

**UNA METODOLOGIA DE EVALUACION INTEGRAL DE ALTERNATIVAS
PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES Y SU ILUSTRACION EN
LA CUENCA DEL RIO ESCALANTE**

Por:

Alex G. Barrios R.

**Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en
Planificación de los Recursos Hidráulicos**

**CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
INTEGRAL DE AGUAS Y TIERRAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MERIDA - VENEZUELA
1985**

A mis seres queridos

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, CONICIT, por el apoyo financiero brindado, necesario para llevar a cabo mis estudios del postgrado.

Al CIDIAT, por haberme permitido realizarlos y a Roberto y Alberto por ser los de la idea.

A todo el personal Docente, Administrativo y Obrero del CIDIAT, por el trato y colaboración brindada.

Al Dr. R. Amisial, guía del desarrollo del presente trabajo. Al Dr. H. Jégar e Ing. M. Sc. T. Banes por la colaboración prestada.

Al personal de Laboratorio de Computación y Proyectos.

Al personal de la Oficina del MARNR, Zona 5 ubicada en el Vigía, especialmente a los Ing. Molina y Galvis.

A mis compañeros de Postgrado.

A todas aquellas personas amigas que me brindaron su ayuda desinteresada y sincera.

INDICE

Página

AGRADECIMIENTO.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
 Capítulo	
I. INTRODUCCION	1
Planteamiento de la Problemática.....	1
Revisión Bibliográfica.....	3
Obras de control existente.....	10
La necesidad de un plan de manejo de la planicie inundable..	11
Objetivos e importancia de estudio.....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.....	12
Importancia del estudio.....	13
Metodología del estudio.....	14
Presentación del trabajo.....	16
II. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	19
Introducción.....	19
Características físicas.....	22
Localización y extensión.....	22
Fisiografía.....	24
Hidrografía y drenaje.....	24
Clima.....	28
Geología y Litología.....	31
Geomorfología.....	33
Suelos y capacidad de uso.....	34
Vegetación.....	36
Características socio-económicas.....	38
Población.....	39
Tenencia y distribución de la tierra.....	43
Uso actual de las tierras.....	45
Sistema de explotación y mercadeo.....	48

INDICE (Continuación)

	Página
Política crediticia y predominio de la actividad pecuaria en la z.s.l.m.	50
Producción agropecuaria.....	52
Demanda y oferta del recurso hidráulico.....	53
Infraestructura.....	54
Importancia económica.....	58
Evaluación de daños por inundaciones.....	58
III. ESTUDIO HIDROLOGICO. CAUDALES.....	61
Introducción.....	61
Descripción del modelo.....	61
Metodología aplicada.....	65
Calibración del modelo. Fase I.....	67
Calibración preliminar y discusión de resultados.....	69
Estrategia para la calibración.....	73
Resultados de la calibración. Fase I.....	81
Calibración del modelo. Fase II.....	83
Precipitación de diseño.....	92
IV. ESTUDIO HIDROLOGICO SEDIMENTOS.....	113
Introducción.....	113
Metodología aplicada.....	116
Producción de sedimentos.....	117
Descripción de la ecuación universal de pérdida de suelo, "USLE" y la modificación para su uso en la predicción de la producción de sedimentos "MUSLE".....	117
Erodabilidad del suelo, Factor K.....	123
Topografía, Factor LS.....	127
Cubierta vegetal y manejo, Factor C.....	135
Prácticas de conservación, Factor, P.....	138
Estimación de los factores K, C y LS en la cuenca de estudio.....	140
Retención de sedimentos.....	152
Métodos de retención de sedimentos por un Embalse.....	153
Características de los embalses hipotéticos.....	158

INDICE (Continuación)

	Página
V. METODOLOGIA DE EVALUACION DE ALTERNATIVAS.....	161
Introducción.....	161
Alternativas para el control de daños por inundaciones...	162
Medidas convencionales.....	162
Medidas no convencionales.....	167
Alternativas seleccionadas para ilustrar la metodología de evaluación.....	171
Procedimiento para evaluar las consecuencias de las alternativas en la reducción de daños por inundaciones, mediante el uso del modelo hidrológico.....	172
Alternativa cero o no hacer nada.....	177
Alternativa de reforestación en las cuencas altas.....	184
Alternativa "zoba filtro" o diques marginales en forma de embudo, a lo largo de la margen izquierda del río Morotuto y la margen derecha del río Escalante.....	185
Alternativas de zonificación de la planicie inundable.....	188
VI. APLICACION DE LA METODOLOGIA: RESULTADOS.....	191
Introducción.....	191
Alternativa cero.....	192
Alternativa de reforestación en las cuencas altas.....	201
Alternativa de zonificación de la planicie inundable..	213
VII. EVALUACION ECONOMICA DE LAS ALTERNATIVAS. ANALISIS Y DISCUSION.....	227
Introducción.....	227
Alternativa cero.....	229
Alternativa de reforestación.....	230
Alternativa de zonificación.....	232
Análisis y discusión.....	233
VIII. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	239
Introducción.....	235

INDICE (Continuación)

	Página
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	253
LITERATURA CITADA.....	259
APENDICE A. EVALUACION DE DAÑOS POR INUNDACIONES.....	265
APENDICE B. CARACTERISTICAS DEL MODELO STANFORD IV.....	279
APENDICE C. ANTECEDENTES EN LA CALIBRACION DE UN MODELO HIDROLO- GICO EN LA CUENCA DEL RIO ESCALANTE.....	315
APENDICE D. EVALUACION DEL FACTOR C DE LA "USLE" EN TIERRAS FO- RESTALES.....	323
APENDICE E. SELECCION DE AREAS A REFORESTAR.....	345

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Resumen de características morfométricas.....	25
2	Capacidad de uso de los suelos de la cuenca alta y media del río Escalante.....	34
3	Capacidad de uso de los suelos de la planicie Z.S.L.M.....	36
4	Capacidad de uso comparativa: con drenaje sin drenaje.....	36
5	Cuadro resumen de cobertura y uso actual de las tierras. Cuenca alta y media.....	39
6	Población total por municipios en el área de estudio y para la Z.S.L.M., años 1950, 1961, 1971, 1981.....	40
7	Densidad de población (hkm ²) por municipios de la cuenca en estudio y para la Z.S.L.M.....	41
8	Distribución por grupos de edades Z.S.L.M.....	41
9	Población urbana y rural dentro de los municipios del área en estudio y para la Z.S.L.M.....	43
10	Clasificación de las unidades de producción según tipo de actividad y número de propietarios.....	44
11	Uso de la tierra por municipios dentro de la cuenca de estudio. 1981.....	45
12	Porcentaje de uso de la tierra en municipios de la cuenca en estudio y para la Z.S.L.M.....	46
13	Destino de los créditos agropecuarios período 74-75.....	51
14	Cultivo y producción del plátano por Estados. años 78,79,80.	53
15	Áreas productoras de leche cruda. Z.S.L.M. año 1982.....	54
16	Tierras saneadas Z.S.L.M. 1980.....	56
17	Daños por inundaciones en la zona rural del río Escalante....	59
18	Parámetros usados en el modelo Stanford IV.....	64

LÍSTA DE TABLAS (Continuación)

19	Estaciones pluvio-evaporimétricas usadas en la calibración. Fase I.....	69
20	Resumen mensual del Modelo Stanford IV. Resultados obtenidos por Rivera y el MARNR. Creciente 1970.....	72
21	Parámetros del Modelo Stanford IV. Resultado de la Calibración Fase I.....	82
22	Estaciones pluvio-evaporimétricas usadas en la calibración Fase II.....	85
23	Histograma tiempo-área. Cuenca Fase II,.....	88
24	Valores de NN, K3, EPXM en función de la cobertura vegetal.....	89
25	Valores de NN, K3, EPXM por segmentos en las cuencas Fase II.....	90
26	Valores de NN, K3, EPXM asignados en la calibración de las cuencas Fase II.....	91
27	Valores de los parámetros. Resultado de la calibración Fase II. Cuenca de los ríos Grande y Pajita.....	93
28	Valores de los parámetros. Resultado de la calibración Fase II. Cuenca de los ríos Escalante y Onía.....	95
29	Estaciones pluviográficas usadas en el análisis de la precipitación de diseño.....	101
30	Crecientes máximas anuales del río Escalante en la Ferreira..	102
31	Factores de Thiessen para la cuenca del río Escalante.....	105
32	Período de retorno de la precipitación total caída durante el evento de Noviembre-Diciembre de 1975.....	107
33	Distribución espacial del volumen total precipitado durante los meses de Noviembre-Diciembre de 1975.....	108
34	Precipitaciones de dos meses de duración para diferentes períodos de retorno.....	110
35	Ecuación de regresión múltiple de Wisschmeir y Mannering para la estimación del factor K.....	125

LISTA DE TABLAS (Continuación)

36	Valores de C para algunas condiciones de Africa Occidental.....	136
37	Valores de C para algunos cultivos y formaciones vegetales en Africa y Madagascar.....	137
38	Valores de C para pastos permanente y pastizales.....	137
39	Valores de P y límites críticos de longitud y pendiente.....	139
40	Valores de K por sectores o subcuencas.....	143
41	Cobertura vegetal por sectores o subcuencas.....	144
42	Cobertura en porcentaje de la vegetación boscosa.....	146
43	Valor de C para los tipos de vegetación predominante.....	147
44	Valores de C para cada sector o subcuenca.....	147
45	Factor topográfico por sectores (1era. aproximación).....	149
46	Resultado preliminar de aplicar la "MUSLE" usando valores de LS sobre-estimados.....	149
47	Aplicación de los métodos de la longitud de contornos y puntos extremos de contorno en la cuenca alta del río Morotuto.....	150
48	Valores de λ , p y LS en un caso de estudio presentado en Londres 1982.....	151
49	Valores de λ , p y LS por sectores o subcuencas.....	152
50	Valores de K y γ para arenas, limos y arcillas.....	157
51	Capacidad estimada para los embalses hipotéticos.....	159
52	Escorrentía anual simulada en millones de m ³	160
53	Cálculo del valor promedio esperado de daños anuales.....	174
54	Alternativa Cero: caudales máximos del río Escalante en la Ferreira, sin considerar el efecto de los sedimentos.....	193

LISTA DE TABLAS (Continuación)

55	Alternativa Cero: Daño anual esperado por inundaciones en la cuenca rural del Escalante, sin considerar el efecto de los sedimentos.....	194
56	Alternativa Cero: Producción anual de sedimentos en las cuencas Fase II.....	197
57	Alternativa Cero: Retención de sedimentos en los embalses hipotéticos y aporte aguas abajo.....	198
58	Alternativa Cero: Daño anual esperado por inundaciones en la cuenca rural del Escalante, considerando el efecto de los sedimentos....	199
59	Alternativa Cero: Daño anual esperado por inundaciones en la cuenca rural del Escalante, considerando el efecto de los sedimentos.....	200
60	Alternativa de Reforestación: cobertura vegetal en porcentaje después de la reforestación,.....	201
61	Alternativa de Reforestación: Estimación de la infiltración potencial relativa entre pastos, bosque medio y bosque alto.....	203
62	Alternativa de Reforestación: Valores estimados de x, y, z por estación de parámetros, en la calibración Fase II.....	205
63	Alternativa de Reforestación: Valores de CB.....	206
64	Alternativa de Reforestación: Valor del factor C de la "MUSLE" para los sectores al sur de la Panamericana.....	207
65	Alternativa de Reforestación: Caudales máximos del río Escalante en la Ferreira, sin considerar el efecto de los sedimentos.....	208
66	Alternativa de Reforestación: Daño anual por inundaciones en la cuenca rural del Escalante, sin considerar el efecto de los sedimentos.....	208
67	Alternativa de Reforestación: producción anual de sedimentos en las cuencas Fase II.....	210

LISTA DE TABLAS (Continuación)

68	Alternativa de Reforestación: Retención de sedimentos en los embalses hipotéticos y aporte aguas abajo.....	211
69	Alternativa de Reforestación: Caudales máximos del río Escalante en la Ferreira, considerando el efecto de los sedimentos.....	212
70	Alternativa de Reforestación: Daño anual esperado por inundaciones en la cuenca rural del Escalante, considerando el efecto de los sedimentos.....	212
71	Alternativa de Zonificación: Carga animal y precio comercial por hectárea para diferentes grados de mecanización de los pastos.....	220
72	Alternativa de zonificación: Estimación del daño promedio por hectárea para diferentes grados de mecanización de los pastos.....	221
73	Alternativa de zonificación: Estimación de la relación caudal-área inundada.....	222
74	Alternativa de zonificación: Daño anual esperado sin zonificación.....	223
75	Alternativa de zonificación: daño anual esperado con zonificación.....	224
76	Alternativa de zonificación: daño anual esperado con zonificación.....	225
77	Determinación de beneficios y costos de la producción pecuaria por hectárea.....	229
78	Estimación de costos y beneficios anuales. Alternativa Cero.....	230
79	Estimación de costos y beneficios anuales. Alternativa de Reforestación.....	231
80	Estimación de costos y beneficios anuales. Alternativa de zonificación.....	232
81	Resumen de resultados de la evaluación económica.....	233

LISTA DE TABLAS (Continuación)

82	Resultados de la evaluación económica. Alternativa de zonificación.....	236
83	Daño anual por inundaciones. Resumen de los resultados del capítulo VI.....	240
84	Relación máxima de volumen almacenado - caudal de descarga en los embalses hipotéticos, durante la calibración Fase I.....	244
85	Caudales afluentes y efluentes en los embalses hipotéticos.....	248
86	Caudales máximos comparativos entre las alternativas cero y de reforestación.....	249
87	Sedimentos producidos con y sin reforestación.....	251

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Región N° 1 COPLANARH.....	20
2	Límites de la zona sur del Lago de Maracaibo.....	21
3	Paisajes Fisiográficas y conjuntos sedimentarios.....	23
4	Patrón de drenaje, Zona Sur del Lago de Maracaibo.....	26
5	Isoyetas medias anuales, Zona Sur del Lago de Maracaibo.....	30
6	Isopletas medias anuales, Zona Sur del Lago de Maracaibo.....	32
7	Capacidad de uso de la tierra Z.S.L.M.....	37
8	Evolución del uso de la tierra z.s.l.m. 1957-1968-1981.....	47
9	Relación caudal-daños-área inundada.....	60
10	Estructura del modelo Stanford IV.....	63
11	Segmentación inicial de la cuenca del Escalante para la calibración Fase I.....	68
12	Hidrogramas observado y simulado, Creciente de 1970.....	70
13	Segmentación de la cuenca del Escalante para la calibración Fase II.....	76
14	Curvas de áreas y capacidades, Embalse Onía.....	78
15	Curva de la descarga por aliviadero, Embalse Onía.....	79
16	Curvas de K variable usadas en la calibración Fase I.....	83
17	Curvas de los embalses hipotéticos, Resultado de la calibración Fase I.....	84
18	Segmentación esquemática de las cuencas Fase II.....	87
19	Curvas de los embalses hipotéticos, Resultado de la Calibración Fase II.....	99
20	Hidrograma diario observado de la creciente de Diciembre 1975.....	100

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

Figura		Página
21	Nomograma de Wischmeier y Smith para estimar el factor K..	126
22	Ejemplos de longitud de pendiente.....	129
23	Cuenca hipotética que muestra el contorno, puntos extremos y contorno base.....	131
24	Factor topográfico LS como función de λ y p.....	134
25	Curvas de Brunne para retención de sedimentos en embalses.	155
26	Representación esquemática de la cuenca del río Escalante.	179
27	Esquema del modelo Stanford IV para la evaluación del daño anual esperado por inundaciones en la cuenca del río Escalante.....	180
28	Aplicación de métodos del valor esperado en zonificación del uso de la tierra.....	189
29	Alternativa de zonificación: secciones transversales de cauce y planicie.....	216
30	Alternativa de zonificación: Mancha de inundación de 50 y 100 años de retorno. Río Escalante, tramo Ferreira - Río Grande.....	218

RESUMEN

En este estudio se presentan diferentes aspectos de carácter técnico general, que a nivel de la Planificación permita evaluar diferentes tipos de alternativas para el control de las aguas y sedimentos y/o reducción de los daños por inundaciones en la cuenca del río Escalante.

En primer término se identifica y caracteriza detalladamente el sistema o cuenca hidrográfica bajo estudio, de tal manera que las causas de las inundaciones y el problema que éstas ocasionan puedan conocerse de la manera más explícita posible.

En segundo lugar y como consecuencia de lo anterior, se realiza un estudio hidrológico a nivel de caudales y sedimentos. Para el estudio de los caudales se hace uso del modelo de simulación paramétrica Stanford IV. Para los sedimentos se aplica la ecuación de predicción de la producción de sedimentos en una cuenca "MUSLE", la cual es una modificación de la ecuación universal de pérdida de suelo.

Debido a que mediante el modelo Stanford IV se puede resolver parcialmente el problema de escasez de información fluvioigráfica dentro de la cuenca en estudio, se detallan extensamente diferentes aspectos teórico-prácticos referentes al modelo de simulación y su aplicación en la cuenca del río Escalante. De manera análoga y con el fin de conocer con mayor certeza la bondad que la "MUSLE" tiene cuando se aplica a cuencas grandes del país, se lleva a cabo una detallada aplicación de la misma.

En tercer término se discuten los diferentes tipos de alternativas para el control de inundaciones, y se desarrolla un procedimiento de evaluación, basado en el uso del modelo de simulación calibrado para la cuenca en estudio, que permita cuantificar las consecuencias que algunas alternativas de tipo convencional tienen en el control de las aguas y de los sedimentos; y con ello, en la reducción de daños por inundaciones. También se presenta el procedimiento a seguir para evaluar qué consecuencias tienen medidas no

convencionales, como la zonificación de la planicie inundable, en la reducción de los daños por inundaciones.

Por último se presentan los resultados de aplicar la metodología desarrollada a las alternativas seleccionadas. Las cuales son de carácter ilustrativo principalmente, y no pueden considerarse como concluyentes para ser usados en la toma de decisiones.

Finalmente, y como complemento a la metodología desarrollada, se ilustra la evaluación económica de las alternativas seleccionadas, haciéndose un análisis y discusión de la misma.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Planteamiento de la Problemática

A través del decreto 557 del 19 de Noviembre de 1974 se fija el marco físico de la Unidad Sur del Lago de Maracaibo (Venezuela, Presidencia de la República 1974). Se declara Reserva Nacional Hidráulica a la porción de territorio y a las aguas ubicadas dentro del área de la Zona Sur del Lago de Maracaibo, z.s.l.m, que están comprendidas en los Distritos Coión del Estado Zulia, Jáuregui y Panamericana del Estado Táchira y Alberto Adriani y Andrés Bello del Estado Mérida. Se declara además Zona Protectora a las cuencas altas y de piedemonte hasta la carretera panamericana, las cuales forman parte del área objeto de estudio.

La z.s.l.m. es de gran importancia para el desarrollo agropecuario del país, debido al potencial agrícola y pecuario de sus tierras y las abundantes recursos hidráulicos de que dispone. Aunque en la actualidad es uno de las zonas agropecuarias de mayor producción del país, persisten una serie de limitaciones de orden físico, social y económico que frenan al desarrollo de la región. Entre las limitaciones de orden físico las inundaciones periódicas juegan un papel muy importante, debido al alto porcentaje de vialidad y desarrollo agropecuario afectado. Los informes de las inundaciones reportan, por ejemplo, daños del orden de los 7,25 y 160 millones de bolívares, para la zona rural del río Escalante, en los años 72, 75 y 82 respectivamente (MOP 1972, 1976a; MARNR 1983a).

Para el desarrollo de las tierras de la z.s.l.m. se han saneado parcialmente gran cantidad de tierras, persistiendo en la actualidad problemas por inundaciones del río Escalante y algunos de sus tributarios. Hasta ahora se ha realizado una fuerte inversión sin que todavía se resuelva el problema de las inundaciones periódicas, tal como lo demuestran los daños de 1982.

El enfoque dado a algunos proyectos de control de crecientes ejecutados hasta ahora, es de resolver un problema local en un área conflictiva, más que alcanzar un uso eficiente de la planicie inundable. La selección de estos proyectos se hace con presiones psicológicas y políticas que ocurren cuando un sector de la comunidad se ve afectado directamente de manera drástica. En esta situación casi no existen alternativas a escoger y en muchos casos las soluciones están dadas a priori, sobre todo si se ven amenazadas vidas humanas.

Los estudios realizados para los proyectos de control de inundaciones, ejecutados hasta la fecha, se han hecho de manera aislada y localizada, ocurriendo algunas veces que después de dar solución al problema local, surjan otros no previstos por falta de integralidad en los estudios. De allí que ocurran una serie de problemas concatenantes cuya solución parcial cada vez que se presentan, implicaría una duplicación de esfuerzos y recursos. Un caso es la obra de desvío parcial del río Escalante hacia la Laguneta del Zulia, para proteger las poblaciones de San Carlos y Sta. Bárbara del Zulia. Para su diseño no se considera el uso de las tierras aguas arriba y en la actualidad corre el riesgo de que su vida útil disminuya como consecuencia del aumento en la producción de sedimentos. Lo mismo es aplicable a los diques marginales proyectados a lo largo del río Escalante, aguas arriba de la estructura de desvío. Al respecto Trica,rt (1972) dice que el encauzamiento del río Escalante entre diques aguas abajo hacia la Laguneta del Zulia, tendría más eficiencia si se pudiera mejorar las condiciones hidrológicas y geomorfológicas en la cuenca ubicada aguas arriba.

Es entonces cuando surge la necesidad de realizar estudios más integrales que permitan evaluar diferentes alternativas posibles. El presente estudio busca desarrollar una metodología aplicable al área objeto de estudio, que permita evaluar las consecuencias de diversas alternativas sobre el proceso de inundaciones.

La hidrología, especialmente la escasez de información fluvioigráfica, ha sido la limitación más general en el dimensionamiento de las obras hidráu-

licas construidas hasta la fecha. Aún cuando se han realizado diversos estudios, a través de modelos hidrológicos, con el fin de generar información fluviográfica en diversos sitios donde se carece de tal información, existe desconfianza en cuanto a la calidad de estos estudios por el hecho de presentar resultados muy diferentes entre sí. De allí que surja la necesidad de realizar un nuevo estudio hidrológico que basándose en los antecedentes permita calificar mejor a aquellos.

El problema de las inundaciones en la z.s.l.m. por desbordes de los cauces, está relacionado no sólo con los volúmenes de escorrentía, sino también con el de sedimentos, que reducen la capacidad de los cauces. Actualmente se considera importante la incorporación de los sedimentos dentro del estudio hidrológico debido a la experiencia que se tiene con algunas obras ejecutadas hasta el presente, el caso más relevante es la presa "Ing. Víctor Martín Elvira" sobre el río Onía. La cual, de acuerdo a conversaciones con el personal encargado de su operación en la actualidad, ha acumulado en un período de 5 años más sedimento que el esperado según el diseño de la obra.

Revisión Bibliográfica

Se presenta aquí en primer término los planteamientos de diversos autores acerca del mecanismo de las inundaciones, sus causas, líneas generales para su control. En segundo término se hace una breve revisión de la literatura existente y las metodologías usadas en los estudios tendientes al control de inundaciones. Finalmente se revisan criterios generales sobre este último aspecto.

Kijewski en Febrero de 1967, citado por Abi Saab (1972), plantea que los daños causados por ríos y quebradas en la carretera Panamericana demuestran claramente que las deforestaciones efectuadas en la parte alta de las hoyas y en el piedemonte, han incrementado rápidas y devastadoras movilizaciones de masas de agua, de escorrentía difusa y concentrada, cargada de sedimentos y residuos de deforestaciones. Kijewski hace la advertencia de que las obras están orientadas hacia la protección de la zona central y norte, dejando vir-

tualmente desprovista la parte sur o de piedemonte. Dicho en 1967 y aún en 1984 sigue siendo válida.

Propone como solución a la problemática del piedemonte la protección de la hoya y la del piedemonte de la cuenca recolectora de los ríos Escalante y Orope, declarándolos Reserva de Protección Hidrográfica.

El mismo Kijewski en Junio de 1970, citado por Abi Saab (1972), opina que los límites aceptables para las explotaciones ganaderas racionales han sido ampliamente sobrepasados, produciendo las consecuencias aguas abajo por el desequilibrio ecológico inducido en el piedemonte. Expresa como solución al problema de inundaciones y sedimentación una posible rectificación y profundización de cauces de los torrentes y/o protección por medio de diques marginales. Recomienda a su vez la medida de delimitar la zona de las cuencas declarándolas como zonas de protección y hasta cercarlas y dejarlas bajo cuidado de la Guardia Nacional.

Linsley en Enero de 1971, citado por Abi Saab (1972), dice que ninguno de los tributarios en la cabecera del Escalante es capaz de mover su carga de sedimentos a través de la llanura costera. En lugar de ello, los sedimentos se depositan en una franja que se encuentra justamente al Norte de la carretera Panamericana. Estos sedimentos son bastante permeables. El curso principal del río Escalante está alimentado en gran parte por la infiltración del agua subterránea que se encuentra a poca profundidad procedente de estos depósitos permeables, por lo tanto, transporta una cantidad de sedimentos relativamente pequeña. Debido a esta infiltración aparece una condición de nivel freático elevado. Debido a que se sugiere, para reducir el problema de drenaje, la construcción de un canal interceptor que recoja el caudal, y lo lleve al Escalante antes de que las aguas lleguen a la zona de infiltración, Linsley advierte que esto soluciona el drenaje, pero aumenta el aporte al Escalante con la consecuente inundación aguas abajo. Recalca que la zona de infiltración es un gran embalse que almacena al caudal de los tributarios y lo libera lentamente como flujo subsuperficial al Escalante, siendo un factor importante en la mitigación de las inundaciones aguas abajo.

Linsley de nuevo en Septiembre de 1971, citado por Abi Saab (1972), refiriéndose al problema del piedemonte dice que los tributarios del Escalante han ido erodando y moviendo aguas abajo, viejos depósitos glaciares. Una explicación posible de los problemas recientes es que una nueva fuente de sedimentos finos ha sido disponible por la deforestación y uso agrícola de las laderas de montaña al Sur de la carretera Panamericana. No solamente esto proporciona sedimentos finos, los cuales son depositados aguas abajo, sino que debe ciertamente incrementar el escurrimiento aumentando así el problema de inundación. Advierte que hasta que las deforestaciones crecientes sean paradas y las tierras actualmente ya deforestadas retornen a una cobertura de protección, el desarrollo del sector Norte del Escalante es imposible excepto en pequeñas áreas donde existe una razonable seguridad de no inundación. Cree el autor que la prioridad máxima debería ser dirigida hacia el problema de parar la deforestación de las laderas inclinadas y replantar ya las pendientes deforestadas.

Silvestre y Medina (1971) refiriéndose al sector entre el río Grande al Norte y la carretera Panamericana al Sur, manifiestan que, cualquier problema de saneamiento del sector está íntimamente supeditado a medidas drásticas, tendientes a la protección de las cuencas del piedemonte. Consideran que aún así, en gran parte del sector la situación no podrá ser controlada, lo que implicaría cuantiosos gastos, por concepto del mantenimiento y corta vida útil de las obras de canalización.

Tricart (1972) señala que la degradación de la faja andina es poco acentuada. A pesar de la topografía accidentada, las pequeñas subcuencas proporcionan poco material de arrastre a las cuencas mayores. La débil degradación de las laderas, a pesar de la pendiente, es una consecuencia del clima húmedo que favorece la vegetación y del sistema de cultivos, en el cual los potreros predominan, existiendo pocas tierras labradas. El escurrimiento durante las lluvias intensas es substancialmente aumentado cuando se quita el bosque para desarrollar potreros. El escurrimiento es más rápido y el tiempo de concentración disminuye, lo que aumenta el caudal del pico de las crecientes, no solamente en los pequeños tributarios sino también en los ríos mayores. La

tendencia de los pequeños tributarios es limpiar y ensanchar su lecho. Los ríos más importantes son muy activos por la misma razón. Ellos socavan sus orillas y retoman grandes cantidades de material grueso depositado en los valles y el piedemonte. El abundante material de arrastre grueso que se observa en los cauces tiene este origen, no viene de las laderas. La abundancia de material grueso de los ríos, provoca la inestabilidad de sus lechos. La deposición de materiales obstaculiza el escurrimiento y provoca un socavamiento de orillas, que aumenta a su vez la cantidad de material de arrastre. Estos procesos funcionan a la altura de la Panamericana y explican los daños que causan a la carretera. Aguas abajo, la disminución de la pendiente torna difícil el arrastre. El material tiende a depositarse y tapa los lechos cada vez que hay obstáculo. Así se originan los desbordamientos, acompañados de derrames y de difluyentes. Más abajo aún, el agua desparramada se concentra difícilmente y las inundaciones afectan grandes superficies, durando mucho tiempo por la insuficiencia de la pendiente.

Ecosa (1977), describe el mecanismo de desequilibrio fluvial de los ríos de la cuenca media del Escalante, el cual parte del incremento del escurrimiento hídrico por deforestaciones del bosque en áreas de elevada pendiente. Este mecanismo es el mismo presentando por Tricart (1972). Considera un segundo caso de desequilibrio que puede actuar en combinación con el anterior, el cual se debe al aporte de sedimentos finos provenientes de las cuencas a causa de la intensa actividad antrópica. Como ejemplo de este mecanismo cita a los ríos Onía, Arenoso, Carira y Gríta.

Respecto a las metodologías usadas en la evaluación de alternativas para el control de inundaciones, existen pocos estudios aplicados a las condiciones del país. Gallardo (1973) hace un estudio del control de crecientes en la cuenca baja del río Chama en el cual evalúa alternativas sólo de tipo estructural. El análisis se basa en la asignación de un costo anual a cada alternativa y la determinación del daño anual debido a las crecidas. El costo anual de las obras se calcula a partir del costo total y suponiendo una vida útil de 25 años para diques laterales y 50 años para presas; usando una tasa de descuento del 8%. La cuantificación de daños se hace a partir de una relación li

neal entre daños y caudal pico. El daño anual es calculado aplicando una metodología de valor esperado. Este daño considera además del correspondiente al caudal pico, un daño adicional por reparación de las obras, el cual es de 10% del costo de la obra, si los caudales están entre 10 y 100 años de período de retorno; para caudales mayores supone reposición completa de la obra.

Hace una evaluación económica de proyectos basada en los criterios de Mínimo Costo, máxima relación beneficios menos costos, B-C y beneficios sobre costos, B/C. El costo usado para el primer criterio es la suma del costo anual de las obras más el daño anual esperado por inundaciones. Para los otros criterios el costo usado es solamente el de las obras y el beneficio es la diferencia entre el daño anual esperado en condiciones naturales menos el daño anual esperado al implementarse cada alternativa.

Bandes (1980), hace un estudio de la planicie inundable del río Acarigua. Este estudio considera también medidas estructurales, algunas implementadas y otras en proyecto. Para el análisis de las alternativas determina el daño anual aplicando la metodología del valor esperado. El daño por inundación lo calcula a partir del área inundada y asignando un costo igual a la suma del costo de producción del cultivo más el ingreso que el agricultor deja de percibir. Supone que la inundación ocurre cuando el cultivo está a punto de cosecharse. La evaluación se refiere a los daños evitados por cada alternativa y diferentes combinaciones entre ellos.

El MARNR (1983b) ejecuta un estudio de evaluación de alternativas para control de inundaciones en el río Escalante. Las alternativas se refieren a diferentes tamaños de diques marginales, es decir un solo tipo de medida estructural. El análisis es de tipo económico, usando los criterios B-C y B/C. El costo anual es el de la implementación de cada tamaño de obra. El beneficio es la diferencia entre el daño anual en condiciones naturales y el correspondiente a cada alternativa. El daño anual se calcula de igual manera que lo hace el estudio de Gallardo (1979).

Los estudios anteriores evalúan solo medidas de tipo estructural. En términos generales las medidas más comunes para reducir los daños por inunda-

ciones son, según Linsley y Franzini (1970).

- 1.- Reducción de la escorrentía máxima con vasos de almacenamiento.
- 2.- Encauzamiento de la escorrentía dentro de la sección de un cauce determinado por medio de bordes, muros de encauzamiento, o un conducto cerrado.
- 3.- Reducción de niveles máximos por aumento de las velocidades, a través de mejoramientos y rectificación del cauce.
- 4.- Derivación de las aguas de crecientes por obras de desvío o cauces del alivio.
- 5.- Evacuación y zonificación de la planicie inundable.
- 6.- Trabajos para dejar "a prueba de inundaciones" a ciertas propiedades particulares.
- 7.- Reducción de daños con "manejo de terrenos".

Los estudios anteriores tratan de los cuatro primeras medidas; sobre los últimos tres, casi no existen experiencias en cuencas rurales.

Colmenares (1976), señala la existencia de 3 clases de medidas en el manejo de una planicie de inundación:

- 1.- Acciones dirigidas a modificar las características de la inundación.
- 2.- Acciones dirigidas a ajustar las actividades del hombre en las planicies de inundación.
- 3.- Acciones dirigidas a que el ocupante de la planicie soporte parte de los daños causados por la inundación.

La primera clase se refiere a medidas estructurales de mantenimiento de

cauces: dragado, rectificación, corte de meandros, desviaciones; diques marginales, embalses y obras de ingeniería a nivel de cuenca.

La segunda clase se refiere a medidas no-estructurales de reglamentación del uso de la tierra, protección de edificaciones, reubicación de actividades y, sistemas de pronósticos y evacuación de población.

La tercera clase se refiere a una medida no-estructural que consiste de un sistema de seguro contra daños, basado sobre primas que son equivalentes al riesgo, y en consecuencia, los usuarios acumulan reservas para cubrir el aleatorio daño de las inundaciones.

La evaluación de las medidas dentro de las clases 2 y 3 es difícil. Kuiper (1975) señala que para efectuar un análisis económico adecuado, se necesita una cantidad considerable de datos básicos; posiblemente más de los que hay disponibles para el momento. Sin embargo, el análisis daría de todos modos, ciertos conocimientos sobre la naturaleza del problema, que de no hacerlo, no se llegarían a conocer. Aún más, éste indicaría el tipo de datos básicos que se debe recolectar en el futuro. En relación a los beneficios del control de crecientes, señala que, la eliminación de las avenidas o la reducción de la frecuencia de las mismas, tiene un doble efecto beneficioso. En primer lugar, previene contra el incidente de los daños causados por avenidas. En segundo lugar, estimula el incremento de la producción en las áreas protegidas. A los primeros los divide en:

1.- Daños físicos a las obras y a sus partes, puentes, carreteras. Estos deben estimarse en relación al costo de sustitución o reparación.

2.- Pérdidas en las cosechas agrícolas. Estos deben estimarse en relación a los valores de mercado.

3.- Pérdida de ingreso debido a una interrupción en los negocios. Esto debe estimarse en relación a las mercancías o servicios que se hubieran producido si no hubiera ocurrido la avenida.

4.- Costo del combate de la avenida, y la evacuación, cuidado y rehabilitación de las víctimas de la avenida.

El segundo grupo de beneficios, es decir, el uso más intensivo de la tierra, es similar a los beneficios de los trabajos de recuperación, que en el caso de inundaciones periódicas, consisten en beneficios debido a la construcción de diques que mantengan la avenida fuera de la tierra, excavación de acequias y canales para mantener un nivel freático recomendable.

Obras de control existentes

Se han propuesto y ejecutado, tanto a nivel público como privado, diferentes obras para la mitigación de crecientes y el saneamiento de tierras en la cuenca del río Escalante.

Por carecer de una planificación global, se trata a menudo de soluciones locales que algunas veces afectan negativamente las áreas adyacentes (MARNR, 1984b). Entre las obras públicas, que son las de mayor alcance, se encuentran:

1.- Dique marginal Zulía - Catatumbo. Se trata de un dique de tierra de 141 km de longitud, desde la población de Orope, siguiendo por las márgenes derechas de los ríos Zulía y Catatumbo, hasta el caño Caña Dulce, en las cercanías del Lago de Maracaibo. El primer tramo del dique entre Orope y El Guayabo, impide los desbordes hacia la cuenca del Escalante saneando parcialmente las tierras alrededor del caño La Yuca.

2.- Canalización ríos Orope y Carira. Afecta un área aproximada de 200 km² que se extiende hasta la población de la Fría en el extremo Sur-Oeste de la cuenca. A pesar de que la construcción está casi finalizada, no ha sido puesta en funcionamiento. El objetivo es reducir el área tributaria del Escalante, al trasladar los aportes de estas cuencas al río Zulía.

3.- Embalse Víctor Martín Elvira para la mitigación de crecientes y

control de sedimento del río Onía, situado a 7 kms de la población de El Vigía a nivel de la carretera Panamericana. Protege 50.000 Has aguas abajo de La Presa.

4.- Canalización río Onía - Caño Amarillo. Esta canalización recibe la descarga de la presa sobre el río Onía y la traslada al Escalante 55 kms aguas arriba del punto original de descarga. De esta manera, la obra contribuye al saneamiento de las 50.000 Has beneficiadas por el Embalse del Onía debido a su acción interceptora; pero recarga el cauce del Escalante en su parte media.

