

TC530
B35

ESTUDIO DE LA PLANICIE INUNDABLE DEL
RIO ACARIGUA

Por
Tomás Alberto Bandes Rodríguez

Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en
Desarrollo de Recursos Hidráulicos

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

TOMO I

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL
DE AGUAS Y TIERRAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida - Venezuela
1980

SERBIULA - TULIO FEBRES CORDERO



TC530 B35

Licencia Creative Commons: 03 JUN 1982

Atribución No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

a mi esposa

iii
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

AGRADECIMIENTO

Al Doctor Roger A. Amisial, bajo cuya dirección se realizó la presente tesis, así como al Doctor José R. Córdova y al profesor Roberto Duque, miembros del comité, por su valiosa cooperación.

Al profesor Hervé Jégat, y a los Ingenieros Manuel Matute y José Mogollón, por la colaboración prestada.

A los Ingenieros Guzmán Alvarado Aponte, Carlos Montilla Nava y Carlos Morante, por su interés en hacer posible mi participación en el curso de Postgrado.

Al M. A. R. N. R. Zona 8, por haberme proporcionado los medios para culminar mis estudios, y realizar el presente trabajo. Al personal de empleados y obreros del Núcleo de Inspección Turén I, y en especial al Br, Félix Azuaje, quien realizó el trabajo de dibujo.

Al personal directivo, docente, administrativo y obrero del CIDIAT por la ayuda prestada, en especial al Banco de Programas, al personal de Biblioteca y Departamento de Publicaciones. Así como al personal del Centro de Computación de la Universidad de Los Andes.

Al personal del Centro Operacional de Computación de la U. C. V; Núcleo Maracay.

A mi compañero y amigo Luis Alfredo Chacón por su apoyo y orientación.

A la Señora Carmen Trejo de Calderón y a la Señorita Josefina Chacón quienes realizaron la difícil tarea de mecanografiar el original de la tesis. A la Señorita Alicia Usubillaga por la revisión de la publicación final.

INDICE

	Página
AGRADECIMIENTO.	v
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS.	xi
LISTA DE SIMBOLOS	xiii
RESUMEN.	xix
Capítulo	1
I. INTRODUCCION.	1
Exposición del problema	1
Objetivo general del estudio.	3
Objetivos específicos del estudio	3
Importancia del estudio	3
II. REVISION DE LITERATURA.	5
Alternativas de embalses para control de crecientes en el Río Acarigua.	5
Modelo de Simulación hidrológica Stanford IV	13
Modelo de tránsito dinámico en planicies inundables.	30
III. HIDROGRAMAS DE CRECIENTES EN LA ESTACION HIDROMETRICA PUENTE ACARIGUA.	45
Preparación de los datos de lluvia horaria que serán usados en el modelo Stanford IV.	45
Calibración del modelo Stanford IV para la cuenca del río Acarigua.	52
Adaptación del programa EMBAL al modelo Stanford IV para simular el tránsito de crecientes a través de los embalses Yacambú y Dos Bocas.	59
Análisis de frecuencias de lluvias máximas en la cuenca del río Acarigua.	67
Determinación de los hidrogramas de crecientes en la estación Puente Acarigua, para diferentes alternativas de embalses y diferentes períodos de retorno.	75
Porcentajes de atenuación de picos en la estación Puente Acarigua.	79

INDICE (Contin...)

	Página
IV. DETERMINACION DE LA MANCHA DE INUNDACION DEL RIO ACARIGUA	81
Entrada de datos al modelo de tránsito dinámico en planicies inundables.	81
Descripción de las variables de entrada, utilizadas en el modelo.	82
Cálculo de la mancha de inundación para diferentes alternativas de uso de embalses y para diferentes períodos de retorno	84
V. ESTIMACION DEL VALOR ESPERADO DE DAÑOS POR INUNDACION DEL RIO ACARIGUA	87
Cálculo del área inundada	87
Cálculo de las pérdidas por inundación	87
VI. ANALISIS DE RESULTADOS	95
Comparación de alternativas de uso de embalses	95
Discusión del efecto de los embalses Yacambú y Dos Bocas, sobre las inundaciones en las áreas agrícolas adyacentes al río Acarigua.	96
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
VIII. LITERATURA CITADA	101

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Hidrogramas de crecientes del río Yacambú en Paso Angostura	8
2	Hidrogramas totales de crecientes en el embalse Dos Bocas, tomando en cuenta la contribución desde Paso Angostura construida la Presa Yacambú. . . .	9
3	Hidrogramas totales de las crecientes en Puente Acarigua, construida la Presa Yacambú, Cálculos de FUDECO	12
4	Hidrogramas totales en puente Acarigua construidas las presas Yacambú y Dos Bocas.	14
5	Estaciones Pluvio-evaporimétricas usadas por el MOP en el estudio hidrológico del río Acarigua en Dos Bocas.	47
6	Estaciones pluvio-evaporimétricas seleccionadas.	48
7	Puntos de flujo usados en la calibración del modelo	53
8	Láminas de lluvias máximas ocurridas en la cuenca del río Acarigua, durante el período 1968-1979. Láminas en mm.	66
9	Láminas de lluvias máximas para 12 horas de duración. Estación El Guamito	68
10	Ajuste analítico de los datos de lluvia máxima de la estación El Guamito, a la distribución Gumbel Tipo I.	69
11	Prueba de Smirnov Kolmogorov para el Ajuste Analítico	70
12	Valor Crítico Δ_0 del estadístico de Smirnov-Kolmogorov, para varios valores de α comunmente usados en hidrología.	71
13	Lluvias máximas para diferentes períodos de retorno en la estación El Guamito	71
14	Cálculo de la lluvia media por el método de las isoyetas en el área de influencia de la estación El Guamito.	74

LISTA DE TABLAS (CONT)

TABLA		Página
15	Cálculo de la lluvia media por el método de las isoyetas en el área de influencia de la estación Paso Angostura.	74
16	Cálculo de la lluvia media por el método de las isoyetas en el área de influencia de la estación Caspito	75
17	Lluvias máximas para 12 horas de duración y diferentes períodos de retorno, en el área de influencia de las Estaciones El Guamito, Paso Angostura y Caspito.	76
18	Cálculo de los porcentajes de lluvia horaria en la Estación El Guamito.	79
19	Porcentajes de atenuación de picos en la estación Puente Acarigua	80
20	Area Inundada por el río Acarigua, en hectáreas.	88
21	Daños por inundación del río Acarigua, en bolívares.	89
22	Cálculo del valor esperado de daños anuales para la alternativa 1, en bolívares.	90
23	Cálculo del valor esperado de daños anuales para la alternativa 2, en bolívares.	91
24	Cálculo del valor esperado de daños anuales para la alternativa 3, en bolívares	91
25	Cálculo del valor esperado de daños anuales para la alternativa 4, en bolívares.	92
26	Cálculo del valor esperado de daños anuales para la alternativa 5, en bolívares.	92
27	Cálculo del valor esperado de daños anuales para la alternativa 6, en bolívares.	93
28	Valor esperado de daños anuales para las diferentes alternativas.	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
1 Ubicación de la zona bajo estudio	2
2 Análisis Gumbel-Logarítmico del gasto máximo instatáneo del río Acarigua en Puente Acari- gua, realizado por FUDECO.	11
3 Distribución de frecuencia para la capacidad de infiltración.	16
4 Distribución de frecuencia acumulada para la capacidad de infiltración.	16
5 Aplicación de la distribución de frecuencia acumulada de la capacidad de infiltración	21
6 Infiltración media de la cuenca como función de la humedad del suelo.	21
7 Humedad que entra al almacenamiento del agua subterránea	24
8 Distribución de frecuencia acumulada de la capacidad de infiltración. (1) Incremento de la detención superficial, (2) Incremento de la detención del interflujo.	25
9 Interflujo como una función de LZS/LZSN para CC=1.0.	26
10 Flujo del agua subterránea	27
11 IMPV para cuencas urbanas como función del área impermeable total	28
12 Evapotranspiración real y potencial	30
13 Sección transversal típica utilizada por Fread	31
14 Condición de superficie de agua horizontal en la sección transversal típica.	33
15 Esquema del método implícito de los cuatro puntos	36
16 Sección típica del río y su planicie inundable utilizada en el modelo	36

