas formas de sobreuso de la tierra en la cuenca del río Reventazón, Costa Rica.

Proceso Erosivo	Superficie	
	Km ²	%
Erosión laminar	48,9	6,15
Erosión por cárcavas	13,6	1,71
Erosión por reptación	74,0	9,30
Remoción en masa	9,5	1,19
Taludes de erosión	45,3	5,7
Depósitos aluviales	3,1	0,40
Areas sin signos evidentes de erosión	601,2	75,55
Total	795,6	100,00

Fuente: Elaboración propia(1989).

Fuente : ELABORACION PROPIA 1989.

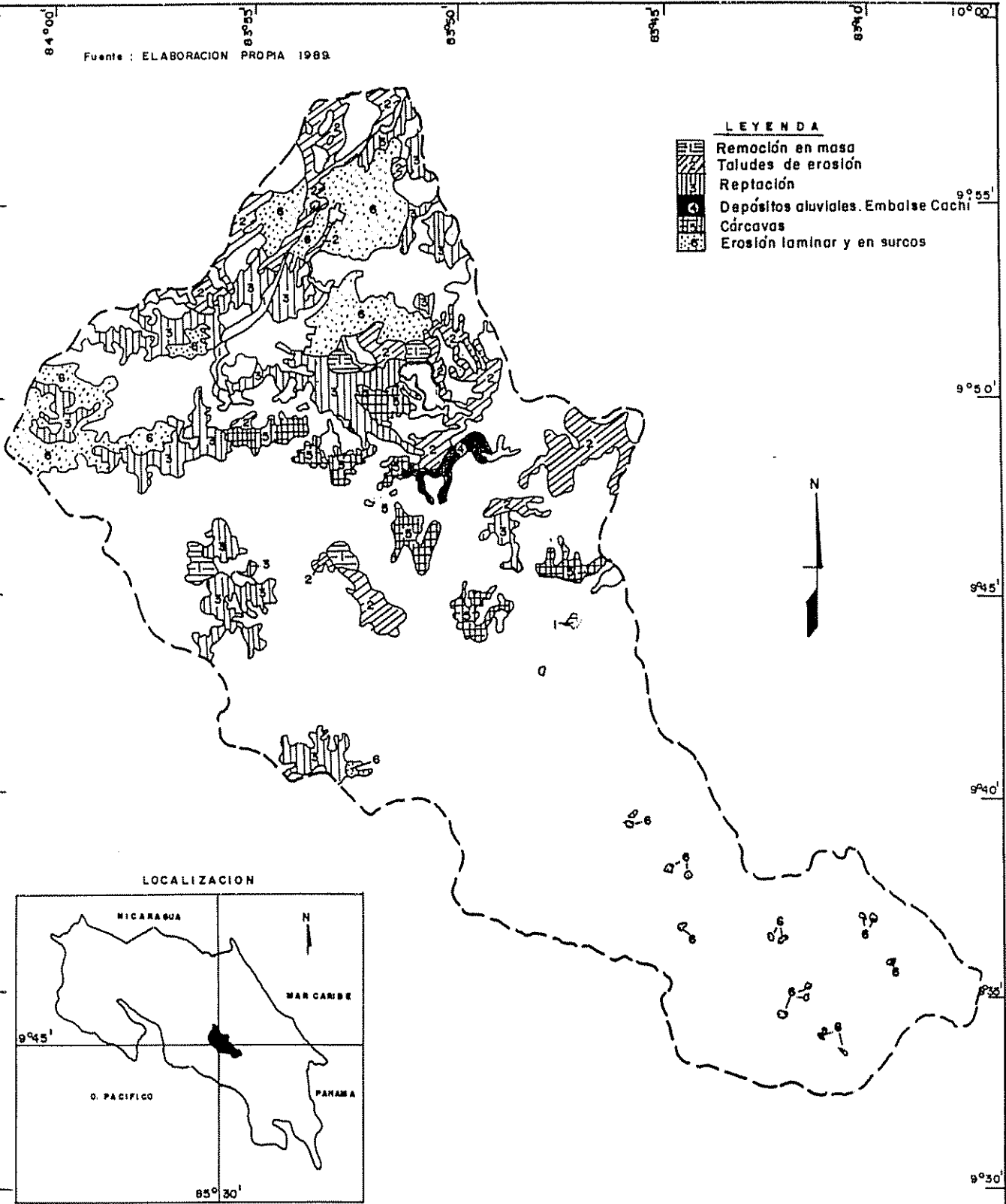


Figura 13 Mapa preliminar de erosión. Cuenca Superior Río Reventazón. Costa Rica.

sobreuso detectadas en la cuenca, estos procesos erosivos, aparecen como consecuencia directa de estas formas de sobreuso. En efecto, diversos autores (Strakov,1967; Heede,1972; López y Blanco,1968; Faustino,1988), asocian los procesos de erosión a prácticas de preparación de suelos en cultivos temporales o permanentes ubicados en terrenos de fuertes pendientes; la reptación a la práctica de la ganadería en pendientes mayores de 30% y las distintas formas de remoción en masa, a la deforestación y a las obras de infraestructuras mal diseñadas.

4.4 Efectos del uso de la tierra en el régimen de caudales.

Para el análisis del efecto del uso de la tierra en el régimen hidrológico, es necesario distinguir distintos componentes, eventos máximos, mínimos y medios, puesto que, su origen, comportamiento y efectos pueden tener distintos significados.

4.4.1 Efecto del uso de la tierra en los caudales máximos.

Estos caudales, corresponden a los eventos de mayor magnitud que pueden presentarse dentro de un año hidrológico. Por ello, para este análisis se adoptaron como valores los caudales de mayor magnitud verificados durante un año. Previamente se rellenó la serie de caudales máximos en la estación Cachi, mediante la ecuación de regresión que se presenta a continuación.

$$Y_i = 17,45748305 + 0,87370111 * X_1 + 0,81224882 * X_2$$

Donde:

Y_i = Caudal máximo anual de la estación Cachi (m^3/s)

X_{1i} = Caudal máximo anual de la estación Navarro (m^3/s)

X_{2i} = Caudal máximo anual de la estación Palomo (m^3/s)

El modelo de regresión arrojó un $R^2=0,787$ y resultó altamente significativo ($Pr>0,00001$).

Para explicar el comportamiento de los caudales máximos anuales, es necesario recurrir al enfoque hidrológico de Horton (Schulz,1980), el cual señala que al agotarse la capacidad de infiltración de una cuenca hidrográfica, el exceso de volumen precipitado se transforma en escorrentía directa, la que es trasladada a los cauces como mecanismo de almacenamiento de la cuenca, por lo que, el caudal máximo es una variable de respuesta tanto de la capacidad de infiltración como de la precipitación antecedente de ésta (Schulz,1980). Puesto que la capacidad de infiltración de una cuenca puede ser alterada por los cambios de uso de la tierra (López y Blanco, 1962; Kirby y Morgan,1984; Schulz,1980; Chang,1982; Gutiérrez,1988), se puede asumir que aislando el efecto de la precipitación antecedente, se puede inferir el efecto del uso de la tierra en los caudales máximos.

Para aislar el efecto de la precipitación antecedente en los caudales máximos, se supone que en el primer período, que se le ubicó entre 1953 y 1969, la cuenca se encuentra en un estado aproximado a la situación natural, la que comienza a ser intervenida principalmente a través de la deforestación, urbanismo e incorporación de terrenos a la ganadería; el segundo período, que se ubica entre 1970 y 1986 representó las condiciones de una cuenca en que se ha alterado su condición ambiental. Ahora bien, el objetivo es comprobar los efectos del uso de la tierra en la alteración del régimen de caudales máximos. Para analizar este efecto, se obtuvieron los volúmenes precipitados los dos días

previos y el registrado en la fecha del evento máximo, calculado con el método de Thiessen empleando cinco estaciones de la cuenca, Sanatorio Durán, El Guarco, Cachi, Tapantí y Villa Mills. Las variaciones en la precipitación antecedente afectan entonces la observación del fenómeno fundamental bajo estudio, que es la relación uso de la tierra versus el caudal máximo. Por tal motivo, para aislar el efecto del uso de la tierra de la precipitación antecedente, se ajustó un modelo estadístico, puesto que esta técnica de corrección, es común en estudios observacionales (Cox y McCulloch, 1982).

$$QM_i = \mu + P_i + \alpha * PREC_i + e_i$$

Donde:

QM_i = Caudal máximo del año i -ésimo.

μ = media poblacional.

P_i = efecto del periodo, que toma dos valores:

$P_{i1} = P$ ($1 \leq i \leq 17$) y $P_{i2} = 1-P$ ($18 \leq i \leq 34$).

$PREC_i$ = Precipitación antecedente en el año i -ésimo

e_i = error experimental del modelo

Este modelo, permitió estimar el coeficiente de regresión α que afecta a la variable precipitación (P_i) como: $\alpha = 1,043$

Por otra parte, el valor medio de la precipitación antecedente en los 34 años bajo estudio es: $PREC = 43,372$

Con ambos valores, se corrigieron los caudales máximos, mediante la ecuación:

$$QMC = QM - 1,043 * (PREC - 43,372)$$

Donde:

QMC= Caudal máximo corregido

QM= Caudal máximo observado en el año i

PREC= Precipitación media antecedente en los 34 años bajo estudio.

Luego de efectuada la corrección de los caudales máximos, se ajustó un modelo estadístico que explicara el efecto de los cambios en el uso de la tierra sobre el régimen de caudales máximos. El modelo de mejor ajuste de la regresión que explica la tendencia en los caudales máximos en el tiempo, es de tipo cuadrático y se indica a continuación:

$$Y_i = 267,19969 + 15,23747531 * A_{0i} - 0,61418386 * A_i^2$$

Donde:

Y_i = Caudal máximo anual corregido (m^3/s)

A_i = año i de la serie de caudales máximos

Otros modelos, como el cúbico o el exponencial no mejoraron significativamente el ajuste.

De la figura 14, donde está graficada la tendencia que siguen los caudales máximos corregidos en el tiempo, se puede observar que éstos comienzan a crecer rápidamente, lo que ha sido observado además en otras cuencas de origen tropical (Cassel *et al.*, 1985) como respuesta rápida de una cuenca que comienza a ser intervenida a la lluvia, donde una alta proporción del flujo base se transforma en escorrentía, para alcanzar un máximo de valores y que luego comienza a decrecer. El tiempo en que los caudales se hacen máximos, puede estimarse mediante el siguiente cálculo:

La derivada de la función es $dy/da = 15,237 - 2 * 0,61418386 * A_i$.

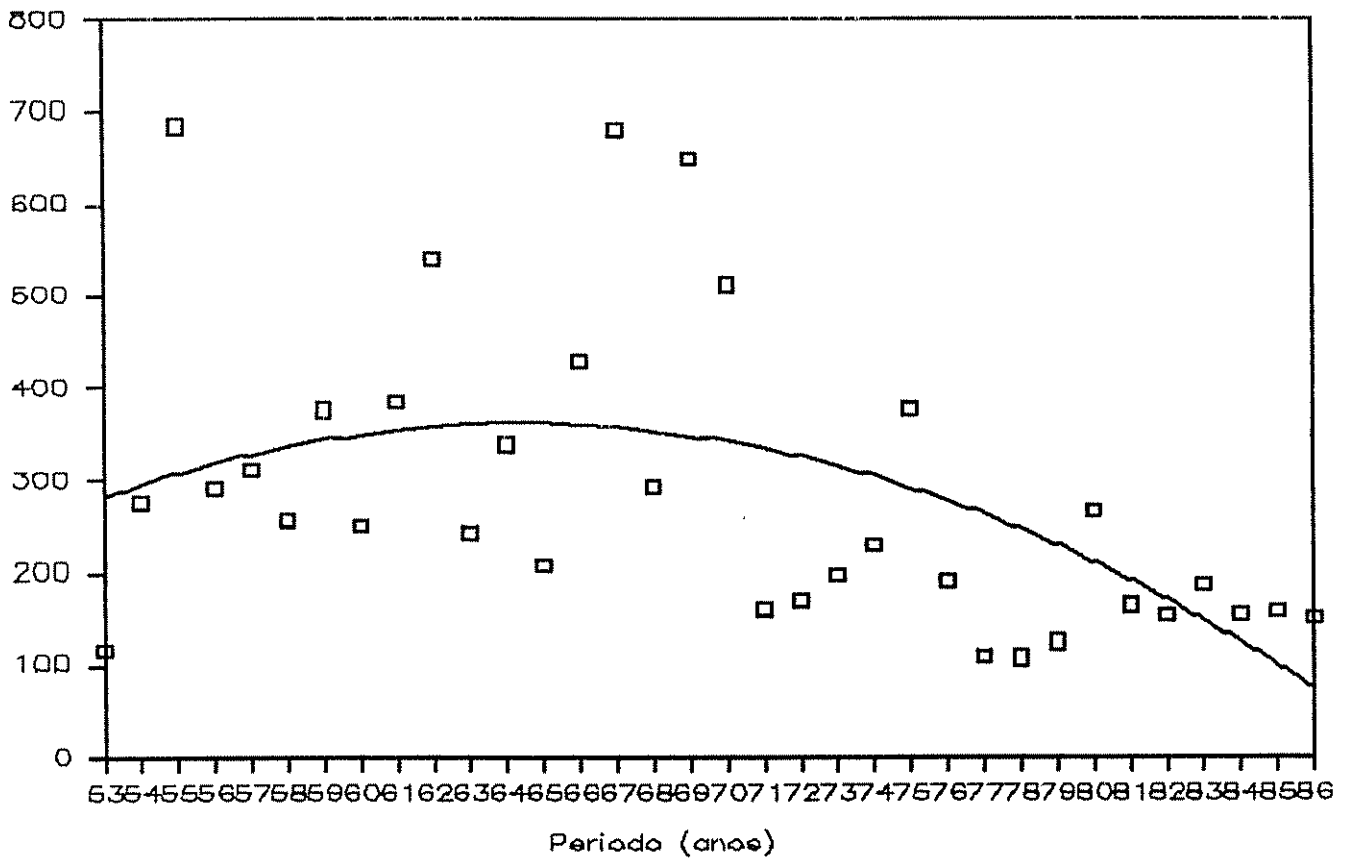


Figura 14. Efecto del uso de la tierra en el régimen de caudales máximos.