5.- Estructura de derivación de crecientes sobre el río Escalante. Puesta en funcionamiento en 1981, esta obra regula los caudales hacia Santa Bárbara y San Carlos, permitiendo un gasto máximo de 200 m³/s. Los excesos de agua, hasta un máximo de 1306 m³/s, se desvían hacia la Laguneta del Zulía a través de un canal artificial.

Se tiene proyectado la construcción de diques marginales a ambas márgenes del Escalante, en un tramo de 20 kms aguas arriba de la estructura de desvío hasta la confluencia con Caño El Padre. Bajo estudio está el tratamiento de otros 59 kms de cauce. El cual consiste en continuar los diques marginales anteriores hasta abrirlos en forma de abanico, donde el correspondiente al de la margen izquierda continuaría aguas arriba por la margen izquierda del caño Morotuto y, en forma similar, el de la margen derecha, continuaría aguas arriba por el caño Amarillo; formándose de esta manera una zona inundable. Esta zona de inundación abarca, según el M.O.P. (1973), 13600 Has para un período de 100 años de retorno, llegando a inundar la confluencia de los ríos Grande y Escalante.

La necesidad de un plan de manejo de la planicie inundable

Las obras de control se diseñan para garantizar solamente cierto grado de protección, el cual siempre es menor que la protección absoluta. La recuperación de la inversión por parte del Estado es difícil, debido a que no

existen elementos de juicio para evaluar los beneficios frente al riesgo no cubierto. El avance acelerado que ha tenido la expansión de la frontera agropecuaria en los últimos años, ha ocasionado que dentro de la planicie se hayan establecido algunos usuarios que tratan de desarrollar alguna actividad, para luego, cuando ocurren inundaciones de gran magnitud, pedir la intervención del gobierno. Otros ocupantes, establecidos desde hace mucho tiempo, mantienen el mismo sistema de explotación, a pesar de las inundaciones periódicas, debido a que confían en que presiones políticas y la publicidad, a veces exagerada, hará que los gobiernos les resuelvan los problemas que ellos mismos ocasionan.

Además, el riesgo de pérdidas por inundaciones a pesar de las obras de control, no incentiva en algunos casos a una mayor inversión por parte de los propietarios, los cuales prefieren mantener el mismo margen de utilidades que tenían antes de que se implementaran las obras. En consecuencia, no ocurre el incremento en producción y productividad, que se esperaba como consecuencia de implementar las medidas de control.

Estas razones hacen que sea necesario un plan de manejo de la planicie inundable.

Objetivos e importancia del estudio

Objetivo general

Desarrollar una metodología, al nivel de planificación, que permita evaluar diferentes tipos de alternativas para la reducción de daños por inundaciones. Donde se pueda medir, de manera integral dentro de la cuenca del Escalante, las consecuencias que diferentes alternativas tengan en el control de las aguas y de los sedimentos.

Objetivos específicos

a.- Mejorar la calibración que se tiene con el modelo hidrológico Stanford IV en la cuenca del río Escalante, tendiente a resolver parcialmente la

problemática de escasez de información fluviográfica dentro de la cuenca de estudio.

b.- Desarrollar un procedimiento lógico, mediante el modelo hidrológico, para la valoración del efecto que diferentes alternativas tengan en el control de las aguas y de los sedimentos, en la cuenca del río Escalante.

c.- Evaluar diferentes alternativas de control de inundaciones en la cuenca del río Escalante, como ilustración del uso de la metodología desarrollada.

Importancia del estudio

El Estado ha realizado una gran inversión para el control de las aguas y el saneamiento de tierras, dentro de la cuenca en estudio. Sin embargo, el problema de las inundaciones periódicas persiste todavía. Entre diversas causas, es importante la falta de un estudio general donde se hubieran analizado y evaluado múltiples alternativas de solución posible. El presente estudio trata del desarrollo de una metodología para tal fin.

En este estudio se pretende incorporar, como componente de las crecientes, a los sedimentos producidos en las cuencas; hecho resaltante, puesto que la mayoría de estudios de control de crecientes, realizados hasta el presente, solamente consideran al componente agua.

Por otra parte, y de manera singular, se incluyen en la evaluación general de alternativas, medidas pocas veces usadas, pero eficaces para reducir los daños por inundaciones.

El procedimiento de evaluación mediante el modelo hidrológico, permite considerar la interrelación del proceso hidrológico entre los distintos paisajes fisiográficos de montaña, piedemonte y planicie, evaluándose así, de manera integral, las consecuencias que el manejo de las cuencas altas tiene sobre las inundaciones aguas abajo en la planicie.

Metodología del estudio

El procedimiento seguido para el logro de los objetivos es el siguiente:

1. Identificación y caracterización del sistema a ser estudiado:

- Recabación del material cartográfico
- Revisión de la literatura sobre el problema de inundaciones en la cuenca de estudio.
- Caracterización y evaluación de los daños por inundaciones.
- Recabación de información para el inventario físico y socio-económico de la cuenca: fisiografía, hidrografía, geomorfología, meteorología y climatología, hidrología, suelos, vegetación natural, uso de la tierra, población, tenencia de la tierra, sistemas de explotación y mercadeo, uso potencial de las tierras, obras de control existentes.
- Identificación de proyectos, programados o bajo estudio, dentro de la cuenca del río Escalante.

2. Calibración del modelo hidrológico, Stanford IV.

- Preparación de los registros de precipitación horaria y, evaporación y escurrimiento diaria; según el formato utilizado por el modelo.
- Calibraciones iniciales del modelo.
- Revisión de las formulaciones matemáticas del modelo y verificación del programa en Fortran IV utilizado.
- Revisión de los estudios, mediante modelos hidrológicos, que se hayan realizado en la cuenca del Escalante.
- Calibración final del modelo y verificación.

3. Definición de los eventos de diseño, para diferentes períodos de re torno.

4. Aplicación de la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo, para estimar la producción de sedimentos.

- Revisión de la literatura sobre el uso de esta ecuación.

- Estimación de los diferentes factores de pérdida de suelo, por secto res dentro de la cuenca.

- Procesamiento de los eventos de diseño, de diferentes períodos de re torno, y por subcuencas, para determinar los caudales picos y volúmenes de es correntía.

- Aplicación de la ecuación universal modificada de pérdida de suelo y determinación de la producción anual de sedimentos por subcuencas.

5. Simulación de la retención de sedimentos en la planicie, o zona fil tro, mediante un método usado por embalses.

6. Desarrollo de un procedimiento lógico, usando el modelo calibrado, que permita la valoración de las consecuencias que tendrían diferentes alterna tivas de control de inundaciones, sobre los caudales picos y la producción de sedimentos.

- Análisis de alternativas posibles para la solución al problema de las inundaciones en la cuenca de estudio. Y selección de aquellas a usar para la ilustración de la metodología.

- Desarrollo de un esquema general para la valoración de la condición actual o alternativa cero.

- Modificaciones necesarias al esquema general, para la valoración de las alternativas seleccionadas.

7. Evaluación de las alternativas seleccionadas mediante el procedimiento diseñado.

8. Evaluación económica de las alternativas, como ilustración del último aspecto de la metodología propuesta.

9. Análisis de los resultados obtenidos en cada etapa del estudio, para la determinación de conclusiones y recomendaciones.

Presentación del trabajo

El trabajo se presenta en nueve capítulos

El capítulo uno es introductorio. En él se planteó la problemática en la región dentro de la cual está enmarcada la cuenca de estudio. Se hace una revisión de la literatura sobre las causas y mecanismos del proceso geomorfológico de las crecientes y sus consecuentes inundaciones, los métodos usados en la evaluación de alternativas de control de inundaciones y los criterios generales sobre estos tipos de proyectos. Se señalan las distintas obras de control implementadas por el Estado y se discute sobre la necesidad de un plan de manejo de la planicie inundable de la cuenca del Escalante. Finalmente, se presentan los objetivos, importancia y metodología del estudio.

En el capítulo dos se describen las características físicas y socio-económicas del área objeto de estudio.

En el capítulo tres se detalla el procedimiento seguido en el estudio hidrológico, con la finalidad de generar los caudales de diferentes períodos de retorno. Se describe el modelo hidrológico Stanford IV y las calibraciones Fase I y Fase II realizadas en la cuenca de estudio. Por último, se describe el método usado para la determinación de los eventos horarios de precipitación de diferentes períodos de retorno.

En el capítulo cuatro se presenta la metodología adoptada para la esti-

mación de los sedimentos producidos en cada subcuenca. Se describe detalladamente la ecuación universal de pérdida de suelo, USLE, y la modificación hecha posteriormente, MUSLE. Se presenta los valores estimados, por sectores dentro de la cuenca, de los diferentes factores de pérdida de suelo, señalando las dificultades y cuidados que hay que tener en su determinación.

En el capítulo cinco se describe el esquema metodológico de evaluación de crecientes y de los daños por inundaciones, según diferentes alternativas de solución.

En el capítulo seis se muestra detalladamente los pasos seguidos para la valoración de los daños anuales de las diferentes alternativas.

En el capítulo siete se muestra el método de Evaluación Económica de las Alternativas.

En el capítulo ocho se presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos en las diferentes etapas del estudio.

En el capítulo nueve se dan las conclusiones y recomendaciones finales del estudio.

CAPITULO I I

DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

Introducción

El área de estudio o cuenca alta y media del río Escalante, está enmarcada dentro de la Zona Sur del Lago de Maracaibo.

De acuerdo a la regionalización adoptada por COPLANARH (1974), la sub-región Sur de la cuenca del Lago de Maracaibo, Figura 1, cubre un área de 21000 km², desde la divisoria de los ríos Santa Ana y Zulia-Catatumbo, hasta la divisoria de los ríos Chama y Mucujepe y tiene como límite Sur y Suroeste la divisoria de aguas de la Cordillera de los Andes correspondiente a las cuencas altas de los ríos Chama y Escalante (MARNR, 1979).

Se identifica como zona Sur del Lago de Maracaibo a una extensión de poco más de 797000 Ha, ubicadas en su totalidad dentro de la zona COPLANARH 1B2, 1B3 y 1B4 correspondiente a la sub-región 1B y comprendidas desde las cercanías de la margen derecha del río Mucujepe hasta el río Zulia - Catatumbo. Aproximadamente 630000 Ha pertenecen al paisaje de planicie y 167000 Ha a los paisajes de piedemonte y montaña.

La carretera Panamericana en su tramo El Vigía - La Fría, demarca en grandes rasgos la línea de transición entre la planicie y piedemonte. Políticamente, la Zona Sur del Lago de Maracaibo ocupa parcialmente los distritos Coíche, del Estado Zulia; Alberto Adriani, del Estado Mérida; Panamericano y García de Hevia del Estado Táchira.

En la Figura 2 se muestran los límites correspondientes a la designación de Zona Sur del Lago de acuerdo al decreto 557 del Ejecutivo Nacional, establecido en Noviembre de 1974. Sin embargo para efectos de estudios topográficos y relieve cartográfico, la Zona Sur ha sido limitada en su parte meridional por la carretera Panamericana, tramo el Vigía - La Fría, lo que erróneamente ha

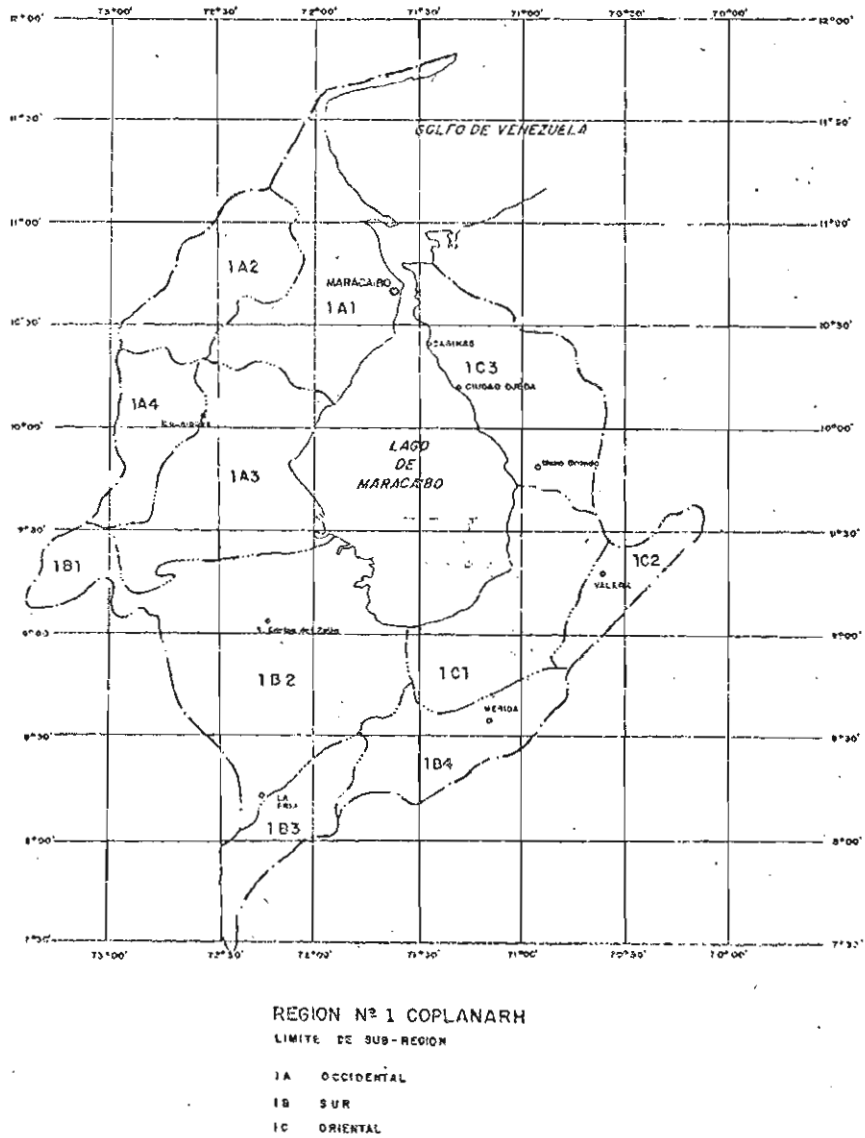


Figura 1. MARNR (1978)

reducido los límites de la misma. Este hecho ha creado dificultad para integrar la información en la cuenca de estudio.

La Zona Sur del Lago incluye parcialmente las zonas COPLANARH 183 y 184, sin embargo los estudios existentes sobre la misma se limitan a la zona 182. Las zonas 183 y 184 se estudian independientemente de la zona 182, razón por la cual se dificulta la integridad de la información existente dentro de la cuenca de estudio.

De esta manera, se encuentran suficientes estudios referentes a la planicie aluvial de la Zona Sur del Lago. La cual desde el punto de vista geomorfológico (a nivel de grandes conjuntos sedimentarios y petrográficos), se divide, según Stagno (1970), en 3 grandes conjuntos, Figura 3: Sector Chama, Sector Zulia y Sector Intermedio. La cuenca en estudio abarca parcialmente los sectores Intermedio y Zulia.

Para la montaña y piedemonte existen pocos estudios, debido a la poca importancia relativa que hasta ahora han tenido estos paisajes dentro del contexto de la problemática de inundaciones y desarrollo regional de la Zona Sur del Lago.

Características físicas

Localización y extensión

El área de estudio está ubicada geográficamente entre los paralelos $8^{\circ} 10'$ al Norte y $9^{\circ} 00'$ al Sur y los meridianos $71^{\circ} 35'$ al Este y $72^{\circ} 25'$ al Oeste.

Su localización político - territorial cubre los Distritos García de Heredia y Panamericana del Estado Táchira, y parte de los Distritos Alberto Adriani del Estado Mérida y Colón del Estado Zulia.

Su superficie es de aproximadamente 3926 km^2 .

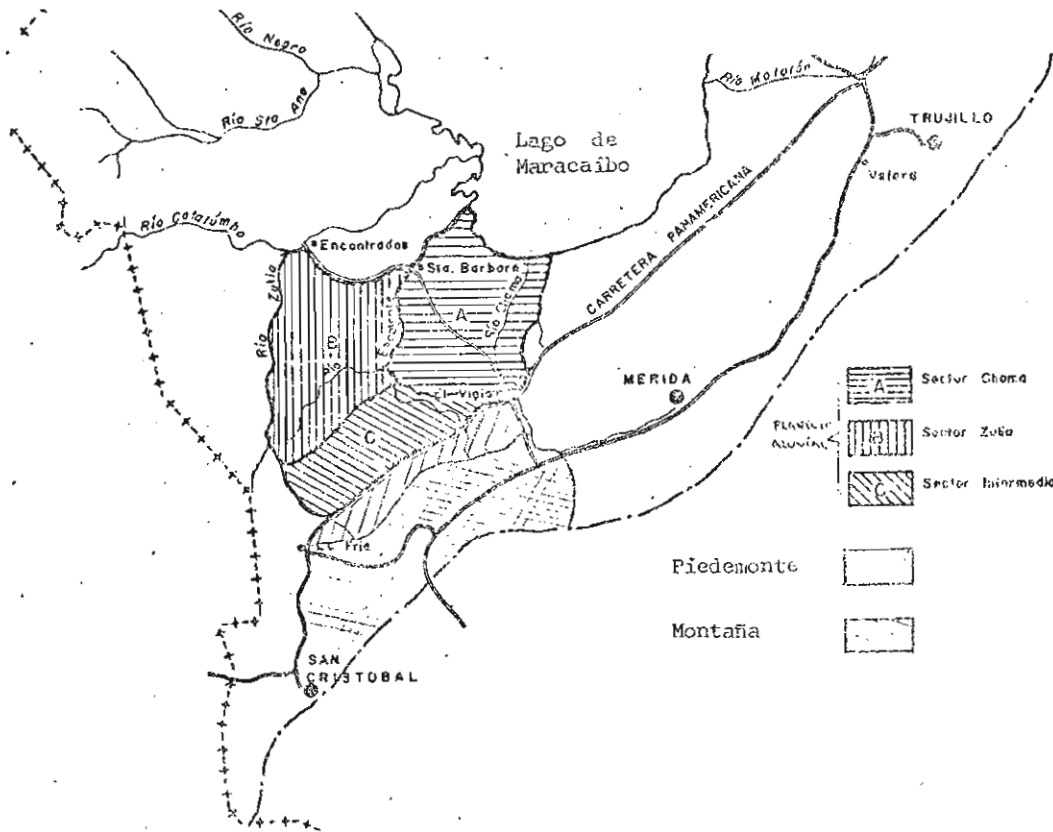


Figura 3. Paisajes Fisiográficos y Conjuntos sedimentarios.

Fisiografía

La cuenca bajo estudio puede dividirse en tres grandes unidades fisiográficas (Stagno, 1970) que corresponden a tres importantes situaciones de la evolución geológica regional, éstas son: Paisaje de montaña, paisaje de llanura aluvial y paisaje de piedemonte que hace la conexión entre las anteriores. Ver Figura 3.

Hidrografía y drenaje

El río Escalante nace en la vertiente Oeste de la Cordillera de Tovar, la cuenca cubre hasta la altura de Santa Bárbara del Zulia, una superficie de 4.184 km². A la altura de la Estación La Ferreira, la cuenca abarca 3926 km². En la composición de la cuenca entran trece subcuencas principales: subcuenca de los ríos Jabillo, Umuquena, Coquetería Arenoso, Maratulo, Pajitas, Boconó, San Mateo, Guaruríes, Pedernales, Culegría - Onia, Caños Oropito - Santa Bárbara, Caño la Yuca, Caño Conticeiba, de las cuales once descargan al Escalante por la margen izquierda. En la Tabla 1 se muestra el resumen del análisis morfométrico de la cuenca alta y media del Escalante, realizado por el MARNR (1984a).

Existe un gran desequilibrio fluvial de los ríos y caños afluentes en la faja de contacto del piedemonte con la planicie, al presentarse una disminución brusca del gradiente topográfico, y ocurrir numerosos desbordes de los ríos con la consiguiente inundación y sedimentación.

En la Figura 4 puede apreciarse el patrón de drenaje del río Escalante enmarcado dentro de la unidad Sur del Lago. Allí puede notarse que el gran colector natural de la planicie aluvial es el río Escalante, cuyo cauce discurre por la parte central de la zona, ocupando una posición topográficamente más baja que el área circundante, ubicada entre los ríos Zulia y Chama. El sistema tributario del Escalante intercepta el escurrimiento de aproximadamente un 60% del área total de la Zona Sur del Lago. La topografía plana de la zona le confiere la característica de ofrecer una

Tabla 1. Resumen de características morfométricas. Cuenca alta y media del Escalante. Fuente: MARN (1984b).

Parámetro	Fórmula	VALOR			EN	CADA	SECTOR		Sector Crítico
		Onia Guarurites	Escalante Boconó	Umuquena Morotuto			Orope Carira	Cuenca total	
Área	Planimetría	426.92 Km ²	401.28 Km ²	388.75 Km ²	185.75 Km ²	1402.70 Km ²		Onia - Culegría	
Perímetro	Curvímetro	94.5 Km	106.5 Km	850 Km	52.0 Km	202.0 Km		Escal. - Boconó	
De Forma									
Coef. Compac.	Kc = 28 P/A	1.28	1.48	1.20	1.27	1.51		Umuquena - Morotuto	
Fact. Forma	Ff = A/L ²	0.369	0.250	0.622	0.573	0.875		" "	
Sist. Drenaje									
Grad. Ramif.	Mapa	4to Orden	3er Orden	3er Orden	3er Orden	4to. Orden		Onia - Culegría	
Dens. Dren.	Dd = Li/A	0.496 Km	0.422 Km ²	0.389 Km/Km ²	0.344 Km/Km ²	0.425 Km/Km ²		" "	
E.H. Esc. Sup.	Es = A/4xLi	0.503 Km	0.591 Km	0.642 Km	0.726 Km	0.587 Km		" "	
Frec. ríos	Fd = N° CA/AT	0.14 ríos/Km ²	0.079 R/Km ²	0.084 R/Km ²	0.048 R/Km ²	0.057 R/Km ²		" "	
VDE. Altitud									
Alt. Media	H = h1st/A	535. m	850 m.	846 m.	495 m.	682 m.		Escalante - Boconó	
Pol. Frec. Alt.	Gráfico	LI/2000 m	LI/3200 m	LI/3200	LI/2400	LI/3.200		Onia - Culegría	
Curva Hipo	Mapa y gráfico	M. y gráfico	M. y gráfico	M. y gráfico	M. y gráfico	M. y gráfico		Onia - Culegría	
Lechos fluv.									
Pend. A. río	PMP=Hm-Km/L	4.1%	7.5%	11.2%	10.0%	8.4%		Umuquena - Morotuto	
Fec. Long.	Gráfico	Gráfico	Gráfico	Gráfico				" "	
Pend. Media	Sxy = H.D/L	18.7%	17.6%	22.5%	14.5%	10.33%		Umuquena - Morotuto	
Rangos Pend.	Mapa	Mapa	Mapa	Mapa	Mapa	Mapa			
Frec. Torrec.	GMNCA ter/AT	0.057 R/Km ²	0.057 R/Km ²	0.067 R/Km ²	0.032 R/Km ²	0.068 R/Km ²		Onia - Culegría	
Coef. Nasilvid.	CMNH/AT	1.21 m/Km	2.11 m/Km	2.17 m/Km	2.66 m/Km	0.486 m/Km		Onia - Culegría	

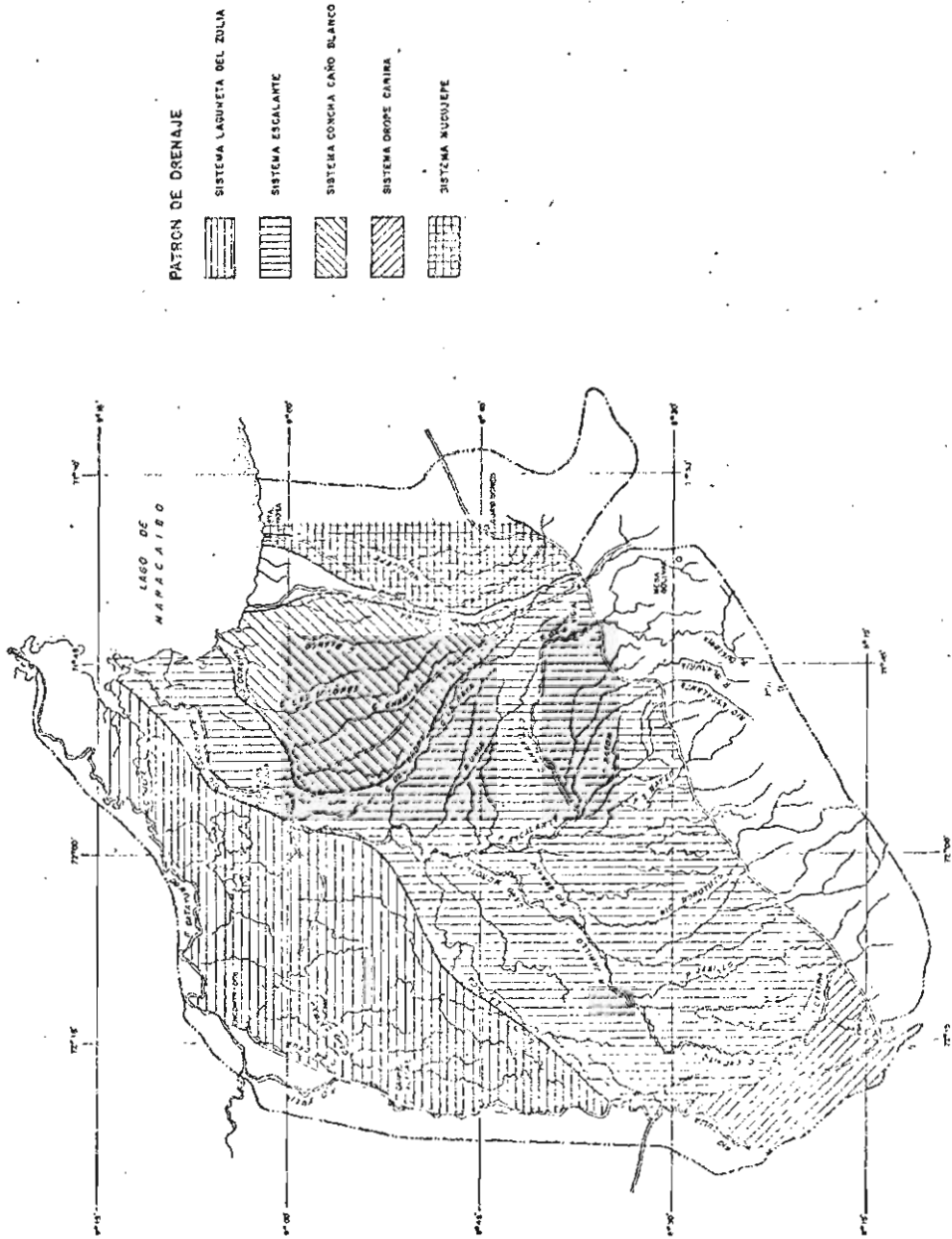


Figura 4. Patrón de drenaje. Zona Sur del Lago de Maracaibo.
Fuente: MARNR (1978)

lenta evacuación de las aguas que la inundan. Es de hacer notar que la proliferación de camellones de penetración a los fundos, acumulación de residuos de deforestación en los cauces naturales y la construcción por particulares de obras que interfieren con el escurrimiento de las aguas, ha creado un gran número de pequeños diques, para cuya construcción no se ha tenido en cuenta la dirección de movimiento de las aguas, y en consecuencia, afectan de un modo imprevisible la dinámica hidráulica provocando inundaciones (MARNR, 1978).

El río Escalante tiene aguas abajo de su confluencia con el caño la Yuca, características que dificultan una adecuada evacuación de las crecidas, como son bajo gradiente y su cota de fondo por debajo del nivel del Lago.

De acuerdo al drenaje, y atendiendo a la problemática de inundaciones, se puede dividir la planicie inundable en tres sectores (Stagno, 1973): 1° una primera faja bordeando el piedemonte y paralela a la carretera Panamericana, la cual tiene un ancho variable entre 5 kms al Este y 15 km al Oeste. Compuesto por depósitos de textura arenosa, de buena permeabilidad. Esta área tiene problemas de drenaje por la elevada mesa de agua, pero el exceso de agua sería fácilmente evacuable por los pendientes favorables que posee este sector. 2° hacia el Norte y contigua a la anterior, hay otra faja de ancho variable entre 10 y 20 km. Constituida por depósitos arcillosos de baja permeabilidad, que aunado al exceso de lluvia local, los aportes de escurrimiento de la faja contigua anterior y al de los desbordes de los ríos provenientes de la Cordillera, constituye la zona más problemática a drenar. 3° una zona entre río Grande al Sur y la carretera Santa Bárbara - Encontrados al Norte, formada por sedimentos finos poco permeables. Las inundaciones que afectaban este sector, debido a crecidas del río Zulia, fueron eliminadas mediante la infraestructura del dique Oropé - Valderramas - Encontrados. Actualmente persisten, dentro del área de estudio, inundaciones debido a desbordes del caño la Yuca.

Clima

La clasificación meso-climática de Sánchez Carrillo, destaca para la zona estudiada dos mesoclimas: El mesoclima subhúmedo - húmedo, cubriendo un pequeño sector al Norte de la cuenca en estudio, representado por la estación La Ferreira y el mesoclima húmedo que comprende la mayor parte de la cuenca, representado por las estaciones La Fría, El Guayabo, Umuquana, Caño Negro y Fuente Escalante. De acuerdo al mapa de zonas de vida de Venezuela, (Ewel y Madríz, 1976) existen dos zonas de vida principales: el bosque seco tropical, ocupando un pequeño sector al Norte de la cuenca y el bosque húmedo tropical ocupando la mayor parte de la cuenca.

La información sobre temperatura, radiación, nubosidad, insolación, humedad relativa y velocidad del viento es escasa en la Zona Sur del Lago, ya que sólo se cuenta con registro desde el año 1968 en la estación Santa Bárbara: La temperatura media es de 26.8°C con muy pocas variaciones a lo largo del año, la temperatura máxima media de 31.3°C y mínima media de 23.5°C. La radiación media anual es de 355 cal/cm²/día, con valores promedios mensuales máximos en Septiembre de 408, y mínimos en Enero de 249.

La nubosidad media anual es de 6/8, con poca variación a lo largo del año. La insolación media anual es de 174.8 horas sol/mes con valor promedio máximo de 198.9 para el mes de Septiembre y mínima de 142.2 para el mes de Abril. La humedad relativa anual es de 81%, con amplitud de variación mensual de 80% a 86%. La velocidad media del viento es de 4.9 km/h., y los valores máximos medios mensuales varían desde 26.1 en Noviembre, hasta 50.1 en Julio. Sin embargo, el encuentro de los vientos alisios que circulan en dirección Noroeste - Sureste y vientos que circulan en dirección contraria, provenientes del Sur, dan origen a: la formación de una convergencia inter-tropical y bajas presiones, la cual es casi permanente en la planicie durante todo el año y a la formación de ráfagas de viento difíciles de controlar, debido a lo irregular de su desplazamiento (MARNR, 1978).

Precipitación

Es el elemento del clima que cuenta, aunque insuficiente, con más registros en la cuenca. La escasez de esta información es notable en la planicie, encontrándose relativamente concentrada en el eje del piedemonte.

La pluviosidad en la cuenca del Escalante es notablemente lluviosa, existiendo una fuerte variabilidad interanual; los valores pueden llegar hasta más de 50%, por encima o por debajo de la media. La cuenca de estudio se caracteriza por un incremento de las precipitaciones de Norte a Sur y de Este a Oeste, con una tendencia a un microclima más seco, circundando la estación La Ferreira, (ver Figura 5). Los valores más altos corresponden a las zonas de piedemonte donde las precipitaciones se desarrollan con mayor intensidad, disminuyendo gradualmente hacia el Sureste y Noroeste.

La concentración de lluvias en el piedemonte es debido principalmente a la acumulación de las precipitaciones orográficas que se forman por la ascendencia de masas de aire caliente cargadas de humedad que se originan en la lámina del Lago de Maracaibo, así como en la planicie del Sur del Lago; al chocar con las masas de aire fresco de las alturas montañosas, se originan precipitaciones periódicas. (MARNR, 1984).

La distribución de la precipitación es cuatripartita, es decir se reparte en dos períodos lluviosos alternados con dos períodos más secos. En la mayoría de estaciones el máximo se presenta en el segundo período lluvioso en los meses de Noviembre - Diciembre y el máximo secundario en los meses de Abril - Mayo. Intermedio entre los dos picos pluviométricos, existe un período seco breve en los meses de Julio - Agosto y otro más largo en los meses Enero - Marzo. (MARNR, 1984).

La precipitación media en la cuenca del Escalante es de unos 1773 mm. (HIDROMET, 1979).

Evaporación

La media anual en la cuenca del Escalante es de 1462 mm, con una mínima de 1100 mm en el extremo Este, aumentando gradualmente hacia el Oeste hasta valores superiores a los 1600 mm, en la Figura 7, se muestra la variación especial. (Hidromet, 1979).

Balace hídrico

Según Stagno (1973) y el MARNR (1984) con un almacenamiento de 200 mm no existe déficit de humedad en el año. Con un almacenamiento de 100 mm existiría un sector, al Norte de la cuenca, con un período seco de 1 a 2 meses, la época seca se hace más importante de Este a Oeste.

Geología y Litología

El paisaje de montaña está constituido en su mayor parte por rocas precámbricas, primarias y secundarias, del macizo cristalino de los Andes. Las formaciones más importantes son: F. Mucuchachí, del paleozóico inferior y F. La Quinta, del Triásico-Jurásico.

El paisaje de piedemonte está formado por dos subpaisajes muy distintos el uno del otro. El subpaisaje de colinas, constituido por formaciones terciarias, principalmente Palmar e Isnotu del Mioceno y Betijoque del Mio-Plioceno, todas compuestas en su mayor parte por arcillas y en menor grado por areniscas. El subpaisaje de conos formado por acumulaciones del cuaternario inferior y medio, caracterizadas por la abundancia de material gravoso, guijarro y granzonoso envuelto en una matriz sin consolidar.

El paisaje de llanura aluvial se trata de una fosa de hundimiento con muy poca diferenciación, geocronológica, casi toda la zona está recubierta por un espeso monto de aluviones recientes.

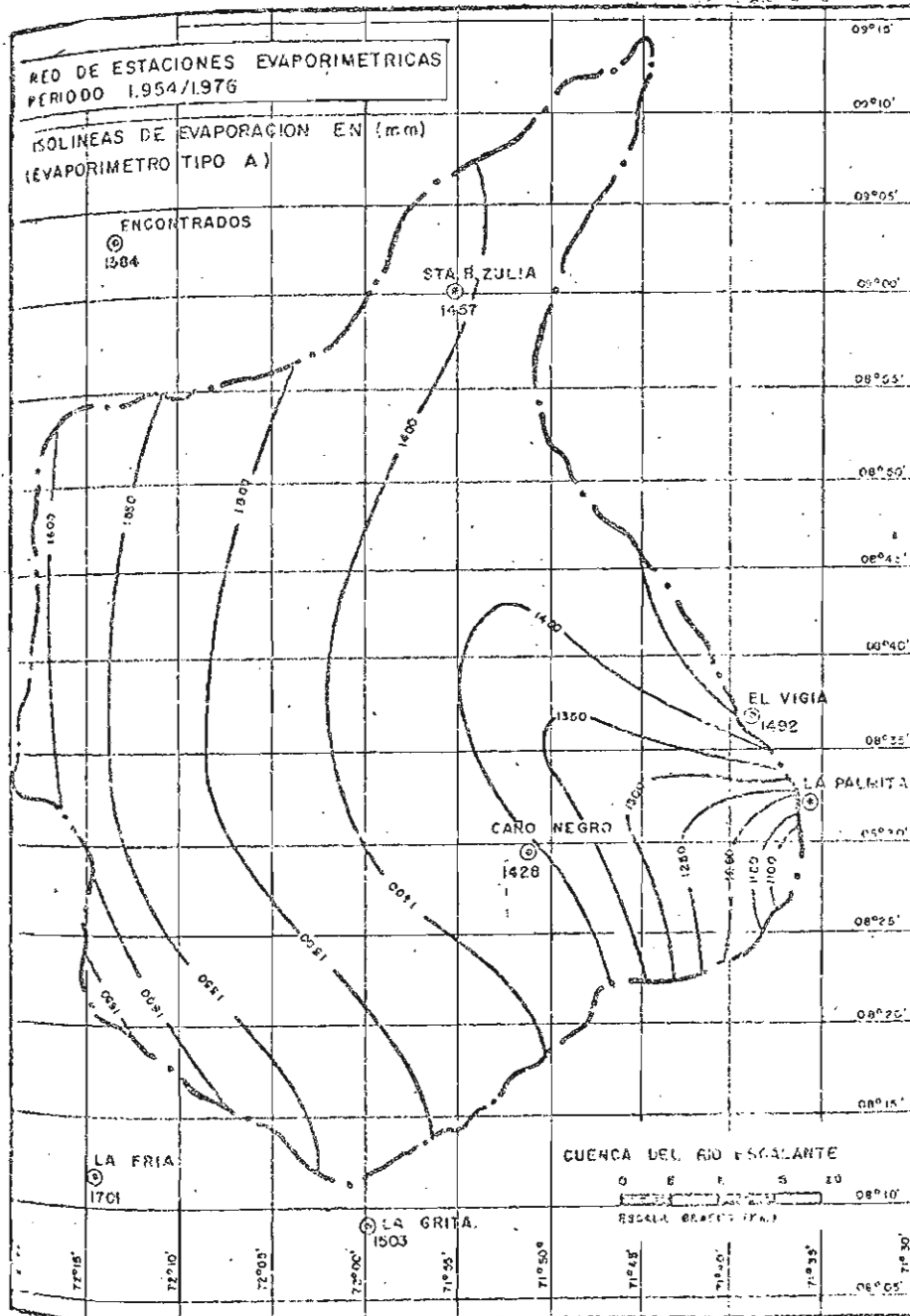


Figura 6. Isopletes medias anuales Zona Sur del Lago de Maracaibo. Fuente: HIDROMET (1979)

Geomorfología

El paisaje de montaña está formado principalmente por laderas de pendientes elevadas y mediano o muy alto potencial morfodinámico. El paisaje de piedemonte conformado principalmente por colinas y conos de deyección con alto potencial morfodinámico. ECOSA (1977) presenta la descripción de 24 medios geomorfológicos pertenecientes a estos dos paisajes, caracterizando su potencial morfodinámico, los tipos de procesos que ocurren, su intensidad, tendencia evolutiva y estructura temporal.