LISTA DE FIGURAS (CONT)

FIGURA		Página
17	Planta del río con su correspondiente planicie de inundación.	37
18	Distribución de secciones y tramos en que se divide la extensión del río en estudio.	38
19	Ubicación de la Estación Pluviométrica e Hidrométrica en la cuenca del río Acarigua	46
20	Trazado de los Polígonos de Thiessen en la Cuenca río Acarigua.	50
21	Ubicación de Isocronas y de los siguientes puntos de flujo: 1) Río Yacambú en Paso Angostura; 2) Río Yacambú en el Cajón; 3) Río Acarigua en Puente Acarigua.	55
22	Perfil longitudinal del río Yacambú.	56
23	Perfil longitudinal del río Bucaral.	57
24	Parte de la calibración del modelo STANFORD IV en la cuenca del río Acarigua.	61
25	Isocronas y puntos de flujo en los sitios de presa Sigüientes: 1)Presa Yacambú; 2) Presa Dos Bocas.	62
26	Isoyetas de la Tormenta ocurrida el 18-05-76. Cuenca del río Acarigua. Duración 12 horas, Unidades = mm.	73
27	Esquema ilustrativo para la obtención de los datos tabulares del área, profundidad, perímetro mojado y ancho superficial en cada sección en estudio.	86

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos

Definición

A	▪ Area total de la sección transversal de flujo
AA	▪ Factor de Interpolación
Ac	▪ Area en el canal
ADDFW1	▪ Puntos de flujo que entran en cada elemento de TIMEAR
ADDFW2	▪ Puntos de flujo que entran en cada elemento de TIMEAR
AEPI	▪ Índice de evapotranspiración antecedente
AETR	▪ Volumen de evapotranspiración de la zona inferior
ALIV	▪ Volumen descargado por el aliviadero en el período de tiempo
ALMAX(I)	▪ Tirante máximo alcanzado en cada sección en estudio durante todo el período de tránsito
AM (I, K)	▪ Datos tabulares del área mojada para diferentes niveles en cada sección en estudio
AMAX(I)	▪ Área máxima de flujo en el cauce del río antes del desborde
Ap	▪ Área en la planicie
AREA	▪ Área de influencia del punto de flujo en Km ²
AREA(J)	▪ Área de inundación del vaso del embalse que corresponde al volumen del embalse en el período de tiempo
AREA2(IPT,j)	▪ Valores tabulares del área de inundación para diferentes niveles de agua del vaso del embalse ubicado en un punto de flujo determinado
AREACA	▪ Área de influencia de cada cántaro
AREACU	▪ Área de la cuenca
AREARE	▪ Área de influencia del registrador
AS	▪ Área muerta de almacenamiento
AT	▪ Fracción del área del segmento ocupada por superficies impermeables
B	▪ Ancho máximo alcanzado por la mancha de inundación en la sección transversal en estudio
BM(I, K)	▪ Datos tabulares del ancho superficial para diferentes niveles en cada sección en estudio

LISTA DE SIMBOLOS (CONT..)

<u>Símbolos</u>	<u>Definición</u>
Bm	= Ancho máximo del canal del río
BMAX(I)	= Ancho máximo de flujo en el cauce del río antes del desborde
BS(I)	= Ancho superficial alcanzado por el flujo en cada sección en estudio, para cualquier intervalo de tiempo
CB	= Índice nivelador de la infiltración
CC	= Índice de interflujo
CRG	= Coeficiente de rugosidad de Manning para el cauce del río
CRp	= Coeficiente de rugosidad de Mannign en la planicie
DET(J)	= Intervalo de tiempo utilizado para el tránsito en segundos
DEXC(L)	= Intervalo de distancia entre secciones a lo largo del cauce en metros
DEXP(L)	= Intervalo de distancia entre secciones a lo largo de la planicie en metros
DISP	= Volumen de agua disponible en el embalse en el período de tiempo
E (I)	= Lámina de evaporación en el embalse en el período de tiempo
EG	= Volumen entregado desde el embalse
ELEMS	= Número de elementos en el histograma tiempo-área
EP	= Evapotranspiración potencial residual
EPX	= Capacidad disponible en el almacenamiento de intercepción
EPXM	= Valor máximo del almacenamiento de intercepción
ESTA	= Nombre de la estación
EV	= Volumen de evaporación desde el suelo en el período de tiempo
FLOW(IPT, I)	= Volumen de agua entrante en la cola del embalse, en el período de tiempo
F14	= Recarga del agua subterránea
GAGEAR	= Número de la estación de medición de precipitación que será usada en cada elemento de TIMEAR
GWF	= Flujo de salida del agua subterránea
GWS	= Volumen almacenado en la zona superior del suelo

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

LISTA DE SIMBOLOS (CONT...)

<u>Símbolos</u>	<u>Definición</u>
g	= Aceleración de gravedad
H	= Desnivel en metros
h	= Elevación de la superficie de agua, referida a un datum
I	= Caudal afluente promedio
i	= Índice que se utiliza para hacer variar de nodo a nodo, el proceso de cálculo
IMPV	= Fracción del área del segmento ocupada por superficies impermeables
IRC	= Coeficiente de recesión del interflujo
j	= Índice que se usa para hacer variar procesos de cálculo de una línea de tiempo a otra
K	= Variable cualquiera de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento
KK24	= Coeficiente de recesión del agua subterránea
KS1	= Constante de atenuación en el canal
KV	= Componente variable de la recesión del agua subterránea
K1	= Relación entre el promedio de precipitación del segmento con respecto al promedio de precipitación puntual
K3	= Índice de pérdidas de humedad por evapotranspiración en la zona inferior del suelo
K24L	= Parte de la recarga del agua subterránea asignada a la percolación profunda
K24EL	= Evapotranspiración desde el almacenamiento del agua subterránea
L	= Distancia media recorrida por el escurrimiento de la cuenca
LIRC4	= Componente del almacenamiento del interflujo que entra a la descarga de éste
L-L	= Divisoria donde cambian las características propias del canal y de la planicie
LLUCA (K1,I)	= Lluvia diaria de cada cántaro

LISTA DE SIMBOLOS (CONT...)

Símbolos

Definición

LLUCAN	= Sumatoria del producto de la lluvia diaria de cada cántaro por su área de influencia
LLUPRO	= Lluvia diaria promedio en la cuenca
LLUV	= Lluvia registrada en una hora determinada
LLUVH	= Lluvia horaria calculada a partir de la lluvia diaria promedio de la cuenca
LZS	= Humedad en el almacenamiento de la zona inferior del suelo
LZSN	= Capacidad nominal del almacenamiento de la zona inferior
MES	= Mes del año
N	= Extremo del cauce aguas abajo
NANO	= Año
NDIA	= Día
NM	= Número total de medidas tabulares, hechas en cada sección
NN	= Coeficiente de Manning
NT	= Número total de intervalos de tiempo para el tránsito
NZ(IPT)	= Número total de datos tabulares de las curvas del embalse
NUMCA	= Número de cántaros
O_1	= Caudal efluente al principio del período
O_2	= Caudal efluente al final del período
P	= Porcentaje de la detención superficial, del escurrimiento y del interflujo que se retiene en la zona superior del suelo
P (I)	= Lámina de precipitación entrante al embalse en el período de tiempo
Pc	= Perímetro mojado en el canal
PG	= Porcentaje de la humedad que entra al almacenamiento del agua subterránea
PM (I, K)	= Datos tabulares del perímetro mojado para diferentes niveles en cada sección en estudio
Pm	= Lluvia máxima en mm
PMAX (1)	= Perímetro mojado máximo del flujo en el cauce del río

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

LISTA DE SIMBOLOS (CONT...)