Si se hace la derivada igual a 0, se tiene que el valor límite máximo de la función se produce a los 12,5 años. Esto implica, que hacia 1966 los caudales se hicieron máximos y posteriormente, el incremento disminuye suavemente. Esta predicción coincide bastante bien con una simple inspección de los caudales observados en la figura 14. El fenómeno descrito, es característico de la disminución drástica de las intervenciones silvícolas intensivas (Benee *et al.*, 1983) en una cuenca hidrográfica. La tendencia al decrecimiento de los caudales máximos continúa hasta la actualidad.

4.4.2 Efecto del uso de la tierra en los caudales medios.

Este caudal, corresponde al promedio mensual de los caudales diarios. Para rellenar la estadística básica de la serie de caudales medios mensuales, se utilizó la ecuación de regresión múltiple que se presenta a continuación.

$$Y_i = 0,8525553 + 1,08361487 * X_{1i} + 0,93220046 * X_{2i}$$

Donde Y_i , X_{1i} , X_{2i} , representan los caudales medios mensuales en el año i , en las Estaciones Cachi, Navarro y Palomo, respectivamente

El modelo obtenido arrojó un $R^2 = 0,988455$ y resultó altamente significativo ($Pr > 0,0001$).

Con el fin de evaluar la tendencia del régimen de precipitaciones y si éste influye en el régimen de caudales medios mensuales, se desarrolló un modelo hidrológico que es ampliamente recomendado por Clarke (1973). Este modelo, incluyó como variables independientes el tiempo, medido como el número de meses a partir de Enero de 1953 hasta Diciembre de 1986, denotadas como variables LIN y QUAD que actúan en forma lineal y cuadrática respectivamente y un conjunto de variables dummy (0,1) que explican el efecto estacional de las precipitaciones debido las diferencias climáticas de los

doce meses del año, denotadas por S_1, \dots, S_{12} , en que $S_i = 1$ si la observación corresponde al mes i -ésimo y 0 en otro caso. La variable S_{12} no se coloca pues producirá multicolinealidad.

El cuadro de Análisis de Varianza se presenta en forma resumida en el cuadro 10.

El modelo de regresión presentado arrojó un $R^2=0,7437$ y resultó altamente significativo ($Pr > 0,0001$).

Del cuadro 10, también se desprende que el régimen de precipitaciones tiene una marcada estacionalidad, puesto que, todas las variables S_1 a S_{12} son altamente significativas, a excepción de los meses de enero y mayo (S_1 y S_5) que no presentan estacionalidad.

Del mismo modo, en el modelo de regresión presentado, se puede observar claramente que las variables LIN y QUAD, no son significativas, lo que indica que el régimen de precipitaciones se ha mantenido inalterable como tendencia, por lo que ésta no influye en el régimen de caudales medios mensuales lo que implica trabajar en un modelo de tendencia con los valores de caudales observados.

Un análisis similar al desarrollado para los caudales máximos, permitió explicar la tendencia del régimen de caudales medios mensuales a través del tiempo, es decir, en función de los cambios de uso de la tierra, a través de las variables LIN y QUAD. El modelo presenta el análisis de varianza señalado en el cuadro 11, que se presenta a continuación:

Cuadro 10. Pruebas de significancia de los parámetros de la regresión de las precipitaciones medias mensuales.

Variable	G.L.	Prob>F
Intercepto	1	0,00001
LIN	1	0,3289
QUAD	1	0,3499
S1	1	0,0188
S2	1	0,0001
S3	1	0,0001
S4	1	0,0244
S5	1	0,0001
S6	1	0,0001
S7	1	0,0001
S8	1	0,0001
S9	1	0,0001
S10	1	0,0001
S11	1	0,0001

Cuadro 11. Análisis de varianza del modelo de regresión de caudales medios mensuales.

Fuente	GL.	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Prob>F
Modelo	13	126984,33	9768,025	35,61	0,00001
Error	394	108067,94	274,284		
Total	407	235052,28			
MSE ²		16,56	R ²	0,540	C.V. 33,603
Media		49,28	r	0,525	

Por otra parte, los parámetros de la regresión se muestran en el cuadro 12.

Eliminando la estacionalidad, es decir las variables S_1 a S_{12} y representando solamente la tendencia (figura 15), se puede observar que el caudal medio fue creciente en los primeros años y luego decreciente, al igual que lo observado en los caudales máximos anuales. La abscisas del máximo se puede calcular de la misma forma que se hizo para los caudales máximos. La función y su derivada son respectivamente.

$$Y = 53,93636906 + 0,06233589 * A_x - 0,000179442 * A_x^2$$

$$dy/dA = 0,06233589 - 0,000358884 * A_x$$

Si se hace la derivada igual a 0, se tiene que el máximo de la función ocurre en el mes 173,7 o bien, a los 14,5 años lo que implica, que los caudales fueron crecientes en los primeros quince años y hacia 1968 comienza una tendencia decreciente en los caudales medios mensuales.

Cuadro 12. Estimación de los parámetros de la regresión que explica la tendencia de los caudales medios mensuales.

Variable	GL	Parámetro	Pr>F
Intercepto	1	53,936336906	0,0001
LIN	1	0,06233589	0,0261
QUAD	1	-0,000179442	0,0069
S1	1	-16,94220121	0,0001
S2	1	-28,36234167	0,0001
S3	1	-34,27626089	0,0001
S4	1	-32,33981122	0,0001
S5	1	-19,74123797	0,0001
S6	1	-2,34524701	0,5597
S7	1	1,39816165	0,7280
S8	1	2,28310568	0,5701
S9	1	11,67134976	0,0039
S10	1	18,86583507	0,0001
S11	1	10,93126751	0,0068

Esta misma tendencia, se observó en los caudales máximos, en observaciones de Hewlett (1969), Lusby (1970) y Rosen (1984), cuando una cuenca es sobrepastoreada o se intervienen intensivamente los bosques naturales, ya que se alteran drásticamente las propiedades hidrológicas e hidráulicas del suelo (Kirby y Morgan, 1982) .

La influencia de los cambios de vegetación en el régimen de caudales máximos y medios, la han explicado tradicionalmente los hidrólogos, a través del ciclo hidrológico (Dooge et al., 1973), puesto que la cubierta vegetal interviene en la recepción, almacenamiento y entrega del volumen potencial de escorrentía, producida por la precipitación (Lull y Reinhart, 1972).

En efecto, el aumento de los caudales medios y máximos debido a la transformación de las estructuras vegetacionales como respuesta a los cambios de los patrones de uso de la tierra, han sido reportados por diversos autores (Nakano, 1965; Lull y Reinhart, 1972; Rosen, 1984), que se explica por la modificación del ciclo hidrológico, puesto que, la transformación del bosque a cultivos permanentes, agricultura temporal, charral o pasto, implica una disminución de la intercepción (Zambrana, 1975; Zadroga, 1975), de la evapotranspiración puesto que la nueva vegetación tiene un menor consumo hídrico que el bosque (Penman, 1965; Douglas, 1965); además, disminuye la infiltración de los suelos por la compactación de éste, especialmente en suelos destinados a pastos y charrales (Estribí, 1984). Estas alteraciones en el ciclo hidrológico, explican en lo fundamental el aumento temporal de la escorrentía (Nakano, 1965; Mojica, 1971; Rosen 1984). Sin embargo, tal como lo reportan Hamilton y King (1983), este aumento llega invariablemente a un punto máximo para luego comenzar a decrecer, tal como lo postula la presente tesis. Esta situación es explicada en cuanto, las nuevas

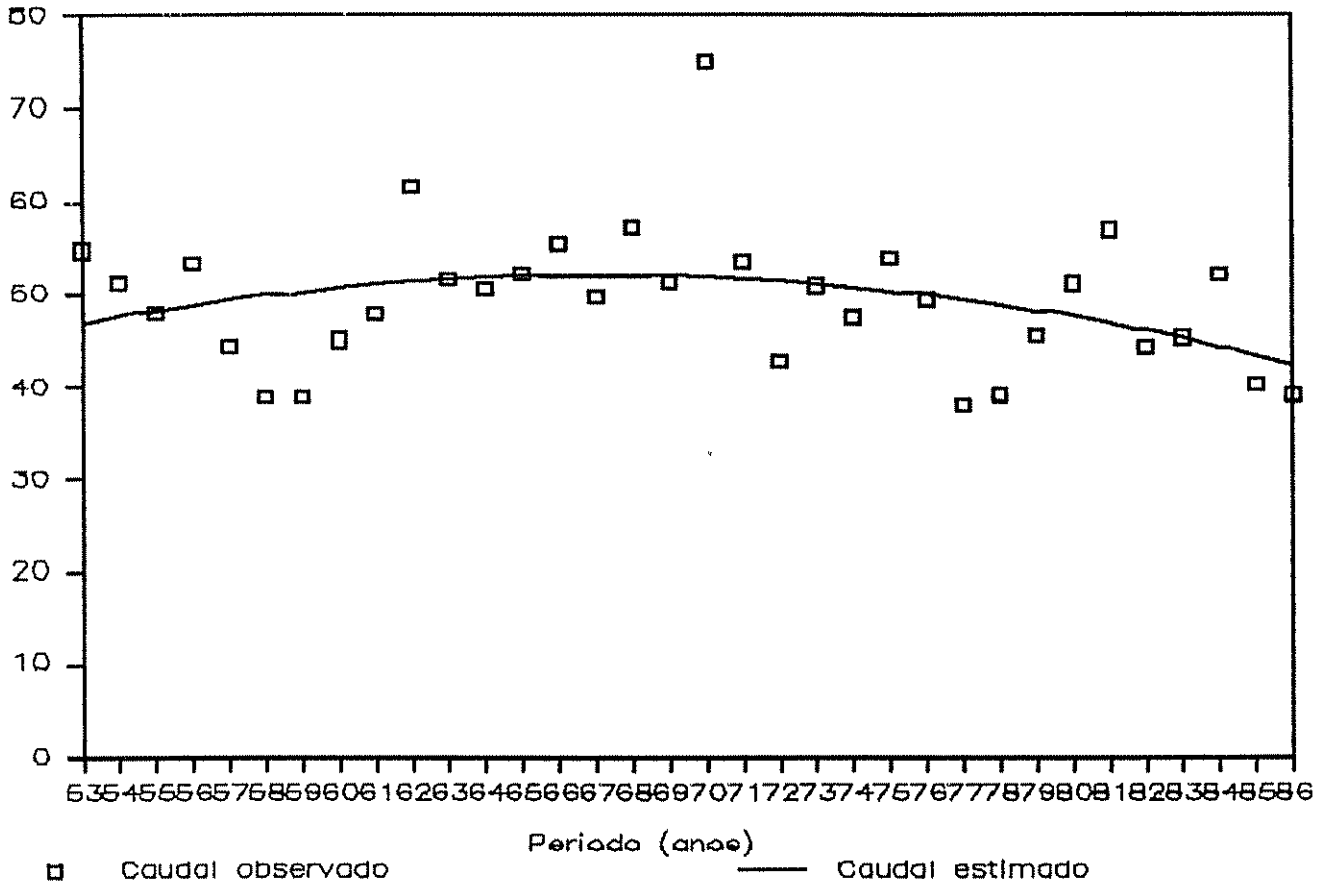


Figura 15. Efecto del uso de la tierra en el régimen de caudales medios mensuales.

estructuras vegetacionales deben equilibrarse con el medioambiente; al respecto, en los experimentos del Laboratorio de Coweeta en los Estados Unidos, el incremento de la escorrentía se produjo hasta los 9 años en que comenzó a decrecer hasta un nuevo equilibrio entre la escorrentía y la producción de biomasa de la pradera, en el caso que la conversión fue de bosque a pasto (Hamilton y King, 1983). En el mismo sentido son los reportes de Lusby (1970), en que el decrecimiento en los caudales se produjo a los 14 años. Por último es necesario destacar que el decrecimiento de los caudales máximos y medios coincide con el término en las operaciones forestales de gran escala, al crearse la Reserva Forestal de Río Macho en 1966, la cual ocupa 327,4 km² (41,2%) de la superficie total de la cuenca. Sin embargo, el brusco decrecimiento de los caudales máximos y medios mensuales a partir del año 1976 y hasta 1984, es insuficientemente explicado por ambos modelos, puesto que no puede atribuirse exclusivamente al uso de la tierra este comportamiento en los caudales.

4.4.3 Efecto del uso de la tierra en los caudales mínimos.

Los caudales mínimos, naturales en la mayoría de los casos, son originados por descargas de agua subterránea provenientes, ya sea, de manantiales o del flujo base del lecho. En el caso de la presente tesis, el flujo base representa una mecánica y cuantificación de descarga de los acuíferos, por lo cual, los caudales mínimos representan un dato relevante en el cálculo de los rendimientos seguros de acuíferos para una programación de explotación máxima (Blair, 1983). Los caudales mínimos, tienen particular importancia en los proyectos hidroeléctricos, por cuanto en las centrales a filo de agua la potencia depende en todo instante del caudal influente, mientras que las centrales con regulación, son proyectadas si la planta es capaz de

satisfacer los requerimientos del mercado en un año crítico, el cual, es definido fundamentalmente por el régimen de caudales mínimos.

De acuerdo con Kite (1985), para los estudios de eventos extremos y en particular, en el estudio de los caudales mínimos, se puede emplear la prueba de medias entre dos series; además, el caudal mínimo es una variable de respuesta de la recarga de acuíferos cuyas propiedades hidrogeológicas han sido alteradas exclusivamente por el uso de la tierra, por lo que se pudo comparar las medias de los períodos 1953-69 y 1970-86, tal como se muestra en el cuadro siguiente:

Cuadro 13. Prueba de medias de caudales mínimos anuales del río Reventazón, Costa Rica

Prueba	Período 1953-69	Período 1970-86
Media (m ³ /s)	12,16	12,05
Varianza (m ³ /s)	1,73	3,52
Coef. de Variación (%)	14,23	29,21

La prueba "t" de Student, indica que no hay diferencias significativas entre las medias de los períodos considerados ($1,697 > 0,039$); sin embargo, el coeficiente de variación, 14,23% para el período 1953-69 y 29,21% para 1970-86, indica que el uso de la tierra ha alterado el régimen de caudales mínimos en el sentido que presentan una mayor variabilidad, lo que introduce un factor de incertidumbre en una central con regulación, como el embalse Cachí, en cuanto a su nivel de operación en los años críticos.