El paisaje de llanura aluvial es dividido según Stagno (1973) en dos grandes grupos sedimentarios y petrográficos. 1° Sector Sur o conjunto de ríos provenientes de los Andes. Formado por las planicies coalescentes de los ríos Escalante, Pajita, Morotuto, Umuguena y Jabillo. Todo el sector es está integrado por un conjunto sedimentario de 3 sistemas deposicionales que suceden de Sur a Norte, ellos son: sistema de explayamiento, sistema de desborde y sistema fluviodeltáico. El último trecho de la faja de explayamiento está todavía en actividad, contribuyendo al ensanche de la misma. Esto está causando un gran problema en las zonas aguas abajo, especialmente en la faja colindante o sistema de desborde, debido a que los lechos se sedimentan y los ríos desbordan con cualquier pequeña creciente, inundando la zona. En el sistema de desborde las aguas derramadas por los explayamientos en el sistema anterior, vuelven a encauzarse y ya libres de sedimentos gruesos, son capaces de excavar cauce y volver a funcionar como ríos con desbordamiento generalizado. En el sistema fluviodeltáico los ríos comienzan a emitir numerosos difluentes y cambian de curso constantemente, tratando de buscar mayores pendientes.

2° Sector Norte, formado por el delta alto y medio del río Zulia y el delta del río grande. Todo el sector correspondiente al delta del río Zulia drena al río Escalante a través del caño La Yuca. Presenta una configuración muy intrincada debido a que por falta de pendiente y gran aporte de sedimen-tos, los difluentes son incapaces de conducir su carga y al depositarla van cegando el canal de escurrimiento y durante cualquier pequeña crecida ocurren

rupturas de los diques y salida de un difluente que se dirige a las zonas bajas en busca de pendiente.

Suelos y Capacidad de Uso

Cuenca Alta y Media del Escalante

Según ECOSA (1977), los suelos en esta zona, paisajes de montaña, piedemonte y valles, presentan gran diversidad genética, habiéndose reconocido los ordenes Entisoles, Inceptisoles, Molisoles, Ultisoles y Oxisoles; siendo los Inceptisoles y Ultisoles los más extendidos. Dentro de los Inceptisoles los grupos principales son: Eutropepts, Cryandepsts, Humitropepts y Tropaguepts; y Plinthudults. El factor común de casi todos los suelos es la acidez y baja saturación de bases, es decir son suelos de muy baja fertilidad natural, la cual se explica por el intenso lavado que han ejercido los importantes excesos en el balance hídrico de la región. Las familias texturales dominantes son francosa y francosa esquelético. Las clases de capacidad de uso son resumidas por ECOSA (1977) de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Capacidad de uso de los suelos de la cuenca alta y media del Escalante.

CLASE	DESCRIPCION	EXTENSION (Ha)	%
III	Tierras adecuadas para	5139	3.5
IV	Cultivos adaptados	19878	13.4
V	Tierras de uso limitado	4468	3.0
VI	Café - frutícolas - pas- tos - silvícola)	37268	25.1
VII		42181	28.5
VIII	Tierras sin posibilidades de uso (vida silvestre)	39316	26.5

En dicho estudio se señaló que estas cifras necesariamente deben cambiar, a la luz de las informaciones geomorfológicas, de uso actual de la tierra y necesidades conservacionistas propias de la cuenca.

Planicie o Llanura Aluvial

Se destaca la alta predominancia de suelos aluviales jóvenes, de poca evolución, Inceptisoles, casi todos ellos pertenecientes al gran grupo Tropaquepts, a causa de una evolución corta y en ambiente hidromórfico. Otros órdenes y grandes grupos presentes en la zona son: Entisoles (Fluvaquents, Tropopsamments, Tropofluvents, Troporthents), Alfisoles (Tropaquealfs, Tropudalfs, Natrudalfs) y Ultisoles (Tropaqueults, Plinthudults). Una característica importante en muchos de los suelos, es la presencia de un microrelieve con zanjas, o con montículos y zanjas denominado Tatucos, el cual es un sistema de erosión reticular que se implanta cuando hay entalles de los cursos de agua (Stagno, 1973).

En la Tabla 3. Se muestra un resumen de las clases de capacidad de uso en condiciones naturales dadas por Stagno (1973), la cual se basa en 3 clases de tierra.

1. Con aptitud agrícola; que pueden ser A1, A2, A3, es decir "muy buenos", "buenos", "regular", para cultivos adaptables al medio climático, con "ligeras", "moderadas", "severas" limitaciones.

2. Con aptitud pecuaria y agrícola especial; pueden ser P1FV, P2FV, P2R, es decir "muy buenos", "buenos", para pastos, frutales y varios y "buenos" para pastos y arroz.

3. Con aptitud pecuaria; puede ser P1, P2, P3, P4, es decir "muy buenos", "buenos", "regular", "malos" para pastos.

Tabla 3. Capacidad de uso de los suelos de la planicie z.s.l.m.

CLASE	SUPERFICIE Ha.	%	
A3	2893	1.0	"Agrícola"
P1FV	39241	12.6	"Agropecuarias"
P2FV	8763	2.8	
P1	48703	15.6	
P2	33345	10.7	"Pecuarías"
P3	75389	24.2	
P4	38399	12.3	
Otros	64988	20.8	"Sin potencial agrícola ó pecuario".

Dado que el potencial de las tierras está limitado principalmente por el mal drenaje, los valores interiores se modificarían notablemente al solucionarse el problema de drenaje. En la Tabla 4 se muestra esta comparación, presentada por Stagno (1973). En la Figura 7 se muestra la comparación entre ambas capacidades.

Tabla 4. Capacidad de uso comparativa: con drenaje - sin drenaje

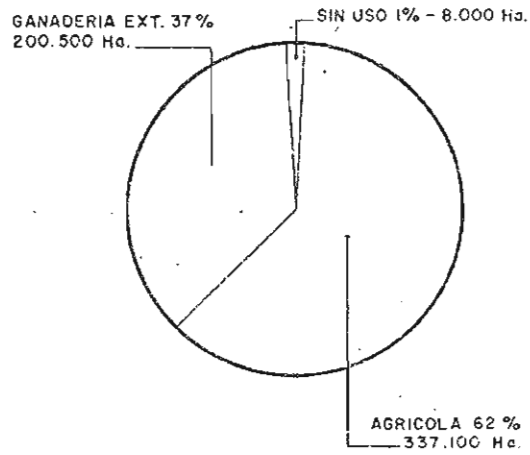
	Potencial Agrícola	Potencial Agropecuario	Potencial Pecuario	Sin Potencial Agrícola-Pecuario
Sin drenaje	1.0%	15.4%	62.8%	20.8%
Con drenaje	43.0%	13.2%	41.6%	2.2%

Vegetación

Cuenca Alta y Media

ECOSA (1977) define 15 unidades o tipos fisonómicos de cobertura vegetal, determinando en cada uno de ellos el porcentaje de recubrimiento, los ín-

CAPACIDAD DE USO
AL EJECUTARSE OBRAS DE
INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA



CAPACIDAD DE USO
EN CONDICIONES NORMALES

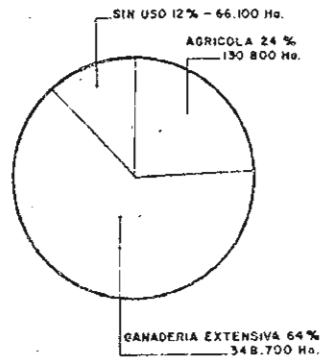


Figura 7. Capacidad de uso de la tierra z.s.l.m.
Fuente: MARNR (1979)

dices y grados de protección según la capacidad de intercepción, dispersión de energía y drenaje del escurrimiento. La Tabla 5 es un resumen de la cobertura vegetal en la cuenca alta y media.

El bosque primario corresponde; según la clasificación ecológica de Holdridge, a varias zonas de vida: bosque húmedo tropical, bosque húmedo premontano, bosque muy húmedo premontano, bosque húmedo montano bajo, bosque muy húmedo montano bajo y bosque muy húmedo montano. En todos los casos se trata de un bosque de gran diversidad específica.

Planicie

Es poco lo que queda de vegetación natural en la zona, ésta ha sido casi completamente deforestada para el establecimiento de pasturas, localizándose en la actualidad en áreas con graves problemas de drenaje. El bosque primario se caracteriza por una exuberante vegetación, con muchas especies de gran altura; las palmas se encuentran en gran proporción. Las especies más abundantes son las palmas coruba y llanera (*Cipura paludosa*), ceiba majumba (*Ceiba pentandra*), guayabón (*Terminolia* sp) y guamo (*Inga* sp). En el bosque secundario las especies más abundantes son balsa (*Ochroma Pyramidale* y el Yagrumo (*Cecropia riñoña*). En la actualidad menos del 10%, aproximadamente, es bosque: el 90% restante son pastos: guinea, para, alemán, elefante.

Características socio-económicas

La información socio-económica disponible se refiere en su mayoría a la Zona Sur del Lago de Maracaibo, principalmente al sector de planicie y piedemonte al Norte de la carretera Panamericana. Por esta razón y debido a que los aspectos socio-económicos dentro de la cuenca en estudio están interrelacionados con aquellos que se presentan en las áreas vecinas de influencia, se presenta aquí la información disponible para la Zona Sur del Lago de Maracaibo. En los casos donde es posible se especifica aquella correspondiente al área en estudio.

Tabla 5. Cuadro resumen de cobertura y uso actual de las tierras. Cuenca alta y media.

Símbolo	Superficie Ha	%	Descripción	Índice de Protección	Grado de Protección
Bp	54425	35.7	Bosque Primario	200 - 300	Muy alto
Bs	6629	4.5	Bosque Secundario	125 - 225	Alto o muy alto
R	10154	5.9	Rastrojos	100 - 175	Alto
Bc	13813	9.3	Café bajo bosque	75 - 175	Mediano a alto
Bd	1278	0.8	Bosque degradado	50 - 150	Mediano a alto
Cm	363	0.2	Musáceas	75 - 150	Mediano a alto
F	560	0.4	Frutales varios	75 - 150	Mediano a alto
Pc	25058	17.0	Pasto cuidado	75 - 100	Mediano
Pn	34455	23.2	Pasto no cuidado	50 - 100	Mediano
Cc	514	0.4	Caña de azúcar	50 - 100	Mediano
Cn	122	0.1	Cultivos hortícolas	25 - 50	Bajo
C	294	0.2	Maíz	25 - 50	Bajo
Cv	448	0.3	Otros (Yuca, Ocumo, etc.)	25 - 50	Bajo

Población

La población en la z.s.l.m. puede caracterizarse como predominantemente joven, masculina, urbana y analfabeta (IGCRN, 1984).

La población total para los municipios dentro del área de estudio, y para la z.s.l.m. se presenta en la Tabla 6.

En términos absolutos la z.s.l.m. tiene su crecimiento en el período 71-81, pero su máximo relativo es el período 51-61, lo cual está relacionado con la construcción de la carretera Panamericana; hecho que dio origen a la colonización de tierras baldías nacionales del piedemonte y la llanura.

Tabla 6. Población total por municipios en el área de estudio y para la z.s.l.m. años 1950, 1961, 1971, 1981.

ESTADO	DISTRITO	MUNICIPIO	1950	1961	1971	1981
Mérida	Alberto Adriani	Alberto Adriani	-	18891	32130	19319
Táchira	Panamericana	J.T. Colmenares	-	13111	17543	19319
	García de Hevia	García de Hevia	-	14138	18827	19695
Zulia	Colón	Sta. Cruz del				
		Zulia	11571	15775	23793	25086
z.s.l.m(*)			101924	157823	220485	310249

Fuente: Ministerio de Fomento (1981)
IGCRN (1984)

(*) : Se refiere a los límites de la z.s.l.m. usados por IGCRN (1984).

Es de destacar, en cuanto a la importancia relativa de la población, que ésta se distribuye para 1981 en 42%, 35% y 23% para los municipios de Mérida, Táchira y Zulia respectivamente; lo cual denota la importancia de cada estado dentro de la cuenca en estudio. Sin embargo para la z.s.l.m. los Municipios zulianos representan al 52%, mientras que los de Mérida y Táchira representan el 31% y 17% respectivamente (IGCRN, 1984).

En la z.s.l.m. el crecimiento natural entre 1950 y 1979 es superior al 3.5%; la natalidad mayor de 40% y algunos casos superior al 50%. La mortalidad ha descendido de 15% para 1950 a 6% en 1979. El crecimiento promedio anual oscila entre 4.4% y 3.5% entre 1950 - 1981. (IGCRN, 1984).

La densidad de población en los años 1971 y 1981 por municipios para la cuenca en estudio y para la z.s.l.m. se presenta en la Tabla 7. Se puede apreciar que el Estado Mérida tiene la más alta densidad de población dentro de la cuenca en estudio, básicamente se debe a la población de El Vigía, sin embargo los municipios de Táchira y Zulia presentan un mayor crecimiento. Es

significativo señalar que la densidad de población en la llanura aluvial es menor que en el piedemonte.

Tabla 7. Densidad de población (h/km²) por Municipios de la cuenca en estudio y para la z.s.l.m.

ESTADO	MUNICIPIO	1971	1981	Δ%
Mérida	Alberto Adriani	53.55	90.39	69%
Táchira	García de Hevia	27.14	68.09	151%
	J.T. Colmenares	19.06	44.11	131%
Zulia	Sta. Cruz del Zulia	8.36	20.93	150%
	Zona Sur del Lago	12.25	17.21	40.5

Fuente: IGCN (1984)

En cuanto a la estructura o composición de la población, ésta es predominantemente, joven, presentando una pirámide de edades en forma de "Arbol de Navidad". En la Tabla 8 se muestra la distribución por grupos de edades para la z.s.l.m.

Tabla 8. Distribución por grupos de edades z.s.l.m.

GRUPO DE EDADES	1981	%	1991	%
0 - 6	60920	16.7	69924	15.4
7 - 15	80178	22.0	92792	20.5
16 - 17	17307	4.7	22110	4.9
18 - 22	41226	11.3	68689	15.2
23 - 29	56149	15.4	76345	16.8
30 o más	109318	30.0	123518	27.2

Fuente: FESDESUL, (1982) y CORPOANDES (1983).

Los índices de masculinidad en la z.s.l.m. presentan valores altos durante el período 50 - 71: 118.25, 129.53 y 116.41 H/100M, para los años 50, 61, 71 respectivamente.

La distribución urbana - rural de la población en la z.s.l.m. favorece a la primera de éstos. Según Fedesul (1982), el crecimiento neto de la población rural ha experimentado una fuerte desaceleración, que es mayor en los Distritos zulianos que en los Andinos. La tasa de crecimiento de la población rural, período 61 - 71, en los Distritos Zulianos es menos de la mitad de la tasa correspondiente a los Distritos Andinos. En los Estados Mérida y Táchira hay un predominio de la población rural en el orden del 61% y 74% respectivamente, para la Zona Sur del Lago, que es una zona eminentemente agropecuaria.

Según el IGCRR (1984), la z.s.l.m. para el período 1950 - 1961 presenta una tasa de urbanización de 14.4% y para el período 1961-1971 aumenta a 30.6%.

En la Tabla 9 se muestra la distribución urbana-rural de la población para los Municipios dentro del área en estudio.

En cuanto a la ocupación de la población hay que destacar que existe poca información al respecto. Según el MARNR (1978) en la z.s.l.m. más de la mitad de la población económicamente activa del año 1971 se ocupa de labores agropecuarias; para ese año existen 18449 personas vinculadas a la explotación agropecuaria del área, de las cuales cerca del 50% se ocupan como empleados y obreros de la empresa privada y un 39% trabaja por cuenta propia. Adicionalmente el 73.7% de los productores agropecuarios desarrollan esta actividad en su propia residencia.

Los centros urbanos de mayor importancia para la cuenca en estudio y en sus alrededores son: El Vieja, San Carlos, Sta. Cruz, La Fría, Coloncito, La Tendida, El Moralito y Zea.

Tabla 9. Población urbana y rural dentro de los Municipios del área en estudio y para la z.s.l.m.

MUNICIPIO		POBLACION		DENSIDAD (Hab./km ²)	
		URBANA	RURAL*	URBANA	RURAL*
Alberto	1961	8874	10017	20.12	22.71
Adriani	1971	21237	10893	41.42	21.24
(Mórida)	1981	27224	19796	96.71	70.52
García	1961	4771	9367	14.27	28.01
De Hevia	1971	9146	9680	16.20	17.15
(Táchira)	1981	9828	15343	18.38	28.70
J.T. Colmenares	1961	3562	9549	7.19	19.29
(Táchira)	1971	7663	9880	9.62	12.41
	1981	8324	18871	9.79	22.21
Sta. Cruz	1961	-	15775	-	14.91
(Zulia)	1971	4851	18942	2.71	10.61
	1981	5117	28904	3.81	21.35
Z.S.L.M.	1961	43165	114658	7.62	20.25
	1971	100985	119499	12.35	14.62
	1981	135740	174514	14.25	18.32

* Incluye población intermedia.

NOTA: La información no es exclusiva para el municipio mencionado, sino que incluye la población de otros municipios vecinos pero de menor relevancia.

FUENTE: IGCN (1984).

Tenencia y Distribución de la Tierra

La tenencia y distribución de la tierra en la z.s.l.m. posee características muy particulares. En la zona se da una alta concentración de la propiedad agraria, en tanto una elevada proporción de las familias vive en un precario régimen minifundario, bajo una economía de subsistencia (MARNR, 1978).

La característica resaltante es que casi el 75% de las explotaciones son de propiedad privada, ocupando el 80% del total de la superficie.

En lo que respecta a la concentración de la propiedad territorial agraria, cerca del 50% de la superficie está concentrada en apenas el 5% del total de explotaciones.

En cuanto a la distribución de las unidades de producción según el tipo de actividad, el IGCEN (1984) señala que el 51.5% de las unidades pertenecen al Estado Zulia, 28,1% a Mérida y 20.4 a Táchira, sin embargo las del Táchira, con predominio pecuario, ocupan mayor extensión, 12.46, y las de Mérida con más alta proporción de unidades agrícolas, ocupa el 11.2%. Las Unidades del Estado Zulia ocupan el 74.4% de la superficie total y son de predominio pecuario.

En la Tabla 10 se presentan las unidades de producción según tipo de actividad para 1980 para los Municipios dentro de la cuenca en estudio.

Tabla 10. Clasificación de las unidades de producción según tipo de actividad y número de propietarios, dentro de la cuenca en estudio y para la z.s.l.m. 1980.

MUNICIPIO	AGRICOLA	PECUARIO	AGROPECUAR.	SIN PRÓDUC.	TOTAL FINCAS	Nº DE PROPIET.
Alberto Adriani	107	113	27		247	249
García de Hevia(*)	38	233	265		536	634
J.T.Colmenares(**)	92	661	181		934	942
Santa Cruz	-	218	-		218	304
Z.S.L.M.	2684	3167	1319	7	7197	7868

* Se refiere al Distrito García de Hevia

** Se refiere al Distrito Panamericano.

Fuente: IGCEN (1984, p. 19)

Uso actual de las tierras

La z.s.l.m. es la más explotada de toda la región zuliana, principalmente en forma de ganadería lechera y cultivos de plátano. Según el MARNR (1978) para el año 1975 el 74.8% de la superficie se encuentra bajo uso agropecuario; un 15.8% es de rastrojos y bosques y el 9.4% restante corresponde a áreas no aprovechables conformadas por ciénagas y lagunas. Las áreas agrícolas se encuentran en el sector Chama-Escante, el cual no forma parte del área en estudio.

La mayor parte de la información disponible respecto al uso de la tierra en la z.s.l.m. se refiere al sector de llanura aluvial, limitado al Sur por la carretera panamericana, sin considerar el amplio sector de piedemonte y montaña al Sur de dicha carretera; lo que evidencia la poca importancia que le han dado a este sector en la planificación del desarrollo de la z.s.l.m. Hecho relevante si se considera que este sector, tan importante desde el punto de vista del problema de inundaciones, forma parte de la z.s.l.m. según el Decreto 557, bajo la figura conservacionista de zona protectora.

El uso de la tierra en 1980, por municipios dentro de la cuenca en estudio, se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Uso de la tierra por municipios dentro de la cuenca en estudio, 1981.

Municipio	Uso Agrícola (ha)	Uso Pecuario (ha)	Uso Agropecuario (ha)
Alberto Adriani (Mérida)	3377	22233	2539
García de Hevia (Táchira)	2840	27959	22656
J.Y. Colmenares (Táchira)	1859	68383	14706
Sta. Cruz (Zulia)	621	125546	7942

Fuente: IGCN (1984)

Para el año 1981, en los Distritos dentro de la cuenca en estudio, existen, según el IGCRN (1984), aproximadamente 20750 ha de tierras cultivadas y 30000 ha de pastizales; lo cual hace que la cuenca en estudio tenga características de zona pecuaria. En efecto las tierras agrícolas al Norte de la Panamericana, entre los ríos Zulia y Escalante, se restringen, según Silvestre y Medina (1971), a franjas aluviales elevadas, ubicadas dentro de grandes extensiones de bajos de uso pecuario. Considerando lo anterior Silvestre y Medina (1971) recomiendan que la planificación se oriente hacia la explotación ganadera intensiva.

El uso de la tierra presenta cambios significativos. En la Figura 9 se muestra la evolución del uso de la tierra en la z.s.l.m. según cálculos del IGCRN (1984). En la Tabla 12 se muestra los porcentajes de uso de la tierra para 1968 y 1981 en los municipios dentro de la cuenca en estudio.

Tabla 12. Porcentajes del uso de la tierra en municipios de la cuenca en estudio y para la z.s.l.m.

	Sto. Cruz del Zulia		García de Hevia		J.T. Colmenares		Alberto Adriani		Z.S.L.M.	
	1968	1981	1968	1981	1968	1981	1968	1981	1968	1981
Pastos	59.6	55.3	70.6	59.5	75.7	100	51.8	60.4	45.4	60.4
Cultivos	10.8	3.0	5.5	0.5	2.4	-	21.4	18.9	7.3	7.0
Bosques	10.6	1.1	10.9	-	7.5	-	4.8	-	24.8	6.0
Asociaciones	18.2	-	11.8	-	14.4	-	22.3	20.7	10.0	9.0
Pantanos	0.8	-	-	-	-	-	-	-	12.5	8.6
Total		100		100		100		100		100

Casi toda la información sobre el uso de la tierra se refiere al sector Norte de la carretera Panamericana. Las tierras de montaña y piedemonte al Sur de la panamericana han sido poco consideradas debido a que no forman parte del área de desarrollo contemplado en el Proyecto Zona Sur del Lago de Maracaibo. Esto es un error de estrategia, puesto que el desarrollo armónico

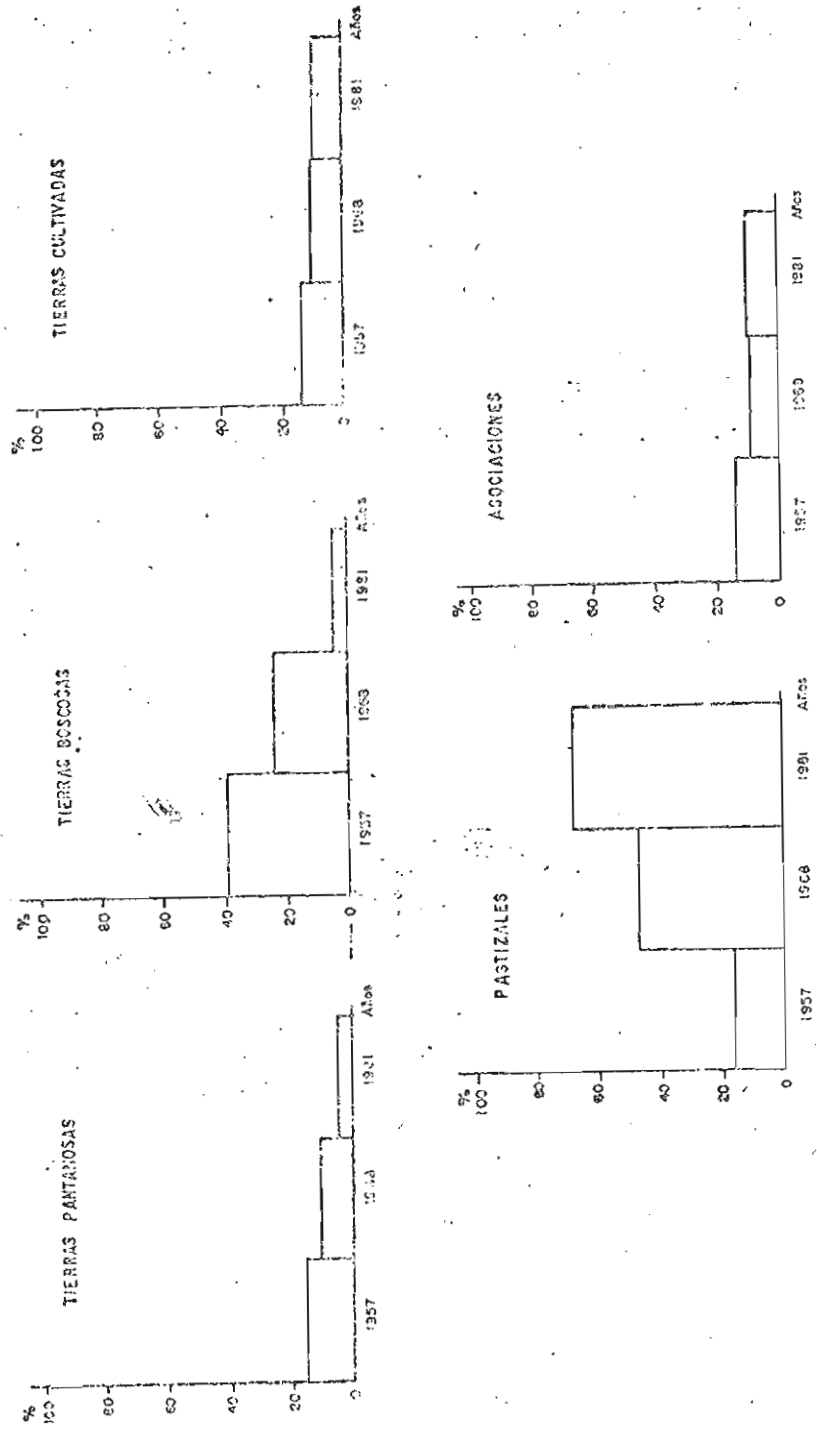


Figura 8. Evolución del uso de la tierra z.s.i.m. 1957 - 1968 - 1981
Fuente: IGCN (1984, p. 203)

de la región depende, en mayor o menor grado, del buen o mal uso de las tierras en la parte alta de la cuenca del río Escalante, aproximadamente 150.000 ha.

Para 1977 el aprovechamiento de la tierra en este sector es, de acuerdo al mapa de vegetación de ECOMA (1977): 50.3% de tierras bajo bosque, 40.21% de pastos, 1.53% de cultivos y 7.96% de asociaciones.

Sistema de Explotación y Mercado

Sistema Pecuario

En general los ganaderos de la zona mantienen una ganadería de doble propósito: carne y leche. El tipo de ganado preferido es el Cebú, ya que las razas lecheras europeas no soportan el clima tropical húmedo que impera en la zona, incrementándose los costos de producción con rebaño de este tipo. El alto meztizaje con Cebú ha ocasionado que el rendimiento de leche por vaca, 4.5 lts/vaca/día, sea menor que en otras zonas de la región zuliana; pero la calidad de los animales para beneficios es de los mejores del país. La inseminación artificial y la monta dirigida son muy poco utilizadas. El ordeño es a mano y aproximadamente el 15% de las fincas utiliza sistema de enfriamiento.

Los pastos predominantes son el Guínea (*Panicum Maximum*), el Pará (*Panicum Purpurascens*), el Alemán (*Echinochloa Polistacha*) y el Elefante (*Pennisetum Purpureum*). El manejo de pastos es muy deficiente, con una densidad de población que no llega en muchos casos a 1 U.A./ha de pasto. (MARNR, 1978).

Diversos factores obstaculizan el desarrollo ganadero de la región; según CONZUPLAN (1974) éstos son:

- Bajo nivel tecnológico general
- Factores estacionales y fallas en la alimentación del ganado: escasez ocasional de pastos y desconocimiento del ensilaje y conservación de pastos por henificación.

- Manejo deficiente del rebaño y de los pastos.
- Aspectos sanitarios
- Asistencia técnica y crediticia
- Investigación
- Falta de capacitación de la mano de obra
- Aspectos administrativos
- Tendencia alcista de los insumos

El mayor porcentaje de la producción de leche en la z.s.l.m. se dirige a 7 plantas procesadoras para la fabricación de leche en polvo y pasteurizada, debido a la conveniencia de los precios y la estabilidad de los mismos. Menos del 5% se destina a la fabricación de quesos no madurados. La casi totalidad de producción lechera de la cuenca en estudio se dirige a las plantas de INDULAC ubicadas en El Vigía y Sta. Bárbara del Zulia.

Sistema Agrícola

La actividad agrícola es de poca importancia en el área de estudio. El principal renglón agrícola es el plátano, aunque la mayor producción está ubicada en el sector Chama-Escalante; éste ha permanecido casi estancando en cuanto a extensión de superficie cultivada y a la ubicación territorial, debido a problemas de mercadeo, altos precios de las tierras y escasa oferta de tierras para este uso (MARNR, 1978).

El plátano se ha convertido en la z.s.l.m. en un monocultivo que ocupa siempre la misma superficie, hace poco uso de fertilizantes, herbicidas y control de enfermedades y plagas; con insuficiente asistencia técnica y poca preparación de los agricultores.

El problema más generalizado es la existencia de niveles freáticos altos y la presencia de ventarrones o "chubascos".

En cuanto a su mercadeo, no existe una verdadera organización para su comercialización. Básicamente existen dos destinos para el producto de la zona: el mercado nacional y el de las exportaciones. Para el año 71 se exportaron a los EE.UU. más de 13380 t. de plátanos, destinados a Miami y Nueva York, principalmente.

Política crediticia y predominio de la actividad pecuaria en la z.s.l.m.

Según el IGCN (1984), este predominio responde a un alto grado de interés en la búsqueda del beneficio económico por parte de los productores de la z.s.l.m. Además, han recibido el estímulo del Estado en este empeño. Así, la política crediticia, al no coordinarse, en este caso, con los objetivos del Proyecto Zona Sur del Lago de Maracaibo, ha incentivado la actividad pecuaria en detrimento de la agrícola. Entre 1971 y 1975 el total de créditos pagados en la región zuliana por tres instituciones del fomento agropecuario (I.C.A.; Bandagro; Fondo de Crédito Agropecuario) se distribuye en 85.7% al sector agrícola animal y un 4.7% para el agrícola vegetal. Del total del monto de créditos otorgados en estos años el 96% es orientado hacia la ganadería bovina y menos del 3% al sector agrícola. Ver Tabla 13.

Casi la tercera parte de estos créditos se destina a la compra de semovientes. Otra parte se ocupó en la formación de capital fijo que contribuye a valorizar las fincas que ya se habían revalorizado debido a la infraestructura construida en la z.s.l.m. como carreteras y obras para saneamiento de tierras.

Adicionalmente, se debe señalar, que la actividad pecuaria resulta más favorable debido a las condiciones naturales que presenta la z.s.l.m., para el desarrollo de pastizales, y a que la cría de ganado, especialmente de ceba, es una actividad menos vulnerable a las variaciones del Mercado, además de que la actividad pecuaria exige menos mano de obra que la agrícola. Finalmente la ganadería resulta más compatible que los cultivos por la existencia de tierras anegadizas e inundables periódicamente.

Tabla 13. Destino de los créditos agropecuarios período 74-75.

		Subsector agrícola vegetal	Subsector agrícola Ganado Mayor (Bovino)	Ganado Mayor	Ganado Menor	animales	Servicios	Totales
- Acondicionamiento de las explotaciones	% Bs. 10 ³	3.6 4351.6	94.1 114942.2	1.0 1325.2	1.3 1540.6			100 122159.6
- Fundación de plantaciones y siembras o recuperación de pastos.	% 10 ³	7.0 1480.7	92.9 19734.4	0.1 16.9	-			100 21232.0
- Adquisición de semovientes	% 10 ³	-	92.4 94303.2	0.6 527.5	-			100 94830.7
- Mecanización	% 10 ³	3.2 1620.4	95.9 48477.3	0.9 455.8	-			100 50554.5
- Vivienda	% 10 ³	6.7 4444.0	93.3 6222.6	-	-			100 6667.0
- Totales	% 10 ³	7.7 7837.1	94.0 283679.7	0.8	9.5 1540.6			100 295443.9

Fuente: IGCAN (1984, p. 291)

Es obvio, entonces, que además de mejores condiciones naturales para el desarrollo pecuario, el Estado con su política crediticia lo ha impulsado mucho más que la actividad agrícola.

Producción Agropecuaria

Básicamente la estructura económica de la z.s.l.m. se caracteriza por una marcada participación de la actividad agropecuaria, fundamentalmente de la ganadería lechera.

El 75% del valor de la producción agropecuaria proviene de la explotación pecuaria, principalmente por concepto de producción de leche. El 21% restante corresponde a actividades agrícolas destacándose el plátano. (Silvestre y Medina, 1971).

La superficie y producción del plátano por Estado se presenta en la Tabla 14.

El valor de la producción pecuaria para 1968 es de 104967565 Bs. distribuido en 65% por concepto de leche, 30% de carne de bovino y 5% por otros rubros. (Silvestre y Medina, 1971).

Según Conzuplan (1974), la producción pecuaria, en el Estado Zulia para el año 1971 es de 466659 litros de leche y 30463 t. de carne bovina, lo que representa el 43% y el 38% de los respectivos valores nacionales.

Según el IGCN (1984), la producción pecuaria del Estado Zulia en los últimos años, en los renglones de carne bovina y leche, ha mantenido un aporte aproximado a la producción nacional de 25% y 60% respectivamente, teniendo la z.s.l.m. un aporte significativo en el contexto general de la región zuliana. Para el año 1970, la producción diaria de leche cruda en la z.s.l.m. es de 532000 litros aproximadamente, mientras que para 1982 la producción ascendió a 1274179 litros diarios lo que representa el 49.3% de la producción del Zulia para ese año y el 32.4% en relación al volumen de leche producido en el

Tabla 14. Cultivo y producción del plátano por estado. años 78,79,80)

Estado	Año	Superficie (ha)	Producción (Miles de Unid.)	Rendimiento (Miles Unid./ha)
Mérida	78	2274	39328	17.2
	79	2506	47053	18.8
	80	2556	46363	18.9
Táchira	78	3961	76727	19.4
	79	3955	78051	19.7
	80	3707	69841	18.8
Zulia	78	29087	736856	25.3
	79	28612	691398	24.2
	80	29125	687102	23.5
Nacional	78	59024	1275794	21.6
	79	58679	1251110	21.3
	80	57663	1197831	20.8

Fuente: IGCRN (1984, p. 26-27)

país, lo que significa que la z.s.l.m. es hoy en día la principal zona lechera del Estado Zulia y de Venezuela.