<u>Símbolos</u>	<u>Definición</u>
PORCEN	= Porcentaje de lluvia horaria en el registrador
POWER	= Exponente de la ecuación de infiltración
Pp	= Perímetro mojado en la planicie
PRE	= Porcentaje de detención superficial del escurrimiento y del interflujo que no se retiene en la zona superior del suelo
PREC (I)	= Lluvia horaria
Q	= Caudal en m ³ /s
q	= Aportes laterales de flujo
Q (I)	= Caudal que pasa por cada sección en estudio para cualquier intervalo de tiempo
Q (I, 1)	= Caudal en cada sección en estudio, al inicio del tránsito
Q (I, J)	= Datos del hidrograma de entrada
Q_i^{k+1}	= Valor de la incógnita Q en la (k + 1)° iteración
Q_i^k	= Valor de la incógnita Q en la K° iteración
QA	= Entradas al sistema durante el período de tiempo
QD (J)	= Caudal descargado por el desagüe de fondo del embalse
QDES	= Volumen descargado por el desagüe de fondo del embalse
QE	= Salidas del sistema en el período de tiempo
QL	= Caudal descargado por el aliviadero del embalse
RES	= Humedad en el almacenamiento de detención superficial
RTEIN	= Intervalo de tránsito en horas
SCEP	= Valor inicial del almacenamiento de intercepción
Sf	= Pendiente de fricción
SGW	= Volumen de almacenamiento del agua subterránea
SOC	= Pendiente promedio a lo largo del cauce del río
SOP	= Pendiente promedio a lo largo de la planicie
SS	= Pendiente media de la cuenca
SUMA	= Lluvia total diaria en el registrador
S_1	= Almacenamiento al inicio del período de tiempo
S_2	= Almacenamiento al final del período de tiempo

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

LISTA DE SIMBOLOS (CONT...)

<u>Símbolos</u>	<u>Definición</u>
t	= Tiempo
T_c	= Tiempo de concentración en horas
TER	= Volumen de agua en el embalse
TIMEAR	= Histogramas tiempo-área en %
TOMA (JPT)	= Entrega de agua fija por el desagüe de fondo para control de
T_R	= Período de retorno en años
TRASV (IPT)	= Entrega de agua por trasvase desde el embalse
V (JPT, J)	= Valores tabulares de los volúmenes del embalse para diferentes niveles de agua
$V_1 X$	= Velocidad del flujo lateral en la dirección del eje X de la planicie inundable
VONOR (IPT)	= Volumen normal en el embalse
VOMUE (IPT)	= Volumen muerto en el embalse
X	= Distancia a lo largo del eje longitudinal del canal o de la planicie inundable
Y	= Profundidad del flujo en el canal
Z	= Cota de fondo del canal
ϵ	= Error de tolerancia aceptable para las soluciones de las incógnitas en el método implícito de los cuatro puntos
ϕ	= Parámetro que afecta el caudal en el cauce del río
θ	= Factor de ponderación utilizado por el método implícito por diferencias finitas
γ	= Parámetro que afecta el caudal en la planicie del río
Δt	= Intervalo de tiempo seleccionado
ΔX	= Intervalo de distancia en el canal
ΔX_c	= Intervalo de distancia en el cauce definido del río
ΔX_p	= Intervalo de distancia en la planicie

RESUMEN

En el presente trabajo se determina la mancha de inundación del río Acarigua, considerando los embalses Yacambú y Dos Bocas entre las alternativas de control de crecientes, y luego se hace una estimación de daños en base al área inundada.

Se usa el modelo de Simulación Hidrológica STANFORD IV, versión National Weather Service, modificado para simular el tránsito de avenidas a través de los embalses propuestos y así obtener los hidrogramas de las crecientes a la salida de la cuenca. Previamente se realiza un análisis de frecuencias de lluvias máximas para 12 horas de duración; y los eventos con períodos de retorno de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 50000 y 100000 años, se utilizan como datos de entrada al modelo ya calibrado para la cuenca en consideración.

Para determinar la mancha de inundación se usa un método de tránsito dinámico en planicies inundables, que presenta una solución numérica de las ecuaciones de SAINT VENANT, aplicadas al caso de flujo unidimensional no permanente, en una cuenca de sección irregular; estando compuesta dicha sección por el cauce definido del río y su planicie de inundación.

Una vez determinada el área inundada, se estiman los daños anuales en bolívares, para evaluar el efecto de los embalses en el control de inundaciones en las áreas agrícolas adyacentes al río Acarigua.

Los daños anuales se reducen en un 4,08% funcionando sólo el embalse Yacambú, y en un 63,74% funcionando simultáneamente los embalses Yacambú y Dos Bocas.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Exposición del problema

La problemática de inundaciones es un fenómeno recurrente que afecta anualmente en términos generales, a las planicies inundables de la mayoría de las cuencas hidrográficas de Venezuela.

En los Llanos Occidentales de Venezuela, específicamente en la zona del Estado Portuguesa, uno de los ríos que han causado serios problemas de inundación es el río Acarigua.

El río Acarigua nace en la confluencia de los ríos Yacambú y Bucaral, Estado Lara. Al desplazarse en sentido Norte-Sur y al atravesar la región, sirve de drenaje natural a las tierras altas aproximadamente hasta Villa Bruzual, ciudad capital del Distrito Turén. En su parte baja, el río tiende a desbordarse e inundar las zonas adyacentes. Tal condición fue motivo para que al comenzar el desarrollo de la región se construyera el canal piloto del río Acarigua, considerando el primer gran drenaje, que en una longitud de 35,33 Km y rumbo franco al Sur, desvía sus aguas directamente al Río Portuguesa.

El Río Acarigua normalmente causa problemas graves de inundaciones en los centros poblados cercanos a sus márgenes; entre los más importantes están: Río Acarigua, La Ríogeña, El Choro, Mijagüito, El Danto, La Misión, El Jobal, El Carretero, El Palmar, Chorrerones, Las Vegas, y Yacurito, pertenecientes a los Distritos Araure, Esteller y Turén, del Estado Portuguesa. Causa problemas graves de socavación lateral en las inmediaciones de Villa Bruzual y la unidad agrícola de Turén. Además, al desbordarse el canal piloto del Río Acarigua causa daños por inundación en los asentamientos campesinos Chingali Sur con 8.000 Ha de superficie y Nueva Florida con 6.000 Ha de superficie. En la Figura 1, se presenta la ubicación de la zona cuya problemática fue descrita anteriormente.