4.5 Efecto de la sedimentación en la producción de energía hidroeléctrica. Análisis del proyecto hidroeléctrico de Cachi.

En los capítulos anteriores, se ha demostrado que el mal uso de los recursos naturales ha desencadenado una serie de procesos erosivos; paralelamente, se ha alterado el régimen de caudales. Ambos fenómenos, que se han dado en forma conjunta debiera tener como consecuencia directa un aumento en las tasas de sedimentación. La deposición de sedimentos en embalses reguladores, reduce la capacidad de éstos y en el caso de los embalses de regulación con fines hidroeléctricos, se espera una pérdida de energía hidroeléctrica. Para comprobar y cuantificar estos fenómenos y a partir de los pasos metodológicos enunciados, se ha obtenido los resultados que se entregan a continuación.

4.5.1 Relleno de estadísticas básicas.

Los caudales diarios de las estaciones Navarro y Palomo, se obtuvieron a partir de las regresiones lineales que se presentan.

a) Estación Navarro.

$$Y_{11} = -1,98685981 + 0,23284671 * X_{11}$$

Donde:

Y_{11} = Caudal diario estimado en la estación Navarro.

X_{11} = Caudal diario en la estación Cachi.

El modelo de regresión presentado, arrojó un $R^2=0,724999$ resultando altamente significativo ($Pr>0,0001$).

b) Estación Palomo.

$$Y_{12} = 2,38897409 + 0,69410164 * X_{12}$$

Donde:

Y_{11} = Caudal diario estimado en la estación Palomo.

X_{12} = Caudal diario estimado en la estación Cachi.

El modelo de regresión, arrojó un valor $R^2=0,934624$, resultando altamente significativo ($Pr>0,0001$).

4.5.2 Estimación del transporte de sedimentos en suspensión.

Puesto que se generaron los caudales diarios (Q_1) en estaciones ya señaladas, el método utilizado, fue la correlación entre las mediciones directas de caudales sólidos (Q_s), en término de concentraciones realizadas por el ICE. Se intentaron diversos modelos de regresión lineales y no lineales; de igual forma, se intentaron los mismos modelos aplicados a tramos de caudales diarios. Invariablemente el modelo de mejor ajuste fue $Q_s=a*Q_1^n$, aplicado por épocas del año. Los resultados de estas regresiones se presentan a continuación.

a) Estación Navarro.

Mayo-Junio-Julio. $Q_s = 10,1649 * Q_1^{1,20378}$ $R^2=0,33$

Noviembre-Diciembre-Enero. $Q_s = 6,50812 * Q_1^{1,2479}$ $R^2=0,12$

Agosto-Septiembre-October. $Q_s = 55,59103135 * Q_1^{0,92308}$ $R^2=0,13$

Febrero-Marzo-Abril. $Q_s = 2,18606 * Q_1^{1,28006}$ $R^2=0,73$

b) Estación Palomo.

Mayo-junio-julio. $Q_s = 1,76059 * Q_1^{1,29586}$ $R^2=0,31$

Noviembre-Diciembre-Enero. $Q_s = 0,004200813 * Q_1^{2,44829}$ $R^2=0,87$

Agosto-Septiembre-October. $Q_s = 2,55866 * Q_1^{1,24306}$ $R^2=0,10$

Febrero-Marzo-Abril. $Q_s = 4,82851 * Q_1^{0,76621}$ $R^2=0,42$

En las ecuaciones de regresión presentadas, puede observarse que algunos R^2 son bastante bajos, lo que en hidrología, es aceptables debido a las siguientes condiciones (Linsley et al., 1978; Mahmood, 1987):

- a) Las relaciones observadas son aproximadas, dado que la concentración de sedimentos, puede ser el resultado de lluvias de diferente intensidad, por lo cual el transporte de sedimentos 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 programas de 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.

Por ello, aceptando estas explicaciones y aplicando las ecuaciones de regresión no lineales, ya presentadas a los caudales diarios de las estaciones Navarro y Palomo, según la época que corresponda entre 1953 y 1972, se obtiene el caudal sólido diario; sumando los caudales sólidos diarios se obtiene el caudal sólido mensual y luego la suma mes a mes, determina el caudal sólido anual. El caudal sólido anual entre 1973 y 1986 se obtuvo de las estadísticas directas entregadas por el ICE.

4.5.3 Determinación del volumen de sedimentos ingresados al embalse Cachi.

Tal como se informó en la proposición metodológica, las ecuaciones de regresión determinan los caudales sólidos anuales ingresados al embalse Cachi, durante el período 1961-65 en que se observa una condición de sobreuso muy baja de la cuenca superior y que se supone representa las condiciones naturales de sedimentación; en cambio, la estadística entregada por el ICE, representa las condiciones de sedimentación originadas cuando ya se ha alterado la relación de equilibrio agua-suelo-planta. Por ello, las condiciones de sedimentación se entregan separadamente entre los períodos a comparar, 1953-69 y 1970-86. Para ello, se asumió que el arrastre por el fondo corresponde al 10% del caudal sólido (Linsley *et al.*, 1977; Herrera, 1978), y que la densidad del sedimento es de 1,65 (Ton/m³) según informes de Corrales al ICE (1968) y la eficiencia de atrape se determinó a través de la curva de Brune (Mahmood, 1987). Las variables consideradas corresponden al Volumen del embalse en el año i (V_i), Esguerrimiento medio anual en el año i (Q_i), Volumen medio anual de sedimentos ingresados en el año i ($Q_{s,i}$), Relación capacidad-esguerrimiento anual en el año i (V_i/Q_i), Eficiencia de atrape en el año i (E_i) y Volumen de sedimentos depositados en el año i (Vs_i).

De esta forma, el volumen de sedimentos ingresados al embalse Cachi en el primer período se presentan en el cuadro 14, mientras que los del segundo período, se muestran en el cuadro 15.

Cuadro 14. Determinación del volumen de sedimentos depositados en el embalse Cachi. Periodo 1953-69.

Año	Vi	Qi	Qsi	Vi/Qi	Ei	Vsi
1953	53750832	1725019200	152763,1	0,0311	0,71	108461,8
1954	53642370	1617796800	267618,1	0,0331	0,72	192685,0
1955	53449685	1513728000	283913,2	0,0353	0,73	207256,6
1956	53242429	1684022400	275898,2	0,0316	0,71	195887,7
1957	53046541	1400198400	237153,3	0,0378	0,75	177864,9
1958	52868676	1262750400	190567,7	0,0418	0,77	146737,1
1959	52721939	1262750400	220649,6	0,0418	0,77	169900,2
1960	52552034	1422273600	241260,7	0,0416	0,77	185770,7
1961	52336268	1510574400	275437,1	0,0346	0,73	201069,1
1962	52165199	1923696000	396824,3	0,0271	0,65	257935,8
1963	51907269	1627257600	285495,9	0,0318	0,71	202702,1
1964	51704569	1589414400	304635,0	0,0325	0,72	219337,2
1965	51485232	1643025600	283537,4	0,0313	0,71	201311,5
1966	51283920	1747094400	293745,1	0,0293	0,70	205311,5
1967	51078299	1567339200	298543,9	0,0325	0,72	214951,6
1968	50863347	1803859200	326102,8	0,0282	0,66	215227,8
1969	50648119	1617796800	326770,7	0,0313	0,71	232007,2

Cuadro 15. Determinación del volumen de sedimentos depositados en el embalse Cachi. Período 1970-86.

Año	Vi	Qi	Qsi	Qi/Vi	Ei	Vsi
1970	53750832	2365200000	426005,9	0,0227	0,63	268383,7
1971	53482448	1687176000	287339,9	0,0317	0,71	204011,3
1972	53278437	1346587200	131402,6	0,0395	0,76	145465,9
1973	53132971	1602028800	539020,5	0,0331	0,72	388094,8
1975	52744876	1494806400	346249,4	0,0352	0,73	252762,1
1976	52492114	1696636800	1582716,3	0,0309	0,70	1107901,4
1977	51039483	1201521600	478791,5	0,0329	0,72	344729,9
1978	50912667	1233057600	182447,4	0,0424	0,78	126815,6
1979	50772183	1438041600	348772,2	0,0353	0,73	254603,7
1980	50517579	1608336000	428465,2	0,0314	0,71	304210,3
1981	50213369	1791244800	574373,1	0,0283	0,66	379086,2
1982	49834283	1397044800	352692,6	0,0356	0,73	257465,6
1983	49576817	1425427200	287755,5	0,0347	0,73	210061,5
1984	49366756	1639872000	816753,6	0,0301	0,70	571727,5
1985	48795028	1270900800	171234,4	0,0384	0,75	128425,8
1986	48666602	1233057600	184531,1	0,0394	0,76	140243,6

4.5.4. Efectos de la sedimentación en la producción de energía hidroeléctrica.

El efecto de los diferentes patrones de sedimentaciones, tuvo como consecuencia reducciones sucesivas de almacenamiento activo del embalse Cachi, tal como se puede observar en los cuadros 14 y 15, que tiene impactos en la generación de energía y potencia firme. El modelo DOPEM (Jiménez y Núñez, 1984), basado en la ecuación de balance de masas o balance hidrológico, cuyo procedimiento de cálculo se entrega en anexos, permite estimar la energía firme, según se detalla a continuación.

4.5.4.1 Datos de entrada al modelo.

Los datos de entrada al modelo, que se detallaron en la metodología, fueron básicamente los mismos para ambos períodos y se entregan en anexos, de tal forma que los efectos de la reducción de volumen activo en la producción de energía, se evaluaron a través de la variación del régimen de caudales, utilizándose los caudales medios mensuales registrados en ambos períodos y la alteración de la curva hipsométrica original del embalse Cachi en el año 0, de acuerdo con los volúmenes de sedimentos depositados en éste, durante cada período de 17 años.

4.5.4.2 Producción de energía firme.

Con la aplicación del modelo DOPEM, se estimaron las producciones anuales de energía firme anual (MWh-año) en ambos períodos, tal como se entrega en el cuadro 16, en que se puede observar el efecto de la sedimentación en la producción de energía firme a través del descenso de las curvas de la gráfica presentada en la figura 16.

Cuadro 16. Producción de energía firme (MWh-año). Embalse Cachi.

Año	Período 1953-69	Período 1970-86
0	506208	595169
1	505869	593920
2	505869	593920
3	503934	593121
4	503934	593121
5	503449	588140
6	503449	588140
7	502915	586580
8	502915	586580
9	502320	585330
10	502320	585330
11	501674	581674
12	501674	581674
13	501027	581425
14	501027	581425
15	500059	578434
16	500059	578434
17	500059	578434

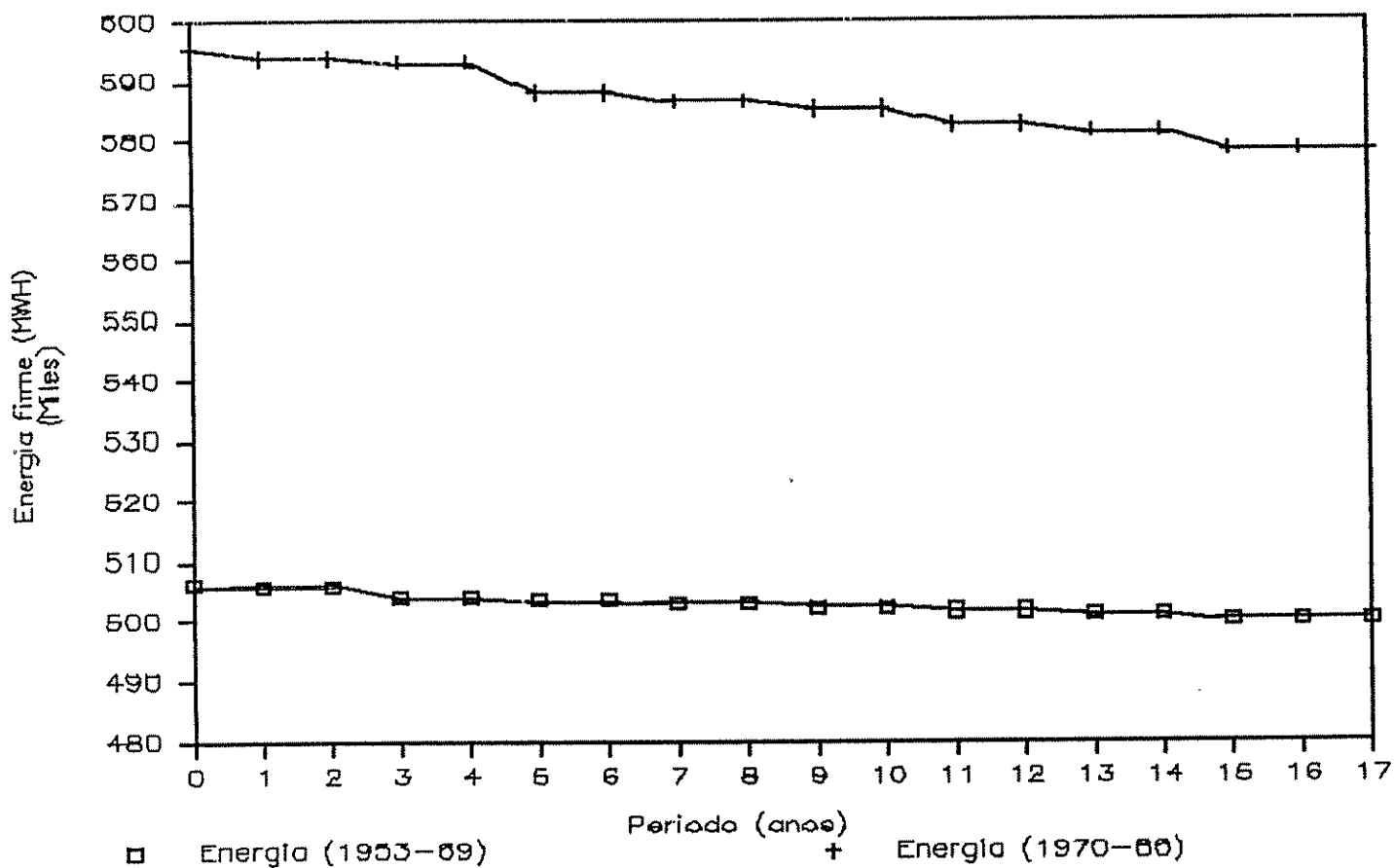


Figura 16. Efecto de la sedimentación en la producción de energía hidroeléctrica.