En la Tabla 15 se muestra la producción de leche cruda en la z.s.l.m. para 1982, por áreas productoras, la cual es estimada por el IGCRN (1984), allí se puede observar, de modo aproximado, que la producción correspondiente a la cuenca y media del Escalante, áreas productoras 1,2,6 y 7, es cerca del 50% de la producción de la z.s.l.m., es decir 637500 litros/día.

Demanda y oferta del recurso hidráulico

La z.s.l.m. tiene recursos de agua muy superiores a cualquier uso con sustitutivo que se pueda hacer de ellos, a tal punto que el recurso sólo puede ser limitante por su abundancia. Las reservas de agua subterránea son consideradas las más importantes del país.

Tabla 15. Areas productoras de leche cruda z.s.l.m. año 1982.

Area	FRÍO (L/m ³)	%	CALENTE (L/m ³)	%	Total	%
1. Concha Chama El Vigía Sta. Bárbara	227165	21.4	36360	17.0	263525	20.7
2. Río Escalante Arriba Sta. Cruz	120101	11.3	15228	7.1	135329	10.6
3. Río Catatumbo Abajo	64271	6.1	18282	8.5	82553	6.5
4. Encontrados - Pre Zulia	282494	26.7	27712	12.0	310206	24.4
5. Pre Zulia - Vía Machiques-Colón	9200	0.9	2620	1.2	11820	0.9
6. Orope-Guaramito-Castellón	79275	7.5	13014	6.1	112289	8.8
7. La Fría-Río Onia-El Vigía	90182	8.5	30526	14.2	120708	9.5
8. El Vigía-Río Frío	48126	4.5	17069	8.0	65195	5.1
9. Río Frío-Caja Seca-Río Pocó	139188	13.1	33416	15.6	172604	13.5
Total	1059952	100	214227	100	1274179	100

Fuente: IGCOR (1989, p. 374)

En términos de la región zuliana las demandas para 1970 son de $759 \times 10^6 \text{ m}^3$: $249 \times 10^6 \text{ m}^3$ para uso urbano, $470 \times 10^6 \text{ m}^3$ para uso agrícola y $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ extra-urbana. Mientras que el escurrimiento anual de aguas superficiales es $17894 \times 10^6 \text{ m}^3$ y el de aguas subterráneas $5074 \times 10^6 \text{ m}^3$, del cual más de $1140 \times 10^6 \text{ m}^3$ es aprovechable en la actualidad.

Del total de escurrimiento superficial unos $5638 \times 10^6 \text{ m}^3$, 31.5%, corresponden a la región COPLANARH 18, dentro de la cual está la cuenca en estudio, aproximadamente un 70% de la superficie de la región 18.

De acuerdo a prospecciones de demanda, hechos por COPLANARH en 1972, la demanda de agua para la región COPLANARH 18 en el año 2001 es de 148000 m^3 para uso urbano y 172000 ha de riego, cifras que pueden ser reducidas por la elevada oferta del recurso hidráulico.

Infraestructura

Los principales centros poblados que funcionan como polos de desarrollo son: Sta. Bárbara y San Carlos del Zulia, El Vigía y La Fría. Los pobla-

ciones más recientes son: La Tendida, el Moralito y Coloncito.

Vialidad y transporte

El sistema vial principal de carreteras de la z.s.l.m. se encuentra prácticamente completa, integrado por aproximadamente 456 km de vías pavim~~en~~entadas. Además, existen numerosos caminos de tierra o camellones engranzonados que enlazan las vías principales con las haciendas.

Los dos aeropuertos principales son los de Sta. Bárbara y La Fría. En El Vigía existe una pista asfaltada de 1300 m. Los únicos puertos, de poca importancia, son los puertos fluviales de Sta. Bárbara y Encontrados el último en desuso.

Obras hidráulicas

La infraestructura hidráulica está enmarcada en un plan que abarca el tratamiento de los principales ríos y caños y evacuación de grandes áreas cenagosas.

Las obras ejecutadas hasta el presente son:

- Dique marginal Zulia - Catatumbo
- Defensas de Encontrados
- Sistema laguneta Zulia - Birimbay
- Estructura de desvío parcial del río Escalante
- Canalización Caño Amarillo - Río Onía
- Embalse "Victor Martín Elvira"
- Sistema Orope - Carira

En la Tabla 16 se muestra las tierras saneadas por las obras de infraestructura del Proyecto z.s.l.m. hasta 1980.

Tabla 16. Tierras saneadas z.s.l.m. 1980.

Subsector	Superficie (ha)
Dique Zulia-Catatumbo	
Caño La Yuca	120000
Orope-Carira	22000
Total sector Zulia-Escalante:	142000
Onia-Caño Amarillo	63000
Dique Río Chama	15000
Caños Don Pepe, Patos, Gloria	16600
Caño Anvario-Mujeres	25000
Caños Chamita-Sta. María-Doñores	45900
Total sector Escalante-Chama	166000
Total z.s.l.m.	308000

Fuente: IGCORN (1984, p. 282)

Del total de obras ejecutadas, la Presa "Víctor Martín Elvira", la canalización Onia - Caño Amarillo y la canalización Orope - Carira corresponden al área de la cuenca del presente estudio. Sin embargo el Dique Zulia- Cata-tumbo beneficia un amplio sector de la cuenca alrededor de Caño La Yuca. Por otra parte, la influencia que tiene la cuenca del Escalante hasta la Ferrei-ra, área en estudio, sobre la obra de desvío parcial del Escalante y el canal de alivio a la Laguneta del Zulia es muy importante. Además, se tienen programados diques marginales a lo largo del río Escalante desde la obra de desvío hasta la canalización Caño Amarillo. Al respecto hay que destacar que un mal manejo de la tierra en la cuenca en estudio podría influir directamen-te en el aumento en la producción de sedimentos y con ello la disminución de la vida útil de estas obras.

Servicios

Electricidad. La fuente de energía esta constituida por plantas eléctricas de CADAFE, particulares o de propiedad municipal. CADAFE posee centrales eléctricas en el Vigía y La Fría. Actualmente casi la totalidad de la Zona en estudio es servida de electricidad por CADAFE. (MARNR, 1978).

Agua potable y disposición de aguas servidas. El INOS administra acueductos en El Vigía, La Fría, San Carlos, Sta. Cruz y Encontrados. Existen numerosos acueductos rurales construidos por la División de Acueductos Rurales del Ministerio de Sanidad y Asistencia Social. (MARNR, 1978).

Correos, telégrafos y teléfonos. Poseen oficinas de correos Encontrados, San Carlos, El Moralito, Sta. Cruz, El Vigía, La Fría. Funcionan estaciones telegráficas en Encontrados, Sta. Bárbara, El Vigía y Coloncito; en cuanto a teléfonos tienen este servicio El Vigía, La Fría, Coloncito, Sta. Bárbara y San Carlos, Sta. Cruz. (MARNR, 1978).

Planteles educativos. Funcionan aproximadamente, 120 planteles de enseñanza primaria, de los cuales 2 son Escuelas Granjas, ubicados en la Unidad Agrícola los Andes y Sta. Bárbara. La capacidad de los planteles llega a menos del 70% de la población Escolar. Existen planteles de educación secundaria en El Vigía, Sta. Bárbara, La Fría y Encontrados (MARNR, 1978).

Servicios asistenciales. Son escasos y deficientes. Se localizan 3 hospitales: uno en La Fría, uno en El Vigía y uno en Sta. Bárbara. Existen medicaturas rurales en Coloncito, Orope, El Guayabo, Sta. Cruz, La Tendida, Caño Amarillo, San Carlos, Encontrados, Concha, Pro Concha, El Moralito, San Rafael (MARNR, 1978).

Vivienda. Para 1971, en las 24325 viviendas familiares ocupadas, habitaban 151063 personas, es decir 6.2 hab/viv. Hay que considerar que el grupo de vivienda integrado por "ranchos", "vivienda improvisada" y "local utilizado como vivienda" representa el 52% del total. (MARNR, 1978).

Importancia económica

La importancia económica del área dentro de la cuenca de estudio se debe a su producción pecuaria, principalmente de leche cruda, la cual ocurre en el sector de llanura aluvial y la parte baja del piedemonte. La producción de leche cruda en estos sectores representa cerca del 45% del total producido en la z.s.i.m., el cual a su vez es cerca del 50% de la producción total del Estado Zulia; y éste representa para el año 1982 el 32.4% de la producción de leche cruda a nivel nacional.

Adicionalmente la producción de carne de bovino alcanza valores significativos. De acuerdo al uso potencial de estas tierras, según MANIR (1979), podría incrementarse notablemente la producción pecuaria, al aumentar la densidad de población del ganado de 2 vacas/ha pasto a 4 vacas/ha pasto, después de la ejecución de obras de drenaje. Pero también podría cambiarse el uso de las tierras, pasando a una producción agrícola en los mejores suelos; tendiente a una mayor contribución para el tan buscado autoabastecimiento del país en materia alimentaria.

Evaluación de daños por inundaciones

En el Apéndice A se presenta la evaluación de daños por inundaciones en la zona rural del río Escalante.

Los resultados obtenidos, actualizados al año 1982, se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Daños por Inundaciones en la zona rural del río Escalante. (Valores actualizados a precio de 1982.)

Año	Daño (10 ⁶ Bs.)	ha Inundadas	Q _{max} (m ³ /seg) Escalante en la Ferreira
72	33.221	7400	377
75/76	52.733	12165	409
82	178.575	34950	325.5

Con estos valores se obtiene la relación Caudal-Area Inundada-Daños, de la Figura 9. Estas relaciones pueden ser usadas en estudios de diferentes alternativas para el control de inundaciones, dentro del área de la cuenca del río Escalante hasta la Ferreira.

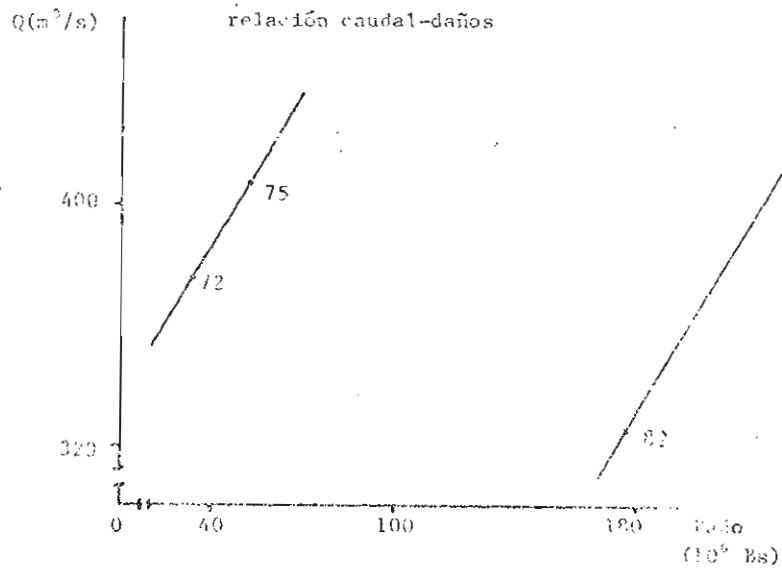
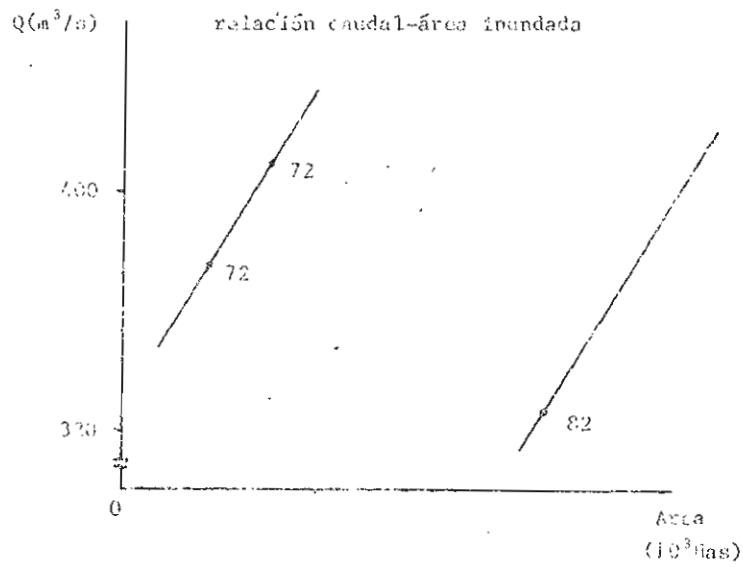


Figura 9. relación caudal-daños-área inundada
 - el caudal se refiere al río Escalante en la Perreina
 - el área inundada y los daños se refieren al sector rural de la cuenca del río Escalante.

CAPITULO III

ESTUDIO HIDROLOGICO. CAUDALES

Introducción

Para la determinación de caudales en diferentes puntos de la cuenca, se emplea la técnica de simulación hidrológica.

Según Linsley (1977), la simulación hidrológica permite obtener datos de caudales en cauces naturales, y su valor radica en la habilidad para obtener estos datos en cuencas sin estaciones de medición o para extrapolar registros cortos. Posiblemente más importante es la capacidad de predecir condiciones futuras en la cuenca. Dado que la planificación de los recursos hidráulicos es para el futuro, esta capacidad es especialmente importante.

En este estudio se hace uso del modelo hidrológico Stanford IV, el cual fue uno de los primeros modelos de cuencas hidrográficas desarrollados. Los principales datos de entrada son la precipitación horaria y la evaporación diaria. El modelo está basado en el cálculo de balances de agua. Los cálculos se realizan separadamente para segmentos de la cuenca con características diferentes de suelo, vegetación, usos de la tierra y precipitación. Cada segmento se describe por medio de un grupo de parámetros que representan características físicas específicas del mismo. Algunos parámetros se deben determinar mediante tanteos en los cuales los caudales observados y simulados se comparan iterativamente hasta que se encuentra un ajuste apropiado. A este procedimiento se lo denomina calibración del modelo.

Descripción del modelo

Descripción general

El modelo de simulación hidrológica Stanford IV, fue desarrollado por Crawford y Linsley (1966), para simular los procesos que componen el ciclo hi

droológico. El programa original está en SUBALGOL y su conversión a FORTRAN IV fue hecha por Anderson en 1967, citado por Bandes (1980). Este último Programa, se conoce como modelo Stanford IV, versión National Weather Service. Duque (1977), adapta esta versión al sistema de computación IBM 370/135 de la Universidad de Los Andes, haciendo la conversión a unidades métricas. Esta versión acepta un máximo de 5 estaciones medidoras de precipitación, 10 puntos de flujo, 1 estación de evaporación y 10 elementos en el histograma tiempo-área. Bandes (1980) incorpora al programa una subrutina para el tránsito de crecientes a través de Labajos, siguiendo la regla de operación normal. Rivera (1982) adapta el programa al sistema HP-1000 del CIDEAT, incrementando la capacidad para aceptar 15 puntos de flujo. Esta última versión es la que se usa en el estudio.

El modelo Stanford IV es un modelo digital paramétrico de simulación hidrológica continuo, su escala de tiempo es de 15 min en el cálculo de volúmenes de escorrentía y de 1 hora para el tránsito de caudales. Respecto a su escala espacial puede ser aplicado a cuencas pequeñas hasta grandes.

El sistema hidrológico regional que simula el modelo Stanford IV se muestra en la Figura 10. El modelo simula por separado cada uno de los procesos de dicho sistema.

La versión original de Crawford y Linsley (1966) contiene 34 parámetros, incluyendo aquellos usados en los procesos de derretimiento de nieve. La versión actual no incluye los procesos relacionados con la nieve y por tanto contiene sólo 25 parámetros; ver Tabla 18. De éstos, sólo cuatro parámetros, CB, CC, LZSN, UZSN, están sujetos a optimización. Los demás son evaluados de mapas, levantamientos físicos o registros hidrometeorológicos. Una guía para su estimación es presentada por Duque (1979) y Crawford y Linsley (1966).

Tabla 18. Parámetros usados en el modelo Stanford IV. Adaptado de Fleming (1975).

Nombre de la variable	Parámetro
KI	Razón entre la precipitación promedio del segmento y la precipitación promedio en la estación registradora.
IMPV	Área impermeable en fracción.
EPIN	Almacenamiento de Intercepción, valor en l/m ² .
UZSN	Almacenamiento nominal de humedad en la zona superior del suelo.
LZSN	Almacenamiento nominal de humedad en la zona inferior del suelo.
CB	Índice de infiltración.
CC	Índice de Interflujo
K3	Índice de pérdida de evapotranspiración actual de la zona inferior del suelo. Referido a la cobertura areal del enraizamiento profundo de la vegetación.
K24L	Fracción de la recarga de agua subterránea asignada a la percolación profunda o agua subterránea inactiva.
K24EL	Fracción del área de la cuenca que evapotranspira a la tasa potencial desde el agua subterránea. Referida a los segmentos con vegetación.
L	Longitud del flujo superficial
SS	Pendiente del flujo superficial
NH	"n" de Manning para el flujo superficial
IRC	Tasa diaria de la recesión de interflujo
KI24	Tasa diaria de la recesión de agua subterránea
KV	Tasa variable de la recesión de agua subterránea
POWER	Exponente de la ecuación de la curva de infiltración
UZS	Almacenamiento inicial de humedad en la zona superior
LZS	Almacenamiento inicial de humedad en la zona inferior
SGP	Almacenamiento inicial del agua subterránea
GW	Índice de la pendiente inicial del agua subterránea
RLS	Almacenamiento inicial de la detención superficial
SRGX	Almacenamiento inicial de la detención de la arfija
SCEP	Almacenamiento inicial de la intercepción
AEPI	Índice inicial de la evapotranspiración potencial antecedente.

Los datos básicos de entrada al modelo son: Precipitación horaria y Evaporación diaria o mensual promedio.

La salida final son los valores de escurrimiento: caudales horarios o caudales medios, diarios o de cada seis horas.

En el Apéndice B se presenta el algoritmo de las subrutinas LAND y CHANE, en el que se pueden detallar todos los procesos simulados. Las formulaciones matemáticas de los procesos son presentados por Duque (1979).

A diferencia de la versión del modelo presentado por Crawford y Linsley (1966), la versión usada en este estudio tiene incorporada dos herramientas para hacer variable tanto el retardo de los flujos como la atenuación de la onda. Estas son el LAQ y K variable. En el Apéndice B se define el uso de ambas.

Metodología Aplicada

Para la determinación de los caudales de diseño dentro de la cuenca de estudio, se hace uso del modelo hidrológico Stanford IV.

La calibración del modelo se hace en dos fases. En la primera fase se calibra la cuenca del Escalante hasta la Ferreira. En la segunda, se calibran independientemente las cuencas de los tributarios al río Escalante en su parte media: cuenca del río Onía hasta la presa, cuenca alta del río Escalante hasta su confluencia con Caño Negro, cuenca del río Pajita, y cuenca del río Escalante.

La calibración se hace en dos fases por diversas razones: En primer lugar, la versión del modelo implementada en la HP-1000 del CIDIAT no permite subdividir la cuenca en más de 15 segmentos de escurrimiento; ni tampoco usar más de 5 estaciones de precipitación. La cuenca del Escalante hasta la Ferreira tiene casi 4000 km² de superficie, y su división en solo 15 segmentos, hace

que algunos de ellos resulten demasiado grandes no pudiéndose de esta manera medir los flujos a nivel de subcuencas de montañas, los cuales como se sabe son los de mayor respuesta hidrológica y los más sensibles a cambios de uso de la tierra. En segundo lugar, la limitación de usar sólo 5 estaciones de precipitación, significa también que sólo se dispone de 5 zonas para definir los parámetros físicos representativos de la cuenca, lo cual obligaría a suponer como homogéneas y uniformes zonas de montaña y piedemonte de gran extensión.

Una solución alterna consista en modificar el programa en lenguaje de programación, aumentando las dimensiones de algunas variables. Sin embargo, tal medida requeriría mucho tiempo, por el cuidado que se debe tener al modificar un programa tan complejo como es el Stanford IV. Además se incrementaría demasiado el tiempo de ejecución del programa. El programa de computación del modelo ocupa gran espacio de la memoria disponible por el computador HP-1000 para su ejecución; el incrementar la dimensionabilidad del mismo podría crear conflictos de uso. Estos argumentos son los de mayor peso para que se prefiera la calibración en dos fases.

El esquema general de los pasos seguidos para la determinación de los caudales de diseño, es el siguiente:

1. Procesamiento de datos de precipitación, evaporación y escurrimiento, de las estaciones a usar en la Fase I.
2. Segmentación de la cuenca del Escalante y estructuración lógica para el uso del modelo.
3. Calibración Fase I.
4. Procesamiento de datos de precipitación, evaporación y escurrimiento, de las estaciones a usar en la Fase II.
5. Segmentación de las cuencas de los ríos Onña, Escalante Alto, Pajita y río Grande; y sus estructuraciones lógicas para el uso del modelo.

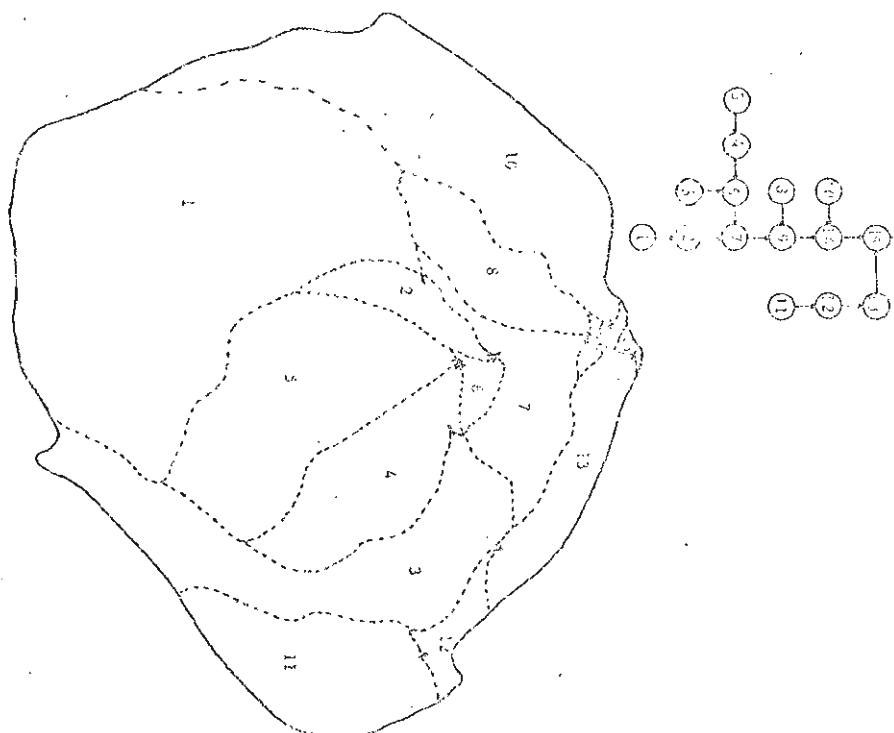
6. Calibración Fase II
7. Determinación de la precipitación horaria de diseño en cada estación.
8. Generación de caudales de diseño en las cuencas (fase II, usando el modelo calibrado en cada cuenca.
9. Generación de caudales a la salida de la cuenca, usando el modelo calibrado en la fase I y tomando los caudales obtenidos en el paso 8 como afluentes.

La calibración Fase I se hace tomando como patrón los caudales registrados en la estación fluvigráfica de la Ferreira. Mientras que la calibración Fase II usa como patrón los caudales generados, en los puntos de interés, por el modelo calibrado Fase I

Calibración del Modelo. Fase I

Consiste en calibrar al modelo en la cuenca del río Escalante hasta la Ferreira, comparando el hidrograma registrado en la estación fluvigráfica, a la salida de la cuenca, con el hidrograma simulado por el modelo. El proceso se repite iterativamente hasta lograr un ajuste adecuado.

La calibración se hace para el período 1970-1972, usándose el período 1975-1978 para la verificación de la calibración. En un principio la calibración se hace sólo con el período 70-71, debido a que los datos de entrada al modelo para este período se encuentran disponibles en los archivos del sistema Hp-1000 del CIDIAT, como consecuencia del trabajo desarrollado por Rivera (1982). La información disponible para el período 70-71 incluye los registros de precipitación horaria de 5 estaciones medidoras, evaporación diaria de una estación y caudales diarias de la estación a la salida de la cuenca. Hacer uso de esta información disponible significa un ahorro considerable de tiempo. La segmentación de la cuenca y las estaciones de precipitación y evaporación usadas por Rivera (1982) es igual a la que utiliza el estudio del MARNR (1983), la cual consiste de 15 segmentos de escorrentía, 5 estaciones



1. Sta. Barbara, Oropita, Juchillo, Unquera, Morotzto
2. Río Grande
3. Río Escalante-Tramo 1-
4. Río Escalante-Tramo 2-
5. Río Lajitos, Bocón y San Pedro
6. Río Escalante-Tramo 3
7. Río Escalante-Tramo 4
8. Río Mucutun Bajo
9. Río Escalante-Tramo 5-
10. Caño La Yuca
11. Río Caña Alto
12. Río Caña Medio
13. Río Caña Bajo
14. Río Escalante-Tramo 6
15. Río Mucutun-La Tierra (Punto de control por la ciudad)

Figura 11. Segmentación inicial de la cuenca Escalante para la calibración fase I. Modificada de Rivera (1982).

de precipitación y 1 estación de evaporación. En la Tabla 19 se lista el nombre de las estaciones y en la Figura 11 se muestra la segmentación de la cuenca.

Tabla 19. Estaciones Pluvio-evaporimétricas usadas en la calibración Fase 1.

Estación	Serial	Tipo de datos
Uauquena	8065	Precipitación
Caño Negro	8052	Precip.- Evaporación
El Guayabo	3034	Precipitación
El Vigía	3035	Precipitación
La Ferreira	3013	Precipitación
La Ferreira	145	Escoorrentía

Calibración Preliminar y Discusión de Resultados

El resultado de la calibración para el período 70-71, después de numerosos tanteos, usando los parámetros de Rivera (1982) parcialmente modificados, es un hidrograma simulado con numerosos picos de muy corta duración, en contraste con el hidrograma registrado que presenta una rama ascendente de larga duración, tal como se muestra en la Figura 12.

Esta es la forma típica de los hidrogramas observados en la Ferreira y la misma puede explicarse de diferentes maneras: La primera es que a partir de cierto nivel el agua se desborda en la sección del cauce donde está ubicada la estación registradora, situación que haría a los caudales máximos registrados poco representativos del fenómeno de los crecientes. Esta razón es la que hace que Rivera (1982) desestime los picos máximos registrados y base su calibración en los caudales base. Sin embargo, se puede constatar a partir de los registros, que los crecientes con picos menores de 250 m³/seg producen hidrogramas con una cresta casi horizontal durante una o dos semanas.

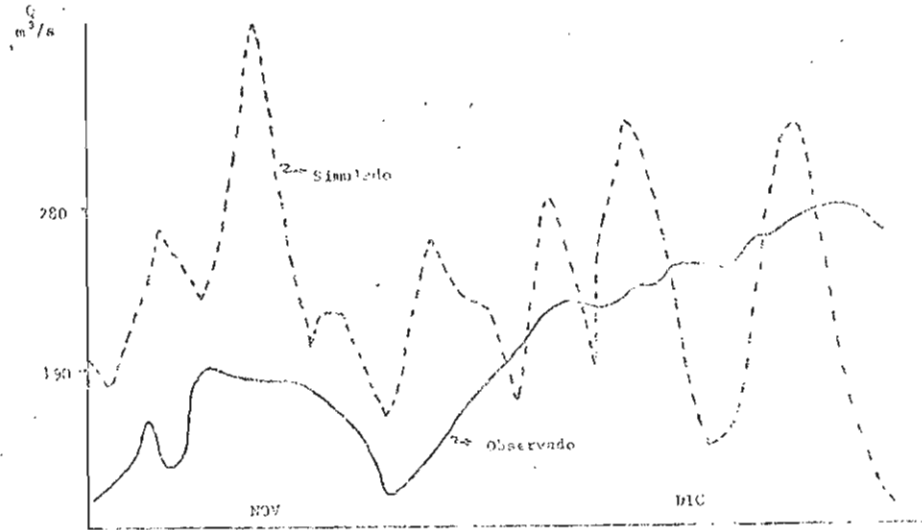


Figura 12. Hidrograma observado y simulado de la crecienle de Noviembre a Diciembre de 1970. Resultado de la calibración con los Parámetros de Rivera (1962).

Por otra parte, el MARNR (1963a) señala una altura de mira de 7.5 m. como el nivel de desborde de la sección del cauce donde está ubicada la estación medidora, al cual corresponde un caudal de 379 $m^3/seg.$ Sin embargo, el estudio del MARNR (1963b) indica que el caudal de desborde es de 500 $m^3/seg.$

La forma típica de los hidrogramas de crecientes en la ferreña se puede explicar también, debido al efecto de desbordes, y consiguiente inundación de la planicie, en diferentes tramos del cauce aguas arriba del sitio donde está la estación.

Para los efectos de la calibración fase I se asume que los valores registrados en la estación fluvioigráfica por debajo de 400 m^3/s , son indicadores del verdadero caudal que pasa por la estación durante la crecienle. Por encima de este valor no se comparan los hidrogramas simulado y observado.

Una característica especial, que explica la diferencia notable en la forma de los hidrogramas simulado y observado, es el hecho de existir una zona natural en la faja de contacto entre piedemonte y planicie aluvial, donde ocurren numerosos desbordes y explayamientos de los cauces y caños que lo atraviesan. La estructura matemática y lógica del modelo no permite la incorporación directa de estos procesos a la simulación hidrológica que realiza. Dichos procesos naturales localizados en la faja piedemonte y planicie, amortiguan suficientemente la onda de las crecientes, y al no ser tomados en cuenta por el modelo, éste simula una respuesta rápida y violenta de la cuenca a los eventos de precipitación.

En el estudio del MARNR (1983b) se calibra la cuenca del Escalante hasta la Ferreira usando los mismos datos de Rivera (1982), pero en esta ocasión el hidrograma simulado tiene una forma semejante al observado. Para tal fin modifican el parámetro de atenuación en el canal, $KS1$, asignando un valor de 0.96 a todos los segmentos de escorrentía dentro de la cuenca. Esto significa que el caudal simulado en el intervalo t , es reducido por efecto del almacenamiento en el cauce, en un 96% de la diferencia de éste y el caudal del intervalo anterior. De esta manera logran calibrar los caudales picos a nivel de la Ferreira, pero desmejoran la calibración de los caudales para el resto del año, además de que indirectamente se está suponiendo que el efecto tan elevado del almacenamiento en el cauce ocurre con la misma magnitud en toda la cuenca, incluyendo los sectores montañosos.

Lo anterior es válido si el objetivo de la calibración es generar caudales picos aguas abajo del punto usado como referencia en la calibración. El objetivo del presente estudio es generar caudales tanto a nivel de la Ferreira como en diferentes puntos de flujo aguas arriba de la estación registradora; por tanto, el artificio de calibración, usado en el estudio del MARNR (1983), no se debe aplicar.

Por otra parte y más significativo es el hecho de que en las calibraciones de Rivera (1982) y el MARNR (1983), más del 90% de la escorrentía simulada en los meses de las crecientes corresponde a flujo de agua subterránea e

interflujo. Para los demás meses del año este porcentaje se incrementa aproximadamente a más del 99%, siendo casi despreciable el aporte del flujo superficial a la escorrentía total. Un ejemplo es la creciente de Noviembre a Diciembre de 1970, figura 12. En la Tabla 20 se muestra una salida típica de estas calibraciones.

Así pues, se plantea la necesidad de revisar detalladamente las formulaciones matemáticas de la versión del modelo Stanford IV que se usa en el estudio, así como también el rango de magnitud usual de los parámetros del modelo. De igual manera se revisan las diferentes experiencias que existen en la calibración de un modelo hidrológico en cuenca del río Escalante.

Tabla 20. Resumen mensual del modelo Stanford IV. Resultados obtenidos por Rivera (1982) y NARNR (1983) para la creciente simulada de 1970.

Mes	Estación	Q Total (cm)	Q Superficial (cm)	Interflujo (cm)	Q Subterráneo (cm)	Precipit. (cm)
Nov.	1	23.929	0.072	10.043	13.814	34.76
	2	14.491	0.080	5.797	8.614	33.93
	3	9.197	0.000	1.982	7.215	25.29
	4	8.401	0.000	0.319	8.081	23.34
	5	11.294	0.013	4.529	6.752	32.16
Dic.	1	15.157	0.051	5.003	10.103	21.49
	2	12.168	0.025	5.111	7.032	17.00
	3	22.626	0.021	10.750	11.854	31.75
	4	5.849	0.000	0.188	5.661	16.95
	5	8.808	0.004	2.681	6.123	19.18

Estrategia para la Calibración

Como consecuencia de los planteamientos anteriores se revisa la formulación matemática del modelo Stanford IV versión National Weather Service, contenida en el programa en Fortran IV, implementado en el sistema HP-1000 del CIDIAT. La misma se hace teniendo como patrón la versión diseñada por Crawford y Linsley (1966). Se investigan los rangos de valores de los diferentes parámetros del modelo presentados en la literatura especializada sobre diferentes versiones del modelo Stanford (James, 1970; Crawford y Linsley 1966; NOAA, 1972; LIU, 1970).

Se revisan también diferentes estudios hidrológicos de la cuenca del Escalante, realizados mediante el modelo hidrológico Stanford IV o versiones del mismo (MOP, 1971a, 1971b; Hidromet, 1979; MARNR, 1983b).

Los detalles y resultados se presentan en los Apéndices B y C.

A partir de estos resultados, se define la siguiente estrategia para mejorar la calibración del modelo:

1. Introducir los valores del parámetro CC en unidades inglesas y no hacer la conversión a unidades métricas como en el caso de las calibraciones de Rivera (1982) y el MARNR (1983b).
2. Modificar los parámetros CB, CC, LZSN, UZSN, dentro del rango típico de valores, hasta obtener una distribución de la escorrentía total en flujo superficial, interflujo y flujo base, adecuada al régimen hídrico de la cuenca.
3. Hacer uso de embalses hipotéticos para la calibración Fase 1: Estos embalses, como sugiere Linsley (citado por el MOP, 1971a), simulan el amortiguamiento de las crecientes que existe en los conos de deyección del piedemonte.

4. Emplear valores ficticios en los parámetros L y HN de segmentos de escorrentía a nivel de piedemonte, con igual finalidad que los embalses hipotéticos: Este artificio es similar al usado por el PCP (1971b), donde consideraron canales de escorrentía de 20 km de ancho con un coeficiente de rugosidad de Manning igual a 2.0.

5. Usar parámetros de almacenamiento en el canal, KSI , variables. Es decir emplear la curva K variable. No se incluye el uso de la curva para hacer variable el retardo de los flujos, LAG variable, debido a que no se dispone de topografía de los cauces para estimar, mediante la ecuación de Manning, el tiempo de concentración en función de la longitud de los caudales.

6. Basar la calibración en el hidrograma de creciente más que en el hidrograma para el resto del año.

Existen numerosas combinaciones de valores, de los parámetros del modelo, que se pueden asignar a los segmentos de la cuenca para simular hidrogramas semejantes a la salida de ésta. De esta manera la calibración del modelo, tomando como punto de referencia los caudales registrados en la Ferreira, no garantiza que a nivel de subcuencas la simulación de caudales sea aceptable. La carencia de registros fluviométricos de los principales tributarios del Escalante, aguas arriba de la Ferreira, no permite saber si la calibración final obtenida está simulando de manera aceptable, el régimen hidrológico existente en las cuencas de cada uno de los tributarios principales.

La única información disponible de mediciones de caudal en las cuencas de los tributarios principales al río Escalante, se refiere a la serie de aforos esporádicos realizados por personal de la zona 5 del WARNR durante los meses de Octubre y Noviembre de 1983. Estos aforos se hicieron para el río Grande en Pto. Limón, río Escalante en Pte. Escalante, río Pacónó aguas abajo de la confluencia con el río San Mateo, río Onía en la confluencia con Caño Amarillo y en Caño La Yuca. Esta información es de baja utilidad debido al tipo de aforo practicado, el cual consiste en usar un flotador para estimar la

velocidad del flujo y de estimaciones aproximadas de la sección del cauce. Sin embargo, se usa esta información para determinar el orden de magnitud de los parámetros CB y LZSN en las cinco estaciones de precipitación usados en el modelo. Para lo cual se hace una pre-calibración, usando los datos hidro meteorológicos de Octubre-Noviembre de 1983, en las cuencas de drenaje correspondientes a los puntos de flujo donde se hacen los afloros.

Debido a que existe un interés especial, por parte del MARNR Zona 5, en evaluar las consecuencias del proyecto de diques marginales a nivel de la "zona filtro", se modifica la segmentación de la cuenca presentada en la Figura 11. El proyecto de diques marginales en la parte media del Escalante (MOP, 1973) incluye la formación de un embalse o zona inundable, aguas abajo de Pto. Caimán en la confluencia del Caño Morotuto con el río Escalante, como consecuencia de disponer de los diques marginales en forma de embudo. Para poder considerar este embalse, es necesario entonces implementar un segmento de escurrimiento que cierre en la confluencia del Caño Morotuto con el río Escalante. De esta manera la nueva segmentación de la cuenca, a usar en este estudio, es lo que se muestra en forma esquemática en la Figura 13. En el Anexo 2 se presenta un mapa de la misma.