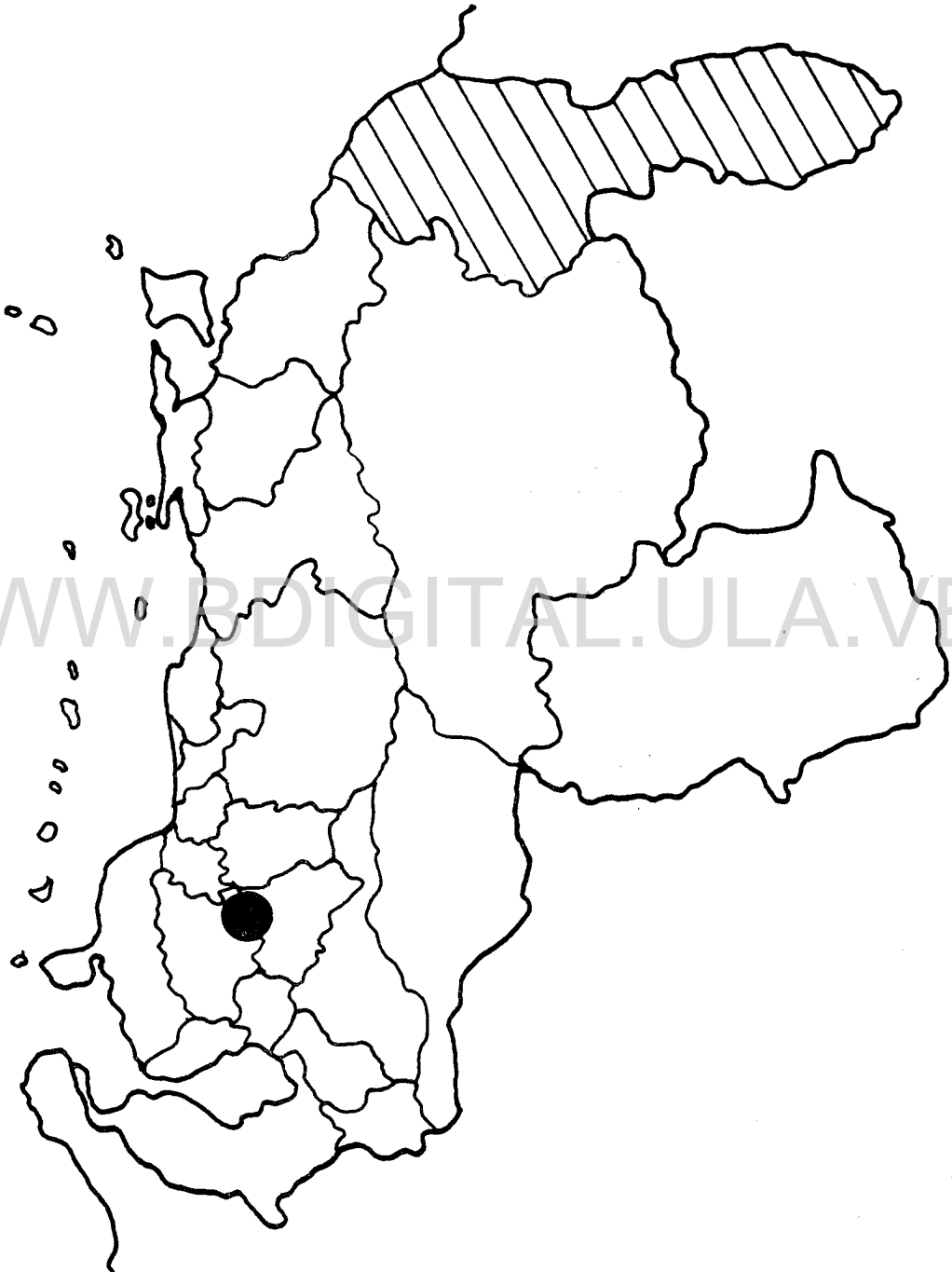


Figura 1. Ubicación de la zona bajo estudio.

Objetivo general del estudio

Desarrollar una metodología que permita realizar una evaluación de medidas alternativas para control de crecientes, mediante modelos de simulación hidrológica.

Objetivos específicos del estudio

1. Determinar la mancha de inundación del río Acarigua, para crecientes con períodos de retorno de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 50000 y 100000 años, considerando los embalses Yacambú y Dos Bocas, entre las alternativas de control de crecientes.

2. Estimar los daños económicos a partir del área inundada, para evaluar el uso de los embalses propuestos.

Importancia del estudio

1. Se desarrolla una metodología aplicable a ríos que requieran una evaluación de alternativas para el control de crecientes.

2. La incorporación de un programa de tránsito de crecientes en embalses a un modelo de simulación hidrológica que incluya todos los procesos hidrológicos, permite estimar el efecto de los embalses proyectados sobre las inundaciones en el área de influencia de los mismos, evitando así el uso de métodos en los cuales posiblemente se obtendrá poca precisión en los resultados.

3. El estudio de manchas de inundación, permite conocer los distintos niveles alcanzados por las avenidas de diferentes frecuencias, lo que serviría de base para el ordenamiento de las planicies inundables.

4. Los resultados del estudio son necesarios en el proceso de decisión relacionado con la selección de medidas alternativas para el control de las inundaciones en el área adyacente al río Acarigua.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CAPITULO II

REVISION DE LITERATURA

Alternativas de embalses para el control de crecientes en el río Acarigua

FUDECO (1973), señaló al embalse Dos Bocas como alternativa de control de crecientes del río Acarigua. Además, considera que un aprovechamiento óptimo de los recursos de la cuenca debe tener entre sus objetivos resolver este problema, conjuntamente con la construcción de obras de riego.

FUDECO (1973), recomienda la construcción de embalses para control de crecientes, conjuntamente con otros aprovechamientos, ya que las inundaciones sufridas no producen daños de importancia mayor como para considerar el control de crecientes como un propósito específico del proyecto.

Las obras que se construyan con otros fines, tales como riego, servirán para mejorar la situación de las zonas inundables, puesto que se podrán aprovechar tierras que actualmente están expuestas a inundaciones, además se mejorará el drenaje de aguas de lluvia que cae sobre la zona.

FUDECO (1978), señala la ubicación del sitio de presa seleccionado, el cual se encuentra ubicado políticamente en el Municipio Araure, Distrito Araure, en el Estado Portuguesa. El vaso de la presa se encuentra en los Municipios Sarare y Buena Vista del Estado Lara; y ubicado geográficamente entre las coordenadas N 1.070.000 y E 460.000; 2 Km aguas abajo de la confluencia de los ríos Yacambú y Bucaral.

FUDECO (1978), estudia el control de crecientes como posible uso de la obra, señalando que la construcción de un embalse sobre el río Acarigua tendrá un efecto beneficioso sobre el problema de inundación en el área de influencia.

El área de influencia del embalse Dos Bocas se localiza en cuatro distritos del Estado Portuguesa: Araure, Turén, Esteller y Páez; constituyendo éstos la principal zona agrícola de los Altos Llanos Occidentales.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tendría como límites:

Norte: Piedemonte y cuenca captora del embalse

Sur : Río Portuguesa

Este : Quebrada de Armo, Caño Turén

Oeste: Río Guache

Al realizar el estudio de la influencia del Embalse Dos Bocas en los problemas de inundación, incluyen la influencia que tendrá la presa Yacambú en este aspecto, ya que cualquier embalse sirve para control de crecientes, aunque sea construido con otro propósito.

También fue estudiada la situación que se presentará al estar funcionando los dos embalses. La mitigación de crecientes del río Acarigua es otro beneficio adicional que se obtendrá al construirse la presa Yacambú.

La metodología usada por FUDECO (1978) consistió en la estimación de las crecientes a esperarse en el sitio de presa Dos Bocas y en Puente Acarigua, para períodos de retorno de 10, 25, 100 y 10.000 años. La creciente de 10.000 años en Dos Bocas se utilizó para el diseño del aliviadero de la presa y la de 100 años en el sitio de presa para el diseño del túnel de desvío y de la ataguía para la construcción. Las crecientes de 10, 25 y 100 años fueron transitadas a través del embalse Dos Bocas y luego aguas abajo hasta el Puente Acarigua. Los hidrogramas resultantes del tránsito fueron comparados con las crecientes que han causado daños por inundación en la zona de influencia del embalse Dos Bocas. Esto, con el objeto de analizar la influencia que tendrá el embalse en la mitigación de las inundaciones aguas abajo.

El procedimiento utilizado fue el siguiente:

1. Con los hidrogramas correspondientes a las crecientes de 10, 25 y 100 años, calculados por el MOP (1975), y con un análisis probabilístico Gumbel, se estimó el pico de la creciente de 10.000 años en el sitio de presa Yacambú. Luego, aplicando este pico al hidrograma unitario se obtuvo el

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

hidrogramas de la creciente de 10.000 años en Yacambú. En la Tabla 1, pueden observarse los hidrogramas de estas crecientes.

2. Se transitaron por el embalse Yacambú las crecientes de 10, 25, 100 y 10.000 años.

3. Estas crecientes fueron transitadas por un tramo de 6 Km del cauce del río mediante el método de Muskingum, para determinar los hidrogramas correspondientes en la cola del embalse Dos Bocas.

4. Se dispuso de los hidrogramas de crecientes para 10, 25 y 100 años calculados por el MOP (1976), para la cuenca diferencial entre Paso Angostura y Dos Bocas. Se calculó la creciente de 10.000 años para esta cuenca diferencial, siguiendo la misma metodología del estudio hidrológico.

5. Las crecientes transitadas desde el embalse Yacambú se adicionaron a las de la cuenca diferencial Paso Angostura-Dos Bocas, sin hacer coincidir los picos, pues se consideró que por el origen orográfico de las tormentas en la cuenca, esta situación no podría ocurrir.

En la Tabla 2, se pueden observar los hidrogramas de crecientes para diferentes períodos de retorno, en el sitio de presa Dos Bocas, tomando en cuenta la contribución de la cuenca del río Yacambú hasta Paso Angostura, calculados por FUDECO (1978).