4.5.4.3 Prueba de hipótesis.

Puesto que no se pueden comparar dos series de tiempo distintas, la prueba de hipótesis tratará de probar, si hay diferencias significativas en las tasas de pérdidas de energía firme en ambos periodos.

El problema consiste entonces, en tratar de ajustar un modelo a cada una de las series, en que la serie A representa el periodo 1953-69, con una tasa de sedimentación geológica de la cuenca y la serie P, representa el periodo 1970-86, en que se han acelerado los procesos erosivos y el régimen de caudales, por efecto del mal uso de la tierra.

Es necesario considerar previamente, que en el análisis de series, se enfatiza la dependencia de la observación en el tiempo, por lo cual Y_t , es una observación en función del tiempo, tal como en este caso es la variable producción de energía en el tiempo, en que a y b , son los parámetros del modelo y e_t es el error experimental.

El modelo es $Y_t = a + b \cdot t + e_t$, en que interesa probar la hipótesis de si las tasas " b " coinciden en ambas series donde obviamente la prueba " t " usual no es válida, pues los errores podrían no ser independientes, puesto que se trata de series cronológicas.

Obviamente, las diferencias de un año con el anterior cumplen la condición siguiente:

$$D_t = Y_t - Y_{t-1} = b + e^*_t \quad (1)$$

Ahora, interesa comparar interceptos, u ordenadas en origen del modelo (1) entre las series A y P, para lo cual se usó el procedimiento ARIMA, a través del paquete

estadístico SAS, para analizar las series ya mencionadas y determinar el orden de autocorrelación.

Las funciones de autocorrelación estimadas para ambas series son presentadas en las figuras 17 y 18, siendo típicas de un proceso AR(2), es decir, autoregresivo de orden 2, correspondientes a un modelo en que la observación en un año depende significativamente de las de los dos años anteriores (Brockleblank y Dickey, 1986). El modelo correspondiente se presenta a continuación:

$$Y_t = a + b * Y_{t-1} + c * Y_{t-2} + e_t \quad (2)$$

Por otra parte, analizadas las diferencias D_t del modelo (1), se puede observar que corresponden a un AR (1), autoregresivo de orden 1, de acuerdo a sus funciones de autocorrelación, tal como se puede observar en las figuras 19 y 20. Este hecho revela que:

$$D_t = a + b * D_{t-1} + e_t \quad (3)$$

Además, este hecho implica que los errores del modelo (1), tienen una estructura AR (1), (Box y Jenkins, 1976) o sea:

$$e^*_t = k * e^*_{t-1} + \epsilon_t \quad (4)$$

En que ϵ_t son variables normales e independientes $N(0, \sigma^2)$.

De los modelos (1) y (4), se puede observar que:

$$\begin{aligned} D_t &= b + e^*_t = b + k * e^*_{t-1} + \epsilon_t = b + k * (D_{t-1} - b) + \epsilon_t \\ &= b * (1-k) + k * D_{t-1} + \epsilon_t \end{aligned} \quad (5)$$

Es decir, se ha pasado del modelo original (1) al modelo (3), o sea AR (1) donde se puede observar la relación entre sus parámetros.

NOMBRE DE LA VARIABLE = A
 MEDIA DE LA SERIE = 502709
 DESVIACION ESTANDAR = 1908.55
 NUMERO DE OBSERVACIONES = 18
 AUTOCORRELACIONES

INTERVALO	COVARIANZA	CORRELACION	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	DESVIACION ESTANDAR DEL ERROR
0	3642576	1.00000												*****										0
1	2926684	0.80347												*****										0.235702
2	2276691	0.62502												*****										0.356769
3	1426711	0.39168												*****										0.413146
4	1095386	0.30072												*****										0.433285
5	636199	0.16642												***										0.444739
6	306542	0.08416												**										0.448175
7	-135732	-0.03726												*										0.449052
8	-379098	-0.10407																						0.449224
9	-749264	-0.20570																						0.450561
10	-916172	-0.25152																						0.455748
11	-1190881	-0.32893																						0.463396
12	-1261398	-0.34629																						0.476038
13	-1448160	-0.39756																						0.489833
14	-1437749	-0.39471																						0.507443
15	-1445569	-0.39685																						0.524222
16	-980349	-0.26914																						0.540655
17	-515128	-0.14142																						0.548047

PUNTOS DEL ERROR ESTANDAR

FIGURA 18 PROCEDIMIENTO ARIMA PARA LA SERIE P

NOMBRE DE LA VARIABLE = P
 MEDIA DE LA SERIE = 586254
 DESVIACION ESTANDAR = 5568.34
 NUMERO DE OBSERVACIONES = 18
 AUTOCORRELACIONES

INTERVALO	COVARIANZA	CORRELACION	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	DESVIACION ESTANDAR DEL ERROR
0	31006412	1.00000												*****										0
1	25739063	0.83012												*****										0.235702
2	21090312	0.68019												*****										0.363486
3	15074097	0.48616												*****										0.428403
4	10753040	0.36680												*****										0.458029
5	4887454	0.15763												***										0.472392
6	1971069	0.06357												*										0.475305
7	-2186396	-0.07051																						0.475777
8	-4356952	-0.14052																						0.476357
9	-7304693	-0.23559																						0.478654
10	-9090280	-0.29317																						0.485053
11	-11946758	-0.38530																						0.4948
12	-12741205	-0.41092																						0.511197
13	-13745440	-0.44331																						0.529229
14	-12035937	-0.38818																						0.549472
15	-10533977	-0.33974																						0.564501
16	-7203526	-0.23232																						0.575749
17	-3873076	-0.12491													**									0.580933

PUNTOS DEL ERROR ESTANDAR

FIGURA 19 PROCEDIMIENTO ARIMA PARA LAS DIFERENCIAS DE LA SERIE A

NOMBRE DE LA VARIABLE = DA
 MEDIA DE LA SERIE = -361.706
 DESVIACION ESTANDAR = 501.901
 NUMERO DE OBSERVACIONES = 17
 AUTOCORRELACIONES

INTERVALO	COVARIANZA	CORRELACION	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	DESVIACION ESTANDAR DEL ERROR
0	251904	1.00000												*****										0
1	-131314	-0.52129												*****										0.242536
2	72942	0.28877												*****										0.301319
3	-84939.6	-0.33719												*****										0.31718
4	74513.7	0.29580												*****										0.337608
5	-76246.1	-0.30268												*****										0.352524
6	67065	0.26623												*****										0.367493
7	-66531.4	-0.26411												*****										0.378669
8	60032.8	0.23832												*****										0.389354
9	-56603.8	-0.22470												****										0.397842
10	49842.5	0.19786												****										0.405239
11	-46889.1	-0.18614												****										0.410883
12	68498.1	0.27192												****										0.415813
13	-38195.6	-0.15163												***										0.426145
14	-26588.5	-0.10555												**										0.429307
15	8179.06	0.03247												*										0.430831
16	483.109	0.00192																						0.430975

PUNTOS DEL ERROR ESTANDAR

FIGURA 20 PROCEDIMIENTO ARIMA PARA LAS DIFERENCIAS DE LA SERIE P

NOMBRE DE LA VARIABLE = DP
 MEDIA DE LA SERIE = -984.412
 DESVIACION ESTANDAR = 1383.11
 NUMERO DE OBSERVACIONES = 17
 AUTOCORRELACIONES

INTERVALO	COVARIANZA	CORRELACION	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	DESVIACION ESTANDAR DEL ERROR
0	1912996	1.00000												*****										0
1	-953745	-0.49856												*****										0.242536
2	437153	0.22852												*****										0.29676
3	-848287	-0.44343												*****										0.306936
4	730092	0.38165												*****										0.342554
5	-609586	-0.31866												*****										0.366714
6	647495	0.33847												*****										0.382655
7	-471411	-0.24643												*****										0.399879
8	294487	0.15394												****										0.408714
9	-446652	-0.23035												****										0.412111
10	636227	0.33258												****										0.419616
11	-302477	-0.15812												***										0.434845
12	-137351	-0.07180												*										0.438214
13	-63775.6	-0.03334																						0.438906
14	98971	0.05174																						0.439055
15	41682.5	0.02179																						0.439413
16	-15321.4	0.00801																						0.439477

PUNTOS DEL ERROR ESTANDAR

En los cuadros 17 y 18, se entrega el ajuste del modelo (5) aplicado a las diferencias de la series A y P. Asimismo, se pueden obtener los intervalos de confianza al 95% para los parámetros de la ecuación (3), que son:

Serie DA

$$\text{Parámetro a:} \quad 0,10 \leq k \leq 0,99 \quad (6)$$

$$\text{Parámetro b:} \quad -526,10 \leq b(1-k) \leq -213,43 \quad (7)$$

Serie DP

$$\text{Parámetro a:} \quad 0,0 \leq k \leq 0,97 \quad (8)$$

$$\text{Parámetro b:} \quad -1443,4 \leq b(1-k) \leq -554,73 \quad (9)$$

De las ecuaciones (6) y (8), se puede observar que los intervalos se sobreponen, por lo que no hay diferencias significativas en el parámetro k entre las series DA y DP. A su vez, en las ecuaciones (7) y (9), se puede observar que no hay sobreposición, por lo que hay diferencias significativas en los parámetros $b(1-k)$, atribuibles a diferencias en los valores de interceptos "b". Esta observación, permite concluir que hubo cambios significativos en la tasa de pérdida de energía para ambos periodos.

Es posible estimar la pérdida neta de energía hidroeléctrica, del ajuste de una recta en las series de producción para ambas periodos. En la serie que corresponde al periodo 1953-69, la tasa de pérdida anual energética es de -360,20 (KWh), mientras que en el periodo 1970-86 es de -1057,05 con lo que la pérdida neta de energía hidroeléctrica anual atribuible al deterioro de la cuenca superior del río Reventazón por efecto del mal uso de la tierra es de 696,85 (MWh)/año.

Cuadro 17. Modelo de ajuste a la serie de diferencias DA.

Estimadores ordinarios de cuadrados medios.

SSE	4282372,0	DFE	16
MSE	267648,2	MSE ²	517,34
SBC	262,5	AIC	261,66
REG ²	0,0	REG ² Total	0,00
Durbin-Watson	3,0119		

Modelo de regresión.

Variable	GL	Valor b	Error estandar	F	Pr
Intercepto	1	-361,705888	125,475149	-2,883	0,0108

Estimadores de autocorrelaciones.

INT	COVAR.	CORR.	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
0	251904	1,00													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1	-131314	-0,521						*	*	*	*	*												

MSE preliminar=183451,9

Estimadores de los parámetros autoregresivos.

Intervalo	Coefficiente	Error estandar	F
1	0,52128647	0,22034222	2,365804

Límites de confianza

$$0,5212 \pm 2,12 * 0,2203 = (0,1;0,99)$$

Estimadores Yule-Walker.

SSE	3080528	DFE	15		
MSE	205368,6	MSE ²	453,1761		
SBC	260,0532	AIC	258,3868		
REG ²	0,0000	REG ² Total	0,2806		
Variable	GL	Valor B	Error estandar	F	Pr
Intercepto	1	-369,779788	73,7507992	-5,014	0,0002

Límites de confianza.

$$-369,779 \pm 2,12 * 73,7507 = (-526,1; -213,43)$$

Cuadro 18. Modelo de ajuste a la serie de diferencias DP.

Estimadores ordinarios de cuadrados medios.

SSE	32520938	DFE	16
MSE	2032559	MSE ²	1425,67
SBC	296,96	AIC	296,13
REG ²	-0,00	REG ² Total	-0,00
Durbin-Watson	2,9652		

Modelo de regresión.

Variable	GL	Valor b	Error estandar	F	Pr
Intercepto	1	-984,411765	345,777777	-2,847	0,0117

Estimadores de autocorrelaciones.

INT COVAR. CORR.	-1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	
0	1912996	1,00											*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1	-953745	-0,498					*	*	*	*	*											

MSE preliminar=1437496

Estimadores de los parámetros autoregresivos.

Intervalo	Coefficiente	Error estandar	F
1	0,49856087	0,22382092	2,227499

Límites de confianza

$$0,4985 \pm 2,12 * 0,2238 = (0,0;0,97)$$

Estimadores Yule-Walker.

SSE	24171278	DFE	15		
MSE	1611419	MSE ²	1269,417		
SBC	295,043	AIC	293,3765		
REG ²	0,0000	REG ² Total	0,2567		
Variable	GL	Valor b	Error estandar	F	Pr
Intercepto	1	-999,072676	209,592317	-4,767	0,0002

Límites de confianza.

$$-999,0726 \pm 2,12 * 209,5923 = (-1443,408276; -554,736924)$$

Los resultados obtenidos, coinciden en general con la apreciación de diversos investigadores en el sentido que las condiciones de sobreuso de la tierra están ligadas estrechamente a la aparición y profundización de diversos fenómenos (Strakov,1967; Hammer,1972; Heede,1972), el cual tiene una decisiva influencia en la sedimentación de embalses (López y Blanco,1968). Sin embargo, de los cuadros 14 y 15 donde se cuantifica la pérdida de volumen útil del embalse Cachi, se puede deducir que la pérdida de capacidad del embalse atribuible a la erosión geológica fue de 0,36% anual, mientras que la pérdida de capacidad debido a la erosión acelerada para un período de tiempo similar fue de 0,56%, por lo cual el uso de la tierra en la cuenca alta tiene una influencia decisiva en la tasa de sedimentación del embalse Cachi. Mahmood (1987), informa que la tasa a nivel mundial de pérdida de capacidad de embalses es de 1% anual, por lo que Cachi estaría por debajo de las tasas mundiales de pérdida de capacidad de operación, lo cual también puede probablemente atribuirse al efecto beneficioso de la Reseva Forestal de Río Macho.