El esquema de drenaje de la Figura 13, es válido para el período 70-72. Para el período 75-78 no es estrictamente válido debido a que a partir del año 1977 comienza a funcionar la canalización Onía-Caño Amarillo, sin embargo este esquema se mantiene durante la calibración Fase I, debido a que la creciente más importante durante el período 75-78 corresponde a la de Diciembre, 75-Enero, 76.

Para el período 75-78 se considera como parte del segmento 2 al embalse sobre el río Onía. La presa "Victor Martín Elvira" sobre el río Onía se inauguró en 1977, pero comenzó a funcionar como amortiguadora de crecientes aproximadamente en el período 73-74 a través de la regulación de caudales por la torre-toma; por esta razón se incluye como parte del segmento 2 durante todo el período 75-78.

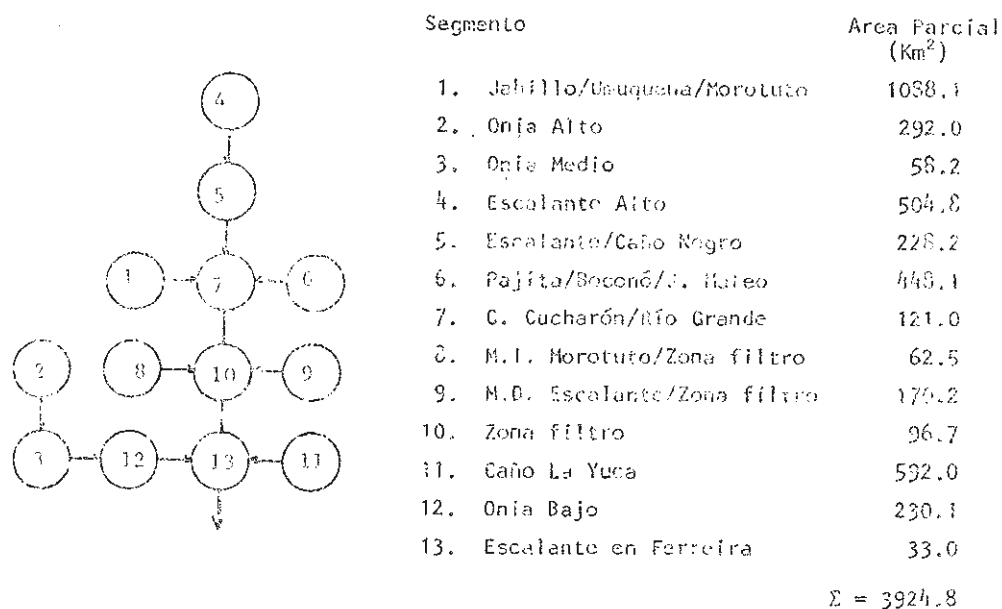


Figura 13. Segmentación de la cuenca del río Escalante usada para la calibración Fase I.

El Uso de Embalses Hipotéticos

Para la calibración Fase I del modelo Stanford IV en la cuenca del río Escalante, se suponen tres embalses hipotéticos o ficticios, ubicados a la salida de los segmentos 1, 5 y 6, con la finalidad de simular el amortiguamiento de las crecientes que ocurren por efecto del desborde de los cauces a nivel de la faja de contacto entre piedemonte y planicie.

Linsley (citado por M.O.P. 1971a) sugiere dos embalses hipotéticos, con el fin de considerar el amortiguamiento de crecientes a nivel de los ríos Umuquena y Jabillo, como consecuencia de los desbordes y explayamiento que estos presentan. Las cuencas de los ríos Jabillo y Umuquena forman parte del segmento 1 de la Figura 13. Sin embargo, en este estudio se considera un so-

lo embalse hipotético ubicado a la salida del segmento, que de manera agregada simule el amortiguamiento de las crecientes debido a los desbordes de ambos ríos, así como también el correspondiente a los desbordes de los Caños Santa Bárbara y Oropito, donde el MARNR (1983a) reportó una mancha de inundación de 4218 Ha.

A la salida del segmento 6 se ubica también un embalse hipotético, con la finalidad de simular el amortiguamiento de crecientes debido al desborde de los cauces de los ríos Pajita y Boconó, donde el MARNR (1983) reportó una mancha de inundación de 2180 Ha.

De una manera análoga, se ubica un embalse hipotético a la salida del segmento 5, debido a que una visita de campo que se hace al sector de planicie y piedemonte y la información que se obtiene de algunos productores dentro del sector, permite suponer que allí también están presentes los procesos del desborde de los cauces, con la consecuente amortiguación de crecientes aguas abajo hasta la Ferreira.

La subrutina para el tránsito en los embalses, adaptada al modelo Stanford IV por Bandes (1980), necesita como datos de entrada las curvas elevación-área-capacidad, elevación-descarga por la toma y/o elevación-descarga del aliviadero. Estas curvas para el caso del embalse sobre el río Onía se toman directamente de los archivos en el sistema Hp-1000 del CIDIAT creados por Rivera (1982), los cuales se muestran en las Figuras 14 y 15.

Para el caso de los embalses hipotéticos usados en la calibración Fase I, éstos se definen sólo con la relación capacidad-descarga por la toma. El área de los espejos de agua no se toma en cuenta para el diseño de los embalses hipotéticos puesto que éstos representan en forma agregada a todos los pequeños embalses, reservorios o lagunas que se producen como consecuencia del desborde de los cauces dentro del segmento de escurrentía. Así pues, los embalses hipotéticos se definen tomando solamente en cuenta la relación capacidad-descarga por la toma, lo que significa que el caudal a la salida

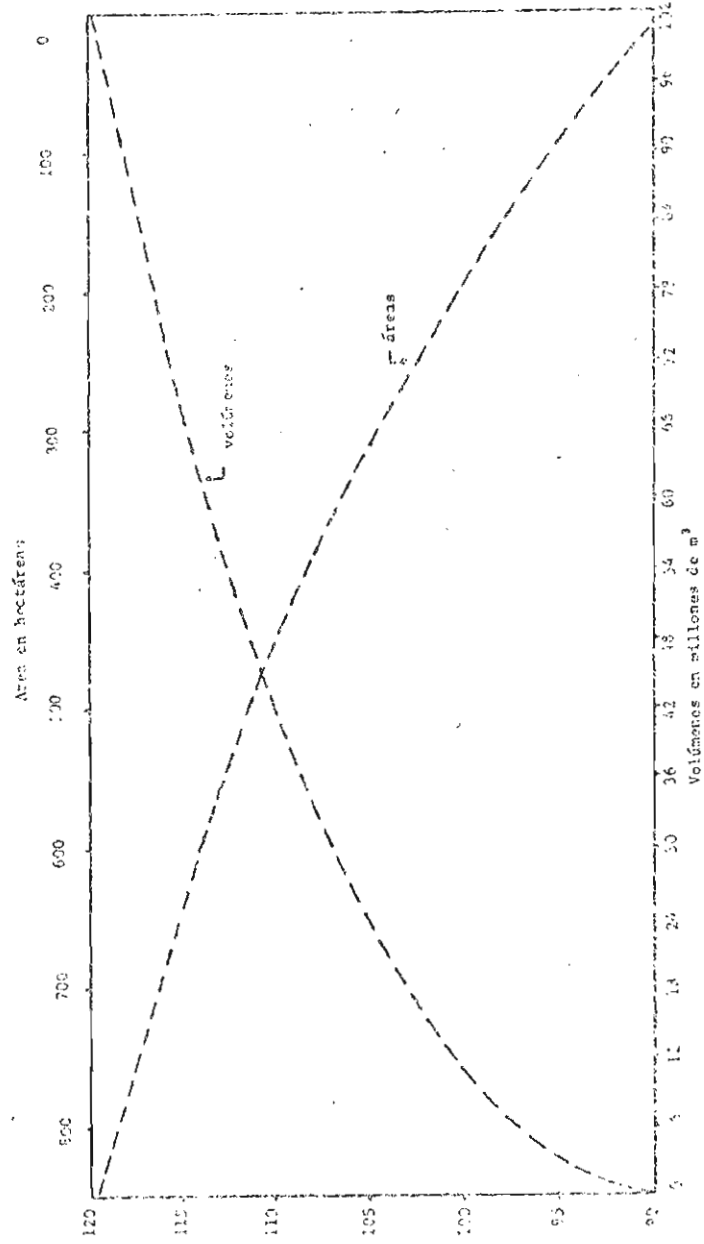


Figura 14. Curva de áreas-capacidades. Embalse rfo Onfa, Fuente Rivera (1982).

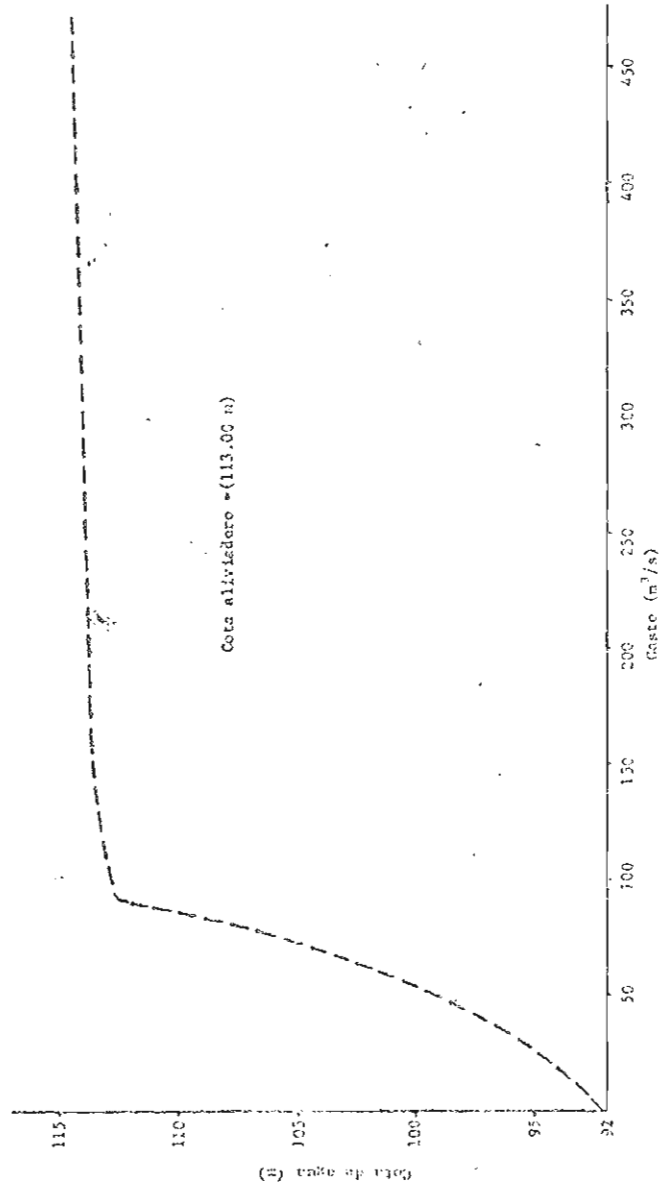


Figura 15. Presa Onfa. Curva de descarga por aliviadero. Curva provisional. Fuente: Rivera (1980).

del segmento de escurrentía será función del volumen de agua almacenada tanto en los cauces como en la planicie inundable.

Las relaciones capacidad-descarga por la toma, que se asignan a los embalses hipotéticos, tienen dos características importantes. En primer lugar, no se considera amortiguamiento de la creciente hasta tanto los flujos simulados por el modelo Stanford IV no superen los correspondientes al nivel de desborde de los cauces principales. Esto se logra asignando una descarga por la toma del embalse equivalente al volumen de escurrentía horaria simulada con el modelo; gráficamente sería una recta de 45 grados.

En segundo lugar, la capacidad de la planicie inundable para almacenar volúmenes de agua tiene un límite, el cual es función de su topografía. Este valor es desconocido y por tanto no se puede fijar un límite en la relación capacidad-descarga por la toma que se define para cada embalse hipotético. Como consecuencia se definen los embalses hipotéticos a partir de la calibración, las relaciones capacidad-descarga por la toma que se obtienen se grafican y luego se extrapolan exponencialmente simulando la búsqueda de un límite o techo en la capacidad almacenamiento. De esta manera se definen embalses suficientemente grandes de manera que se puedan simular crecientes de hasta 100.000 años de retorno. La subrutina para el tránsito de embalses pierde validez en sus cálculos una vez que el embalse almacena su valor máximo, como consecuencia de la regla normal de operación que utiliza. Para evitar este inconveniente se extrapolan las curvas que se obtienen de la calibración y no significa de ningún modo que el procedimiento seguido se ajuste a las condiciones reales en la cuenca. Debe tenerse presente que es un artificio para evitar inconvenientes en la simulación de crecientes demasiado grandes.

Los niveles de desborde de los cauces principales a nivel del piedemonte se desconocen. Se estiman inicialmente, aplicando la ecuación de Manning, a partir de las secciones transversales presentadas por el MOP. (1975) a la salida de la cuenca del río Grande; pero se modifican posteriormente a través de la calibración.

Uso de la curva K variable

Con la finalidad de considerar el amortiguamiento de las crecientes debido a las inundaciones producidas por el río Onía, aguas arriba de la Ferreira, se hace uso de la curva K variable, a través de la cual se asigna una mayor atenuación de la onda, por efecto de los almacenamientos en el cauce, a los caudales que superan el nivel de desborde del cauce. Esta curva se usa para el período 70-72 solamente, puesto que para el período 75-78 ya está en funcionamiento el embalse "Victor Martín Elvira".

Se usan también curvas de K variable en los segmentos 10 y 11 para simular la atenuación de la onda debido a los desbordes del río Escalante a nivel de la "zona filtro" y el caño la Yuca respectivamente. Ambas curvas se usan en los períodos 70-72 y 75-78.

Resultados de la calibración Fase I

El ajuste final de los parámetros del modelo, las relaciones capacidad-descarga por la toma y las curvas de K variable se hace en dos etapas. Un primer ajuste se hace al calibrar el período 70-72, éste se verifica luego con el período 75-78 y como resultado se hace un segmento ajuste, de tal manera que la calibración final sea representativa para ambos períodos.

Los resultados obtenidos para la calibración Fase I se presentan en el Anexo 2. En la Tabla 21, se muestra el valor de los diferentes parámetros del modelo y en la Figura 16 se presentan las curvas de K variable usadas en los segmentos 2, 10 y 11. En la Figura 17 se presentan las curvas de los embalses hipotéticos como resultado de la calibración.

Tabla 21. Parámetros del Modelo Stanford IV. Resultado de la calibración. Fase I.

CUESTA RIO ESCALANTE HASTA LA TIERRERA

APLICACION DEL METODO COMPARATIVO CON PAREOS, HORAS Y PUNTO DE FLUJO

REGISTRACION ESCALA DE LA CUESTA

INICIO DE LA CUESTA : 01 DE ENO DE 1975 FINAL DE LA CUESTA : 31 DE JUN DE 1976
 ALTEZA DE FONDO DE TUBO : 10 NÚMERO DE CIL. DE PEB. DE TRANSMISION : 5

PARÁMETROS PARA LA VERIFICACION

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
12	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
13	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
19	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
21	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
22	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
24	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
26	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
27	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
28	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
29	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
31	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
32	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
34	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
36	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
37	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
38	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
41	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
43	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
44	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
45	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
46	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
48	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
49	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

EL EFECTO DE LA ESCALERA DE TRANSMISION ES LA EL INOCOR LIGER ES CERO

AL VACUACIONES INICIALES

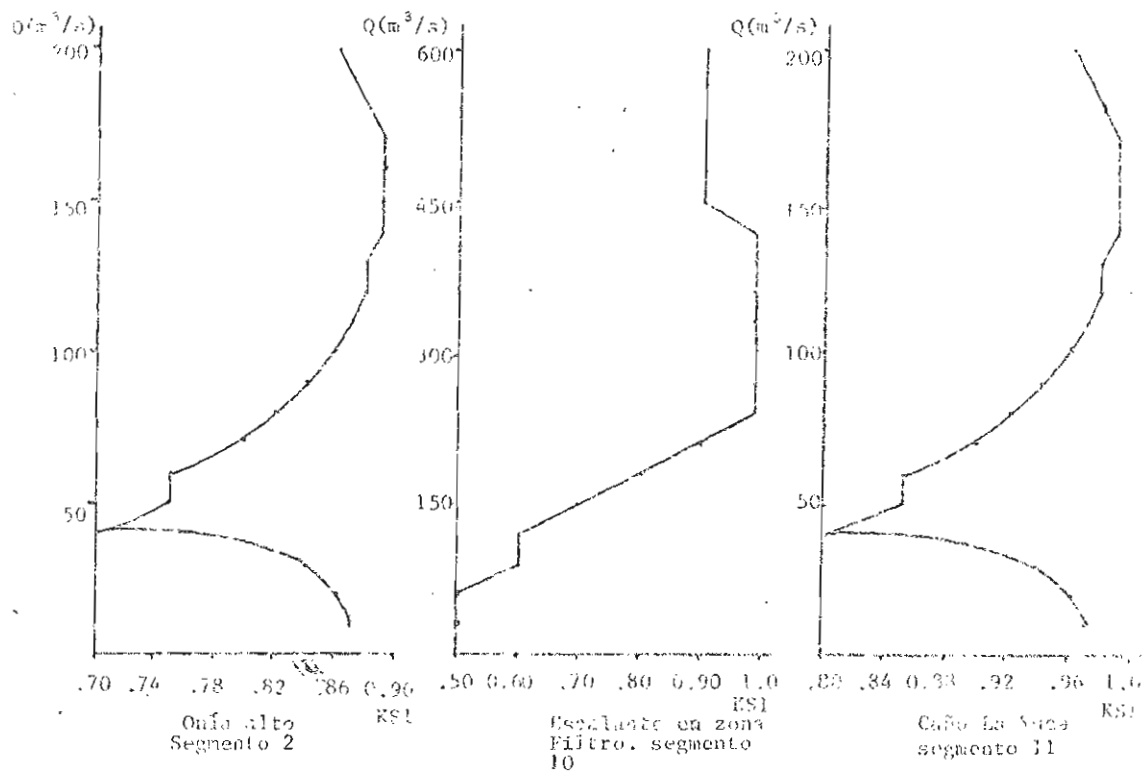


Figura 16. Curvas de K variable usadas en la calibración Fase I.

Calibración del modelo, Fase II

Consiste en calibrar el modelo, de manera independiente, en los segmentos de escorrentía 1, 2, 5 y 6 usados en la Fase I: El segmento 1 o cuenca del río Grande que incluye las subcuencas de los Caños Santa Bárbara y Oropitito, y ríos Jabillo, Umuquena y Morotuto; el segmento 2 o cuenca del río Onía hasta la carretera Panamericana; el segmento 3 o cuenca del río Escalante hasta su confluencia con Caño Negro; y el segmento 6 o cuenca del río Pajita.

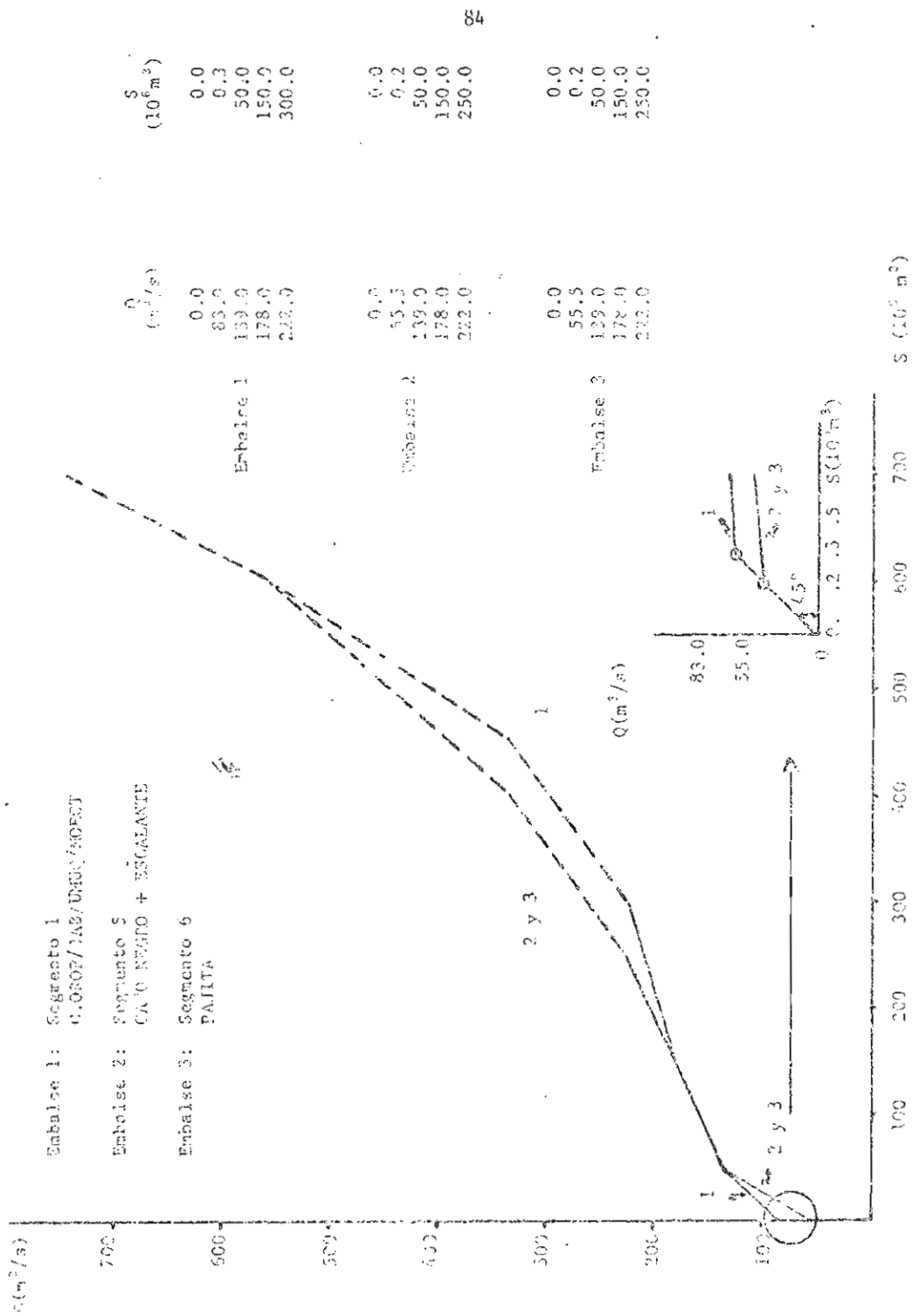


Fig. 17. Embalses hipotéticos. Resultado de la calibración Fase I

Estos segmentos o cuencas Fase II se calibran asumiendo como caudales observados los simulados a la salida de cada segmento en la Fase I.

Al calibrar separadamente cada cuenca Fase II se pueden utilizar estaciones de precipitación adicionales a las asignadas a estos segmentos en la calibración Fase I, de tal manera que se obtenga una mejor representación del régimen hídrico.

Las estaciones pluvio-evaporimétricas utilizadas en la calibración Fase II se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Estaciones pluvio-evaporimétricas usadas en cada cuenca Fase II.

Cuenca Fase II	Estación	Serial	Tipo de Datos
1. Río Grande	Umuquena	8065	Precipitación
	La Fría	3061	Evap. y Precipit.
	El Olimpo	8071	Precipitación
	Aldea Pajitas	8074	Precipitación
2. Río Pajita	Caño Negro	8052	Evap. y Precipit.
	Aldea Pajistas	8074	Precipitación
	Zea Florida	3142	Precipitación
3. Escalante alto + Caño Negro	Caño Negro	8052	Evap. y Precipit.
	Pte. Escalante	8054	Precipitación
	Zea Florida	3142	Precipitación
4. Río Onia (hasta el cabalse)	El Vigía	3035	Evap. y Precipit.
	Pte. Escalante	8054	Precipitación
	Zea Florida	3142	Precipitación

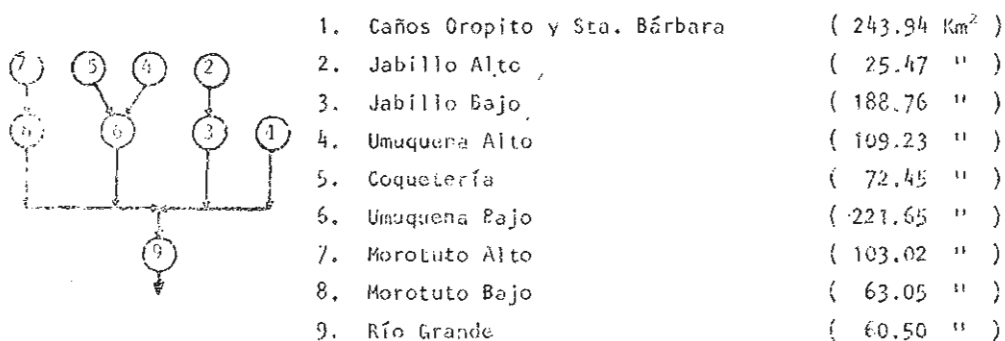
Al usarse estaciones de precipitación diferentes a las de la calibración Fase I se espera que ocurran modificaciones en la respuesta de las cuencas, las cuales se van a reflejar en los hidrogramas simulados. Estas estaciones pueden introducir una nueva componente de precipitación que no se considera en la calibración Fase I. Pero se supone que ésta es de poca importancia para los eventos de crecientes, debido a que durante los mismos la distribución de la precipitación es más homogénea. Sólo para eventos de menor importancia la nueva componente de precipitación puede tener un mayor efecto, debido a que en las estaciones de precipitación usadas en la Fase I, ha podido ocurrir que no se registre lluvia alguna, mientras que en la nueva estación que se considere sí se registre, lo cual hace que se presente un caudal pico, de mediana a pequeña magnitud, donde el hidrograma obtenido en la Fase I no lo presenta. Este efecto es de poca importancia para la calibración del Modelo, si se compara con los caudales originados por las crecientes, sobre los cuales la nueva componente de precipitación tiene poco efecto.

La calibración Fase II se hace para el período 75-78 por ser el período de registro común entre las estaciones usadas en la Fase I y las nuevas adicionales que se consideran en esta Fase.

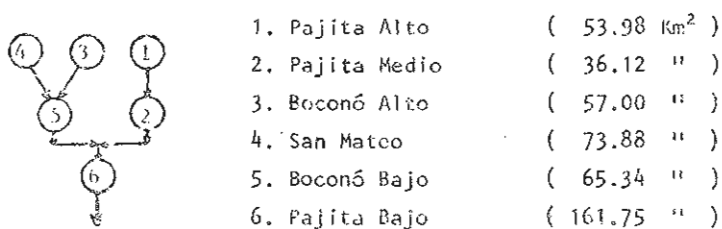
Para la ejecución de la calibración Fase II es necesario dividir cada cuenca en segmentos de escorrentía y calcular los histogramas tiempo-área en cada uno de ellos. La mejor manera de hacerlo es, según Crawford y Linsley (1966), estimando los tiempos de viaje de los flujos en cada segmento aplicando la fórmula de Manning. Como no se dispone de datos hidráulicos para los cauces principales dentro de las cuencas Fase II, necesarios para aplicar la fórmula de Manning, se estiman los histogramas a partir del plano de isocronas de la cuenca del río Escalante elaborado por Rivera (1982).

En la Figura 18 se muestra, de manera esquemática, la segmentación que se hace en cada cuenca Fase II y en el Anexo 2 se presentan los mapas correspondientes. En la Tabla 23 se muestran los histogramas tiempo-área.

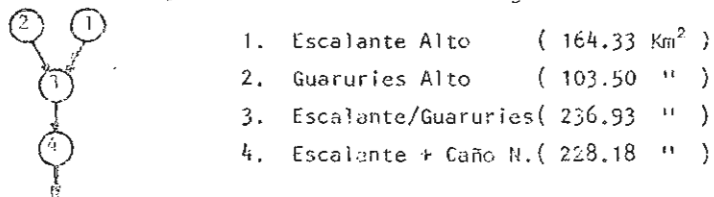
Cuenca Fase II N° 1: Río Grande



Cuenca Fase II N° 2: Río Pajita



Cuenca Fase II N° 3: Río Escalante + Caño Negro



Cuenca Fase II N° 4: Río Onía hasta el Embalse

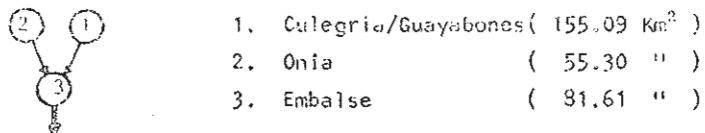


Figura 18. Segmentación Esquemática. Cuenclas Fase II.

Tabla 23. Histogramas tiempo de retardo - área.

Cuenca Fase II N° 1: Río Grande																	
S E G M E N T O S																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9									
T	A	T	A	T	A	T	A	T	A	T							
5	.13	1	1.0	5	.12	1	1.0	1	1.0	5	.03	1	1.0	4	.03	4	.11
10	.20			10	.16					10	.17			8	.22	8	.12
15	.30			15	.09					15	.23			12	.41	12	.32
20	.28			20	.19					20	.50			16	.30	16	.45
25	.09			25	.44					25	.07						

Cuenca Fase II N° 2: Río Pajita											
S E G M E N T O S											
1	2	3	4	5	6						
T	A	T	A	T	A	T	A	T	A	T	
2	.78	3	.10	2	.71	2	.59	3	.13	4	.07
4	.22	6	.48	4	.29	4	.41	6	.36	8	.14
		9	.42					9	.51	12	.75
										16	.54

Cuenca Fase II N° 3: Escalante + Caño Negro										
S E G M E N T O S										
1	2	3	4							
T	A	T	A	T	A	T	A	T	A	T
4	.05	3	.30	4	.30	4	.10			
8	.20	6	.52	8	.54	8	.13			
12	.57	9	.18	12	.26	12	.32			
16	.18			16	.16	16	.45			

Cuenca Fase II N° 4: Onía										
S E G M E N T O S										
1	2	3								
T	A	T	A	T	A					
3	.20	2	.48	2	.54					
6	.46	4	.52	4	.46					
9	.34									

T: Tiempo de viaje en horas

A: Fracción del área total del segmento

1: Segmento de escorrentía N° 1.

El orden de magnitud de los parámetros del Modelo se basa en los resultados obtenidos en la calibración Fase I. Los parámetros EPXM, K3 y NN se estiman en forma sistemática, a partir de la cobertura vegetal en los diferentes segmentos. De esta manera los cambios en el uso de la tierra, deforestaciones, o reforestaciones, pueden ser considerados sistemáticamente durante un período de tiempo dado.

Los valores de K3, NN, EPXM como función de la cobertura vegetal usados en este estudio se presentan en la Tabla 24. La cual es un resumen de las tablas diseñadas por Crawford y Linsley (1966), presentadas por Duque (1979), modificándose lo concerniente al parámetro NN de acuerdo a los resultados obtenidos en la calibración Fase I.

Tabla 24. Valores de NN, K3, EPXM en función de la cobertura vegetal

	Pasto	Bosque Medio	Bosque Alto
NN	0.25	0.40	0.60
K3 (cm)	0.50	0.71	0.76
EPXM (cm)	0.25	0.38	0.50

Los valores de estos parámetros asignados al área de influencia de cada estación o diferentes sectores con características homogéneas delimitados dentro de cada cuenca, se calculan como un promedio ponderado, según área, de aquellos estimados en cada segmento de escorrentía.

En la Tabla 25 se muestran los valores de estos parámetros, así como también la longitud y pendiente promedio de la vertiente en cada segmento; y en la Tabla 26 los valores asignados a los sectores dentro de las cuencas Fase II.

Tabla 25. Valores estimados de NN, K3, EPXM en cada segmento de las cuencas Fase II.

Cuenca Fase II	Segmento	Area (Km ²)	P	Cobertura			NN	K3	EPXM	L (mts)	SS
				Bm	Ba	NR					
1	1. Propito/Sta. Esrb.	243.94	90	-	10	.285	.526	.275	1124	.00025	
	2. Jabillo alto	25.47	80	15	5	.29	.545	.282	707	.26	
	3. Jabillo bajo	186.76	95	-	4	.262	.505	.258	1026	.00020	
	4. Umuquena alto	103.23	55	15	50	.448	.662	.395	790	.20	
	5. Coqueteria	72.45	40	-	60	.46	.656	.40	724	.35	
	6. Umuquena bajo	221.65	48	-	52	.432	.635	.38	657	.0009	
	7. Horotuto alto	103.02	40	15	45	.43	.649	.382	735	.31	
	8. Horotuto bajo	63.05	93	-	7	.775	.518	.268	525	.002	
	9. Río Grande	60.50	95	-	5	.268	.513	.263	785	.0005	
Σ = (1009.07)											
2	1. Pajita alto	53.98	60	25	15	.34	.552	.32	703	.26	
	2. Pajita medio	36.12	80	-	20	.32	.552	.30	600	.001	
	3. Bocón alto	57.0	35	15	50	.448	.662	.395	791	.25	
	4. San Mateo	73.88	40	25	35	.41	.644	.37	527	.25	
	5. Bocón medio	65.34	80	-	20	.32	.552	.30	600	.001	
	6. Pajita bajo	161.75	80	-	20	.32	.552	.30	1195	.001	
Σ = (448.07)											
3	1. Escalante alto	164.33	35	15	50	.448	.662	.395	978	.28	
	2. Guarurries alto	103.50	45	45	10	.353	.621	.354	862	.27	
	3. Guarurries/Escalant.	236.93	89	4	7	.281	.527	.273	703	.0005	
	4. Escalante+Caño Neg.	228.13	95	-	5	.268	.513	.263	890	.00012	
Σ = (732.94)											
4	1. Culegria/Guayab.	155.09	20	50	30	.415	.662	.377	842	.30	
	2. Onia	55.3	30	10	60	.475	.677	.413	760	.31	
	3. Embalse	51.69	60	20	20	.35	.594	.326	760	.15	
Σ = (292.0)											

P : Pasto

Bm : Bosque medio

Ba : Bosque alto

Tabla 26. Valores de NN, K3, EPXM, L y SS asignados en la calibración de las cuencas Fase II.

Cuenca Fase	Sector	NN	K3	EPXM	L	SS	Segmentos representativos.
1	La Fría	.285	.526	.275	1524	.00025	1
	Unuquena	.351	.600	.323	883	.1636	2, 3, 4, 5
	Fajitas	.43	.649	.382	735	.00058	1, 3, 5, 8, 9
	El Olimpo	.319	.550	.299	1018		
2	Pajitas	.34	.574	.317	901	.076	1, 2, 3, 5, 6
	Caño Negro	(.41)	.644	.370	527	(.25)	4
	Zea Florida	.41	.644	.370	527	.25	4
3	Zea Florida	.411	.646	.371	933	.276	1, 2
	Pte. Escalan.	.281	.527	.273	703	.0005	3
	Caño Negro	.268	.513	.263	890	.00012	4
4	Zea Florida	.415	.662	.377	842	.30	1
	Pte. Escalan.	.415	.662	.377	842	.30	1
	El Vigía	.400	.623	.361	760	.215	2, 3

(): Los valores entre paréntesis se modifican en la calibración.

Los demás parámetros del modelo Stanford tienen valores similares a los obtenidos en la calibración Fase I.

Para la calibración Fase II se usan embalses hipotéticos de igual manera y con la misma finalidad que en la Fase I: El embalse hipotético a la salida de la cuenca del río Grande, segmento N° 1 de la calibración Fase I, es eliminado y en su lugar se usan tres embalses hipotéticos ubicados dentro de la misma. La cuenca del río Grande, o cuenca Fase II N° 1, está dividida en nueve segmentos de escorrentía como se muestra en la Figura 18, ubicándose en los segmentos 1, 3 y 6 los embalses hipotéticos. El primero, a la salida de la subcuenca de los caños Sta. Bárbara y Oropito, se usa para simular el amortiguamiento de crecientes debido al desborde periódico de sus cauces; en esta subcuenca el MARNR (1983a) reporta una mancha de inundación de 4218 Ha. El

segundo y tercer embalse hipotético, a la salida de las subcuencas de los ríos Jabillo y Umuquena respectivamente, se usan para considerar la amortiguación de crecientes debido al desborde de los cauces que allí ocurren, tal como lo sugiere Linsley, citado por MOP, (1971a). A la salida de las cuencas Fase II N° 2 y 3 se usan los mismos embalses hipotéticos correspondientes a los segmentos 5 y 6 de la calibración Fase I. La finalidad de su uso es considerar el amortiguamiento de crecientes debido al desborde de los cauces en las cuencas de los ríos Pajita y Escalante, hasta la confluencia con Caño Negro, respectivamente.