El procedimiento seguido por FUDECO (1978) para analizar la influencia del Embalse Yacambú en la amortiguación de los picos de crecientes en la estación de aforo de Puente Acarigua, fue el siguiente:

1. Se transitaron las crecientes, por el canal natural del río desde la salida del aliviadero de la presa Yacambú hasta el sitio de presa Dos Bocas.

2. Las crecientes transitadas desde Yacambú, se adicionaron a las calculadas por el MOP (1976), para la cuenca diferencial Paso Angostura-Dos Bocas.

Tabla 1. Hidrogramas de crecientes del río Yacambú en Paso Angostura

t Horas	TR			
	10	25	100	10.000
0	0	0	0	0
0,5	15	17	25	37
1	38	52	92	135
1,5	120	162	265	389
2	390	495	625	918
2,5	615	790	1140	1675
3	745	1008	1365	2006
3,5	775	1049	1436	2110
4	600	836	1075	1580
4,5	465	645	870	1278
5	385	531	730	1073
5,5	325	440	620	911
6	275	375	520	764
6,5	240	320	445	654
7	205	276	380	558
7,5	180	235	325	478
8	155	205	275	404
8,5	125	170	235	345
9	115	150	205	301
9,5	100	131	180	264
10	85	118	155	228
10,5	72	100	130	191
11	68	88	110	162
11,5	55	75	100	147
12	46	68	80	118
12,5	40	56	75	110
13	35	48	65	96
13,5	30	40	55	81
14	22	32	45	66
14,5	18	25	35	51
15	16	19	30	44
15,5	6	12	20	29
16	3	6	10	15
16,5	0	0	0	0

FUENTE: FUDECO (1978).

Tabla 2. Hidrogramas totales de crecientes en el embalse Dos Bocas, tomando en cuenta la contribución desde Paso Angostura construida la Presa Yacambú.

t	TR			
	10	25	100	10.000
0	20	20	20	20
0,5	55	60	70	105
1	87	102	121	173
1,5	170	200	320	480
2	484	593	777	1159
2,5	928	1096	1683	2522
3	1080	1347	1815	2723
3,5	1079	1339	1809	2719
4	1034	1290	1793	2617
4,5	814	1009	1510	2297
5	607	762	1040	1592
5,5	472	588	808	1258
6	362	468	652	1015
6,5	305	396	538	857
7	246	325	465	737
7,5	217	288	412	666
8	184	251	362	584
8,5	172	231	333	556
9	148	207	300	490
9,5	144	197	283	471
10	130	183	267	431
10,5	124	173	251	413
11	118	166	243	391
11,5	117	163	235	380
12	112	156	226	360
12,3	109	151	219	347
13	107	148	213	334
13,5	104	145	208	322
14	103	143	201	311
14,5	101	139	196	301
15	99	136	192	292
15,5	98	132	187	293
16	96	130	181	273
16,5	94	127	176	263
17	92	124	172	154
17,5	90	121	167	244
18	88	119	161	236
18,5	87	116	157	227
19	85	113	152	219
19,5	84	109	148	211
20	82	106	144	202

FUENTE: FUDECO (1978).

3. Los aportes laterales en el tramo del río Acarigua entre Dos Bocas y Puente Acarigua, fueron considerados al estimar las crecientes de período de retorno 10, 25 y 100 años en dicho sector. Esto se realizó con el hidrograma adimensional de la cuenca y las lluvias de la estación Camburito; siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que utilizó el MOP (1976).

4. A las crecientes transitadas desde el sitio Dos Bocas, se les adicionó el aporte lateral al sumarles los hidrogramas calculados para el sector diferencial Dos Bocas-Puente Acarigua.

En la Tabla 3, pueden verse los hidrogramas totales en Puente Acarigua, construida la presa Yacambú, calculados por FUDECO (1978).

5. Los picos de las crecientes fueron llevados al papel Gumbel-Logarítmico, observándose que la recta correspondiente a la presa Yacambú construida, presenta para las diferentes frecuencias, picos atenuados en aproximadamente un 15-20%, frente a la recta trazada a partir de los gastos máximos instantáneos registrados por la estación de aforo de Puente Acarigua. Es decir, según FUDECO (1978), la construcción del embalse Yacambú amortiguará las crecientes que ocurren en Puente Acarigua en un 15% al 20% dependiendo del período de retorno de la crecienta.

En la Figura 2, se puede observar el análisis Gumbel-Logarítmico del gasto máximo instantáneo del Río Acarigua en Puente Acarigua, realizado por FUDECO (1978).

Para analizar el efecto que tendrá sobre las inundaciones del área de estudio, la construcción de los embalses Yacambú y Dos Bocas, FUDECO (1978), utilizó el siguiente procedimiento:

1. Las crecientes de 10, 25 y 100 años de período de retorno se transitaron por el embalse Dos Bocas, luego fueron transitadas por el cauce del río Acarigua hasta Puente Acarigua, usando el método de Muskingum.

2. A las crecientes transitadas desde la presa Dos Bocas, se les

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

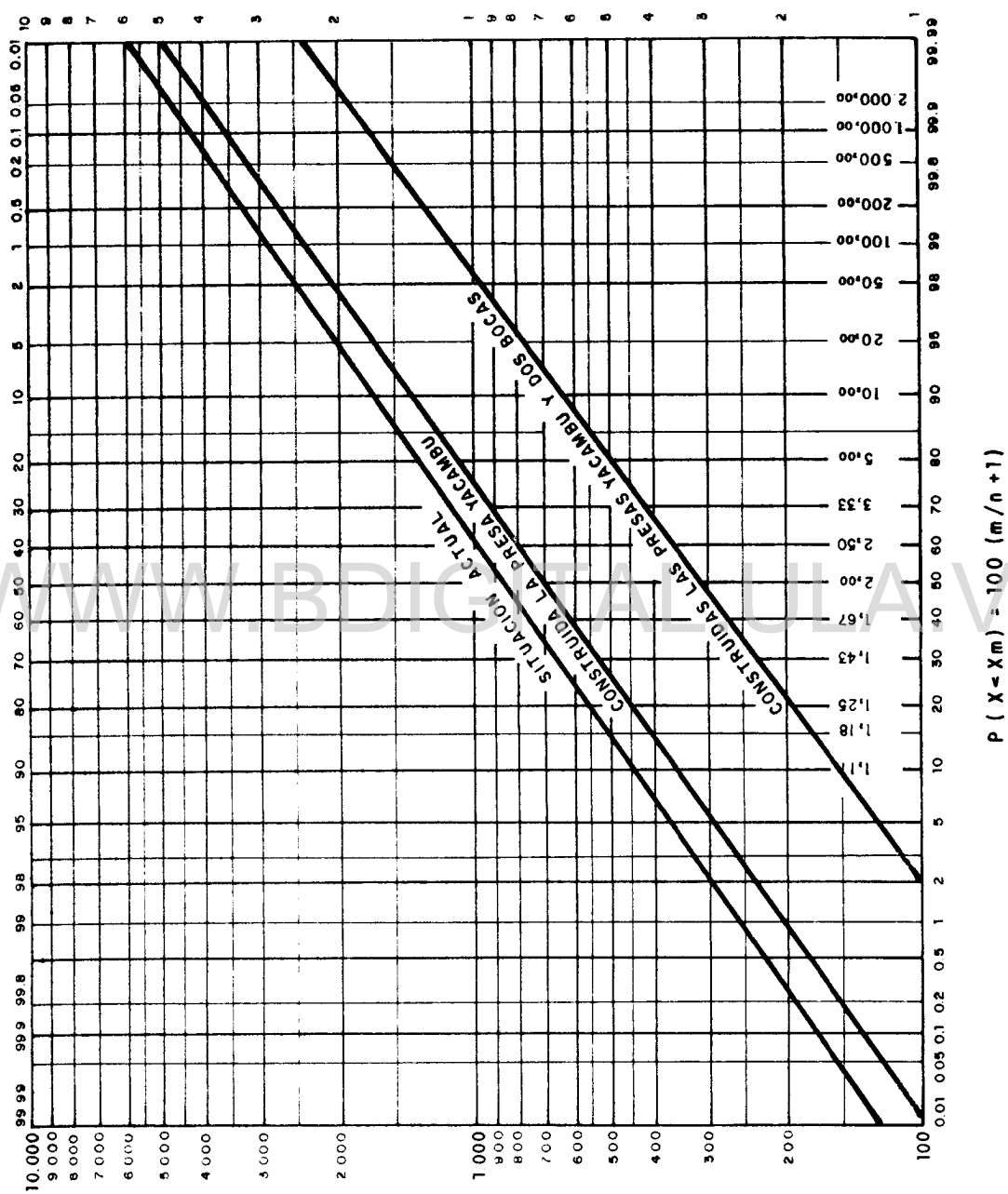


Figura 2. Análisis Gumbel-Logarítmico del gasto máximo instantáneo del río Acarigua en Puente Acarigua, realizado por FUDECO. (1978)