Por otra parte, si bien las tasas de pérdidas energéticas debido a la sedimentación resultaron con diferencias significativas, no es menos cierto que en términos relativos a la capacidad de generación de energía del embalse Cachi, la disminución de energía firme no se ve grandemente afectada con la reducción de volumen, dado que es un embalse con 206 metros de caída externa y una alta carga hidráulica de poca oscilación. Además, según lo observado por Quesada (1983) en el embalse Cachi, la altura de generación es poco sensible al impacto de la sedimentación; por otra parte, por ser Cachi un embalse de relativamente poco volumen, el efecto de la regulación por almacenamiento no es muy grande, por lo que la energía firme

va a depender en gran parte del régimen de caudales mínimos en los periodos críticos.

4.6 Efectos económicos de la sedimentación en el proyecto hidroeléctrico de Cachi.

El efecto de la sedimentación en un embalse trae consecuencias económicas que se analizan en el presente capítulo, dado que ya ha sido estimado el efecto de la sedimentación en la producción de energía firme en el embalse Cachi y que se cuenta con diversa información proporcionada por el Instituto Costarricense de Electricidad, relativa al impacto de la sedimentación en la maquinaria hidráulica.

En general, se ha adoptado una metodología que estima los mayores costos en que ha debido incurrir el ICE en la represa de Cachi y que se derivan de la disminución de energía por reducción del volumen activo, la paralización de la planta para labores de mantención y limpieza del vaso por sedimentación y el aumento de costos de mantención de la maquinaria hidráulica por el efecto de desgaste que ocasionan las partículas de sedimentos mayores de 1 mm de diámetro.

4.6.1 Determinación de costos atribuibles a la pérdida de energía por disminución de volumen.

Esta partida consiste en la valoración de la energía perdida por disminución de volumen del embalse y que de acuerdo al capítulo anterior, se ha estimado en 696.850 KWh.

Esta valoración, se hará de acuerdo al criterio de costo alternativo que para el ICE representa generar la misma cantidad de energía a través de sus plantas térmicas o importada; por tanto, la valoración implica calcular el

costo unitario del kilowatt-hora que producirían estas plantas. Dado que, el costo unitario está influenciado enormemente por el factor de carga y el período de operación, se ha optado por calcular este costo a través del sistema de plantas térmicas durante un período de 4 años, desde 1985 a 1988, o importación verificada entre 1986 y 1988.

La información financiera provino de informes del ICE (1988), la cual está distribuida por ítems de costos que incluye la operación que incorpora los gastos de mano de obra y corrientes; los costos de mantención representan los gastos de reposición de las piezas y partes dañadas además de mano de obra; los costos varios directos están constituidos por los gastos de transportes y usos de equipos; por último, están los costos varios indirectos que incluye los gastos de depreciación, seguros e impuestos.

Por otra parte, se sabe que el ICE opera a precios de mercado, que en una evaluación económica, no proveen necesariamente la mejor cuantificación del valor de los recursos de un país, como son el capital, mano de obra, divisas y producción doméstica. El valor de mercado de tales recursos no representan una cuantificación precisa, dado que, los precios de mercado están generalmente distorsionados por la intervención gubernamental en los mercados, a través de impuestos, subsidios, salarios mínimos de ley y controles de precios. Para corregir los precios de mercado, se utilizaron los multiplicadores estimados por el ICE (1983), en la estimación de los precios sombras de la divisa y el costo de trabajo no calificado. Los pasos metodológicos para la determinación del precio social unitario del kilowatt-hora se informa a continuación.

4.6.1.1 Determinación de precios constantes.

Puesto que los valores informados por el ICE, se dan en moneda del año correspondiente, fue necesario determinar precios constantes, para lo cual, se deflactaron los valores de acuerdo al índice de precios al consumidor. De esta forma, los valores se llevaron al año 1985, constituido en año base común; los índices deflactores utilizados fueron para el año 1986 de 0,894; para 1987 fue 0,765 y para 1988 resultó ser 0,663. Por tanto, las pérdidas económicas se informan en moneda de 1985 y para convertirlos a dólares americanos, se utilizó el valor promedio de esa moneda para el año 1985 (Dirección General de Estadística y Censos, Comunicación personal, 1989).

4.6.1.2 Corrección de los valores de mercado.

De acuerdo con el ICE (1983) el componente de costos en divisas para las plantas térmicas es del 48%, mientras que el multiplicador es de 1,1; por otra parte, el componente de costos en mano de obra no calificada es del 2 % y un multiplicador de 0,73. Estos multiplicadores aplicados a los valores constantes y eliminando las transferencias, proporcionan los costos sociales en que incurre el ICE para la generación de energía en el sistema térmico.

4.6.1.3 Determinación de costos unitarios.

El costo unitario resulta de dividir el costo total incurrido en la generación de energía ponderada según la importancia relativa de la planta en el sistema, por la producción promedia de todo el sistema, los cuales se entregan en el cuadro 19.

Cuadro 19. Determinación del costo unitario de un kilowatt-hora de una planta térmica.

<u>Item Operación</u>										
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)		
	1985	1986	1987	1988						
Colima	8655120	9014470	9523734	11253776	9611775					
Molín	4385875	9082093	11604969	14214957	9821974					
San Antonio	6951578	7334173	9002218	12517291	8951315					
Barranca	2021315	2423410	2533950	4612884	2897890					
Promedio Ponderado					8276342	8734851	0,73669			0,7775
<u>Item Mantenimiento</u>										
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)		
	1985	1986	1987	1988						
Colima	3176975	2519012	3703625	7636090	4258926					
Molín	10064105	13148527	11279733	12887802	11845042					
San Antonio	4658335	6157276	6877176	11084500	7194322					
Barranca	1599609	3428650	4080879	8133632	4310692					
Promedio Ponderado					7381510	7790446	0,6570			0,6934
<u>Item Varios directos</u>										
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)		
	1985	1986	1987	1988						
Colima	327368	104435	104908	204068	185195					
Molín	1420808	1757965	1689803	1410097	1569668					
San Antonio	770401	657683	699670	749898	7194143					
Barranca	191602	311646	481609	350967	333956					
Promedio Ponderado					780893	824155	0,0695			0,07336
<u>Item Varios indirectos</u>										
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)		
	1985	1986	1987	1988						
Colima	8645389	16597821	13897880	9073957	12053762					
Molín	8982360	17290134	14534778	9512294	12579892					
San Antonio	8547543	16511767	13808316	9036138	11975941					
Barranca	8455440	16253891	13692189	9084100	11871405					
Promedio Ponderado					12702021	13405713	1,13063			1,193268
Costo Total (Colones/KWH)								2,59382		2,7375

Fuente: Elaboración propia (1989)

De acuerdo al costo unitario a precios sociales calculado de acuerdo con el cuadro 19 y la pérdida energética anual estimada por efectos de la sedimentación, la pérdida económica para el ICE es de 1.907.627 colones de 1985, o bien, 12.760 dólares americanos expresados en moneda del mismo año.

4.6.1.4 Costos por importación.

Aunque Costa Rica exportó electricidad a los países vecinos, a partir de 1986 y hasta 1988, se debió importar electricidad a costos unitarios de 0,02925; 0,02835 y 0,03827 US\$ por KWh respectivamente para suplir la demanda del país. Dado que, la importación ocurrió fuera del período de estudio no se consideró el costo de importación para valorar la pérdida energética, sino que se utilizó el costo de la energía térmica. Sin embargo, a futuro el aumento de la demanda por energía eléctrica implicará seguramente nuevas importaciones, por lo cual las pérdidas energéticas atribuibles a la sedimentación será un problema creciente.

4.6.2 Costos atribuibles a la pérdida energética por paralización de la planta.

Con la misma metodología anterior, aunque con un cambio en la composición de costos, se calculó el costo unitario de producir un kilowatt-hora en plantas hidroeléctricas. Los cambios introducidos derivan del cambio en la composición de costos en moneda extranjera para las plantas hidroeléctricas, estimadas por el ICE en un 66% (ICE, 1983). Los costos unitarios de producir un kilowatt-hora en plantas hidroeléctricas, se entregan en el cuadro 20.

De acuerdo con la información obtenida en la planta, la paralización es de 15 días promedios al año, con una pérdida

Cuadro 20. Determinación del costo unitario de un kilowatt-hora de una planta hidroeléctrica.

<u>Item Operación</u>								
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)
	1985	1986	1987	1988				
Garita	14742800	16265498	18084886	24221792	18328744			
Río Macho	16888337	19967037	17851491	17257287	17991038			
Cachí	12850071	13413287	14559598	11814182	13159285			
Promedio Ponderado					16088868	17269791	0,033577	0,036042
<u>Item Mantenimiento</u>								
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)
	1985	1986	1987	1988				
Garita	6225099	5364273	7607867	10557821	7438765			
Río Macho	4914511	10319097	7743383	10545180	8380543			
Cachí	31576035	9597934	10905262	11773171	15963101			
Promedio Ponderado					11280695	12108698	0,0235429	0,02527
<u>Item Varios directos</u>								
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)
	1985	1986	1987	1988				
Garita	3045856	6896816	1911628	6134368	4497167			
Río Macho	3239229	3189888	7378106	3150777	4239500			
Cachí	14988762	1020057	2932204	3000228	5485313			
Promedio Ponderado					5088624	5462129	0,01062	0,011399
<u>Item Varios indirectos</u>								
Planta	Año				Promedio	Corrección económica	Costo Unitario a precios privados (Colones/KWH)	Costo Unitario a precios sociales (Colones/KWH)
	1985	1986	1987	1988				
Garita	18380344	19014984	18351285	18793223	18634959			
Río Macho	71730212	74065296	70709160	69705429	71552525			
Cachí	57906587	59865741	57165735	56439633	57844425			
Promedio Ponderado					52965816	56853507	0,1105403	0,118654
Costo total (Colones/KWH)							0,17828	0,191365

Fuente: Elaboración propia (1989)

energética de 19.691.259 KWH-año, por lo cual, la pérdida energética ascendería a 3.768.218 colones de 1985, o bien, 25.205 dólares americanos del mismo año.

4.6.3 Pérdidas por aumentos de costos en faenas de mantención.

De acuerdo a antecedentes proporcionados por el ICE (Corrales, 1968; Starceovich, comunicación personal, 1989) aproximadamente un 70% de los costos relativos a la mantención de la planta, pueden atribuirse a daños ocasionados en la maquinaria hidráulica por el sedimento en suspensión que pasa a través de las turbinas; este hecho, puede corroborarse al compararse la información contenida en el cuadro 20, relativa a los costos de mantención de la planta Cachi con la planta Río Macho que se ubica en la misma cuenca y que tiene una potencia instalada y una maquinaria hidráulica similar, pero que se encuentra protegida directamente por la Reserva Forestal de Río Macho, en el cuadro mencionado aparecen los costos de mantención de la planta Cachi superiores en un 66%, con respecto a la planta Río Macho. Se puede aceptar por tanto, que los aumentos de costo debido a la sedimentación originada por el mal uso de los recursos naturales, como equivalente al 70% de los costos de mantención, por lo cual, la pérdida anual ascendería a 8.476.089 colones de 1985, o bien, 56.696 dólares americanos en moneda del mismo año.

En total, se puede asumir que el monto anual de pérdidas económicas anuales del proyecto Cachi, atribuibles a los efectos de la sedimentación es de 14.151.934 colones de 1985, que equivalen a 94.661 dólares americanos, expresados en moneda del mismo año. Para tener una aproximación del valor en moneda de 1989 de las cifras de pérdidas anuales del proyecto Cachi, atribuibles a la sedimentación, se puede emplear el criterio del Valor

Presente tomando una tasa de descuento del 13% que es la tasa utilizada por el ICE en sus proyectos, se puede estimar dicha pérdida en 23.086.430 colones o US\$ 154.342 anuales.

Las pérdidas económicas estimadas en la presente tesis, difieren sustancialmente de las pérdidas económicas informadas por Leonard (1986) en el perfil ambiental de Centroamérica el que señala una pérdida anual de 13,7 millones de dólares americanos, los cuales resultan extremadamente exagerados para un proyecto que tuvo una inversión inicial de 17 millones de dólares americanos y que no tuvo una información precisa y de calidad para valorar correctamente las pérdidas económicas atribuibles a la sedimentación en el proyecto hidroeléctrico de Cachí. Además, a diferencia del Lago Alajuela, el proyecto hidroeléctrico de Cachí no utiliza el dragado para la limpieza del vaso, tecnología que implica un altísimo costo de mantenimiento de éste; sin embargo, el ICE utiliza el sistema de eliminación del sedimento por compuertas, que es trasladado a estas por medio de maquinaria pesada que también representan costos altos, aunque menores al dragado. Por tanto, se considera, que las estimaciones de pérdidas económicas hechas en el presente estudio, son más confiables debido a la calidad de la información disponible y a las metodologías de evaluación económicas utilizadas.

Resulta necesario destacar además, que si bien los montos informados no pudieran ser relevantes para las inversiones que maneja el ICE, no es menos cierto que, si se considera una acumulación de pérdidas de a lo menos 7 años, y de acuerdo a informaciones recientes de costos en programas de restauración y manejo de recursos naturales en cuencas hidrográficas (Rodríguez y Johnson, 1989), resultaría mucho más eficiente para la sociedad, invertir estas pérdidas en el manejo integrado de los recursos naturales, Puesto que si bien, sólo es posible aminorar los efectos de

la sedimentación, la ventaja social adicional de mantener la sostenibilidad de los recursos naturales de la cuenca superior, sería posible controlar fenómenos erosivos y torrenciales que ocasionan una gran daño a la población y a diversa infraestructura valiosa, lo que se traduciría en general, en un aumento de la calidad de vida de la población que habita la cuenca superior del río Reventazón.

Por otra parte, no han sido considerados en la presente tesis, algunos impactos ambientales relevantes atribuibles al mal uso de la tierra, que no se han valorado en la presente tesis y que se indican en el cuadro siguiente:

Cuadro 21. Impactos ambientales no valorados.

Causalidad	Impacto ambiental no valorado.
Erosión	Pérdida de productividad de suelos
Erosión	Pérdida de paisajes turísticos
Torrenciales	Inundación de poblados
Sedimentación	Declinación de la pesca
Sedimentación	Daños al turismo

Todos los daños enunciados en el cuadro anterior, son susceptibles de ser valorados en términos económicos, puesto que afectan la cuenca superior del río Reventazón; sin embargo, por no ser daños manifiestos en el proyecto hidroeléctrico de Cachi, no se consideraron en la presente tesis.

5. CONCLUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, es posible obtener las siguientes conclusiones:

1. El uso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón, ha seguido en general la misma tendencia nacional, en el sentido de las principales formas de cambio de uso de la tierra. Esto es, el reemplazo del bosque natural que disminuyó desde un 60,2% en 1956 a 51,5% en 1967 y a un 43,1% en 1984; este reemplazo, se hizo para aumentar las tierras destinadas a la ganadería que en 1956 ocupaba un 20% de la cuenca hasta un 33,6% en 1967 que se mantiene hasta la actualidad y terrenos urbanos que hacia 1967 ocupaba un 0,6% y que han aumentado hasta un 2,7%.

2. Al aplicar la capacidad de uso de la cuenca a las distintas condiciones de uso pasado de la tierra, se pudo observar que históricamente, la cuenca presentó problemas de sobreuso, que ha sido creciente en la cuenca, puesto que, hacia 1956 y 1962 la condición de sobreuso no sobrepasó entre un 5,4 y 6,1% de la superficie total, mientras que entre 1967 y 1984 esta condición representa entre un 12,4 y un 15,8% de la superficie total de la cuenca.

3. Diversas condiciones, como la condición de sobreuso de la tierra, la alteración del régimen hidrico, las fuertes pendientes a nivel de laderas y cauces, los cambios de uso de la tierra y la implementación de sistemas tecnológicos inapropiados de utilización de tierras, la alta susceptibilidad de algunos suelos presentes en la cuenca a la erosión y condiciones tanto geológicas como geomorfológicas naturales, han favorecido la aparición y profundización de diversos fenómenos erosivos, de tal manera que, a 1984, la cuenca superior del río Reventazón presenta

un 6,15% de erosión laminar; 1,71% con erosión de cárcavas; 1,2% con remoción en masa; 9,3% con reptación y un 5,7% presenta taludes inestables con distintas formas de erosión.

4. Los cambios de uso de la tierra, han alterado el régimen de caudales. En el caso de los caudales máximos, el modelo que explica la influencia del uso de la tierra es $\text{Caudal Máximo} = 267,199 + 15,237 * A - 15,237 * A^2$, que indica una tendencia creciente de los caudales hasta 1966 debido a la eliminación de la cobertura forestal tal como se señala en la conclusión 1 y 2, para luego decrecer en equilibrio con las nuevas estructuras vegetacionales producto de las nuevas formas de uso de la tierra. Para los caudales medios mensuales, el modelo que explica su tendencia es $\text{C.m.m.} = 53,9367 + 0,06233 * A - 0,61418 * A^2$, que resulta similar en su tendencia que los caudales máximos. En los caudales mínimos al efectuarse una comparación de medias, entre el período 1953-69 que representa las condiciones naturales de la cuenca y 1970-86 que representa las condiciones de una cuenca más degradada, no se encontraron diferencias significativas ($1,697 > 0,039$), aunque en el segundo período el coeficiente de variación resultó mucho mayor (29,21 contra 14,23%).

5. Los procesos erosivos han tenido como consecuencia un aumento de las tasas de sedimentación y una pérdida de capacidad de volumen activo del embalse Cachi. En efecto, en el período 1953-79 la pérdida de capacidad fue de 0,34% al año, mientras que para el período 1970-86 esta pérdida resultó ser de 0,55%, la cual siempre se observa más baja que el nivel mundial que es de 1% al año.

6. La pérdida de volumen activo del embalse Cachi por efecto de la sedimentación, originada en la erosión acelerada, tuvo como consecuencia una disminución de la producción de energía de éste. Al comparar las tasas de

pérdida energética en ambos periodos, se encontraron diferencias significativas en los interceptos de las funciones estimadas para ambos periodos, pues no se encontró sobreposición en los límites de confianza en el modelo de ajuste de ambas series de producción energética, que resultaron ser de -526,1; -213,43 para el primer periodo y de -1443,4; -554,736 para el segundo periodo; la tasa neta de pérdida energética atribuible a la sedimentación originada en la erosión acelerada resultó ser de 696.850 kilowatt-hora al año.

7. Si bien, las tasas de pérdidas energéticas debido a la sedimentación resultaron con diferencias significativas, no es menos cierto que en términos relativos a la capacidad de generación de energía del embalse Cachi, la disminución de energía firme no se ve grandemente afectada con la reducción de volumen, dado que es un embalse con 206 metros de caída externa y una alta carga hidráulica de poca oscilación. Además, en el embalse Cachi, la altura de generación es poco sensible al impacto de la sedimentación; por otra parte, por ser Cachi un embalse de relativamente poco volumen, el efecto de la regulación por almacenamiento no es muy grande, por lo que la energía firme va a depender en gran parte del régimen de caudales mínimos en los periodos críticos.

8. Las pérdidas atribuibles al efecto de la sedimentación originada en la erosión acelerada, se estimaron en 23.086.430 colones, o bien, 154.342 dólares americanos al año. Sería mucho más rentable invertir estas cifras en el manejo integrado de los recursos naturales de la cuenca superior que aminoraría los efectos de la sedimentación, con la ventaja adicional de mantener la sostenibilidad de los ecosistemas con el beneficio de aumentar la calidad de vida de la población que habita la cuenca superior del río Reventazón.

9. La creación e implementación de la Reserva Forestal de Río Macho, ha ejercido probablemente una influencia decisiva en el régimen de caudales y en el control de los fenómenos erosivos de la cuenca superior del río Reventazón, en razón a que se ha efectuado una protección eficiente del bosque natural ubicado en terrenos de aptitud preferentemente forestal.

10. El deterioro ambiental experimentado por la cuenca superior del río Reventazón, no solo implica una pérdida de sostenibilidad de los ecosistemas naturales o artificiales in situ, sino que además la exportación de estos ecosistemas de diversos productos, como el suelo y el agua, tienen impactos negativos en la sostenibilidad de otros sistemas naturales o artificiales.

11. La precisión y esfuerzos que se emplean en el diseño de diversos proyectos hidráulicos, pierden con el tiempo relevancia, puesto que, las condiciones básicas de estos diseños como son el régimen de caudales y el volumen del embalse activo son alterados, por la gestión que se haga de los recursos naturales de la cuenca superior, en el proceso de diseño.

6. RECOMENDACIONES.

En virtud de las conclusiones expuestas, es posible exponer las siguientes recomendaciones.

1. Se hace necesario y urgente promover acciones institucionales concretas, reales y factibles que formulen una planificación tecnificada del uso de la tierra en la cuenca superior del río Reventazón.

2. Dado los inconvenientes de la escala a la cual se trabajó y a que los análisis de uso de la tierra y de erosión son preliminares, se hace conveniente, para definir acciones correctivas en la cuenca, definir con mayor precisión y nivel de detalle, las áreas de sobreuso y su condición de degradación.

3. Se hace necesario implementar un programa de investigaciones de largo plazo, en el sistema agua-suelo-planta, de manera que se explique con mayor precisión el impacto del uso de la tierra en el régimen hidrológico y en la calidad de las aguas.

4. Sería altamente beneficioso, incorporar y desarrollar métodos cuantitativos que expliquen los impactos del uso de la tierra a gran escala, en el régimen de caudales y en la disminución de volumen activo de embalses. Al respecto, se hace necesario desarrollar modelos hidrológicos que expliquen los fenómenos señalados en cuencas, ubicadas en ambientes tropicales.

5. Sería conveniente repetir el presente estudio, en cuencas que presenten alteraciones aún más drásticas en el uso de la tierra, y que exploten obras hidroeléctricas con poca carga hidráulica y de volumen mucho mayor.

6. Sería recomendable a futuro, que las instituciones ligadas al manejo de los recursos naturales, tuvieran una participación más decisiva, en el diseño y operación de los proyectos hidráulicos, por cuanto se observa una estrecha relación entre éstos y los proyectos de recursos naturales.

BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO, L. A. 1987. La sedimentación del lago Alajuela. Balboa, Pan. Comisión del Canal de Panamá. 17 p.
- AMEZQUITA, E.; FORSYTHE, W.H. 1975. Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos en Turrialba. Turrialba, C.R. IICA. 29 p. (Presentado en: V Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Medellín, Col.)
- BERMUDEZ, L. 1980. Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema Café (Coffea arabica) Poró (Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook) y Laurel (Cordia alliodora (RP) Cham) en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 74 p.
- BENEE, F.S.; LASSITER, C.J.; RIEKERK, H. 1983. Effects of different harvesting and site preparations on the peak flows of stream in Pinus elliottii flatwoods forests. *Forest Ecology and Management* (Holanda) 5:77-86.
- BERGDEING, J.P.; MALAVASSI, E. 1982. Geomorfología del valle central de Costa Rica: explicación de la carta geomorfológica. San José, C.R. Convenio Universidad de Costa Rica-Ministerio de Obras Públicas y Transporte. 25 p.
- BLAIR, E. 1983. Hidrología con información limitada. Caudales mínimos. In *Curso Regional Itinerante Post Universitario de Hidrología y Ciencias del Agua, Istmo Centroamericano y El Caribe*. San José, C.R. Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. 118 p.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. 1970. *Time series analysis: forecasting and control*. New York, Holden-Day. 78 p.
- BROCKLEBANK, J.C.; DICKEY, D.A. 1986. *SAS system for forecasting time series*. North Carolina, SAS Institute. 240 p.
- CABRERA, R.O. 1987. Identificación de áreas críticas con base a criterios biofísicos y análisis básico de la degradación específica y transporte de sedimentos en la cuenca superior del río Chixoy, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 174 p.

- CASSEL, D.S.; GILMOUR, D.A.; BONELL, M. 1985. Catchment response and watershed management in the tropical rainforest in north-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, (Holanda) 10:155-175.
- CHANG, H. 1982. *Forest hydrology*. Nacogdoches, Austin State University. 202 p.
- CHOW, V.T. *Handbook of applied hydrology*. New York, Mac Graw Hill. 2930 p.
- CLARKE, R.T. 1973. *Mathematical models in hydrology*. FAO. Irrigation and Drainage Paper no 19. 281 p.
- CONTRERAS, H. 1988. *Geomorfología aplicada*. In *Apuntes de clases del curso de geomorfología*. Turrialba, C.R., CATIE, s.p.
- CORRALES, F. 1968. Informe sobre sedimentos en relación con el proyecto de río Macho N° 2 (Tapantí). Informe Interno. San José, C.R., ICE 22 p.
- CORRALES, J.L. 1985. Influencia de las políticas internas y externas en el desarrollo tecnológico de Costa Rica. Tegucigalpa, Honduras, Unidad de Coordinación Regional I.D.R.C./OEA. Proyecto de Instrumentos de Política y Planificación Científica y Tecnológica para Centroamérica y Panamá. (IPPCT-CAP/OEA/IDCR No 12). 29 p.
- COSTA RICA. INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1976. Aplicación del costo marginal y precios sombra al diseño de tarifas eléctricas. Dirección de Electrificación. Sección de Programas y Presupuestos. San José, C.R. 76 p.
- _____. INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1987. Plantas hidroeléctricas del ICE. San José, C.R., 26 p.
- _____. INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1989. Informe anual de labores. San José, C.R., s.p.
- _____. INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1989. (Resumen de las estaciones hidrometeorológicas). San José, C.R., Departamento de Estudios Básicos. (Extraído de la base de datos HIDROMET del ICE).
- _____. INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1989. (Listado de registro de caudales de las estaciones Cachi, Navarro y Palomo). San José, C.R., Departamento de Estudios Básicos. (Extraído de la base de datos HIDROMET del ICE).

- _____. INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1989.
(Listado de registro de sedimentos de las estaciones Cachi, Navarro y Palomo). San José, C.R., Departamento de Estudios Básicos. (Extraído de la base de datos HIDROMET del ICE).
- _____. OFICINA DE LA PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. 1979.
Los problemas socioeconómicos más importantes del país, San José, C. R. Oficina de Planificación Nacional y Política Económica. 62 p.
- COX, D.R.; MCCULLOGH, P. 1982. Some aspects of analysis of covariance. *Biometrics* (EE.UU.) 38 (3): 541-553.
- DENGO, G. 1968. Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central. México D.F., Ed. Centro Regional de Ayuda Técnica Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. 50 p.
- DINGMAN, S.L. 1984. Fluvial hydrology. New York, W.H. Freeman. 383 p.
- DOOGE, J.C.I.; COSTIN, A.B.; FINKEL, H.J. 1973. Man's influence on the hydrological cycle. FAO. Irrigation and Drainage Paper no 17. 71 p.
- DOUGLASS, J.E. 1965. Effects of species and arrangement of forest on evaporation. *In* Forest Hydrology. Ed. by E. Sopper; W. Lull. Oxford, Pergamon Press. p.451-461.
- ESPINOSA, J. 1985. Uso del modelo HEC-6 en la cuantificación de procesos erosivos urra-río Sinu; un caso práctico. *In* III Congreso Colombiano de Cuencas Hidrográficas (3,1985, Cali, Col.) Memoria Corporación Autónoma Regional del Cauca. p. 25-104.
- ESTRIBI, C.A. 1984. Cambios edáficos e hidrológicos derivados de la conversión de bosque a pasto y charral (pasto abandonado) en una zona montañosa húmeda en Costa Rica. Tesis Mag., Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 139 p.
- FAUSTINO, J. 1986. Erosión potencial y erosión actual. Turrialba, C.R., CATIE. 47 p. (Presentado en: Curso de posgrado Conservación de Suelos y Aguas)
- _____. 1988. Modelos de procesos erosivos. Turrialba, C.R., CATIE, Proyecto Regional de Manejo de Cuencas/AID/ROCAP. 47 p.
- FOGEL, H.M. 1980. Predicting sediment yield from strip-mined land. *In* Symposium on Watershed Management (1980, New York). Proceedings. New York, American Society of Civil Engineer. p. 176-187.