Los embalses hipotéticos se definen de igual manera que en la calibración fase I. Los datos para el embalse "Ing. Víctor Martín Elvira" a la salida de la cuenca Fase II N° 4, río Onia hasta la presa, son los mismos de la calibración Fase I.

Los resultados de la calibración Fase II son del mismo tipo que los obtenidos en la calibración Fase I y no se presentan como Anexos debido al espacio considerable que ocuparían. Sin embargo están disponibles en los archivos del sistema HP - 1000 del CIDIAT. En las Tablas 27 y 28 se muestra el valor de los parámetros que se obtienen de la calibración y en la figura 19 se presentan las curvas de operación de los embalses hipotéticos.

Precipitación de Diseño

Para simular las crecientes de diferentes períodos de retorno, TR, es necesario introducir al modelo hidrológico los datos de precipitación puntual horaria de cada estación utilizada. Estos datos deben corresponder a un período de retorno tal que puedan generar la creciente con el período de retorno buscado.

Existen infinitas combinaciones entre las diferentes estaciones, cada una con un TR diferente, que pueden generar la misma creciente de TR años de retorno. Sólo si la correlación entre las diferentes estaciones pluviométricas es total, podría ocurrir un evento con igual período de retorno en todas las estaciones.

El MARNR (1983b) presenta un análisis estadístico donde demuestra que la correlación entre estaciones pluviométricas, en la cuenca del río Escalante, está lejos de ser total. Debido a ello la metodología que se emplea en este estudio es del tipo agregación - desagregación. La cual consiste en estimar la precipitación promedio sobre la cuenca, con un período de retorno deseado, y luego se desagrega ésta en valores puntuales para cada estación.

El siguiente aspecto de la metodología para estimar las precipitaciones de diseño se refiere a la duración de los eventos. Generalmente se toma el tiempo de concentración de la cuenca, el cual, según el MARNR (1983b), HIDROMET (1979) y CIVISAN (1966), es aproximadamente de 6 días para la cuenca del río Escalante hasta la Ferreira.

La metodología más aceptada para determinar la precipitación máxima de t horas de duración, cañja sobre una cuenca, es el análisis de tormenta. En Venezuela, los análisis de tormenta existentes, MARNR (1984b), son para duraciones inferiores a 12 horas, debido a que las tormentas individuales generalmente no sobrepasan esta duración. La información de lluvias extremas que se encuentra en los anuarios hidrometeorológicos se refiere sólo a 1,3,6,9,12 y 24 horas de duración, por lo que, para aplicar el análisis de tormentas sería necesario revisar y procesar los registros históricos de cada estación pluviográfica dentro y fuera del área en estudio. El análisis de tormentas considerando 6 días de duración es complejo, puesto que en ese lapso de tiempo se pueden encontrar sucesivas tormentas cada uno de duración diferente. Bajo estas condiciones, llevar a cabo dicho análisis en el área de estudio requeriría demasiado tiempo, y por ello no se aplica en el presente trabajo.

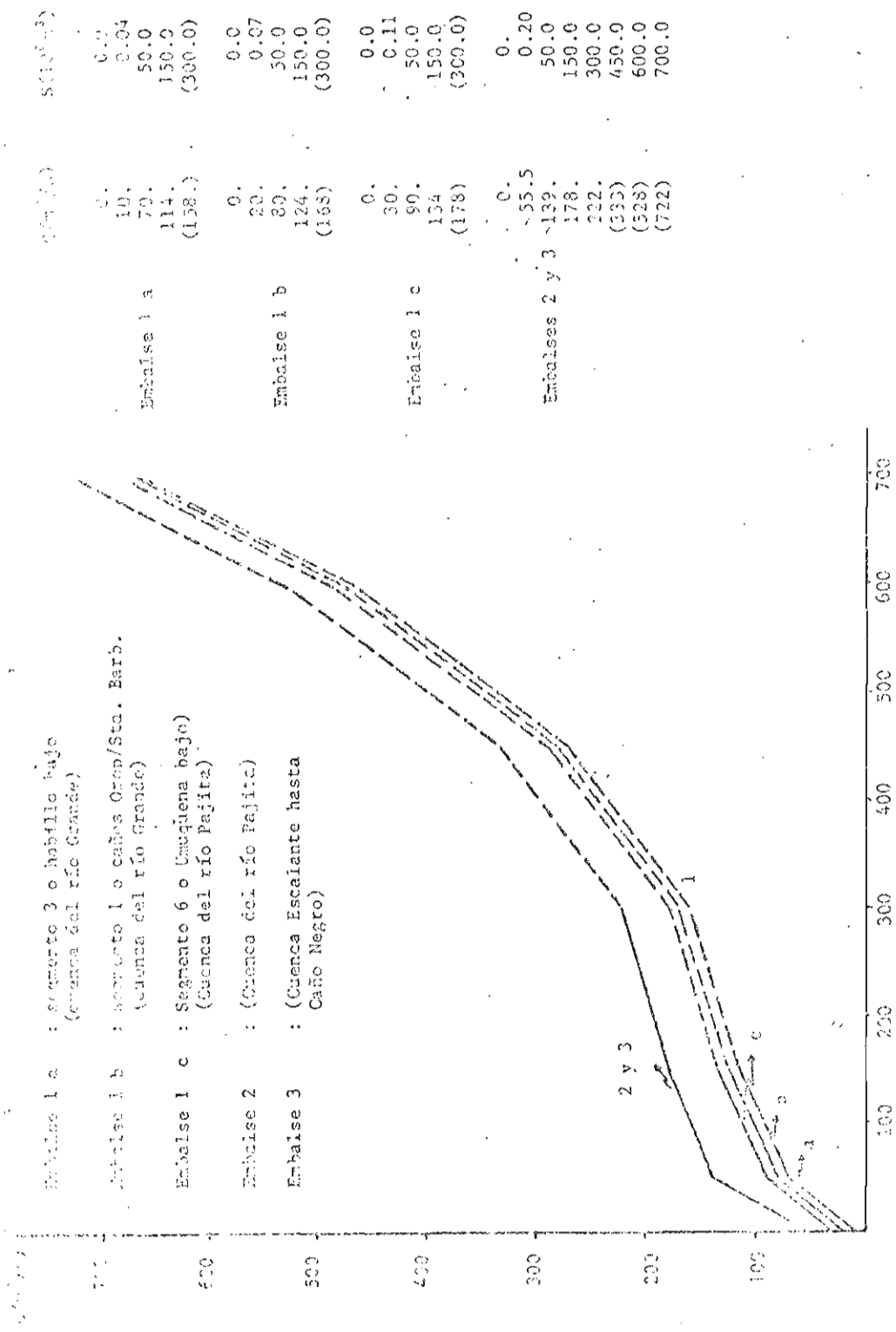
El análisis de tormenta es un método de optimización que maximiza, a partir de la tormenta máxima, la lámina caída de diferentes duraciones y para diferentes tamaños de superficie; lo que se traduce en maximizar el volumen precipitado, dentro de una superficie específica, para diferentes duraciones, siguiendo al patrón de la tormenta máxima.

La metodología que se aplica en este estudio trata de conseguir eso

mismo, pero para una duración fija y teniendo como patrón el evento que haya generado la máxima creciente registrada, y para la cual se disponga de la información pluviográfica.

Las dos crecientes máximas del río Escalante registrados en la estación La Ferreira son la de Enero de 1956, con un caudal pico de $580 \text{ m}^3/\text{s}$ (HIDROMET 1979), y la de Diciembre de 1975 con un caudal pico de $409 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor es el publicado por el reporte de la inundación de 1975/1976 (M.O.P., 1976a); sin embargo, del mensuario pluvio-evaporimétrico correspondiente a Noviembre-Diciembre de 1975 (MOP 1976b), se obtiene un caudal diario máximo de $534 \text{ m}^3/\text{s}$. Como no se dispone de información pluviográfica de 1956 para las estaciones usadas en este estudio, el análisis se hace en base a la creciente de Diciembre de 1975.

Para la determinación de la precipitación de diseño se selecciona un período de dos meses de duración. El criterio para tal selección se basa en que la creciente de Diciembre de 1975 no se origina como respuesta a la máxima precipitación de 6 días de duración, que es el tiempo de concentración de la cuenca. Como no se dispone de un análisis de tormenta para saber si lo anterior es cierto, se hace un análisis de los datos diarios registrados en diez estaciones pluviográficas del área en estudio. En el cual se observa que la precipitación acumulada en los 6 días anteriores a la fecha del pico no es la máxima precipitación de 6 días de duración ocurrida en la cuenca. Se supone entonces que la magnitud de la creciente se debe tanto a la precipitación caída en los 6 días anteriores a la ocurrencia del pico, como a las condiciones de humedad antecedentes. Del análisis al hidrograma diario en La Ferreira, Figura 20, se puede observar que éste comienza a ascender a partir del 28 de Octubre hasta el 24 de Diciembre, fecha del pico, pero su ascenso más marcado ocurre a partir del 26 de Noviembre. De esta manera se asume, para los efectos de este estudio, que del 28 de Octubre al 25 de Noviembre, casi un mes, se crean condiciones de humedad, tales que, con los eventos del 25 de Noviembre al 24 de Diciembre, casi un mes, se produce la onda máxima de la creciente.



Volumen almacenado S (10⁶ m³)

Embalses 1 a, b, c, 2 y 3. Resultados de la explotación. Fase 1.

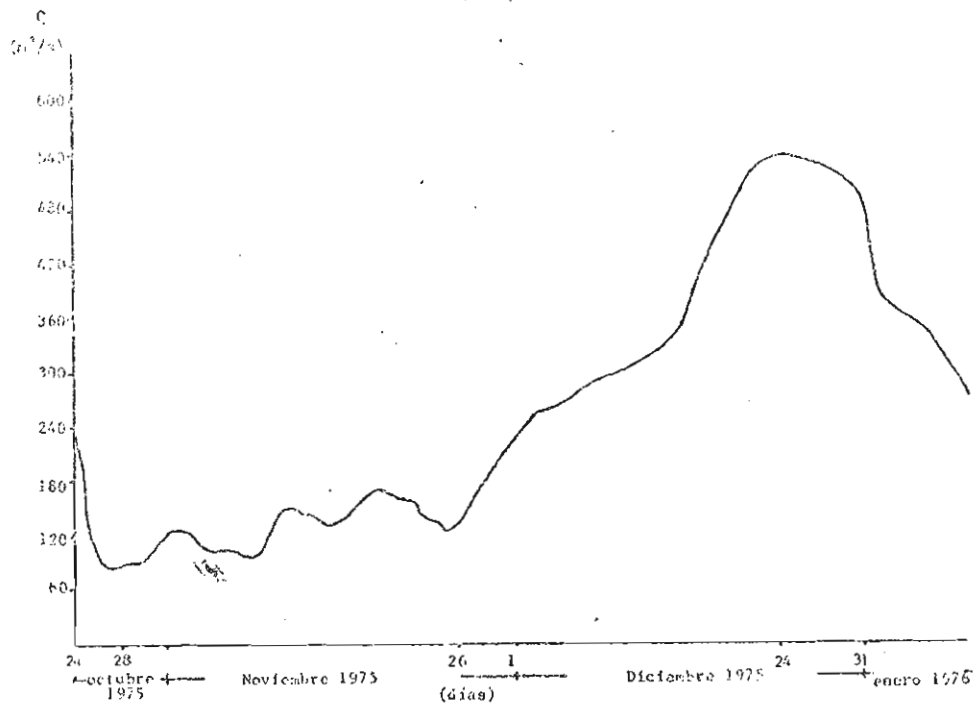


Figura 20. Hidrograma observado de la creciente de Diciembre de 1975.

A continuación se presenta, por pasos, el procedimiento que se sigue para estimar la precipitación puntual de diseño en las estaciones pluviográficas usadas con el modelo hidrológico.

1. Recabación y procesamiento de Datos

En la Tabla 29 se presenta un listado de las estaciones pluviográficas y el período para el cual se recaban los datos de precipitación mensual.

Tabla 29. Estaciones pluviográficas usadas en el análisis de la precipitación de diseño.

Estación	Serial	Período de la información
La Ferreira	3013	1953 - 1983
El Guayabo	3034	1968 - 1983(*)
El Vigía	3035	1953 - 1983
La Fría	3061	1951 - 1983
Zea Florida	3142	1969 - 1983
Caño Negro	8052	1953 - 1983
Pte. Escalante	8054	1960 - 1983
Umiquena	8065	1964 - 1983
Aldea Pajitas	8074	1973 - 1982
El Olimpo	8071	1973 - 1983

(*): La Estación es eliminada en Abril de 1983

Para la estimación de datos faltantes y la desacumulación de datos englobados se utiliza el Programa DATFA (Barricos, 1982). En el Anexo 1 se presenta la serie de registros mensuales en cada estación, previamente procesada a través del programa.

La serie de caudales máximos anuales se obtiene de HIDROMET (1979) y se presenta en la Tabla 30.

2. Análisis de Frecuencia y ajuste de la distribución probabilística de Extremos de Gumbel, a la serie de precipitaciones máximas anuales, de dos meses de duración, en cada estación pluviográfica.

En primer lugar se calculan las precipitaciones anuales máximas de dos meses de duración, asumiendo como año hidrológico el período de Julio a Junio. Para las estaciones dentro de la cuenca del Escalante, éste es el período entre todos los posibles en donde ocurre menos veces que la máxima bimensual esté entre el mes final de un año y el inicial del siguiente año. En el Anexo 1 se presentan los registros bimensuales máximos en cada estación.

Tabla 30. Crecientes máximas anuales del río Escalante en La Ferreira.

	Año	Q (m ³ /s)	Inicio	Pico	Final
1	54	263		Dic.	
2	55	202		May.	
3	55/56	580		Ene.	
4	56/57	275		Ene.	
5	58	205		Nov.	
6	59	136		May.	
7	60	357		Dic.	
8	61	119	18 Nov.	13 Dic.	27 Dic.
9	62	114	07 Nov.	29 Nov.	11 Dic.
10	63	205	02 Abr.	15 May.	27 Jun.
11	64	138	07 Nov.	25 Dic.	07 Dic.
12	64/65	245	30 Dic.	19 Ene.	10 Feb.
13	66	394	08 Nov.	19 Nov.	07 Ene.
14	67	360	07 Abr.	10 May.	19 Jun.
15	68	305	13 Mar.	23 Abr.	31 May.
16	69	390	05 Oct.	30 Nov.	12 Ene.
17	70	300	31 Oct.	26 Dic.	02 Feb.
18	71	254	03 Feb.	13 Feb.	01 Mar.
19	72	377	10 Abr.	30 Abr.	10 Jun.
20	73/74	368	19 Oct.	18 Dic.	05 Feb.
21	74	408	23 Abr.	08 May.	30 May.
22	75/76	409*	03 Oct.	24 Dic.	18 Ene.

* Según el Mensuario de Nov. - Dic. del 75: Q = 534 m³/s.

A la serie de eventos bimensuales máximos se le ajusta la distribución probabilística de extremos de Gumbel. La cual se define (Smith, 1982) a continuación.

Función acumulada de probabilidades:

$$F_x(x) = e^{-\alpha(x-\beta)} \quad (3.1)$$

Función de densidad

$$f_x(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} \quad (3.2)$$

Momentos de primero, segundo y tercer orden:

$$\text{Media, } \mu = \beta + 0.577/\alpha \quad (3.3)$$

$$\text{Varianza, } \sigma^2 = 1.645/\alpha^2 \quad (3.4)$$

$$\text{Coeficiente de Asimetría, } g = 1.14$$

α y β son los parámetros de la distribución y su estimación según el método de los momentos es:

$$\alpha = 1.281/S \quad (3.5)$$

$$\beta = \bar{X} - 0.5772/\alpha \quad (3.6)$$

Siendo \bar{X} y S la media aritmética y la desviación típica de la serie observada.

El período de retorno de un evento cualquiera se calcula a partir de su función acumulada de probabilidades aplicando la siguiente ecuación.

$$TR = \frac{1}{[1 - F_x(x)]} \quad (3.7)$$

donde TR = período de retorno en años. $[1 - F_x(x)]$ = probabilidad de que un evento igual o mayor que x ocurra en un año cualquiera

La prueba del ajuste utilizada es la del test de Smirnov - Kolmogorov para datos no-agrupados, el cual consiste en:

- Determinar la diferencia máxima absoluta entre la probabilidad teórica, ecuación 3.1, y la probabilidad empírica entre los datos de la serie observada:

La probabilidad empírica es igual a $\left[\frac{m}{N+1}\right]$; siendo m el orden que ocupa una observación de la serie, luego que ésta ha sido ordenada de menor a mayor, y N el número total de observaciones.

La diferencia máxima, Δ_0 , es entonces el mayor valor de: $\left|\left[\frac{m}{N+1}\right] - F_X(x)\right|$

- Determinar para un nivel de significancia, α , y el número total de observaciones, N , el estadístico tabulado de Smirnov - Kolmogorov, $\Delta_c(N; \alpha)$.

- Si $\Delta_0 < \Delta_c(N; \alpha)$ se acepta el ajuste, en caso contrario se rechaza.

Para los cálculos se utiliza el Programa GUMBE, desarrollado por Bois (1982), el cual realiza el ajuste gráfico y analítico de Gumbel. A este Programa se le incorpora un módulo adicional para realizar la prueba de ajuste de Smirnov - Kolmogorov.

Los resultados de ajustar la distribución Gumbel a la serie de valores extremos, mediante el Programa Gumbel, se presentan en el Anexo 1.

3. Ajuste de la distribución de Gumbel a la serie bimensual de valores extremos de la estación "promedio de la cuenca".

Se define una estación artificial que contiene los registros de precipitación mensual promedio sobre la cuenca, estación "promedio de la cuenca", sobre los cuales se ajusta la distribución de Gumbel.

- Cálculo de la precipitación promedio a través de los polígonos de Thiessen.

El cálculo se hace a través de la siguiente fórmula:

$$PM_i = \sum_{j=1}^n (PRE_{i,j} * PORCP_j) \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.8)$$

donde:

PM_i = Precipitación media sobre la cuenca en el mes i

$PRE_{i,j}$ = Precipitación puntual de la estación j en el mes i

$PORCP_j$ = Fracción del área de la cuenca correspondiente al polígono de la estación j .

n = Número de estaciones

i = Subíndice indicador del mes

m = Número de meses

j = Subíndice indicador de la estación

En la Tabla 31 se presentan los factores de Thiessen para la cuenca del río Escalante.

Tabla 31. Factores de Thiessen. Cuenca del Río Escalante

Polígono de la Estación	PORCP
La Ferreira	0.1388
El Guayabo	0.0796
El Vigía	0.0942
La Fría	0.0175
Zea Florida	0.0681
Caño Negro	0.0962
Pte. Escalante	0.0755
Umuquena	0.1026
Aldea Pajitas	0.1164
El Olimpo	0.2112
	$\Sigma = 1.0000$

La precipitación mensual promedio se calcula para el período 1973 - 1983, el cual es el mayor período común entre las estaciones pluviográficas de la Tabla 31. La excepción es la estación El Guayabo, serial 3034, que es eliminada a partir del 04/83; los registros faltantes se estiman por el método de la razón normal con una estación vecina de apoyo, usando la fórmula siguiente:

$$P_x = \frac{N_x}{N_y} * P_y \quad (3.9)$$

donde:

- Px = Dato faltante en la estación El Guayabo
- Py = Dato conocido en la estación El Olimpo (serial 8071)
- Nx = Precipitación normal mensual en la estación El Guayabo
- Ny = Precipitación normal mensual en la estación El Olimpo

El registro de precipitación mensual, período 73-83, obteniendo para la estación "promedio de la cuenca" se presenta en el Anexo 1.

- Determinación de la serie de eventos bimensuales máximos en la estación "promedio de la cuenca". En el Anexo 1 se presentan los resultados.

- Ajuste de la distribución de Gumbel a la serie de eventos bimensuales máximos en la estación "promedio de la cuenca". Los resultados del Programa GUMBE se presentan en el Anexo 1.

4. Período de retorno del evento de Noviembre-Diciembre de 1975

A partir de los ajustes analíticos de la distribución de Gumbel obtenidos para cada estación pluviográfica y para la estación "promedio de la cuenca" se calcula el período de retorno correspondiente a la precipitación acumulada del evento de Noviembre-Diciembre de 1975. Los resultados se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32. Períodos de retorno de la precipitación total caída en cada estación durante los meses de Noviembre y Diciembre de 1975.

Estación	Lámina (mm)	TR (años)
La Fría	1222.0	18
Umuquena	946.8	7
El Olimpo	713.1	5
Aldea Pajitas	689.0	3
La Ferreira	622.0	16
El Vigía	613.4	4
Caño Negro	609.9	3
El Guayabo	563.3	2
Pte. Escalante	559.4	3
Zea Florida	226.7	1
"Prom. Cuenca"	654.6	5.1

En la misma se puede observar que la precipitación promedio caída durante el evento de Noviembre-Diciembre de 1975, en la cuenca del río Escalante hasta La Ferreira, corresponde a un período de 5.1 años de retorno; mientras que la precipitación total en cada estación corresponde a períodos de retorno entre 1 y 18 años. Esta distribución, de los períodos de retorno en cada estación, corresponde a un punto del espacio muestral posible que pueda originar la misma precipitación promedio sobre la cuenca. La suposición de que ocurra un mismo período de retorno en cada estación pluviográfica es poco probable además de que no garantiza que con ello ocurra una precipitación promedio sobre la cuenca de igual período de retorno.

Ajustando la distribución de Gumbel a la serie de caudales máximos anuales de la Tabla 30, el resultado se presenta en el Anexo 1, se puede determinar que el período de retorno correspondiente al caudal pico de la creciente de Diciembre de 1975, $409 \text{ m}^3/\text{s}$, es de 5.5 años. De esta manera la suposición, comúnmen-

te usada, de que la precipitación de TR años de retorno caída sobre la cuenca, genera la creciente de igual período de retorno es aceptada.

5. Método de desagregación de la precipitación media de diseño, caída sobre la cuenca, en valores puntuales para cada estación.

El método se basa en mantener la misma distribución espacial del volumen precipitado durante el evento de Noviembre - Diciembre de 1975; y consiste en determinar un factor volumétrico para cada polígono de Thiessen, tal como se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Distribución espacial de volumen total precipitado durante los meses de Noviembre - Diciembre de 1975.

Polígono	Area (Km ²)	Precip. Puntual	Volumen (10 ⁶ m ³)	% del volumen Total (fv)	Factor
La Ferreira	544.6	622.0	338.75	0.1319	0.9502
El Guayabo	312.6	563.0	176.07	0.0685	0.8605
El Vigía	369.7	613.4	226.75	0.0883	0.9370
La Fría	68.8	1222.0	84.08	0.0327	1.8667
Zea Florida	267.2	226.7	60.57	0.0236	0.3463
Caño Negro	377.7	609.9	230.37	0.0896	0.9317
Pte. Escalant.	296.5	559.4	165.84	0.0647	0.8545
Umuquena	402.6	946.8	381.18	0.1484	1.4463
Aldea Pajitas	456.8	689.0	314.71	0.1225	1.0525
El Olimpo	828.6	713.1	590.89	0.2301	1.0893
Cuenca	392.5	654.63	2569.42	1.0	

El factor volumétrico se calcula de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$\text{FACTOR}_i = \frac{fv_i}{\text{Area}_i} * \sum_{i=1}^n \text{Area}_i = \frac{fv_i}{\text{PORCP}} = \frac{L_i}{L_p} \quad (3.10)$$

donde:

Fv_i = Fracción del volumen total correspondiente al polígono i

$Area_i$ = Área del polígono i

n = Número total de polígonos

$PORCP_i$ = Factor de Thiessen para el polígono i

Li = Precipitación en la estación del polígono i

Lp = Precipitación promedio sobre la cuenca

$FACTOR_i$ = Factor para convertir la precipitación promedio sobre la cuenca en precipitación del polígono i .

Multiplicando la precipitación promedio sobre la cuenca por fv_i se obtiene el volumen correspondiente al polígono i , el cual guarda la misma relación de volumen del evento máximo de Noviembre - Diciembre de 1975. Dividiendo este volumen entre el área del polígono i se obtiene la precipitación puntual correspondiente a la estación i . Directamente esto se consigue multiplicando la precipitación promedio sobre la cuenca por el factor del polígono, es decir:

$$P_i = P_p * FACTOR_i \quad (3.11)$$

donde:

P_i = Precipitación puntual en la estación pluviográfica del polígono i .

P_p = Precipitación promedio sobre la cuenca

6. Precipitación puntual de diseño

A partir del ajuste de la distribución Gumbel realizado para la estación "promedio de la cuenca", se estima la precipitación media sobre la cuenca para diferentes períodos de retorno. Con estos valores y el factor corres-

pendiente a cada polígono de Thiessen se aplica la ecuación 3.11 para calcular la precipitación puntual correspondiente a cada estación pluviográfica usada en el modelo hidrológico. Los resultados se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. Precipitaciones de dos meses de duración para diferentes períodos de retorno.

Estación	(Sección)	PERÍODO DE RETORNO													
		2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	50000	100000
Quaqueña	(2005)	758.7	952.2	1256.4	1775.7	2415.0	3256.6	4355.3	5855.2	7805.3	10317.4	13654.2	18275.1	24321.7	32411.8
Cerro Negro	(2052)	488.3	605.7	883.1	1257.1	1751.5	2351.6	3177.4	4299.0	5853.6	7835.2	10419.7	14011.2	18631.1	24631.1
El Curvacho	(3034)	451.4	559.4	810.9	1199.5	1651.3	2254.8	3011.2	4093.6	5574.7	7540.8	10128.1	13394.1	17747.4	23613.4
El Vigía	(3035)	491.6	609.1	887.0	1251.7	1758.4	2351.8	3102.1	4198.3	5670.2	7642.2	10237.3	13609.2	18176.0	24048.0
La Ferreira	(3013)	498.5	617.7	895.7	1271.4	1770.5	2373.9	3172.2	4271.7	5767.7	7759.7	10361.1	13829.0	18508.2	24512.2
La Frío	(3061)	979.3	1213.5	1768.7	2517.4	3410.1	4541.4	6095.3	8282.0	11111.3	14874.7	20044.2	26807.3	35839.8	47523.2
El Olémpo	(2071)	571.4	708.2	1057.7	1485.3	2017.9	2722.1	3666.1	4926.8	6560.4	8844.1	11859.6	15832.2	21032.2	27915.3
Hidra Pajital(2074)		554.1	684.2	1017.7	1411.6	1905.2	2545.6	3426.7	4593.6	6184.5	8335.3	11102.1	14829.9	19970.3	26511.1
Pto. Escal. (2054)		448.3	555.5	816.5	1164.6	1582.8	2148.7	2874.7	3891.6	5267.2	7132.8	9519.5	12681.1	16837.3	22407.9
San Florida (3142)		181.7	225.5	333.9	481.1	657.2	884.0	1170.7	1565.9	2102.5	2831.2	3794.2	5068.8	6761.5	8991.1
Lina en la cuenca		524.5	650.1	933.2	1312.9	1781.1	2391.4	3200.5	4272.1	5748.9	7725.7	10327.2	13809.9	18482.0	24538.8

7. Hietogramas horarios como datos de entrada al modelo

Las precipitaciones puntuales, de dos meses de duración, asignadas a cada estación pluviográfica, Tabla 34, mantienen la misma distribución espacial del volumen total precipitado durante el evento de Noviembre - Diciembre de 1975. Para mantener la misma distribución espacial a nivel horario, se determina, a partir de los registros horarios durante el evento de Noviembre-Diciembre de 1975, el hietograma porcentual horario en cada estación pluviográfica

fica. En el Anexo 1 se presenta el Hietograma correspondiente a cada estación, el cual está conformado por 1464 horas.

La precipitación puntual horaria a introducir como dato del modelo hidrológico, se obtiene multiplicando la precipitación de dos meses de duración por el hietograma porcentual horario. Esta operación se hace para cada periodo de retorno en todas las estaciones pluviográficas usadas en el modelo.

CAPITULO I-V

ESTUDIO HIDROLOGICO SEDIMENTOS

Introducción

Los sedimentos que transportan los cauces a nivel del piedemonte, al norte de la carretera panamericana, son una componente importante en el proceso de desbordes de estos. A nivel de la panamericana la deposición de materiales obstaculiza el escurrimiento y provoca un socavamiento en las márgenes de los cauces que aumenta la cantidad de material de arrastre. Aguas abajo, el material tiene tendencia a depositarse tapando los lechos cada vez que hay obstáculo; de esta manera se originan los destoramientos, acompañados de derrames y de difluentes.

Por lo anterior se considera de importancia, como parte de la metodología de evaluación integral de alternativas de control de inundaciones, la cuantificación de los sedimentos producidos en la cuenca de estudio, así como también el efecto que éstos tienen en la magnitud de las inundaciones.

Para la cuantificación de los sedimentos se hace uso del modelo de producción de sedimentos, "MUSLE", basado en la hidrología de la cuenca hidrográfica, presentado por Williams y Berndt (1977); el cual se basa en una modificación a la ecuación universal de pérdida de suelo, "USLE".

Los sedimentos producidos se refieren al sedimento total a la salida de la cuenca hidrográfica en un tiempo dado. No todas las pérdidas de suelo se entregan a los cauces debido a que éstos se depositan en diferentes localidades dentro de la cuenca. El material que es arrastrado hasta algún punto de interés es entonces el sedimento producido (Mitchell y Bubenzer, 1980).

Los sedimentos se mueven en un cauce natural como sedimento en suspensión en el flujo, o como carga de fondo, que se desliza y rueda a lo largo del lecho del canal. Algunas veces se emplea también un tercer término,

el de saltación, para definir algunos sedimentos que parecen rebotar contra el fondo del canal. Los procesos no son independientes entre sí, dado que el material que aparece en un tramo como carga de fondo puede aparecer aguas abajo en suspensión (Linsley, Koiler y Paulhus, 1977). Así pues la producción de sedimentos se refiere a la suma de todos estos tipos de sedimentos.

El mejor método para obtener los valores del sedimento producido es por mediciones directas, tanto del sedimento en suspensión como el de fondo; pero este procedimiento es costoso y requiere de un gran esfuerzo que podría no ser justificado.

Según Mitchell y Bubenzer (1980), las tres categorías de procedimientos para estimar la producción de sedimentos son:

1. Ecuaciones de predicción
2. Cálculo de la erosión bruta o total y asignación de coeficientes de entrega en los cauces.
3. Mediciones del sedimento en suspensión y de fondo o el depositado en reservorios.

El método que se usa en este estudio cae en la primera categoría y se refiere a una ecuación de predicción empírica, desarrollada de mediciones de parámetros en cuencas hidrográficas. Sin embargo, se asemeja al método de la segunda categoría, puesto que se basa en la "USLE" que es una ecuación para estimar la pérdida bruta del suelo y un factor de escorrentía con coeficientes empíricos que consideran la relación de entrega de sedimentos a los cauces.

Aún cuando existen fórmulas hidráulicas sofisticadas para estimar el transporte de sedimento, tanto de fondo como en suspensión, éstas no deben ser aplicadas en un estudio a nivel de planificación. Fórmulas como las de Meyer-Peter-Müller, Einstein-Brown o Toffaleti, requieren datos topográficos y de características de los materiales de arrastre, los cuales requieren costosos de obtener, además del tiempo considerable que se necesita para su procesamiento.

Además, dichas fórmulas no garantizan una mayor precisión en los resultados a obtener.

El volumen total de sólidos que puede transportar un río depende de sus características hidráulicas: caudal, pendiente, ancho. Si la capacidad de transporte es mayor que la cantidad de materiales que le aporta la cuenca, el río toma de su cauce la diferencia. Por otra parte, si esta capacidad es menor, entonces el río deposita la cantidad en exceso. El volumen de materiales que la cuenca de un río aporta durante un cierto período de tiempo, depende de las características globales de ésta: pendiente, suelo, cobertura vegetal; y eso significa que, a largo plazo, los ríos buscan características que les permitan asegurar, en promedio, el transporte de este volumen de material (Jégat, 1984).

El concepto anterior sobre el equilibrio de los ríos, permite hacer notar lo adecuado que resulta la aplicación de la ecuación de predicción, "MUSLE", para estimar la producción de sedimentos. Es un hecho que en la cuenca de estudio los ríos están en desequilibrio, principalmente en la faja de contacto entre piedemonte y planicie, donde ocurren frecuentes desbordes de los cauces con el consecuente derrame y retención de los sedimentos en la planicie. La capacidad de transporte de los cauces se ve notablemente reducida en este sector. La búsqueda del equilibrio requiere de suficiente tiempo en términos geomorfológicos, lo cual hace que a mediano y largo plazo, en términos de planificación y diseño, la producción de sedimentos sea la variable más relevante de consideración.

Otra razón de peso, en favor de los métodos de producción de sedimentos, es que éstos permiten evaluar el efecto que cambios en el patrón de uso de la tierra tengan sobre los sedimentos producidos.

Finalmente, para cuantificar la cantidad de sedimentos que se retiene en la planicie, en la faja de contacto con el piedemonte, se hace uso de un método de retención de sedimentos en embalses: método de Brunne, para lo cual se utilizan las curvas de los embalses hipotéticos, determinadas en el capítulo

lo cres, y se definen las capacidades aproximadas de cada uno.

Metodología Aplicada

Los pasos que se siguen para la estimación de la producción anual promedio de sedimentos, a través de la "MUSLE" son:

1. Generación de caudales de diferentes períodos de retorno, usando el modelo Stanford IV calibrado en la Fase II, en los diferentes segmentos de escurrentía dentro de las cuencas Fase II.
2. Determinación del caudal pico y el volumen de escurrentía correspondiente a cada hidrograma obtenido en el paso 1.
3. Determinación de los factores K, C, LS, P , que se usan en la "MUSLE", para cada segmento de escurrentía.
4. Aplicación de la "MUSLE" para el cálculo de los sedimentos producidos en las cuencas Fase II sin considerar las deposiciones en la planicie en la faja de contacto con el piedemonte, debido a los desbordes de los cauces. Los cálculos se hacen para diferentes períodos de retorno.
5. Cálculo del valor anual esperado de sedimentos producidos en cada segmento de escurrentía dentro de las cuencas Fase II.
6. Determinación de la capacidad de los embalses hipotéticos, usados en la calibración Fase II, desde el punto de vista de acumulación de sedimentos.
7. Aplicación del método de Brunne para el cálculo de la retención de sedimentos por un embalse con el fin de calcular el sedimento neto producido a la salida de las cuencas Fase II.

El procedimiento general es parte de la metodología usada para la evaluación de alternativas de control de inundaciones y se expone con más detalle en el capítulo cinco. En este capítulo se desarrollan exhaustivamente los pasos 3 y 6, y se hace una prueba inicial de la aplicación de todos los pasos para evaluar preliminarmente el orden de magnitud de los resultados, de manera tal que se puedan realizar los ajustes y correcciones necesarios para garantizar valores lógicos de los mismos.

Producción de Sedimentos

Descripción de la ecuación universal de pérdida de suelo, "USLE", y la modificación para su uso en la predicción de la producción de sedimentos "MUSLE".

La ecuación que se usa en este estudio para la determinación de la producción de sedimentos, "MUSLE", se basa en la modificación a la ecuación universal de pérdida de suelo, "USLE", presentada por Williams y Berndt (1977). Esta modificación consiste en substituir el factor de erosividad de la lluvia, R, de la "USLE" por un factor de escorrentía.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, "USLE"

La "USLE" es la ecuación empírica más usada para la estimación de la erosión laminar y en surcos, "Sheet-rill erosion". La ecuación se basa en mediciones de campo en 10000 parcelas experimentales de escorrentía natural. Una descripción adecuada de la misma es presentada por Foster (1982) y Gasperi-Maggi (1982), la cual se expresa como:

$$A = R. K. L. S. C. P. \quad (4.1)$$

donde:

A = Pérdida promedio de suelo a lo largo del relieve, λ , por unidad de superficie; expresada en las unidades seleccionadas para K y en el período seleccionado para R. En el Sistema Métrico A viene en ton/ha/año y en

el sistema inglés en ton/acre/año.

R = Factor precipitación y escorrentía, es el número de unidades índice de erosión por precipitación y por unidad de tiempo, El, más un factor de escorrentía donde ésta ocurre.

K = Factor de erodabilidad del suelo, es la tasa de pérdida de suelo por unidad de área por unidad índice de erosión para un suelo determinado, evaluado en parcelas standards de erosión o parcela unitaria. La parcela standard o unitaria es aquella que tiene 22.1 m de longitud, λ , 9% de pendiente uniforme, p , y es mantenida en barbecho continuo y libre de cobertura vegetal u otro tipo, donde las labores de labranza se realizan en el sentido de la pendiente.

L = Factor longitud de la pendiente, se estima como $(\frac{\lambda}{\lambda_u})^n$ donde, λ es la longitud de la pendiente; λ_u es la longitud de la parcela unitaria, 22.1 m; y n es un exponente, usualmente 0.5. L es la relación entre la pérdida de suelo de una parcela con longitud de pendiente λ y la pérdida de suelo de una parcela con longitud λ_u , manteniendo las otras condiciones iguales.