Tabla 3. Hidrogramas totales de las crecientes en Puente Acarigua, construida la Presa Yacambú, según FUDECO (1976)

t Horas	T_R		
	10	25	100
0	8	0	15
0,5	17	20	24
1	62	71	90
1,5	120	141	179
2	326	379	529
2,5	577	701	950
3	1001	1219	1745
3,5	1239	1598	2238
4	1365	1698	2348
4,5	1351	1678	2311
5	1194	1481	2083
5,5	1008	1252	1749
6	841	1043	1451
6,5	693	865	1203
7	570	717	991
7,5	463	588	817
8	385	490	686
8,5	317	409	576
9	271	351	489
9,5	229	303	434
10	203	271	388
10,5	180	243	350
11	102	221	320
11,5	149	205	298
12	141	194	283
12,5	134	186	272
13	129	179	263
13,5	125	174	254
14	122	170	247
14,5	119	166	241
15	118	163	234
15,5	116	160	229
16	114	156	223
16,5	112	153	217
17	110	150	212
17,5	108	147	207
18	107	144	202
18,5	105	141	197
19	103	138	192
19,5	101	135	187
20	99	133	182

adicionó el aporte del sector diferencial Dos Bocas-Puente Acarigua, y se obtuvieron las crecientes en Puente Acarigua, para períodos de retorno de 10, 25 y 100 años.

En la Tabla 4, aparecen los hidrogramas totales en Puente Acarigua, construidas las presas Yacambú y Dos Bocas, calculados por FUDECO (1978).

3. Los picos de las crecientes fueron llevados al papel Gumbel-Logarítmico, observándose que la recta correspondiente a las presas Yacambú y Dos Bocas construidas, presenta para los diferentes períodos de retorno, picos atenuados en un 60-65% aproximadamente, frente a la recta trazada a partir de los gastos máximos instantáneos registrados en la estación Puente Acarigua. Es decir, la construcción de los embalses Yacambú y Dos Bocas, amortiguará las crecientes que ocurren en Puente Acarigua en un 60-65%, dependiendo de su período de retorno.

La metodología usada por FUDECO (1978) para obtener los hidrogramas de crecientes en la estación Puente Acarigua, presenta la limitación de los ríos Yacambú y Bucaral en el sitio Dos Bocas, tienen igual probabilidad de ocurrencia. De allí que los resultados obtenidos no serán usados en el presente estudio, cuyo objetivo principal es la evaluación de los embalses Yacambú y Dos Bocas, como medidas alternativas para control de crecientes en el río Acarigua, y que requiere por lo tanto el uso de una metodología que permita obtener una mayor precisión en los resultados.

Modelo de Simulación Hidrológica Stanford IV

El modelo Stanford IV, desarrollado por Crawford y Linsley (1966), para simular los procesos que componen el ciclo hidrológico, fue originalmente programado en SUBALGOL. Anderson (1967) hizo la conversión del modelo al lenguaje FORTRAN IV con modificaciones menores, incluyendo la opción de utilizar datos de precipitación con intervalos de una hora o de seis horas. El programa desarrollado por Anderson (1967) es conocido como Modelo Stanford IV, versión National Weather Service. Duque (1977), estudió esta

Tabla 4. Hidrogramas totales en Puente Acarigua construidas las Presas Yacambú y Dos Bocas, según FUDECO (1978)

t	TR								
	10			25			100		
Horas	Dif.	Tran.	Total	Dif.	Tran	Total	Dif.	Tran	Total
0	8	0	8	10	0	10	15	0	15
0,5	11	7	18	14	7	21	19	7	26
1	39	11	50	47	11	58	63	11	74
1,5	77	14	91	92	14	106	124	15	139
2	233	17	250	288	17	305	393	18	411
2,5	358	20	378	446	20	466	612	21	633
3	535	25	560	674	26	700	935	29	964
3,5	610	32	642	771	35	806	1076	42	1118
4	544	42	586	685	48	733	964	62	1026
4,5	454	54	508	570	63	633	808	86	894
5	326	67	393	410	80	490	579	113	692
5,5	235	79	314	295	97	392	417	143	560
6	177	91	268	222	112	334	314	170	484
6,5	139	100	239	174	126	300	246	193	439
7	106	108	214	134	138	272	189	212	401
7,5	79	114	193	100	147	247	141	227	368
8	61	119	180	76	154	230	108	225	363
8,5	44	123	167	55	160	215	77	259	336
9	34	126	160	42	164	206	60	262	322
9,5	25	128	153	31	168	199	44	265	309
10	20	130	150	25	171	196	35	265	300
10,5	15	130	145	19	171	190	27	265	292
11	12	130	142	15	171	186	21	265	286
11,5	10	130	140	12	171	183	17	265	282
12	9	130	139	11	171	182	15	265	280
12,5	8	130	138	10	171	181	15	265	280
13	8	130	138	10	171	181	15	265	280
13,5	8	130	138	10	171	181	15	265	280
14	8	130	138	10	171	181	15	265	280
14,5	8	130	138	10	171	181	15	265	280
15	8	130	138	10	171	181	15	265	280
15,5	8	130	138	10	171	181	15	265	280
16	8	130	138	10	171	181	15	263	278
16,5	8	130	138	10	169	179	15	261	276
17	8	129	137	10	168	178	15	259	274
17,5	8	129	137	10	166	176	15	257	272
18	8	128	136	10	165	175	15	254	269
18,5	8	127	135	10	164	174	15	252	267
19	8	126	134	10	163	173	15	250	265
19,5	8	125	133	10	162	172	15	247	262
20	8	125	133	10	161	171	15	244	259

Licencia Creative Commons

versión, adaptándolo al sistema de computación de la Universidad de Los Andes, haciendo la conversión a unidades métricas y el mismo está disponible en la librería del Banco de Programas del CIDIAT. Esta última versión requiere un espacio de computadora de 228 K, y trabaja con un máximo de 5 estaciones medidoras de precipitación, 10 puntos de flujo, 1 estación de evaporación y 10 elementos en el histograma Tiempo-Area.

El modelo hace una descripción y análisis de los diferentes componentes del modelo y establece para cada uno de ellos lo siguiente:

1. Precipitación: Término que hace referencia a la caída y llegada a la tierra de todas las formas de humedad existentes en las nubes. En el modelo se usa la lluvia, que realmente llega a la superficie del suelo.

2. Intercepción: Es el proceso de captación de agua por las hojas, ramas y tallos de la vegetación en una cuenca rural. Es por lo tanto una función del tipo de vegetación y de la estación del año, en caso de vegetación decídua. En el modelo Stanford IV la intercepción se define en base a la capacidad del almacenamiento de intercepción. Se considera que la precipitación entra en el almacenamiento de intercepción hasta que se llena este último y es removida de él por la evaporación.