- FOURNIER, L.A. 1985. Conservación y recursos naturales de Costa Rica. In Recursos naturales y desarrollo en Costa Rica. Ed. Navarro. San José, C.R., UNA-CONICIT. p. 43-48.
- FOURNIER; F. 1960. Debil solide des cours d'eau de la perte en terre subie par l'ensamble du globe terrestre. In International Association of Scientific Hydrology.. General Assembly of Helsinki, 25/7-6/8-1960. Paris, L'Associacion Internationales d'Hidrologie Scientifique. p. 19-22.
- GOODELL, B.C. 1965. Watershed treatment effects on evaporation. In Forest Hydrology. Ed. by W.E. Sopper; .H.H. Lull. Oxford, Pergamon Press. p.477-482.
- GRAF, W.H. 1984 Hydraulics of sediment transport. Chelsea, USA, Water Reosurces Publications. 513 p.
- GREGERSEN, H.M.; BROOKS, K.N.; DIXON, J.A.; HAMILTON, S.S. 1986. Guidelines for economic appraisal of watershed management projects. FAO Conservation Guides no 16. 143 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. Turrialba 29/12-11/3 1988. CATIE, Turrialba, C.R. 19 p.
- HAMILTON, L.S.; KING, P.N. 1983. Tropical forested watersheds. Hidrological and soil response to major uses or conversions. Boulder, Colorado, Westerview Press. 188 p.
- HAMMER, T.R. 1972. Stream channel enlargement due to urbanization. Edmonton, Canadá., Regional Science Research Institute. 41 p.
- HARTSHORN, G. 1982. Perfil ambiental de Costa Rica. Centro Científico Tropical, Agencia para el Desarrollo Interncional de los Estados Unidos. San José, C.R. 152 p.
- HEEDE, B.H. 1972. Influences of a forest on the hydraulic geometry of two mountain stream. Water Resources Bulletin. (EE.UU.) 8:523-530.
- HERRERA, E. 1978. Arrastre de sedimentos en canales naturales. Tesis Ing. Civil. San José, C.R., Universidad de Costa Rica. 189 p.
- HEWLETT, J.D. 1969. Principles of forest hydrology. Athens, University of Georgia Press. 183 p.

- HIBBERT, A.R. 1965. Forest treatment effects on water yield. In Forest Hydrology. Ed. by W. E. Sopper; H.H. Lull. Oxford, Pergamon Press. p.527-543.
- JACKSON, T.J. 1982. Application and selection of hydrologic models. In Hydrologic modeling of small watersheds. Ed. by C.T. Haan; H.P. Johnson; D.L. Brakensiek. St. Joseph, SAE Press p. 475-493.
- JIMENEZ, J.; NUNEZ, L. 1984. Programa de cómputo para el diseño y operación de embalses. Tesis Ing. Civil. San José, C.R., Universidad de Costa Rica. 76 p.
- KASS, D. 1987. Física de suelos. Turrialba, C.R., CATIE. s.p. (Presentado en: Curso de posgrado Edafología Física)
- KIRBY, M.J; MORGAN, R.P.C 1984. Erosión de suelos. Trad. por José Hurtado Vega. México, D.F., Limusa. 375 p.
- KITE, G.W. 1985. Frequency and risk analyses in hydrology. Chelsea, Water Resources Publications. 224 p.
- KNISEL, W.G. 1980. Erosion and sediment yield: an overview. In Simposium on Watershed Management (1980, New York). Proceedings. New York, American Society of Civil Engineer. p. 141-149.
- KRECEK, J; BALEK, J. 1981. Afforestation and forest treatment effects on streamflow. In IUFRO world congress (17,1981, Tokyo, Japon). Proceedings. Tokyo, Comitee Forestry and Forest Products Institut Forest Environment and Silviculture. p. 237-247.
- LEE, R. 1980. Forest hydrology. New York, Columbia Press University. 349 p.
- 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 Ordóñez y Fabio Castrillón. Bogotá, Col., Mac Graw Hill. 386 p.
- LIZANO, E. 1980. Agricultura y desarrollo económico. San José, C.R., Universidad Estatal a Distancia. 315 p. (Serie de Estudios Nacionales No 1)
- LOMBO, R. 1963. Contribución para un plan de manejo de la cuenca superior del río Macho, Costa Rica. Tesis Mag. Agr. Turrialba, C.R., IICA. 91 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.
- LULL, H.W.; REINHART, K.G. 1972. Forest and floods in the eastern United States. USDA. Forest Service. Northeastern Experiment Station. Research Paper NE-226. 86 p.
- LULL, H.W.; SOPPER, W.E. 1965. Prediction of average annual and seasonal streamflow of physiographic units in the northeast. In Forest hydrology. Oxford, Pergamon Press. p. 507-526.
- LUSBY, C.G. 1970. Hidrologic and biotic effects of grazing vs. non-grazing near Grand Junction, Colorado. Journal of Range Management (EE.UU.) 23: 256-260 .
- MADRIGAL, R.; ROJAS, E. 1980. Manual descriptivo del mapa geomorfológico de Costa Rica. San José, C.R., Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. 79 p.
- _____. 1980. Mapa geomorfológico de Costa Rica. San José, C.R., Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Escala 1:200000. Cartas CR2CM-5, CR2CM-6, CR2CM-7, CR2CM-8.
- MAHMOOD, K. 1987. Reservoir sedimentation. Washington, EE.UU. World Bank Technical Paper no 71. 118 p.
- MALDONADO, T. 1986. La colonización del área Taque-Taque, el uso de la tierra y los sistemas agroforestales. Reserva Forestal de Río Macho, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 192 p.
- MATOS, F. 1967. Ensayo comparativo de tres sistemas fisionómicos-estructurales para la descripción de la vegetación. Tesis Mag. Agr. Turrialba, C.R., IICA. 91 p.
- MOJICA, I.H. 1967. Producción hídrica de la cuenca superior y media del río Reventazón, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., IICA. 149 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.

- MOLCHANDV, A.A. 1963. The hydrological role of forest. Translated from Russian by A. Gorevitch. Jerusalem, Israel, Israel Program for Scientific Translation. 407 p.
- MORA, I. 1987 Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS); aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejiballe, vertiente Atlántica, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 174 p.
- 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. 551-563.
- 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.
- PEREZ, S.; ALVARADO, A.; RAMIREZ, E.. 1978. Asociación de sub-grupos de suelos de Costa Rica. San José, C.R., Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria. Escala 1:200000. Cartas CR2CM-5, CR2CM-6, CR2CM-7, CR2CM-8.
- PEREZ, S., VAN GINNEKEN, P.; PROTTI, F.; RAMIREZ, E. 1978. Capacidad de uso de los suelos de Costa Rica. San José, C.R., Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria. Escala 1:200000. Cartas CR2CM-5, CR2CM-6, CR2CM-7, CR2CM-8.
- PIERCE, R.S. 1965. Evidence of overland flow on forest watershed. In Forest Hydrology. Ed. by W.E. Sopper; H.W. Lull. Oxford, Pergamon Press. p. 247-251.
- QUESADA, C.A. Impacto de la sedimentación de embalses y la alteración de caudales en la generación de energía firme. Turrialba, C.R., CATIE. 28 p.
- REINHART, K.G. 1965 Watershed calibration methods. In Forest Hydrology. Ed. by W.E. Sopper; H.W. Lull. Oxford, Pergamon Press. p. 715-723.
- RENARD, K.G. 1980. Estimating erosion and sediment yield from rangeland. In Simposium on Watershed Management (1980, New York, EE.UU). Proceedings. New York, American Society of Civil Engineer. p. 164-175.
- RICHTER, D.D.; SAPLACO, S.R.; NOWAK, P.F. Problemas de gestión de las cuencas altas tropicales. In La Naturaleza y sus Recursos. (EE.UU.) 21(4):10-21.

- RIEDL, O; ZACHART, D. 1984. Forest amelioration. Amsterdam, Elsevier Publisher. 623 p.
- RODRIGUEZ, A. 1977. Algunos aspectos de la sedimentación en los embalses. Informe Interno San José, C.R., ICE. 16 p.
- RODRIGUEZ, R.; JOHNSON, J. 1989. Plan de manejo de la cuenca del río Tuis. Turrialba, C.R., CATIE. 156 p. (Presentado en: Curso de Planificación de Manejo de Cuencas)
- ROSEN, K. 1984. Effect of clear-felling on runoff in two small watershed in central Sweden. Forest Ecology and Management, (Holanda) 9: 267-281.
- SANDOVAL, F. et al. 1982. Mapa geológico de Costa Rica. San José, C.R. Ministerio de Industria, Energía y Minas Dirección de Geología, Minas y Petróleo. Escala 1:200000. Cartas CR2CM-5, CR2CM-6, CR2CM-7, CR2CM-8.
- SCHULZ, E.F. 1980. Problems in applied hydrology. Fort Collins. Colorado State University. 501 p.
- SEMINARIO, E. 1987. Sedimentación de embalses y deposición de sedimentos. In Curso Regional Itinerante Post Universitario de Hidrología y Ciencias del Agua, Istmo Centroamericano y El Caribe. San José, C.R. Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. 59 p.
- SIEBERT, S.F. 1987. Land use intensification in tropical uplands: Effects on vegetation, soil fertility and erosion. Forest Ecology and Management (Holanda) 21:7-56 p.p.
- SLAYMAKERS, H.O.; McPHERSON, H.J. 1973. Effects of land use on sediment production. In Hydrology Simposyum (1973,Edmonton,Canada). Proceedings. Edmonton, National Research Council. p. 159-183.
- SPRECHMANN, P. 1982. Manual de geología de Costa Rica. San José. Universidad de Costa Rica. 319 p.
- STRAHLER, A.N. 1986. Geografía física. 8 ed. Barcelona, Omega. 767 p.
- STRAKOV, N.M. 1967. Principles of lithogenesis.. Edinburgh, G.B., Consultant Bureau. 145 p.
- SWANSON, R.M. 1965. Seasonal course of transpiration of lodge pole pine and engelmann spruce. In Forest Hydrology. Ed. by W.E. Sopper; H.H. Lull. Oxford, Pergamon Press. p. 419-434.

- TOEBES, C.; OURYVAEV, L. 1973. Las cuencas experimentales y representativas. In Informes de la UNESCO sobre hidrología. Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos. 598 p.
- TOSI, J. 1969. Mapa ecologico de Costa Rica. San José, C.R., Centro Científico Tropical. Escala 1:750000.
- VAN GINNEKEN, P.; CALDERON, J.H. 1978. Mapa de categorías de pendientes. San José, C.R. Oficina de Planificación Sectorial Agropecuaria. Esc. 1:200000, Cartas CR2CM-5, CR2CM-6, CR2CM-7, CR2CM-8.
- WEYL, R. 1957. Contribución a la geología de la cordillera de Talamanca de Costa Rica. San José, C.R., Ministerio de Obras Públicas Instituto Geográfico Nacional. 76 p.
- WIEBE, K.; DRENNAN, L. 1973. Sedimentation in reservoirs. In Hydrology Simposyum (1973,Edmonton,Canada). Proceedings. Edmonton, National Research Council. p. 539-579.
- WILLIAMS, J.R. 1975. Sediment-yield prediction with universal soil loss equation using energy factor. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediments Yields and Sources. (1975, Oxford). Proceedings. Oxford, USDA Sedimentation Laboratory. p. 244-252.
- 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 Simposyum (1973,Edmonton,Canada). Proceedings. Edmonton, National Research Council. p. 699-711.
- ZADROGA, F. 1981. The hydrological importance of a montane cloud forest area of Costa Rica. In Tropical Agricultural Hydrology. Ed. por R.Lal y E.W.Russell. Chichester, England, J. Wiley. p. 59-72.
- ZAMBRANA, H.A. 1975. Comparación y evaluación de la intercepción de lluvias en dos tipos de bosques tropicales. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 61 p.

ANEXOS

Proceso de cálculo de la energía y potencia firme.

I. Estimación del balance.

La ecuación de balance formulada para el modelo DOPEM, con la potencia firme anual, que se vió en la revisión de literatura, es el siguiente:

$$B_x = q_x + Y_i - \beta_x P_x + K/9.8 * h(q_x) * N(q_x) - K_x * A_x(q_x) - R_x$$

El término $K_x * A_x(q_x)$ que representa el volumen de evaporación puede estimarse como el promedio de la evaporación al inicio y al final del mes:

$$V_{E_x} = (V_E \text{ inicial} + V_E \text{ final})/2$$

Teniendo la curva altura-volumen del embalse, es posible estimar estos volúmenes como una función de la altura:

$$V_{E_x} = V_E \text{ inicial } f(h \text{ inicial} - E_p) + V_E \text{ final } f(h \text{ final} - E_p)/2$$

Como h inicial se entiende la altura correspondiente al volumen al inicio del mes y como h final, la altura correspondiente al volumen al final del mes. E_p representa la altura promedio de evaporación neta del mes, tal que:

$$E_p = E_x - \min(P_x, E_t)$$

donde:

E_x = Tasa de evaporación mensual total

P_x = Tasa de precipitación mensual

E_t = Tasa de evapotranspiración potencial

De esta manera, se toma en consideración el volumen de evapotranspiración que se esperaba antes de construir el embalse.

El balance para cada mes se puede estimar inicialmente como:

$$B_i = V f(h_{i-1} - E_p)$$

Con esta primera estimación se calculan todos los parámetros que dependen del balance : h_i , N_i , V_{Ei} . Con estos valores se calcula nuevamente el balance. Comparando este balance con el inicial se obtiene el error de estimación o porcentaje de error y dependiendo de la precisión que se desee, el balance será aceptado o rechazado.

En caso de ser rechazado, se utiliza el promedio de las dos estimaciones para generar nuevamente la altura de carga (h_i), eficiencia de la turbina (N_i) y volumen de evaporación (V_{Ei}).

La estimación inicial del balance, se hace igual al valor calculado anteriormente y un nuevo balance se estima con base a nuevos valores.

El proceso se repite hasta que el balance de dos iteraciones consecutivas no supere el porcentaje de error permisible.

Durante todo el proceso se verifica que el resultado se ajuste a las restricciones de operación, señaladas en la revisión de literatura.

II. Estimación de la potencia.

La potencia firme anual óptima para un determinado volumen máximo anual de embalse es un dato desconocido. Mediante un método de búsqueda directa se logra estimar esta potencia.

Inicialmente se calcula la potencia firme como:

$$P_{r(\text{inicial})} = 9,81 * 0,9 * f_{cg} * Q_m * H$$

Donde:

$P_{r(\text{inicial})}$ = Potencia firme anual (kilowatts)

f_{cg} = Eficiencia conducción-generador

Q_m = Caudal promedio de todos los caudales mensuales,
para el período contemplado (m^3/s)

H = Altura de carga máxima bruta(m)

Como eficiencia de turbina se toma un valor conservador 0,9.
Se define un incremento o decremento de potencia igual a:

$$D P_r = 0,05 * P_{r(\text{inicial})}$$

Con el valor inicial de potencia firme se hace la estimación de balance mensual para todos los años que componen el período estudiado.