S = Factor grado o inclinación de la pendiente, $S = 65.4 \text{ sen}^2 \theta + 4.56 \text{ sen } \theta + 0.065$, donde θ es el ángulo de la pendiente. S es la relación entre la pérdida de suelo de una parcela con p porcentaje de inclinación y la pérdida de suelo de una parcela con 9% de inclinación, manteniendo las otras condiciones iguales.

C = Factor cobertura y manejo, es la relación entre la pérdida de suelo de un área con una determinada cobertura y manejo y otra área igual pero mantenida libre de cobertura y en barbecho continuo.

P = Factor prácticas de conservación, es la relación entre la pérdida de suelo de una parcela con prácticas de conservación tales como cultivo en faja, en contorno, terraceado u otra práctica y la pérdida de suelo de otra parcela sin medidas de conservación, donde las labores de labranza se realizan

en el sentido de la pendiente.

Solo R y K tienen unidades, los demás factores son adimensionales y expresan el efecto que uno de ellos tiene sobre la erosión cuando los demás son idénticos, y siempre tienen como referencia la parcela unitaria.

La "USLE" ha sido desarrollada por Wischmeier desde 1957 en adelante, mediante análisis estadísticos de medidas de la erosión en parcelas experimentales en U.S.A. Es una ecuación de regresión con unidades no homogéneas, por lo que se requiere de consideración especial cuando ella es convertida de la unidad inglesa original a unidades métricas. La variable básica de la "USLE" es el factor R, el cual está expresado en unidades inglesas de $(100 \text{ pies} * \text{Ton}/\text{acre}) * (\text{pulg}/\text{hora})$, la cual se define como la unidad inglesa de índice de erosión, EI, de Wischmeier. No hay todavía aceptada una unidad métrica sencilla para unidades EI del factor R.

Según Foster (1982), la siguiente conversión es la usada por conveniencia para modelar el sistema métrico: a) Multiplicando el EI inglés de Wischmeier por 1.702 se obtiene un EI en sistema métrico con unidades de Newton/hora.

La unidad inglesa para K es $\text{ton}/\text{acre} * \text{EI}$, los valores típicos presentados en el nomograma de Wischmeier y Smith (1978), citado por Foster (1982), están en esta unidad y oscilan entre 0.05 a 0.60. b) Multiplicando el K inglés por 0.1317 se obtiene un K en unidades métricas de $(\text{Kg} * \text{hora}/\text{New}$ ton $* \text{m}^2)$ a lo que es igual, multiplicando el K inglés por 1.317 se obtiene un K en unidades métricas de $(\text{Ton} * \text{hora}/\text{New}$ ton.Hs).

De esta manera, $A = R * K = (\text{New}$ ton $* \text{Kg} * \text{hora}/\text{hora} * \text{New}$ ton $* \text{m}^2)$ es decir $A = \text{Kg}/\text{m}^2 = 0.1 \text{ Ton}/\text{Ha}$. La conversión de la "USLE" de unidades inglesas a métricas es entonces:

$$A [\text{Ton}/\text{Ha}] = 2.24 * (R * K)_{\text{inglés}} * \text{L.S.C.P.} \quad (4.2)$$

Wischmeier (1976), citado por Gásperi-Mago (1982), señala que la "USLE" fue diseñada, entre otras cosas, para:

1. Estimar pérdidas de suelos ocasionadas por la erosión hídrica del tipo laminar o por surcos, de donde se deriva que aplicarla en áreas afectadas por cárcavas es inconveniente y los resultados obtenidos pueden generar conclusiones no valideras.

2. Predecir el promedio anual de pérdida de suelo para una pendiente uniforme determinada y bajo condiciones específicas de uso y manejo, por este motivo el empleo generalizado en grandes cuencas donde hay diferentes condiciones de pendiente y de uso y manejo puede inducir a cálculos inexactos

Lo anterior aunado a la utilización indiscriminada de los diferentes factores que integran a la "USLE" son la mayor fuente de error en la aplicación de esta ecuación a cuencas naturales de gran superficie y con condiciones diferentes a las existentes en U.S.A. donde fue desarrollada.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada, "MUSLE".

Según Foster (1982), las tres grandes limitaciones en el uso de la "USLE" son:

1. No debe usarse para estimar las pérdidas de suelo por eventos individuales o tormentas.
2. Es una ecuación para erosión y por tanto no estima deposición.
3. No estima erosión en cárcavas ni cauces.

Las dos primeras limitaciones se eliminan al usar la "MUSLE", la cual es una ecuación para estimar la producción de sedimentos de la cuenca.

Según Foster (1982). Williams en 1975 modifica la "USLE" para estimar

la producción de sedimentos por la escorrentía de eventos individuales en una cuenca dada, reemplazando el factor R de "USLE" con: $R_w = 9.05 \cdot (V \cdot Q_p)^{0.56}$, donde V = volumen de escorrentía en m^3 y Q_p = caudal pico máximo en m^3/s . La "USLE" con este factor se llama "MUSLE". La producción de sedimentos viene dada en toneladas métricas para el área total de la cuenca y el factor K debe estar en Ton. hora/Newton/Ha. La erosión en cárcavas y canales o la deposición en reservorios naturales se estiman por separado sumándolas y restando las de la ecuación estimada.

La versión de "MUSLE" a usar en este estudio es la presentada por Williams y Berndt (1977), la cual se define por:

$$Y = 11.8 (Q \cdot q_p)^{0.56} \quad K.C.P.L.S. \quad (4.3)$$

donde:

Y = Producción de sedimentos por un evento individual, en toneladas métricas, Ton.

Q = Volumen de escorrentía del evento, en m^3

q_p = Tasa de escorrentía en el pico, en m^3/s .

K, L, S, C, P se definen igual que para la "USLE"

Según Williams (1975), citado por Mitchell y Bubenzer (1980), los coeficientes se obtienen del ajuste de la ecuación 4.3 a datos de Texas y Nebraska. Según Williams y Berndt (1972) la "USLE" fue desarrollada principalmente para su aplicación en terrenos cultivados y cada uno de los factores fueron definidos con este propósito; por tanto cuando esta ecuación se use para calcular el sedimento producido en una cuenca hidrográfica, todos los factores excepto el factor de precipitación R deben ser modificados. El procedimiento de modificación es eficiente debido a que con una sola resolución de la ecuación 4.3 se evalúa la fuente de erosión de toda la cuenca.

Estos dos aspectos señalados deben ser tomados en cuenta en las aplicaciones de la ecuación 4.3. El primer aspecto indica que es muy probable que los coeficientes de la ecuación 4.3 sean de aplicabilidad solamente regional, siendo necesario para otras regiones o países estimar mediante calibración con datos registrados los coeficientes respectivos. El segundo aspecto indica que a pesar de que los coeficientes resultasen adecuados, la aplicación de un procedimiento de modificación de los factores diferente al usado por Williams y Berndt (1977), podría alterar los resultados reales.

Williams y Berndt (1977) proponen, para estimar el volumen de escorrentía Q , el uso de un modelo de lluvia efectiva basado en la técnica del número de curva de Soil Conservation Service del U.S. Department of Agriculture y en un índice de humedad del suelo el cual hay que calibrar. De igual manera proponen, para el cálculo de los caudales pico, el uso de un modelo basado en el hidrograma unitario, pero debido al requerimiento elevado de tiempo para la determinación de los caudales picos y dada la alta relación entre volumen y pico del evento, proponen determinar este último a través del establecimiento de una relación de tipo: $q_p = b_1 Q^{b_2}$, donde b_1 y b_2 son constantes de terminadas al plotear los valores de q_p vs. Q en papel logarítmico usando los eventos de 1, 10 y 100 años de período de retorno.

El uso del modelo Stanford IV no hace necesario el uso de la metodología propuesta por Williams y Berndt (1977), puesto que de éste se puede obtener directamente, para cada evento, el hidrograma horario correspondiente; y con ello el volumen Q y el caudal pico, q_p .

La aplicación de la "MUSLE" incrementa la precisión en la predicción de sedimentos, elimina la necesidad de usar relaciones muy aproximadas entre erosión y producción efectiva de sedimentos. Tales relaciones son requeridas en la "USLE" debido a que el factor R de la lluvia representa la energía usada solamente para los procesos de desprendimiento de partículas del suelo. Estas relaciones no son necesarias con la "MUSLE" debido a que el factor de escorrentía, $\alpha (q_p \cdot Q)^\beta$, representa la energía usada en los procesos de despre

dimiento y transporte de las partículas. Q está más relacionado a los procesos de desprendimiento y q_p define el transporte de sedimentos (Williams y Berndt, 1977).

De esta manera, aplicando la "MUSLE" se obtiene entonces la producción de sedimentos en la cuenca hidrográfica, sin considerar aquellos debido a cárcavas y erosión de canales.

A continuación se presentan los métodos para estimar los diferentes factores de pérdida de suelo, K , C , LS , P , necesarios para aplicar la "MUSLE".

Erodabilidad del suelo, Factor K

La erodabilidad de los suelos es la susceptibilidad de éstos a la acción de agentes erosivos. Es una característica inherente a los suelos que es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas así como también del manejo que de ellas se haga.

Gasperi-Mago (1982) describe los métodos para la determinación de la erodabilidad de los suelos:

1. Simuladores de lluvia
2. Ecuación de regresión múltiple de Wischmeier y Mannering
3. Parcela de erosión "tipo o standard"
4. Nomograma

La ecuación de regresión múltiple de Wischmeier y Mannering (1969), citada por Gasperi-Mago (1982), está compuesta de veinticuatro términos, donde se combinan los efectos de propiedades individuales del suelo e interacciones entre algunas de ellas, presentando una desviación standard de 0.02 y un intervalo de confianza de + 0.03 y de + 0.04 a los niveles de 90% y 95% de probabilidad respectivamente (Gasperi-Mago, 1982).

En la Tabla 35 se presenta la ecuación obtenida por dichos autores. Para poder aplicar este método en el país es necesario definir las ecuaciones de regresión basados en datos locales.

En parcelas experimentales el factor K puede ser evaluado resolviendo la ecuación: $K = A/R \times L \cdot S \cdot C \cdot P$ para condiciones no standard, ó $K = A/R$ para condiciones standard (Jégar, 1982). La parcela standard se define como una unidad de 22.1 m de longitud, con inclinación uniforme y 9% de pendiente, en barbecho continuo, que ha sido labrada en el sentido de la pendiente. Barbecho continuo, para este propósito, es un terreno que ha sido labrado y se deja en descanso para el libre crecimiento de la vegetación por más de dos años (Dissmeyer y Foster, 1982). En estas condiciones $L = S = C = P = 1$.

El método del nomograma de Wischmeier y Smith (1978), citado por Gasperi-Mago (1982), es un método gráfico a través del cual se puede calcular el coeficiente de erodabilidad de un suelo utilizando ciertas propiedades del mismo: porcentaje de limo y arena muy fina, 0.002 mm - 0.10 mm, porcentaje de arena 0.1 mm - 2.0 mm, porcentaje de materia orgánica, tipo de estructura y permeabilidad. Estas propiedades deben estar referidas al suelo superficial, en las primeras 15-20 cm de suelo, excepto la permeabilidad la cual se refiere a todo el perfil. En la Figura 21 se presenta el nomograma y el procedimiento para su uso.

Cuando el contenido de limo más arena muy fina es menor de 70%, el nomograma de la Figura 21 resuelve la siguiente ecuación (Dissmeyer y Foster, 1982):

$$K = 2.1 \times [(\%b + \% amf) (100 - \% A)]^{1.14} \cdot 10^{-6} \cdot (12 - a) + 0.0325 (b-2) + 0.025 (c - 3) \quad (4.4)$$

Tabla 35. Ecuación de regresión múltiple de Wischmeier y Mannering para estimar los valores de K.

$$\begin{aligned}
 "K" = & 0,013 (18,82 + 0,62 x_1 + 0,043 x_2 - 0,07 x_3 + 0,0082 x_4 - 0,10 \\
 & x_5 - 0,214 x_6 + 1,73 x_7 - 0,0062 x_8 - 0,26 x_9 - 2,42 x_{10} + 0,30 x_{11} - \\
 & 0,024 x_{12} - 21,15 x_{13} - 0,18 x_{14} + 1,0 x_{15} + 5,4 x_{16} + 4,4 x_{17} + 0,65 \\
 & x_{18} - 0,39 x_{19} + 0,43 x_{20} - 2,82 x_{21} + 3,3 x_{22} + 3,29 x_{23} - 1,36 x_{24}) \\
 & (V-12)
 \end{aligned}$$

- x_1 = % de limo X 1/% de materia orgánica
 x_2 = % de limo X pH (codificado)
 x_3 = % de limo X estructura (codificada)
 x_4 = % de limo X % de arena
 x_5 = % de arena X % de materia orgánica
 x_6 = % de arena X índice de agregación
 x_7 = Relación de arcilla
 x_8 = Relación de arcilla X % de limo
 x_9 = Relación de arcilla X % de materia orgánica
 x_{10} = Relación de arcilla X 1/% de materia orgánica
 x_{11} = Relación de arcilla X índice de agregación
 x_{12} = Relación de arcilla X 1/índice de agregación
 x_{13} = Índice de agregación
 x_{14} = Contenido de humedad
 x_{15} = Incremento de acidez debajo de la capa arable (codificado)
 x_{16} = Estructura (codificada)
 x_{17} = Grado de desarrollo estructural (codificado)
 x_{18} = Cambio en estructura debajo capa arable (codificado)
 x_{19} = Espesor del material "granular"
 x_{20} = Profundidad desde el material friable al firme
 x_{21} = Material depositado por el viento = 1; Otros = 0
 x_{22} = Material calcáreo = 1; Otros = 0
 x_{23} = % de materia orgánica X índice de agregación
 x_{24} = pH X estructura (codificados)

Fuente: Gasperi-Mago (1982, p. 129)

GRÁFICO PARA DETERMINAR ERODABILIDAD DE SUELO, FACTOR "K"

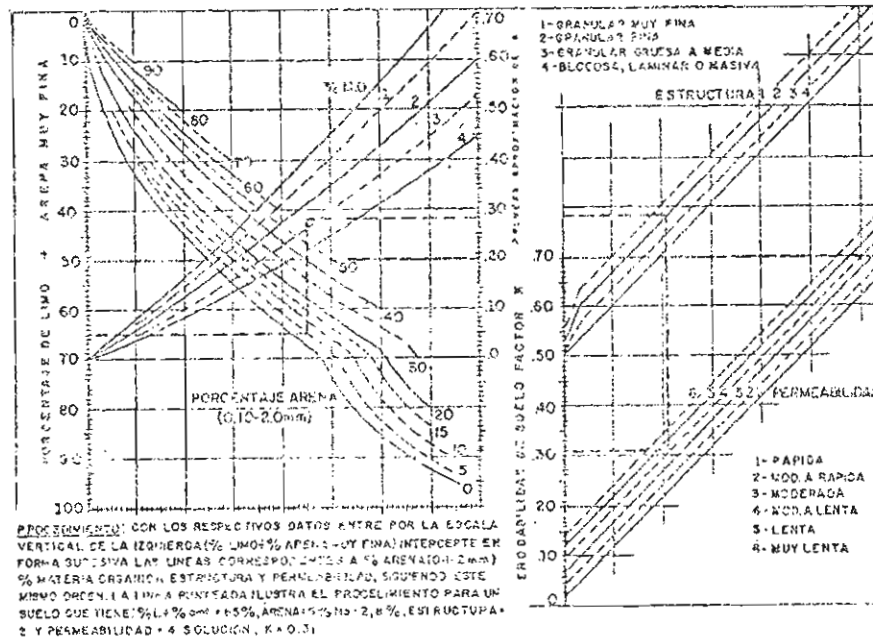


Figura 21. Gráfico para determinar la erodabilidad del suelo, factor K (en unidades inglesas).
Fuente: Wischmeier y Smith, 1978. (Tomado de Gásperi-Mago, 1982, p. 133).

donde:

- % l = porcentaje de limo
- % amf = porcentaje de arena muy fina
- %A = porcentaje de arcilla
- a = porcentaje de materia orgánica
- b = estructura del suelo codificada
- c = clase de permeabilidad en el perfil codificada

Experiencias realizadas en U.S.A. con el nomograma indican que para los suelos que tienen más de 4% de materia orgánica, no extrapolar sino usar la curva del 4% (Jégar, 1982).

El método del nomograma es sencillo, rápido, económico y lo suficiente-

mente confiable como una primera aproximación y por ello es el método usado en este estudio. Los valores de K obtenidos con el nomograma se multiplican por 1.317 para convertirlos al sistema métrico.

Los métodos anteriores se usan para determinar la erodabilidad, K, de un tipo de suelo específico. En una cuenca hidrográfica existen varios tipos de suelo y la aplicación de la "USLE" debe hacerse para cada una de ellas. Según Williams y Berndt (1977) el valor de K a usar en la "MUSLE" se pondera de acuerdo al área de la cuenca hidrográfica con la ecuación:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \times DA_i}{DA} \quad (4.5)$$

donde:

- K_i = valor de K para el suelo i
- DA_i = área de drenaje cubierta por el suelo i
- DA = ~~área~~ área total de drenaje
- n = número de suelos en la cuenca hidrográfica

Topografía, Factor LS

Se refiere al efecto combinado de la longitud y gradiente de la pendiente. Se obtiene multiplicando el subfactor longitud, L, por el subfactor gradiente, S.

Según Williams y Berndt (1976) el factor LS es uno de los más importantes en la "USLE" debido a que él explica la mayor variación en la erosión bruta más que cualquier otro factor, excepto posiblemente el factor C. El factor topográfico LS es particularmente sensible a errores en la medición del grado o inclinación promedio de la pendiente debido a que estos errores se magnifican en el cálculo de LS para pendiente superiores al 3%. Los errores en la medición de la longitud de la pendiente no son críticos debido a que ellos son reducidos a la mitad o más en el cálculo de LS.

Subfactor Longitud de la Pendiente, L. Se define como

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (4.6)$$

donde:

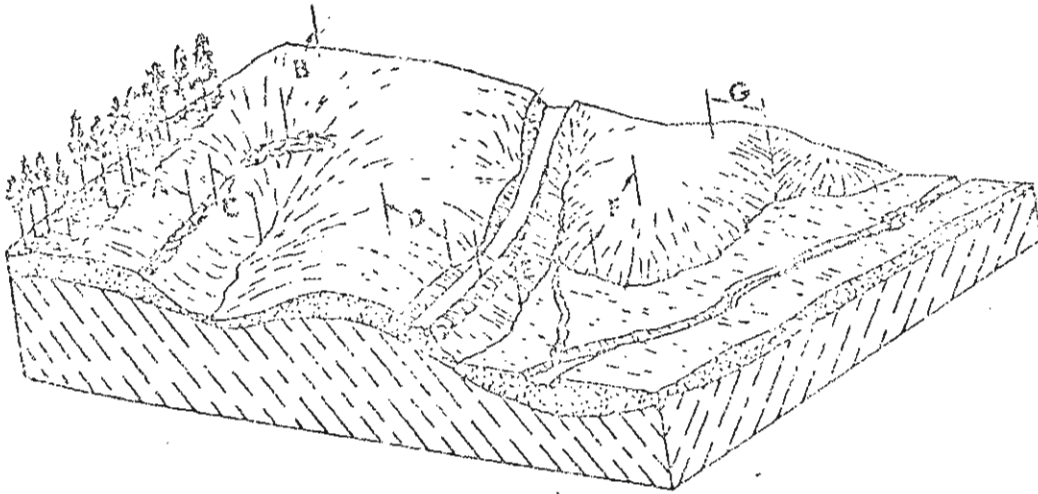
- λ = Longitud estimada de la pendiente uniforme en metros
- m = Exponente influenciado por la interrelación entre la longitud y el grado o inclinación de la pendiente. m es igual a 0.5 si la pendiente es mayor o igual a 5%, 0.4 para pendientes entre 3.5% y 4.5%; 0.3 para pendientes menores de 1%. Para pendiente mayores de 10% m vale 0.6.

La erosión se incrementa con el incremento de la longitud de la pendiente. Como quiera que sea hay un límite práctico para la máxima longitud a ser encontrada en la práctica. La longitud de la pendiente se define como la distancia del punto de origen del escurrimiento hasta el punto donde el gradiente de la pendiente decrece lo suficiente como para que la deposición comience o hasta el punto donde el escurrimiento es concentrado. El escurrimiento superficial usualmente se concentra en menos de 121.8 m o 400 pies (Dissmeyer y Foster, 1982).

La Figura 22 ilustra algunos ejemplos sobre longitudes de pendientes, tal como deben interpretarse para el uso adecuado de la "USLE".

Para estimar la longitud promedio de la pendiente de una cuenca hidrográfica se ha venido utilizando el método de la densidad de drenaje y más recientemente, después de los experimentos de Williams y Berndt (1976) el método de los puntos extremos de contorno.

Método de la Densidad de Drenaje. Horton en 1945, citado por Williams y Berndt (1976), demuestra que la longitud promedio del flujo superficial puede ser estimada por la mitad del recíproco de la densidad de drenaje. La den



- A. Si no se produce escurrimiento superficial en un bosque virgen, el punto de partida de la longitud de pendiente debe comenzar con el fin del bosque virgen y extenderse pendiente abajo hasta el primer punto donde se pueda concentrar el escurrimiento.
- B. Punto de origen de escurrimiento hasta punto de concentración del escurrimiento.
- C. Del punto de concentración de escurrimiento anterior hasta el punto de concentración del flujo.
- D. Punto de origen de escurrimiento hasta una carretera que concentra el escurrimiento.
- E. De la carretera a la planicie inundable, donde la deposición podría ocurrir.
- F. Del punto de origen de escurrimiento a la planicie inundable donde la deposición podría ocurrir.
- G. Punto de origen de escurrimiento a una depresión donde podría concentrarse el escurrimiento.

Figura 22. Ejemplos de longitudes de pendiente

La longitud de drenaje de una cuenca se determina dividiendo la longitud total de todos los cauces o canales por el área de la cuenca. Posteriormente sugiere que esta longitud promedio del flujo superficial es equivalente a la longitud promedio de la pendiente, λ , la cual entonces se puede estimar como:

$$\lambda = 0.5 * \frac{DA}{LCH} \quad (4.7)$$

donde:

LCH = longitud total de todos los canales en la cuenca

DA = área de drenaje

La ecuación 4.7, según Williams y Berndt (1976), subestima la longitud de la pendiente debido a que el flujo superficial se asume perpendicular al canal y a éste con pendiente cero. Estos autores hacen referencia a la modificación introducida por Horton, la cual considera la razón entre la pendiente del canal y la correspondiente a la vertiente o ladera:

$$\lambda = 0.5 * \frac{DA}{LCH} * \left(\frac{1}{\sqrt{1 - S_c/S_g}} \right) \quad (4.8)$$

donde

S_c = pendiente del canal

S_g = pendiente promedio de la vertiente dentro de la cuenca

Las desventajas del método de la densidad de drenaje son: el tiempo requerido y los errores debido a los meandros del canal. Además, diferentes valores de λ pueden obtenerse para una misma cuenca, dependiendo de la escala del mapa topográfico usado y de cómo el que hace las mediciones define un canal.

Método de los Puntos Extremos de Contorno. Es el método propuesto por Williams y Berndt (1977) para la aplicación de la "MUSLE". El mismo es presentado por Williams y Berndt (1976), siendo ensayado en 53 cuencas con pendientes entre 1.5% y 47%, longitudes entre 24 m y 150 m, y áreas entre 1.3 Km². y 54.4 Km². La ecuación de cálculo es:

$$\lambda = \frac{LC * LB}{2 * EP * \sqrt{LC^2 - LB^2}} \quad (4.9)$$

donde:

- LC = longitud del contorno o curva de nivel
- LB = longitud de la línea de contorno base
- EP = número de puntos extremos en el contorno

Se define un punto extremo en el contorno a aquel en donde un canal atraviesa al contorno; estos puntos son máximos locales en una dirección cuesta arriba. La Figura 23 ilustra el significado de estos términos.

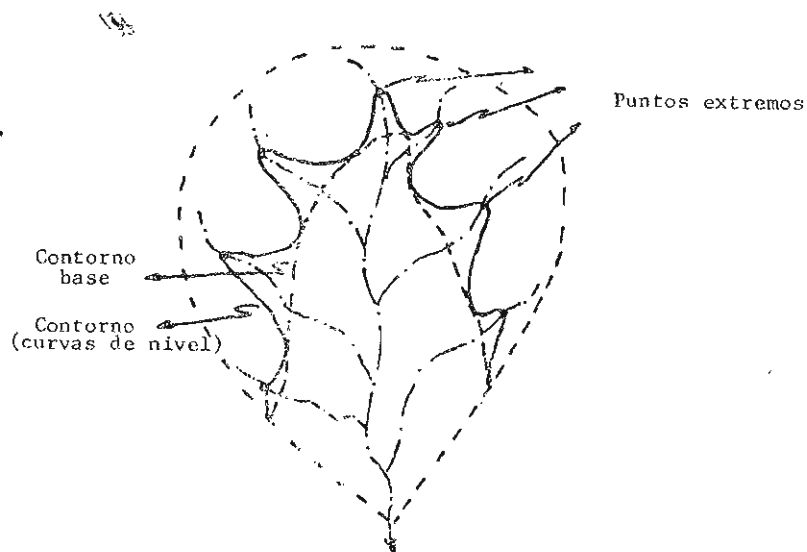


Figura 23. Cuenca hipotética que muestra el contorno o curva de nivel, los puntos extremos y el contorno base.

Subfactor Gradiente o Inclinación de la Pendiente, S. El subfactor gradiente de la pendiente se define como:

$$S = 65.42 \operatorname{sen}^2 \theta + 4.56 \operatorname{sen} \theta + 0.065 \quad (4.10)$$

donde

θ = ángulo en grados de la pendiente

La ecuación 4.10 puede aproximarse a:

$$S = 0.0065 p^2 + 0.0454 p + 0.065 \quad (4.11)$$

donde

p = pendiente expresada en porcentaje

Existen diversos métodos para estimar la pendiente media de las vertientes en una cuenca: método de longitud de contornos o curvas de nivel, método de cuadrículas - contornos, y método de la función de cuadrícula entre otros.

Williams y Berndt (1977) señalan que para la aplicación de la "MUSLE" se debe usar el método de la longitud de contornos.

El método de la longitud de contornos o curvas de nivel consiste en aplicar la siguiente ecuación :

$$p = H \left(\frac{LC_1 + LC_n}{2} + \sum_{i=2}^n LC_i \right) / DA \quad (4.12)$$

donde:

- p = pendiente en porcentaje
- H = equidistancia entre contornos o curvas de nivel
- LC₁, LC_n = longitud del primer y último contorno
- n = número de contornos dentro de la cuenca
- LC_i = longitud del contorno i
- DA = área de drenaje de la cuenca

Williams y Berndt (1976) proponen el uso de solo tres contornos para aplicar este método, debido a que se requiere menos tiempo y no se pierde mayor precisión: Las curvas de nivel a 25, 50 y 75 por ciento del desnivel total de la cuenca son adecuadas para determinar la pendiente. Asumiendo que las curvas de nivel en el punto a la salida y en la cabecera de la cuenca son iguales a cero, la ecuación propuesta es:

$$p = 0.25 * Z * (LC_{25} + LC_{50} + LC_{75}) / DA \quad (4.13)$$

donde

- Z = desnivel total en la cuenca
- LC₂₅, LC₅₀, LC₇₅ = longitudes de los contornos a 25%, 50% y 75% de Z respectivamente.
- DA = área de la cuenca

La ecuación 4.13 es presentada por Williams y Berndt (1977) como la ecuación, a usar con la "MUSLE", para determinar la pendiente promedio en la cuenca.

El factor topográfico, LS, viene dado por la multiplicación de los subfactores longitud, L, y gradiente, S, de la pendiente. Se expresa como:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.7} \right)^m (0.0065 p^2 + 0.0454 p + 0.065) \quad (4.14)$$

La Figura 24, es una representación de la ecuación 4.14, y es la más usada en la determinación del factor LS. La misma puede usarse sin inconvenientes hasta pendientes de 20% y longitudes de 120 m; para pendientes entre 10% y 50% y longitudes de hasta 800 m se puede aplicar la siguiente ecuación (Jégar, 1982):

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^{0.6} * \left(\frac{P}{9} \right)^{1.4} \quad (4.15)$$

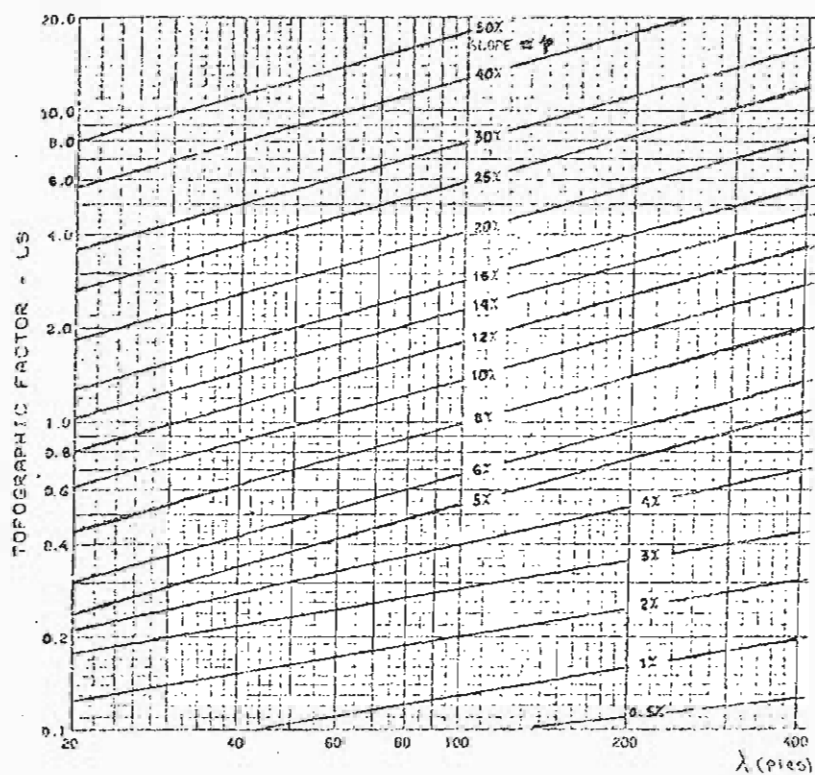


Figura 24. Factor topográfico LS como función de λ y p .

Fuente: Dissmeyer y Foster (1982, p. 6).

Las ecuaciones 4.6, 4.10, 4.11, 4.14 y 4.15 se desarrollaron para aplicárselas en pendientes uniformes con un solo tipo de suelo y de cubierta vegetal en toda su longitud. Si ocurren cambios significativos en el grado de la pendiente, forma de la pendiente, cóncava - recta - convexa, tipo de suelo, cubierta vegetal o prácticas de cultivo, hay que hacer correcciones a dichas ecuaciones (Jégat, 1982).

Al respecto Jégat (1982), Mitchell y Bubenzer (1980) y Dissmeyer y Foster (1982), entre otros autores, presentan los procedimientos a seguir en tales casos. Los cuales se basan en la división de la cuenca en pequeños segmentos con condiciones uniformes en suelo, vegetación y topografía, y la estimación del factor topográfico, iS , en cada uno de ellos, a partir de los cuales se puede calcular un valor representativo para el terreno total.

Este último aspecto es de consideración para aplicar correctamente la "USLE", pero no para la "MUSLE". La razón de ello se debe a que los coeficientes de la "MUSLE", ecuación 4.3, se obtuvieron a partir de datos observados y el valor promedio de λ y p en las cuencas hidrográficas se estimaron con las ecuaciones 4.9 y 4.13 respectivamente.

Cubierta Vegetal y Manejo, Factor C.

Las pérdidas de tierra, ligadas a la cubierta vegetal del suelo, se ven reducidas cuando el suelo está cubierto por una vegetación permanente, bosques o prados, y por el contrario, son mayores cuando el suelo está desnudo, particularmente, si ha sido labrado para cultivos (CIDIAT, 1977).

El cálculo del valor para C es bastante complejo debido a que la erosión varía no solamente con los cultivos, sino también para cada cultivo y con las diferentes fases del ciclo de desarrollo del cultivo. En efecto, la planta protege más o menos bien según su naturaleza propia, pero también para una misma planta el grado de protección depende proporcionalmente de la naturaleza del follaje, su densidad y tamaño (CIDIAT, 1977). Aunque se le considera una variable independiente, lo más probable es que este factor C tiene que ser de-

terminado experimentalmente en la mayoría de los casos (Jégat, 1982).

La mayoría de tablas disponibles para el factor C se han desarrollado en otros países, U.S.A. principalmente, con énfasis para los terrenos bajo cultivos, llegándose a determinar valores de C para diferentes tipos de cultivos y para diferentes fases de rotación: barbecho, siembra, establecimiento y maduración, desde el final del período hasta la cosecha y finalmente restos. Valores de C tan detallados se han desarrollado en U.S.A.; valores más generales se han desarrollado en África y se presentan en las Tablas 36, 37 y 38.

Tabla 36. Valores del factor C para algunas condiciones de África Occidental.

Condiciones	Valor de "C"
Suelo desnudo	1,0
Bosque denso o mulch espeso de paja	0,001
Sabana o pastizal sin pastoreo	0,01
Cultivos de cobertura: sembrado tarde o con desarrollo lento	
1er. año	0,3-0,8
2do. año	0,1
Cultivo de cobertura con rápido desarrollo	0,1
Maíz, sorgo, millo	0,3-0,9
Arroz (cultivo intensivo, segundo ciclo)	0,1-0,2
Algodón, tabaco (segundo ciclo)	0,5
Maní	0,4-0,8
Yuca (primer año)	0,2-0,8
Palma, café, coco, con cultivos de cobertura	0,1-0,3

Fuente: Roose, 1977. (Tomado de Gasperi-Mago, 1982. p. 139).

Tabla 37. Valores del factor C para algunos cultivos y formaciones vegetales en Africa y Madagascar.

Cultivo	Valor de "C"
Bosque y praderas	0,01
Rotación de cultivos con forrajes	0,2
Rotación de cultivos con cereales	0,4
Trigo continuo	0,7
Frutales	0,9
Barbecho con laboreo	1,0

Fuente: CTFT de Francia, 1968. (Tomado de Gasperi-Mago, 1982. p. 140)

Tabla 38. Valores de C para pastos permanentes, pastizales y terrenos baldíos

Cubierta vegetal		Cubierta en contacto con el suelo							
Tipo y altura de la cubierta	Rendim. %	Tipo	95-100						
	2	3	4	5	6	7	8	9	
Cubierta inapreciable,		O	.45	.20	.10	.042	.013	.003	
		W	.45	.24	.15	.090	.043	.011	
Plantas herbáceas y matorros (0,5 m)	25	G	.36	.17	.09	.038	.012	.003	
		W	.36	.20	.18	.082	.041	.011	
	50	G	.26	.13	.07	.035	.012	.003	
		W	.26	.16	.11	.075	.009	.011	
	75	G	.17	.10	.06	.031	.011	.003	
		W	.17	.12	.09	.067	.038	.011	
Matorral (2 m)	25	G	.40	.16	.09	.040	.013	.003	
		W	.40	.22	.14	.085	.042	.011	
	50	G	.34	.16	.085	.038	.012	.003	
		W	.34	.19	.13	.081	.041	.011	
	75	G	.28	.14	.08	.036	.012	.003	
		W	.28	.17	.12	.077	.040	.011	
Arbolado sin matorral pequeño apreciable. (Am)	25	G	.42	.19	.10	.041	.013	.003	
		W	.42	.23	.14	.087	.042	.011	
	75	G	.39	.18	.09	.040	.013	.003	
		W	.39	.21	.14	.085	.042	.011	
		G	.36	.17	.09	.039	.012	.003	
		W	.36	.20	.13	.083	.041	.011	

Fuente: Jégat (1982, p.21)

Recientemente Dissmeyer y Foster (1982) desarrollaron una metodología para estimar el factor C en tierras forestales: selvas, bosques, sabanas, montes; la cual se basa en observaciones de campo de nueve subfactores; 1. La cantidad de suelo desnudo; 2. cobertura del dosel; 3. reconsolidación del suelo; 4. alto contenido orgánico; 5. raíces finas; 6. efecto residual de la labranza, "Residual Binding"; 7. almacenamiento en depresiones sobre el sitio; 8; escalonamientos en la pendiente y 9. contornos de labranza. El noveno es parte de las prácticas de conservación de suelos, factor P de la "USLE". El valor de C para una condición dada se obtiene por multiplicación de los subfactores considerados. Esta metodología se presenta en el Apéndice D en forma detallada.