3. Infiltración: Es el proceso mediante el cual el agua que llega a la superficie pasa al perfil del suelo.

La capacidad de infiltración, es decir, la velocidad máxima del paso del agua hacia el perfil del suelo, es una función de las características de la cuenca tales como permeabilidad, tipo de suelo, cobertura vegetal y del contenido de humedad del suelo. En la Figura 3, se presenta una distribución de frecuencia esquemática para la capacidad de infiltración en una cuenca. La línea continua representa la distribución real y es aproximada por la línea quebrada la cual es utilizada en el modelo Stanford IV. A partir de esta distribución de frecuencia se puede obtener la curva correspondiente a la distribución de frecuencia acumulada de la capacidad de infiltración, tal como se muestra en la Figura 4, en donde la línea quebrada representa la curva de la distribución de frecuencia acumulada que se

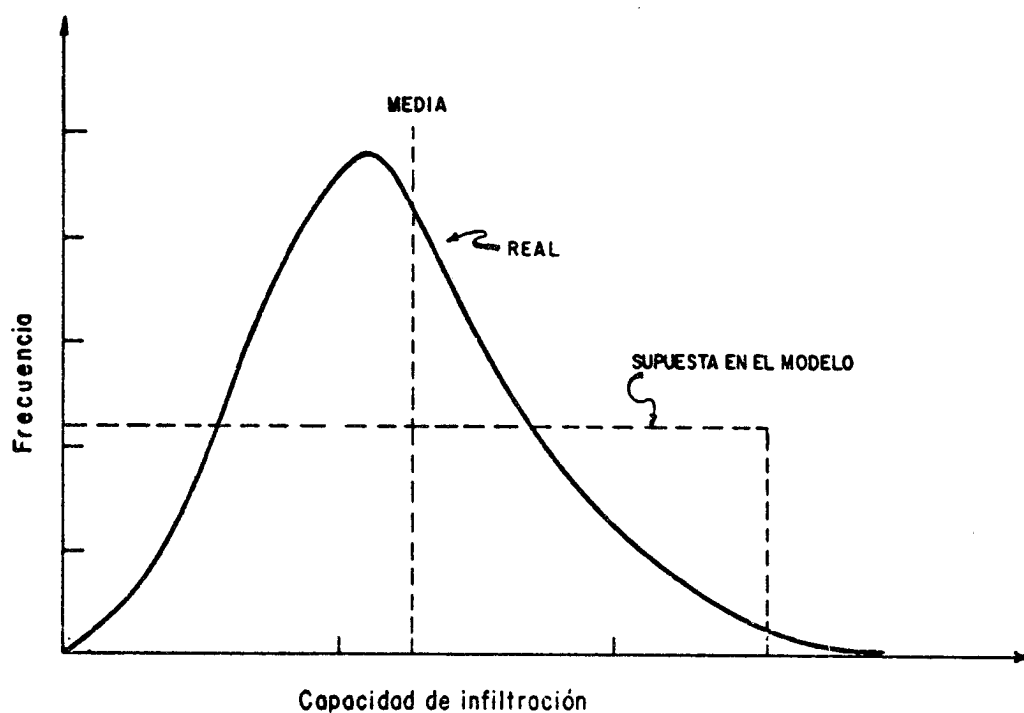


Figura 3. Distribución de frecuencia para la capacidad de infiltración.

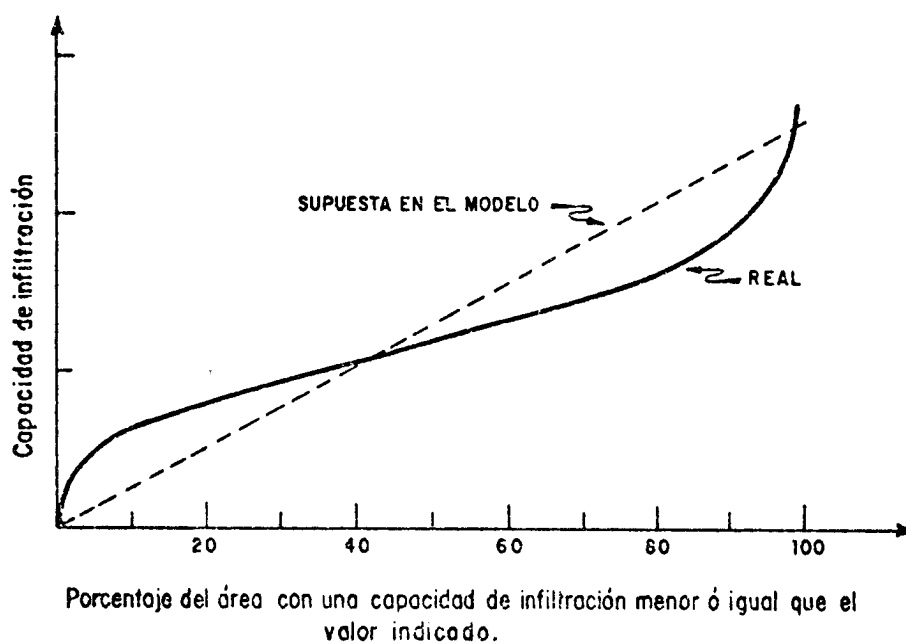


Figura 4. Distribución de frecuencia acumulada para la capacidad de infiltración.

considera en el modelo.

4. Almacenamiento en las depresiones del suelo: A medida que la intensidad de la precipitación que llega a la superficie del suelo se hace mayor que la velocidad de infiltración, comienza a acumularse agua en la superficie del terreno. Inicialmente ésta va a llenar las depresiones del suelo y luego, al estar completamente lleno este almacenamiento, empieza el proceso de escurrimiento.

El agua que se almacena en las depresiones del suelo puede ser removida de éstas por evaporación o por infiltración, constituyendo lo que se llama infiltración retardada. Tanto la infiltración retardada como el almacenamiento en depresiones se introducen en el modelo como una función del almacenamiento de humedad de la zona superior del suelo.

5. Escurrimiento: En el modelo el escurrimiento se trata como flujo turbulento, y el volumen escurrido se relaciona con el almacenamiento de detención superficial. Se usa la ecuación de Manning para relacionar el almacenamiento de detención superficial, la tasa de suministro de escurrimiento, el coeficiente de rugosidad de Manning, la longitud y la pendiente del plano de flujo.

6. Almacenamiento de humedad del suelo: El modelo Stanford IV hace intervenir dos zonas, la zona superior y la inferior, en la representación del almacenamiento de la humedad del suelo.

En este modelo se consideran el almacenamiento en depresiones y el almacenamiento en la superficie del suelo como integrantes del almacenamiento de la zona superior.

La zona inferior puede ser considerada como la porción de suelo que se encuentra entre el margen capilar y la mesa de agua. En la práctica solamente interesa la porción transitoria de este almacenamiento, ya que el volumen de humedad que se pierde por evapotranspiración se repone por infiltración. El almacenamiento de esta zona constituye el almacenamiento de humedad de mayor capacidad.

7. Interflujo. Está constituido por el agua que se infiltra pero que se mueve lateralmente a través de la zona superior del suelo con dirección a los cauces; generalmente es fortalecido por una capa de suelo relativamente impermeable. Si las capas impermeables intersectan la superficie, el interflujo puede salir y juntarse con el escurrimiento.

8. Agua Subterránea. El flujo que entra al almacenamiento del agua subterránea proviene de la infiltración y de la percolación del almacenamiento de las zonas superior e inferior del suelo. Una parte del agua subterránea sale al cauce como flujo base, otra puede pasar por percolación al almacenamiento del agua subterránea profunda, es decir, al almacenamiento inactivo del agua subterránea. El agua asignada al almacenamiento inactivo se considera que se pierde de la fase superficial de la cuenca, ya que no contribuye a la escorrentía.

9. Área Impermeable. El modelo considera como áreas impermeables todas aquellas superficies conectadas al cauce del río, en las cuales el agua proveniente de la lluvia no está sujeta a infiltración. Entre tales áreas se cuentan los pequeños charcos o lagunas y los canales o cauces.

Las edificaciones, los caminos y otras áreas impermeables que descargan su flujo sobre el suelo y no directamente en los cauces, no se consideran en el modelo como áreas impermeables, sino que la escorrentía que producen se representa como una función de la infiltración.

10. Evapotranspiración. Es el proceso mediante el cual el agua pasa a la atmósfera en forma de vapor. En el modelo se considera que la evapotranspiración ocurre del almacenamiento de intercepción a la tasa potencial, pero cuando este almacenamiento no es capaz de suplir la demanda de humedad, ésta es suministrada por el almacenamiento de la zona superior del suelo. Cuando estos almacenamientos han sido agotados entra en juego el concepto de oportunidad de evapotranspiración, que se define como la máxima cantidad de agua disponible para la evapotranspiración en un intervalo

de tiempo y en un punto de la cuenca.