La primera vez, el sistema fallará, debido a que la potencia es calculada con el caudal promedio, una eficiencia alta y la máxima altura de carga.

Si el sistema falla, será necesario disminuir la potencia firme anual:

$$P_{r_n} = P_f(\text{inicial}) - D P_r$$

Con este nuevo valor se procede analizar el sistema.

El incremento o decremento de potencia $D P_r$, será reducido a la mitad cada vez que haya un cambio de condición del sistema, es decir, si cambia de falla a no falla o viceversa.

El proceso de optimización se detendrá cuando el incremento o decremento de potencia sea menor que un 0,0195%, o sea, $(0,05/256)$ del valor inicial de potencia firme.

Cuadro 1A. Datos de entrada generales del embalse Cachí.

Número de años de registro: 17
Primeros años de registro: 1953 Y 1970

ALTURAS (msnm)

MAXIMA: 990,00
MINIMA: 960,00
TURBINA: 724,0

EFICIENCIAS

CONDUCCION: 1,00
GENERACION: 0,80

OTROS

% (q PROMEDIO): 80,0
% DE FALLAS: 5,0
% DE ERROR: 1,0

Cuadro 2A. Porcentaje de carga mínima vs eficiencia de la turbina.

Carga mínima. %	Eficiencia de la turbina
1,0000	0,9120
1,0130	0,9100
1,0250	0,9080
1,0380	0,9050
1,0510	0,9030
1,0640	0,9010
1,0760	0,8990
1,0890	0,8930
1,1020	0,8930
1,1140	0,8910
1,1270	0,8880

Cuadro 3A. Tabla de valores mensuales.

Mes	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Evaporación (mm)	Coficiente de demanda (%)
Enero	116,50	88,20	65,00	6,70
Febrero	75,90	90,80	95,70	5,61
Marzo	57,10	112,70	88,40	5,70
Abril	72,70	114,90	76,70	5,44
Mayo	192,60	114,70	67,20	7,38
Junio	246,00	114,50	63,30	8,88
Julio	215,70	111,70	65,30	9,94
Agosto	196,80	113,40	69,40	10,76
Septiembre	242,80	107,80	70,10	10,28
Octubre	206,20	107,20	73,30	10,22
Noviembre	150,60	92,20	61,70	10,41
Diciembre	182,30	93,00	61,00	8,68

Cuadro 4A. Caudales medios mensuales. Período 1953-69.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
1953	140,2	72,3	62,0	48,6	41,8	48,3	46,1	40,6	36,4	46,6	37,3	36,2
1954	34,3	22,7	16,8	35,9	45,0	61,1	65,2	52,4	48,8	86,6	65,5	81,2
1955	37,1	29,9	20,2	19,9	29,6	45,8	66,3	48,5	63,7	137,0	49,0	29,5
1956	28,5	33,4	33,6	37,7	72,4	60,2	88,6	45,9	48,1	78,5	49,0	64,9
1957	33,3	18,1	18,0	18,1	30,5	40,5	50,5	49,5	68,6	75,3	62,1	65,4
1958	36,2	36,3	18,5	15,7	52,1	58,3	62,5	57,2	39,8	32,1	33,5	24,0
1959	15,5	15,0	12,7	12,7	21,6	53,5	56,3	52,8	52,0	74,7	50,6	49,0
1960	41,5	24,2	24,3	18,1	24,1	36,5	53,8	38,1	55,4	101,0	63,0	61,0
1961	26,7	19,7	15,2	15,0	27,8	46,1	50,8	56,2	96,3	74,9	72,0	74,1
1962	39,5	19,9	14,0	18,5	42,1	62,8	83,9	56,6	83,1	108,0	137,0	73,2
1963	27,8	25,0	21,6	33,6	35,7	41,8	52,0	65,0	101,0	71,5	84,9	58,8
1964	41,4	15,3	12,4	13,7	21,3	59,5	87,2	79,9	89,7	79,8	69,9	34,6
1965	67,4	26,5	29,2	17,3	39,6	52,9	62,0	72,8	65,6	72,7	73,7	45,1
1966	52,5	43,9	23,8	21,2	47,2	60,9	51,9	67,7	69,5	69,5	64,9	92,1
1967	38,8	26,8	23,0	35,1	30,5	70,8	54,0	67,7	74,5	74,2	61,1	40,1
1968	24,4	35,6	32,6	30,0	43,1	66,3	71,8	78,9	99,2	76,6	72,9	55,4
1969	22,0	18,6	13,9	19,9	19,3	32,5	30,9	69,6	88,1	83,9	124,0	93,0

Cuadro 5A. Caudales medios mensuales. Período 1970-86.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
1970	78,5	68,5	27,6	79,1	60,0	61,4	60,1	57,6	81,3	76,7	104,0	145,0
1971	50,1	32,8	33,2	41,3	49,1	52,5	60,9	67,6	77,2	89,6	57,6	30,5
1972	35,4	30,3	20,3	27,4	41,7	40,7	39,9	53,9	59,8	67,5	52,0	43,2
1973	35,2	26,1	16,2	12,9	31,4	70,0	59,1	71,1	58,3	76,2	67,1	86,2
1974	43,6	29,5	23,0	20,7	39,2	63,0	59,0	60,6	51,9	68,3	52,3	57,2
1975	24,8	20,7	15,1	14,9	19,9	45,4	53,0	85,1	96,3	78,1	85,1	106,9
1976	49,3	30,1	20,3	18,5	43,8	68,5	72,9	58,3	63,6	53,0	75,9	38,8
1977	25,7	17,1	16,8	16,3	24,2	42,8	49,3	64,0	52,4	71,6	50,0	27,2
1978	18,5	24,1	18,8	16,5	25,9	40,5	41,5	53,2	69,2	68,7	54,0	38,2
1979	22,2	16,1	15,5	35,6	44,4	58,4	51,9	67,4	66,8	70,0	58,4	40,0
1980	34,9	36,8	18,0	16,3	32,1	66,0	60,5	56,9	77,9	55,6	66,6	90,5
1981	47,9	30,6	31,2	36,1	59,0	71,0	54,9	55,1	66,4	66,8	102,8	60,3
1982	33,4	22,0	16,6	14,2	32,0	53,5	66,4	47,8	68,0	88,4	60,3	29,1
1983	27,3	14,5	15,4	12,4	46,6	51,5	48,2	48,6	68,3	89,9	80,7	39,1
1984	52,4	34,2	33,2	16,3	34,1	56,1	64,1	60,7	80,4	70,3	65,2	57,4
1985	33,0	26,6	20,4	16,5	20,2	59,8	46,1	56,4	60,2	61,1	53,6	30,2
1986	34,1	21,6	30,0	22,9	29,6	49,1	53,3	40,9	45,6	72,9	41,4	27,6

Cuadro 6A. Curva hipsométrica original.

(VOLUMEN EN METROS CUBICOS) (NIVEL EN METROS)										
PENDIENTE INICIAL :			10000.00			PENDIENTE FINAL :			2800000.00	
NIVEL	+ 0.0	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.3	+ 0.4	+ 0.5	+ 0.6	+ 0.7	+ 0.8	+ 0.9
930	0	964	1861	2690	3457	4163	4810	5402	5941	6431
931	6873	7269	7624	7940	8219	8463	8676	8861	9019	9154
932	9268	9364	9445	9512	9570	9620	9666	9709	9753	9800
933	9854	9915	9988	10075	10178	10301	10445	10615	10811	11037
934	11296	11590	11922	12294	12710	13172	13682	14244	14859	15531
935	16262	17055	17910	18828	19811	20858	21969	23147	24390	25702
936	27080	28526	30042	31627	33282	35008	36804	38674	40616	42632
937	44720	46883	49123	51437	53829	56297	58842	61467	64170	66954
938	69816	72759	75786	78893	82084	85357	88714	92158	95685	99300
939	102999	106786	110662	114625	118680	122821	127053	131379	135793	140302
940	144902	149595	154386	159270	164254	169334	174514	179798	185182	190673
941	196265	201964	207773	213688	219717	225854	232104	238471	244950	251549
942	258262	265095	272052	279126	286328	293650	301097	308676	316378	324214
943	332176	340271	348503	356865	365368	374003	382777	391695	400749	409951
944	419290	428775	438411	448189	458121	468198	478425	488812	499345	510041
945	520886	531889	543057	554379	565870	577516	589326	601309	613451	625769
946	638248	650898	663728	676723	689900	703245	716767	730476	744356	758425
947	772668	787094	801715	816512	831505	846679	862042	877606	893353	909303
948	925439	941771	958311	975040	991979	1009110	1026443	1043992	1061735	1079695
949	1097853	1116221	1134810	1153599	1172614	1191831	1211264	1230927	1250795	1270896
950	1291205	1311736	1332504	1353483	1374700	1396130	1417787	1439687	1461801	1484160
951	1506736	1529545	1552600	1575876	1599401	1623148	1647132	1671368	1695829	1720546
952	1745488	1770672	1796115	1821786	1847719	1873881	1900290	1926964	1953870	1981043
953	2008450	2036109	2064039	2092205	2120643	2149320	2178254	2207463	2236914	2266642
954	2296614	2326847	2357361	2388121	2419165	2450455	2482012	2513857	2545950	2578334
955	2610968	2643874	2677075	2710532	2744289	2778308	2812610	2847220	2882098	2917290
956	2952754	2988515	3024597	3060958	3097646	3134619	3171900	3209516	3247423	3285670
957	3324213	3363078	3402290	3441805	3481673	3521849	3562359	3603230	3644415	3685967
958	3727837	3770054	3812647	3855564	3898862	3942490	3986477	4030852	4075564	4120670
959	4166118	4211937	4258158	4304727	4351704	4399033	4446746	4494875	4543364	4592273
960	4641547	4691216	4741309	4791761	4842632	4893857	4945463	4997479	5049839	5102604
961	5155706	5209174	5263040	5317233	5371817	5426722	5481979	5537619	5593571	5649901
962	5706535	5763507	5820847	5878484	5936484	5994774	6053385	6112352	6171599	6231196
963	6291066	6351244	6411763	6472546	6533665	6595042	6656711	6718708	6780953	6843520
964	6906329	6969416	7032816	7096449	7160390	7224557	7288987	7353717	7418663	7483904
965	7549355	7615058	7681066	7747317	7813908	7880777	7947982	8015580	8083507	8151864
966	8220585	8289728	8359354	8429395	8499955	8570964	8642483	8714574	8787166	8860366

NIVEL	+ 0.0	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.3	+ 0.4	+ 0.5	+ 0.6	+ 0.7	+ 0.8	+ 0.9
967	8934101	9008433	9083427	9159007	9235285	9312183	9389766	9468100	9547105	9626898
968	9707396	9788667	9870778	9953647	10037391	10121927	10207323	10293649	10380818	10468952
969	10557963	10647921	10738900	10830805	10923767	11017690	11112648	11208716	11305796	11404023
970	11503295	11603686	11705257	11807882	11911682	12016528	12122478	12229596	12337746	12447058
971	12557394	12668818	12781395	12894985	13009722	13125463	13242275	13360225	13479168	13599244
972	13720304	13842417	13965655	14089864	14215193	14341485	14468813	14597253	14726643	14857138
973	14988577	15121034	15254588	15389073	15524649	15661147	15798647	15937230	16076723	16217293
974	16358766	16501222	16644748	16789163	16934641	17081002	17228329	17376711	17525962	17676262
975	17827424	17979539	18132713	18286777	18441933	18598009	18755115	18913364	19072579	19232971
976	19394360	19556859	19720585	19885354	20051384	20218487	20386781	20556387	20727112	20899182
977	21072402	21246893	21422780	21599863	21778375	21958115	22139205	22321776	22505619	22690976
978	22877636	23065728	23255384	23446389	23638993	23832976	24028471	24225616	24424185	24624438
979	24826145	25029446	25234481	25441017	25649321	25859155	26070663	26283991	26498895	26715652
980	26934016	27154126	27376102	27599647	27825009	28051890	28280402	28510660	28742360	28975760
981	29210549	29446847	29684773	29924013	30164834	30406917	30650386	30895364	31141529	31389155
982	31637918	31887942	32139357	32391831	32645648	32900474	33156439	33413675	33671844	33931236
983	34191511	34452801	34715243	34978491	35242843	35507951	35773951	36040983	36308696	36577391
984	36846718	37116814	37387820	37659382	37931806	38204736	38478312	38752677	39027473	39303011
985	39578928	39855371	40132493	40409941	40688039	40966436	41245285	41524743	41804456	42084750
986	42365269	42646170	42927610	43209232	43491366	43773653	44056251	44339319	44622496	44906115
987	45189816	45473756	45758096	46042475	46327224	46611984	46896912	47182170	47467394	47752920
988	48038383	48323945	48609766	48895482	49181428	49467241	49753082	50039110	50324963	50610976
989	50896784	51182549	51468431	51754066	52039790	52325239	52610573	52895954	53181017	53466097
990	53750832	54035385	54319935	54604143	54888363	55172258	55456008	55739796	56023283	56306824
991	56590080	56873234	57156466	57439439	57722506	58005331	58288095	58570977	58853642	59136443
992	59419042	59701621	59984361	60266924	60549664	60832245	61114846	61397649	61680317	61963203
993	62245970	62528800	62811873	63094851	63378090	63661251	63944515	64228064	64511560	64795357
994	65079117	65363022	65647254	65931473	66216035	66500602	66785354	67070475	67355624	67641157
995	67926736	68212538	68498728	68784944	69071520	69358094	69644827	69931879	70218888	70506190
996	70793421	71080742	71368314	71655774	71943459	72231004	72518571	72806321	73093890	73381615
997	73669132	73956602	74244187	74531522	74818945	75106091	75393122	75680200	75966959	76253738
998	76540171	76826421	77112647	77398489	77684280	77969658	78254784	78539818	78824398	79108859
999	79392840	79676500	79959998	80242976	80525764	80808005	81089856	81371476	81652509	81933282
1000	82213440	82493141	82772540	83051285	83329700	83607434	83884641	84161478	84437592	84713307

VOLUMEN MAXIMO= 53750832 m³

VOLUMEN MINIMO= 4641547 m³