Haciendo uso de las tablas anteriores y del Apéndice D se puede determinar el valor del factor C, para tierras agrícolas y forestales, en áreas homogéneas. El valor de C, promedio para la cuenca hidrográfica, se puede calcular de manera semejante a la ecuación 4.5, es decir:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} * DA_i}{DA} \quad (4.16)$$

donde ,

- C_{ij} = valor de C para el mes j para los cultivos del área i.
- n = número de áreas en la cuenca hidrográfica
- DA = área total de la cuenca hidrográfica
- DA_i = área parcial i

Prácticas de Conservación, Factor, P

Es la relación de pérdida de suelo entre una parcela donde se han aplicado prácticas específicas de conservación como cultivo en franjas, en contorno o terracedo y las pérdidas que se producen en una parcela en condiciones standards, donde las medidas de conservación no se aplican y el laboreo se efectúa en el sentido de la pendiente. Medidas como fertilización, labranza míni-

na, rotación de cultivos y otros, son prácticas de conservación pero no se consideran en la evaluación de este factor, pues su influencia es cuantificada dentro de el factor cobertura y manejo de cultivos, factor C (Gasperi-Mago, 1982).

En la Tabla 39 se presentan los valores de P según la práctica de conservación y el grado de la pendiente del terreno.

Tabla 39. Valores de P y límites críticos de longitud y pendiente.

Rango de pendiente en percent.	Laboreo y siembra en contorno		Franjas en contorno			Terraceado en contorno
	P	Máxima longit. (mts.)	P	Ancho faja (mts.)	Máxima longit. (mts.)	P
1 a 2	0.60	122	0.30	40	244	0.12
3 a 5	0.50	92	0.25	31	183	0.10
6 a 8	0.50	61	0.25	31	122	0.10
9 a 12	0.60	37	0.30	24	73	0.12
13 a 16	0.70	24	0.35	24	49	0.14
17 a 20	0.80	18	0.40	18	37	0.16
21 a 25	0.90	15	0.45	15	31	0.18

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978 (Tomado de Gasperi-Mago, 1982, p. 141-143)

El valor de P, promedio para la cuenca hidrográfica, se puede calcular igual que en la ecuación 4.5, es decir:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot DA_i}{DA} \quad (4.17)$$

P_i = valor de P para el área i

n = número de áreas en la cuenca hidrográfica

DA = área total de la cuenca hidrográfica

DA_i = área parcial i

Williams y Berndt (1977) proponen, para el uso de la "MUSLE", calcular el valor del producto de C y P promedio en la cuenca de acuerdo a la siguiente expresión:

$$CP_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij} * P_i * A_i}{DA} \quad (4.18)$$

donde

- C_{ij} = el valor de C para el mes j en el área i
- P_i = el valor de P para el área i
- n = número de áreas en la cuenca

Estimación de los factores K, C y LS en la cuenca de estudio

El factor P no es evaluado porque en la cuenca de estudio no existen prácticas de conservación de suelo significativas y por tanto es de poca importancia relativa.

La estimación de los demás factores se hace por subcuencas o segmentos de escorrentía, para lo cual se divide la cuenca del río Escalante en veintisiete subcuencas o sectores. Estimándose para cada sector un valor promedio de los factores K, C y LS. En el Anexo 3 se muestra esta segmentación.

Estimación del factor K o susceptibilidad del suelo a la erosión.

Para su cálculo se hace uso de una representación matemática del nomograma de la Figura 21.

Cuenca Alta, Sectores A hasta O. Para la estimación de las propiedades del suelo necesarias para la aplicación del nomograma: porcentajes de arena total, arena muy fina, limo y materia orgánica, y estructura y permeabilidad del suelo, se dispone de ochenta análisis de calícatas, incluyendo análisis de rutina, realizados por ECOSA (1977) y 40 análisis adicionales realizados por el

MARNR (1984a). De allí se seleccionan los perfiles o calicatas de suelo más representativos, en función de su ubicación espacial, para cada unidad de suelo presente en cada sector o subcuenca hidrográfica, de acuerdo al mapa de suelos elaborado por ECOSA (1977). El valor de K para cada sector se estima como el promedio aritmético de los valores obtenidos para cada perfil seleccionado dentro del sector. En los sectores donde no hay localizado ningún análisis de suelo, se asignan los valores de K correspondientes a las mismas unidades de suelo pero obtenidas de otros perfiles ubicados en sectores vecinos. Debido a que la mayoría de los análisis de laboratorio disponibles no presentan el valor del contenido de materia orgánica, sino el correspondiente al carbón orgánico, se estima al primero como el doble del segundo. Para los análisis de rutina donde no hay una descripción de campo del perfil del suelo se estima la permeabilidad del mismo a partir de la textura y estructura del suelo.

Planicie o llanura aluvial, sectores 1 a 12. En este caso se dispone de una muestra de perfil de suelo, de un conjunto de 3500 descripciones de suelo, presentadas por Stagno (1973). De allí se seleccionan los perfiles correspondientes a las Series de suelo predominantes dentro de cada sector, de acuerdo al mapa de Series, Tipos, Fases y Asociaciones de suelos presentado por Stagno (1973). Los valores de arena total, arena muy fina y limo se obtienen como un valor promedio de los diferentes análisis de calicatas correspondientes a la misma Serie de suelo; el contenido de materia orgánica se estima como el valor promedio entre los diferentes análisis de rutina para la misma serie de suelo. La estructura y permeabilidad se obtienen de las descripciones de campo de los perfiles de suelo. Se estima el valor de K para cada serie de suelo y luego como un promedio entre las diferentes series se calcula el K de cada sector; dándose mayor peso a la serie dominante.

Todas las propiedades del suelo se refieren al horizonte superficial, excepto la permeabilidad que es para todo el perfil del suelo. El cálculo de K, para las diferentes unidades y series de suelo, se hace a través de la siguiente representación matemática del nomograma de la Figura 21, la cual es tomada del Programa de Computación "USLE", disponible en el Banco de Programas del CIDIAT.

Algoritmo básico de la representación del nomograma de la Figura 21:

- 1° $AR = AT - AMF$
- $AL = PLI + AMF$
- 2° $A = 32 e^{(-0.015 \cdot AR)}$
- 3° Si $AR > 50$ entonces $B = 0.5 + 0.046 \cdot AR$
Si $AR < 50$ entonces $B = 0.69 + 0.0008 \cdot AR$
- 4° $X = |AL/A|^{1/B}$
- 5° $K_1 = (0.09 - 0.01 \cdot PMO) \cdot X$
- 6° $Z = 0.65 + 1.3 \cdot K_1$
 $P = 7.69 (Z - EST)$
- 7° $K_2 = PERM + 0.15 \cdot P$
- 8° $K = 0.0425 + 0.6885 \cdot K_2 + 0.2297 \cdot (K_2)^2$

Donde

- AT = % arena total
 AMF = % arena muy fina
 PLI = % limo
 PMO = % materia orgánica
 EST = Código de estructura, cuyos valores pueden ser:

EST	TIPO ESTRUCTURA	CLASE
0.79	Gmf	1
0.75	Gf	2
0.71	Gm ó Gg	3
0.66	B ó Ma	4

PERM = Código de permeabilidad, cuyos valores pueden ser:

PERM	TIPO	CLASE
0.04	Rápida	1
0.06	Moderadamente rápida	2
0.08	Moderada	3
0.13	Moderadamente lenta	4
0.16	Lenta	5
0.19	Muy lenta	6

En el Anexo 3, se presentan los valores de K que se obtienen para cada perfil de suelo considerado. Se presenta también el listado del Programa en Fortran 77 usado para tal fin. En la Tabla 40 se presentan los valores de K obtenidos por subcuencas o sectores.

Tabla 40. Valores del factor K por subcuencas o sectores

Sector	Perfiles y Series de suelos	K (Inglés)	K (Métrico)
I. Al Sur de la Carretera Panamericana			
A. Jabillo alto	ER - 18	0.17	0.22
B. Umuquena alto	ER-23; ER-46; ES-21	0.19	0.25
C. Coloncito	ES-22; ES30	0.30	0.40
D. Coquetería	ER25	0.19	0.25
E. Arenoso	ER28	0.17	0.22
F. Morotuto alto	ER27; ER46	0.17	0.22
G. Pajitas alto	ER31; ER34	0.16	0.21
H. Boconó alto	ER46; ER42; ER 26	0.18	0.24
I. San Mateo	ER40; ER41; Es4	0.17	0.22
J. La Tendida	TE-1	0.30	0.40
K. Escalante alto	ER49; ER52; ER63; ER47	0.16	0.21
L. Guaruríes alto	ER48; ES8, ES10, Onia 15	0.27	0.36
M. Pedernales	CU5, Onia 15	0.38	0.50
N. Culegría/Guayabones	Onia 5; PES; PE7; CU6; CU9; Onia 3; PE4	0.28	0.37
O. Onía	ER60; Onia 8; PE1, Cu4	0.30	0.40
II. Al Norte de la Carretera Panamericana			
1. La Yuca	3, 6, 18(29), 30, (31), 37	0.28	0.37
2. Onia bajo	Igual al sector 11	0.34	0.45
3. Zona filtro	3, 6, 16, 19, 29, 30	0.26	0.34
4. Oropita/Sta. Bárbara	3, 20, 22, 36	0.43	0.57
5. Jabillo bajo	(3), (6), 8, 10, (12), 17, 28	0.29	0.38
6. Río grande	3, 14, 15, 19	0.28	0.37
7. Umuquena bajo	3, 5, (6), (8), 9, 11, 13, 34	0.26	0.34
8. Morotuto bajo	3, 6, (9), 32, 35	0.24	0.32
9. Cucharón	3, (4), 6, 7, (9), 21	0.28	0.37
10. Pajita bajo	1, 2, 3, (5), (33), (34)	0.32	0.42
11. Caño negro	3, (23), 24, 25, 24, 27, 33	0.34	0.45
12. Escalante/Guaruríes	Igual al sector 11	0.34	0.45

Nota: Serie dominante entre paréntesis

$$K(\text{Inglés}): \text{obtenido según la representación de} \left[\frac{\text{Ton} \cdot \text{Acre} \cdot \text{Hora}}{\text{Acre} \cdot \text{Ton} \cdot \text{Pie} \cdot \text{Pulg.} \cdot 10^{-2}} \right] \text{ en el nomograma de la Figura 21.}$$

$$K(\text{METRICO}) = K(\text{Inglés}) \cdot 1.317 \text{ en } \left[\frac{\text{Ton} \cdot \text{hora}}{\text{Newton Ha}} \right]$$

Estimación del factor C o Cobertura y Manejo de Cultivos

Para la determinación de la cobertura vegetal al Sur de la carretera Panamericana se cuenta con el mapa de Vegetación y uso de la tierra, escala 1:50000, presentado por ECOSA (1977) y el mapa de vegetación, escala 1:100.000, presentado por el MARNR (1984a). Para el sector al Norte de la Panamericana se dispone del mapa de vegetación, suministrado por la oficina del MARNR en el Vi gía, del levantamiento de vegetación Fase I a escala 1:100.000.

A partir de los mapas anteriores se determina la cobertura vegetal para cada subcuenca o sector. Los resultados se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41. Cobertura Vegetal por sectores o subcuencas en porcentaje.

Sector	Bp	Bs	Bc	R	Pc	Pn	C	Cm
i. Al Sur de la Panameric.								
A. Jabillo alto	---10---			10	40	40		
B. Umuquena alto	50			---30---		20		
C. Coloncito					100			
D. Coqueteria	60				20	20		
E. Arenoso	60				25	13	2	
F. Morotuto alto	45		15		15	25		
G. Pajitas alto	---20---			20	40	20		
H. Boconó alto	50		--13--		30	17		
I. San Mateo	35		25		20	20		
J. La Tendida	---10---			5	80	5		
K. Escalante alto	50		13	---5---		30	2	
L. Guarurries alto	10	15	30	---20---		25		
M. Pedernales	---40---				40	20		
N. Culegria/Guayabones	30	10	30	---5---		15		10
O. Onía	-----70-----			15		15		
ii. Al Norte de la Panamer.								
1. La Yuca	--6.4--				--93.6--			
2. Onía bajo	--1.0--				--99.0--			
3. Zona filtro	--8.7--				--91.3--			
4. Dropito/Sta. Bárbara	-10.3--				--89.7--			
5. Jabillo bajo	--6.1--				--93.9--			

Tabla 41. (Continuación).

Sector	Ep	Bs	Bc	R	Pc	Pn	C	Cm
6. Río Grande	--5.4--							--94.6--
7. Umuquena bajo	--12.1--							--87.9--
8. Morotuto	--7.5--							--92.5--
9. Cucharón	--1.9--							--98.1--
10. Pajita bajo	--2.7--							--77.3--
11. Caño negro	--6.5--							--95.5--
12. Escalante/Guarurías	--3.0--							--97.0--

Ep: Bosque primario
Bs: Bosque secundario
Bc: Café bajo bosque
R: Rastrojo
Pc: Pasto cultivado cuidado
Pn: Pasto cultivado no cuidado
Cm: Cultivos perennes: Musáceas y otros
C: Cultivos anuales.

Los valores anteriores se refieren a los tipos de vegetación dominantes dentro de cada sector. Al Norte de la Panamericana no se diferencia entre pasto cuidado y no cuidado por falta de esta información. Al Sur de la Panamericana se consideran los tipos de vegetación dominantes según la escala del mapa; y no significa que los tipos de vegetación con cero por ciento no estén representados.

Para la estimación de C en cada sector o subcuenca se determina en primer lugar el valor correspondiente para cada tipo de vegetación de la Tabla 41 y luego, aplicando la ecuación 4.16, se calcula el valor promedio del factor C en cada sector o subcuenca.

Los valores de C para los tipos de vegetación Bp, Bs, Bc y R, es decir las tierras de uso forestal, se estiman usando la Tabla D.2 del Apéndice D suponiendo que el 100% del suelo desnudo tiene una matriz densa de raíces finas en los 3 cm superficiales del suelo. El porcentaje de suelo desnudo se estima a partir de la Tabla 42, usando los valores correspondiente a la hojarasca.

Tabla 42. Cobertura en porcentaje de la vegetación boscosa y de pastos.

Tipo	Estrato			
	Alto (> 20 m.)	Medio	Bajo	Hojarasca
Bb	75 - 100	50 - 75	25 - 50	50 - 75
Bs	25 - 50	75 - 100	25	25 - 50
Bc	25 - 50	25		25 - 50
R		25 - 50		25
Pc			75 - 100	
Pn			50 - 75	

Fuente: Cálculos propios y datos obtenidos de ECO:A (1977).

El valor de C para pastos de pastoreo se estima de la Tabla 38, suponiendo un 40% de recubrimiento del suelo, plantas herbáceas de 0.5 m. de altura, rendimientos de 25% y 50% en el tipo W; de ésta manera el valor de C que se obtiene de la Tabla 38 es 0.13 y 0.11 respectivamente, para las dos condiciones de rendimiento. Usando la Tabla 37 el valor de C para rotación de cultivos con forrajes es de 0.2. De acuerdo a la Tabla D.5b del Apéndice D, suponiendo 50% y 70% de suelo desnudo y 12 a 36 meses desde el riego y adecuación de potreros se obtiene valores de 0.19 y 0.30 respectivamente. Los valores asumidos para pastos cuidados y no cuidados, son 0.2 y 0.3 respectivamente, debido a que no se dispone de suficiente información como para aplicar correctamente la metodología del Apéndice D. El valor de C para cultivos permanentes y anuales se estima en 0.2 y 0.6 respectivamente de acuerdo a los valores de las Tablas 36 y 37. En la Tabla 43 se presentan los valores de C para cada tipo de vegetación.

Tabla 43. Valor de C para los tipos de vegetación predominantes.

Tipo	C
Bp : Bosque primario	0.02
Bs : Bosque secundario	0.04
Bc : Café bajo bosque	0.04
R : Rastrojo	0.05
Pc : Pasto cultivado cuidado	0.2
Pn : Pasto cultivado no cuidado	0.3
Cm : Cultivos permanentes	0.2
C : Cultivos anuales	0.6

El valor promedio de C se calcula aplicando la ecuación 4.16 y usando los datos de las Tablas 41 y 43. Para los sectores al Norte de la Panamericana se usa un valor de C para pastos promedio entre Pc y Pn. En la Tabla 44 se presentan los resultados.

Tabla 44. Valor de C para cada sector o subcuenca

Sector	C	Sector	C
I. Al Sur de la Panamericana		11. Al Norte de la Panameric.	
A. Jabillo alto	0.21	1. La Yuca	0.24
B. Umuquena alto	0.11	2. Onía bajo	0.25
C. Coloncito	0.20	3. Zona filtro	0.23
D. Coquetería	0.11	4. Oropito/Sta. Bárbara	0.23
E. Arenoso	0.11	5. Jabillo bajo	0.24
F. Morotuto alto	0.12	6. Río grande	0.24
G. Pajitas alto	0.10	7. Umuquena bajo	0.22
H. Boconó alto	0.09	8. Morotuto bajo	0.23
I. Sari Mateo	0.12	9. Cucharón	0.25
J. La Tendida	0.18	10. Pajita bajo	0.20
K. Escalante alto	0.11	11. Caño negro	0.24
L. Guarurries alto	0.12	12. Escalante/Guarurries	0.24
M. Federnales	0.15		
N. Culegría/Guayabones	0.09		
O. Onía	0.07		

Factor Topográfico LS o Efecto Combinado de la Longitud y Gradiente de la Pendiente

Una primera aproximación de los valores de λ y p para cada sector o subcuenca se realiza con la colaboración del departamento de hidrología de la oficina del MARNR en el Vigía, usando mapas topográficos a escala 1:100000. Los valores de λ se calculan aplicando la ecuación 4.7 y el factor LS aplicando la ecuación 4.14. Los resultados se presentan en la Tabla 45.

Los valores de LS obtenidos para los sectores al Sur de la carretera Panamericana son muy elevados. Un cálculo preliminar de los sedimentos producidos usando estos valores, da como resultado cifras demasiado elevadas, fuera de orden con lo que en la realidad podría ocurrir en la cuenca. Estos resultados se muestran en la Tabla 46. Se supone que los errores que se cometen en la estimación de los valores de K y C son pequeños, en relación a los errores que se cometen al estimar λ y p de mapas a escala muy pequeñas. Aunque los valores de λ y p de la Tabla 45 no se estiman usando los métodos propuestos por Williams y Berndt (1977), para el uso de la "MUSLE", se piensa que esto no ha sido el factor principal para que se obtengan los valores tan elevados; sino más bien que el desconocimiento del verdadero significado de λ , tal como se muestra en la Figura 22 aunado a una inadecuada escala del mapa topográfico usado, son la causa principal de tal situación.

El método de la longitud de contornos, ecuación 4.13, y el método de los puntos extremos de contorno, ecuación 4.9, propuestas por Williams y Berndt (1977) para el cálculo de p y λ respectivamente, tienen la misma limitación de la escala del mapa disponible. La siguiente aplicación de estos métodos a la cuenca alta del río Morotuto lo confirman. En la Tabla se muestran los cálculos correspondientes al sector F ó cuenca del río Morotuto. Los valores obtenidos para λ y p son 548 m y 35% respectivamente, los cuales si se comparan con 735 m y 31% de la Tabla 45 aún continúan siendo elevados. El caso de la longitud de la pendiente, λ , se puede explicar por

Tabla 45. Factor Topográfico por Sectores o Subcuencas. Primera Aproximación.

Sector	p (%)	λ (m)	LS	Sector	p (%)	λ (m)	LS
I. Al Sur de la Panam.				II. Al Norte de la Panam.			
A.	26	707	32	1	0.02	1654	0.57
B.	30	780	43	2	0.142	991	0.48
C.	28	490	30	3	0.085	1728	0.61
D.	35	724	55	4	0.025	1524	0.55
E.	32	461	37	5	0.02	1028	0.45
F.	31	735	45	6	0.05	789	0.40
G.	26	793	34	7	0.09	657	0.38
H.	25	791	31	8	0.2	525	0.36
I.	25	527	26	9	0.025	1120	0.47
J.	15	778	13	10	0.1	1195	0.51
K.	28	978	43	11	0.125	890	0.45
L.	27	862	38	12	0.05	703	0.38
M.	15	765	13				
N.	30	734	42				
O.	31	704	44				

Tabla 46. Resultado de aplicar la "MUSLE" usando valores de LS sobre-estimados.

Cuenca Fase II	Area (Km ²)	Sedimentos Ton/Año	Producidos Ton/Km ² /Año
1. Río Grande	1088	15.83*10 ⁶	14.5*10 ³
2. Pajita	448	2.21*10 ⁶	4.9*10 ³
3. Escalante/Caño Neg.	733	4.68*10 ⁶	6.4*10 ³
4. Onia	292	3.98*10 ⁶	13.6*10 ³

el hecho de que el total de puntos extremos, E_p , no se puede apreciar debido a que la escala del mapa utilizado, 1:100.000, resulta insuficiente para lograr una mejor visualización de todos los canales de escorrentía que atraviesan un contorno dado. Esta es la misma razón por la cual el método de la densidad de drenaje, ecuación 4.7, usada en el cálculo de los λ de la Tabla 45, tampoco da resultados aceptables. Es de esperar que a mayor escala del mapa topográfico usado, mejor se puede definir la red de drenaje en la cuenca, y entonces los valores de LCH y E_p , de las ecuaciones 4.7 y 4.9 respectivamente, serían mayores, dando como resultado valores más pequeños para λ .

Tabla 47. Aplicación de los métodos de la longitud de contornos y puntos extremos de contorno, para el cálculo de p y λ respectivamente, en la cuenca alta del río Morotuto.

Area DA (Km ²)	Desnivel Z (m)	Longitud de contornos LC (m)	Longitud de contornos base LB (m)	Puntos extremos Ep
103.02	2315	(25%) 15000	(25%) 12500	7
		(50%) 31000	(50%) 21000	19
		(75%) 16000	(75) 11000	7
Pendiente: $p = 0.25 * Z * (LC_{25} + LC_{50} + LC_{75}) = 0.35$				$p = 35\%$
Longitud: $\lambda = \frac{LC * LB}{2 * EP * \sqrt{LC^2 + LB^2}} = 548 \text{ m.}$				

En la Tabla 48 se muestran valores de λ , p y LS correspondientes a un caso de estudio, presentado por Rosenzweig (1982). Allí se puede apreciar que las longitudes de pendiente, λ , no superan los 100 m. y como es de esperar, a gradientes mayores los valores de λ son inferiores. Tales valores concuerdan con las definiciones de este subfactor. Dissmeyer y Foster (1982) señalan que visualmente las longitudes máximas de la pendiente no son mayores de 400 pies, es decir, 122 m. Es importante destacar que los valores de la Tabla 48 se obtienen usando un mapa a escala 1:4000.

Tabla 48. Valores de λ , p y LS de un caso de estudio presentado en Londres, 1982.

λ (m)	Rango de Pendiente (5 - 18%)		λ (m)	Rango de pendiente (18 - 40%)	
	p %	LS		p %	LS
60	8	1.40	20	25	4.80
25	12	1.65	40	25	6.75
100	8	1.80	16	40	9.00
90	12	2.40	40	40	14.50

NOTA: λ y p determinados de mapas a escala 1:4000

Fuente: Rosenzweig (1982).

Debido a que no se dispone de un mapa topográfico de mayor escala que 1:100.000 para los sectores al Sur de la Panamericana, los valores de λ a usar en este estudio se asumen teniendo como guía los valores de la Tabla 48. Los valores de p se estiman a partir de la Tabla 1. Para los sectores al Norte de la Panamericana se mantienen los valores de la Tabla 45 debido a que allí los valores de LS son inferiores a la unidad y por tanto el error cometido es menos relevante. Los valores finales estimados para λ , p y LS se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49. Valores finales de λ , p y LS por sectores o subcuencas.

Sector	λ (m)	p (%)	LS	Sector	λ (m)	p (%)	LS
A	100	23	9.67	1	1654	0.02	0.57
B	100	23	9.67	2	991	0.142	0.48
C	120	15	5.15	3	1728	0.083	0.61
D	100	23	9.67	4	1524	0.025	0.55
E	100	23	9.67	5	1028	0.02	0.45
F	100	23	9.67	6	789	0.05	0.40
G	100	18	6.36	7	657	0.09	0.38
H	100	18	6.36	8	525	0.2	0.36
I	100	18	6.36	9	1120	0.025	0.47
J	120	15	5.15	10	1195	0.1	0.51
K	100	18	6.36	11	890	0.125	0.45
L	100	18	6.36	12	703	0.05	0.38
M	120	15	5.15				
N	100	19	6.96				
O	100	19	6.96				

Retención de Sedimentos

Como se sabe, una de las características de la red hidrográfica del río Escalante es que ninguno de sus tributarios en la cabecera de la cuenca, es capaz de mover su carga de sedimentos a través de la llanura. En lugar de ello, los sedimentos se depositan en una franja que se encuentra justamente al Norte de la carretera Panamericana, por ello el curso principal del río Escalante transporta una cantidad de sedimentos relativamente pequeña.

Stagno (1970), divide el sector de los ríos del piedemonte en tres fajas paralelas a la Panamericana, en función de la actuación sedimentológica de estos ríos: Una primera faja, la más cercana al piedemonte, entre cotas 70-90m y 30-40m, constituye un relleno por una napa de epandajes coalescentes. El último trecho de esta faja está caracterizado por una zona de gran inestabili-

dad de los cursos de aguas, que sedimentan frecuentemente sus lechos y desbordan inundando la zona. Una segunda faja, entre cotas 30-40 m a 20 m. constituida por un sistema de desborde y una tercera faja entre cotas 20 a 10 m. ocupada por grandes cubetas de decantación y una baja proporción de diques colmatados.

La retención periódica de sedimentos en las cuencas de estos tributarios hace que gradualmente éstas disminuyan la capacidad de almacenamiento de grandes volúmenes de agua, y con ello el aumento de las crecientes aguas abajo hacia la Ferreira y Sta. Bárbara.

Esta situación obliga a considerar el efecto de los sedimentos, si se quiere obtener una correcta evaluación del proceso de inundaciones en la cuenca del río Escalante, y poder determinar así los daños causados por éstos.

La metodología propuesta para la determinación de los sedimentos retenidos, se basa en los embalses hipotéticos utilizados en la calibración Fase II del modelo hidrológico y en la estimación de la producción de sedimentos mediante la ecuación modificada de pérdida de suelo "MUSLE".

Métodos de Retención de Sedimentos por un Embalse

La eficiencia de captación de un embalse, es simplemente el porcentaje del volumen total de sedimentos entrantes al embalse que queda retenido en él. Se expresa corrientemente como la relación entre el sedimento depositado y el sedimento afluente.

Los métodos más empleados actualmente para determinar la eficiencia de captación están basados en relaciones empíricas, y son descritas por Arroyo (1971):

- El método de Brunne, consiste en expresar la eficiencia de captación porcentualmente en relación a la carga de sedimentos retenida en el embalse y la razón, capacidad/volumen medio de escurrimiento anual, en uni-

dades consistentes, puesto que la relación es adimensional.

- El método de Churchill, el porcentaje de captación del embalse está en función de un índice de sedimentación, el cual se define como la relación del período de retención y la velocidad media a través del embalse. El período de retención es igual a la capacidad del embalse dividido por el gasto afluente diario.

- El método de Einstein, desarrollado para calcular la eficiencia de captación de un desarenador.

El método de Brunne tiene la limitación de que no debe ser aplicado a embalses en los cuales se producen descensos ya que no reflejaría la situación real en el caso de usarse para calcular la eficiencia de captación en embalses que permanecen vacíos por largos períodos de tiempo.

El U.S. Bureau of Reclamation, agrega datos adicionales en la curva del método de Churchill, aplicables a embalses semi-secos, y de esta manera poder ser aplicable a estos casos.

, El método de Brunne es el aplicado en este estudio, debido a que las cuencas medias cercanas al piedemonte simulan un embalse natural que anualmente se llena, al menos parcialmente.

Método de Brunne

Consiste en utilizar las curvas de la Figura 25, las cuales son el resultado del análisis de 44 embalses normalmente llenos (Arroyo, 1971).

Los datos necesarios son:

CEMB = Capacidad del embalse en millones de metros cúbicos

VPA = Volumen de escurrimiento medio anual en millones de metros cúbicos.

Con estos datos se calcula la relación adimensional capacidad/escorrentía, es decir $CEMB/vPA$, luego con el resultado se entra en la Figura 25 y se lee el valor de eficiencia de retención, utilizando la curva promedio para embalses normalmente llenos.

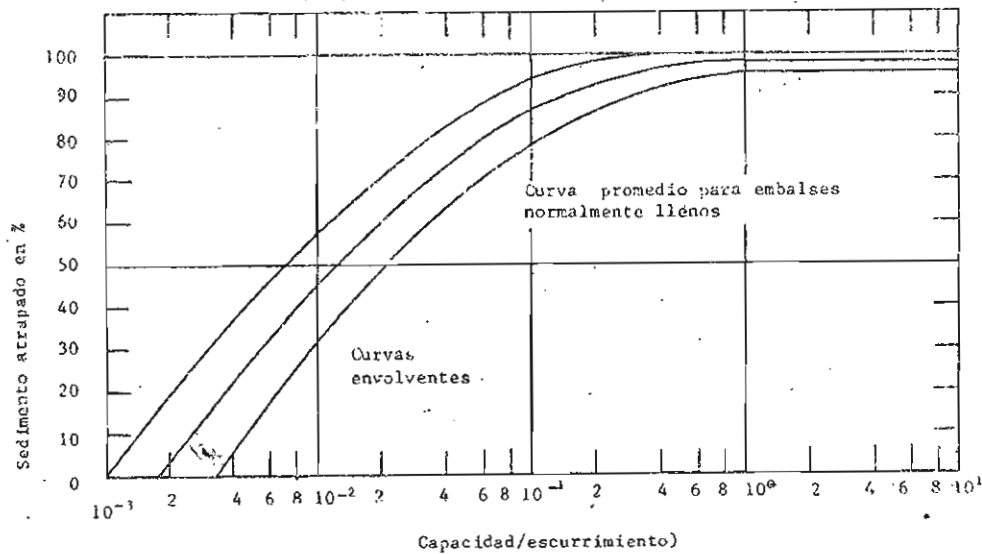


Figura 25. Curvas de eficiencia de atrape en embalses.

Fuente: Design of small dams (1973), p. 778.

A partir de la eficiencia de retención en porcentaje y el aporte medio anual de sedimentos calculado con la "MUSLE" se estima la cantidad de sedimentos retenidos en el embalse, expresada en toneladas métricas. Para llevar las toneladas de sedimento a volumen se multiplica esta cantidad por el peso específico promedio de los sedimentos.

El peso específico de los sedimentos depositados en un embalse varía en función de: 1. La granulometría del material y su composición. 2. La forma en la cual se opera el embalse y 3. El tiempo de consolidación de los sedimen-

tos depositados. Los sedimentos gruesos, como arenas y gravas, se consolidan casi inmediatamente; en cambio los sedimentos finos, como arcillas y limos, sufren un proceso de consolidación mucho más largo (Arroyo, 1971).

El peso específico de los sedimentos se puede calcular por la fórmula de Lane y Koelzer, citado por Arroyo (1971):

$$\gamma_m = \gamma_1 + K \log_{10}(T) \quad (4.19)$$

donde:

γ_m = peso específico seco después de m años en libras/pie³

γ_1 = peso específico seco en el primer año

K = constante

T = el tiempo

además

$$\gamma_1 = \gamma_s * \% a + \gamma_m * \% l + \gamma_c * \% A \quad (4.20)$$

donde:

$\gamma_s, \gamma_m, \gamma_c$ = pesos específicos promedios de las arenas, limos y arcillas respectivamente.

$\% a, \% l, \% A$ = fracciones de arena, limo y arcilla contenidos en la muestra.

y

$$K = K_c * \% l + K_m * \% A \quad (4.21)$$

donde:

K_c, K_m = constantes correspondientes a limo y arcilla respectivamente.

Los valores de K y γ para arenas, limos y arcillas se estiman de la Tabla 50 la cual corresponde a los valores de Lane y Koelzer, citado por Arroyo (1971).

Tabla 50. Valores de K y γ para arenas, limos y arcillas.

Operación del embalse		Arena		Limo		Arcilla	
		γ_s	K	γ_m	K	γ_c	K
I.	Sedimentos sumergidos permanentemente.	93	0	65	5.7	30	16.0
II.	Embalses con descensos moderados.	93	0	74	2.7	46	10.7
III.	Embalses con descensos considerables.	93	0	79	1.0	60	6.0
IV.	Embalses normalmente vacíos.	93	0	82	0.0	78	0.0

Fuente: Arroyo (1982, p. 12).

Para expresar el peso específico de los sedimentos en unidades métricas se usa, según Arroyo (1971), la siguiente expresión:

$$\gamma \text{ (Kg/m}^3\text{)} = 16.02 * \gamma_m \text{ (libras/pie}^3\text{)} \quad (4.22)$$

En el presente estudio se carece de información referente a la composición granulométrica de los sedimentos, por tanto se estima el peso específico de estos asumiendo que el 100% es arena. Aplicando las ecuaciones 4.19 a 4.22 se obtiene:

$$\gamma = 16.02 * (93) = 1489.9 \text{ Kg/m}^3$$

$$\gamma \approx 1.5 \text{ Ton/m}^3$$

Dividiendo las toneladas de sedimento producido, estimado aplicando la "MUSLE", por 1.5 se obtiene el volumen correspondiente en metro cúbicos.

Características de los Embalses Hipotéticos

Como resultado de la calibración Fase II del modelo Stanford IV se tienen cinco embalses hipotéticos, además del embalse existente sobre el río Onia. Los embalses hipotéticos se definen en la etapa de calibración como una relación de volumen almacenado y caudal afluente; no tienen relación alguna con la topografía del terreno.

Los embalses hipotéticos representan la agregación de múltiples y pequeñas áreas de inundación, capaces de almacenar agua de manera significativa. Los mismos son definidos en la calibración sin considerar ninguna curva elevación - área - capacidad.

Para aplicar el método de Brunne, de captación de sedimentos, es necesario estimar la capacidad de atrape de sedimentos en los embalses hipotéticos. Hay que tener presente, incluso para el embalse real sobre el río Onia, que los embalses pueden almacenar, momentáneamente, un volumen de agua superior al indicado por la capacidad de las mismas. En el caso de los embalses hipotéticos este efecto puede ser suficientemente notable, debido a que ellos representan la sumatoria de numerosos y pequeños reservorios incluyendo los producidos por la construcción de camellones de penetración a las fincas, los cuales hacen que se represen volúmenes de agua atrás de ellos.

La determinación correcta de la capacidad de atrape de sedimentos, así como de las curvas elevación - área - capacidad de los embalses, sólo se puede hacer a través de un levantamiento topográfico. A nivel de estudios de planificación y prediseño se pueden estimar estas curvas a partir de cartas cartográficas a escala 1:25000 o mayores.

Por razones de disponibilidad de tiempo y debido a que no se dispone de información referente a las características físicas de las áreas inun-

dables en la faja de contacto entre piedemonte y planicie, las capacidades de retención de agua y sedimentos de los embalses hipotéticos se estiman superficialmente. Para tal fin se asumen embalses rectangulares de 1.0 a 1.5 m de profundidad y área igual al 12% de la superficie total de planicie y piedemonte que podría ser inundada.

En la Tabla 51 se muestran las capacidades estimadas para los embalses hipotéticos, así como también la calculada para el embalse sobre el río Onia.

El volumen promedio de escorrentía anual, segundo dato necesario para aplicar el método de Brunne, se determina a partir de los resultados de la calibración Fase II, período 1975 - 1978. Ver Tabla 52.

Tabla 51. Capacidad estimada para los embalses hipotéticos.

Embalse	Area Hoya (Km ²)	Area Inund. (Km ²)	Altura y Area Hipotéticas de Embalse		Capacidad Hipotética de Embalse (10 ⁶ m ³)
			H (m)	A (Km ²)	
1. Oropito/Sta. Barb.	243.9	243.9	1.0	29.3	29.3
2. Jabíllo	214.2	170.0	1.0	20.4	20.4
3. Umuquena	403.3	200.0	1.5	24.0	36.0
4. Pajitas	448.1	240.0	1.3	28.8	37.4
5. Escalant/Caño N.	732.9	400.0	1.3	48.0	62.4
6. Onia (*)	292.0	—	25.0	6.1	66.0

(*) Datos reales, tomados de las curvas del embalse sobre el río Onia. *

Tabla 52. Escorrentía anual simulada en millones de metros cúbicos.

Subcuenca	1975	1976	1977	1978	Promedio
1. Caños Oropito/Sta. Barb.	177.257	222.337	78.461	147.144	156.300
2. Jabillo	112.361	188.820	47.420	144.705	123.327
3. Uruquena	220.934	352.836	88.012	292.502	238.571
4. Pajitas	327.920	258.197	143.159	349.956	279.308
5. Escaint/Caño Negro	473.638	476.905	252.784	591.609	448.734
6. Onia (Presa)	152.054	102.278	85.744	184.096	131.043