La oportunidad de evapotranspiración tiene una curva de distribución de frecuencia acumulada similar a la de la capacidad de infiltración. La curva de oportunidad de evapotranspiración es una función de las condiciones de humedad del suelo y da un estimado de la evapotranspiración real para cualquier valor de evapotranspiración potencial.

La oportunidad de evapotranspiración controla la evapotranspiración del almacenamiento de humedad de la zona inferior del suelo.

En el modelo se considera la evapotranspiración potencial igual a la evaporación medida en una tina tipo A multiplicada por un coeficiente de tina.

11. Escorrentía. Se refiere al agua que corre en los cauces, también llamado caudal. La secuencia de los fenómenos hidrológicos es tal, que la escorrentía se ve retardada en relación con la precipitación que la produce, dependiendo dicho retardo de las características de la cuenca.

Según Crawford y Linsley (1966) el hidrograma de salida de una cuenca refleja la importancia de los efectos del retardo y la atenuación en el sistema de canales.

En este modelo se usa como método de tránsito un método empírico de sarrollado por Clark (1945), quien supuso que la curva tiempo-área para una cuenca debe representar un hidrograma de salida. Esto, sin tomar en cuenta las atenuaciones debidas al almacenamiento en los canales; Por tal motivo propuso transitar la curva tiempo-área a través de un embalse, para así representar la atenuación debida al almacenamiento en los canales.

El modelo está formado por una serie de formulaciones matemáticas que representan los procesos del sistema hidrológico y que responden a ciertas funciones de entrada. Estas formulaciones matemáticas se detallan a conti - nuación:

1. Se usa la precipitación $P3$ y los cálculos se efectúan para intervalos de 15 minutos. Las ecuaciones son las siguientes:

$$P3 = PX - EPX \quad (1)$$

$$P4 = P3 + RES \quad (2)$$

donde;

EPX = Capacidad disponible en el almacenamiento de intercepción

$P3$ = Lluvia efectiva

$P4$ = Suministro de humedad

PX = Precipitación horaria

RES = Humedad en el almacenamiento de detención superficial

2. La intercepción se define como la capacidad de almacenamiento de intercepción $EPXM$ y constituye un parámetro de entrada. Los valores de este parámetro se dan en función de la cobertura vegetal de la cuenca.

3. La infiltración se representa por una curva de capacidad de infiltración. En el modelo se describe como una función de la humedad del suelo.

En la Figura 5, se ilustra la forma en que este modelo simula la infiltración. La lluvia proporciona un suministro de humedad $P4$ en un cierto intervalo de tiempo, el área rayada de la Figura 5 representa la infiltración que suministra humedad al suelo o al agua subterránea en ese intervalo. La capacidad de infiltración $D3FV$ es variable en el tiempo y decrece con el incremento de humedad del suelo, tal como se muestra en la Figura 6. El valor de $D3FV$ se calcula en base a la ecuación siguiente:

$$D3FV = CB / (LNRAT)^{POWER} \quad (3)$$

donde;

CB = Índice nivelador de la infiltración

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

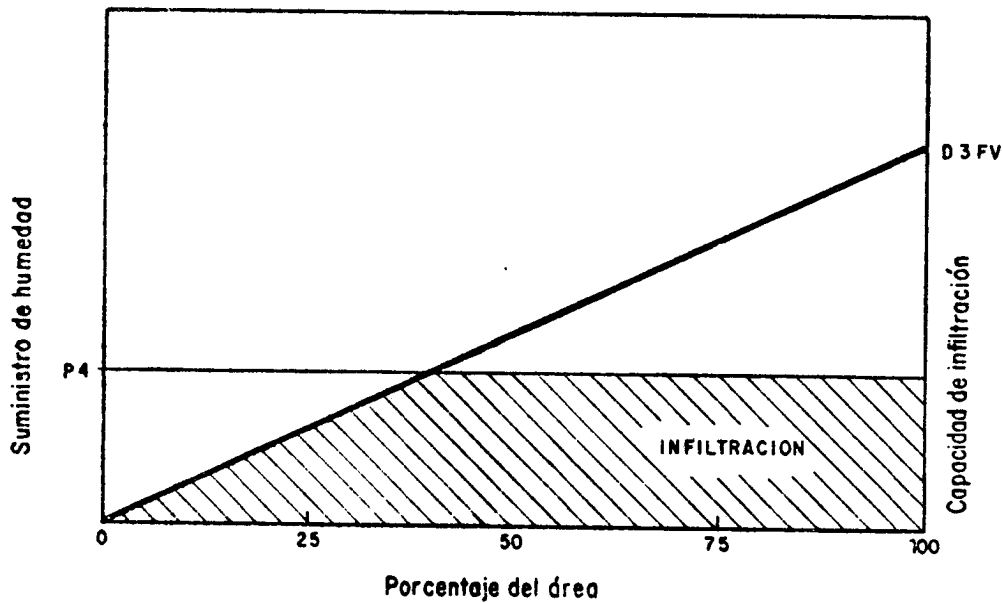


Figura 5. — Aplicación de la distribución de frecuencia acumulada de la capacidad de infiltración.

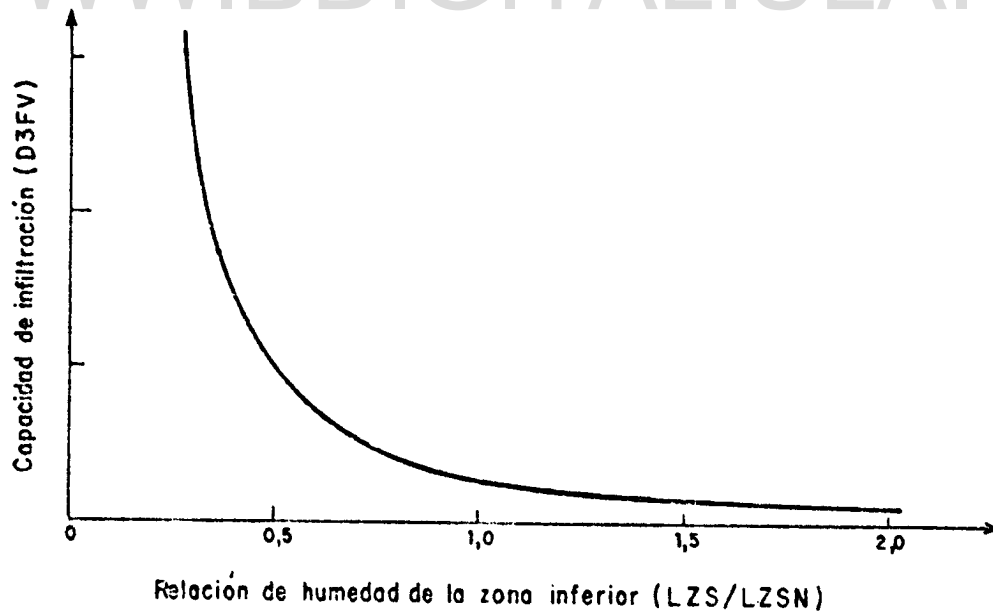


Figura 6. — Infiltración media de la cuenca como función de la humedad del suelo.

LNRAT = LZS/LZSN, relación adimensional del almacenamiento de humedad de la zona inferior del suelo.

LZS = Humedad en el almacenamiento de la zona inferior del suelo

LZSN = Capacidad nominal del almacenamiento de la zona inferior

POWER = Exponente de la ecuación de infiltración.

5. La humedad de la zona superior del suelo se pierde por evapotranspiración y por percolación a la zona inferior. La capacidad de almacenamiento de esta zona es bastante baja. El porcentaje de humedad que se retiene en la zona superior del suelo P, es una función del volumen almacenado en esta zona UZS y de su capacidad nominal UZSN.

Las ecuaciones que representan el almacenamiento de la zona superior del suelo se dan a continuación:

Cuando la relación UZS/UZSN es menor que dos se tiene:

$$P = 100 \times (1,0 - PRE) \quad (4)$$

$$PRE = 0,5 \times (UZS/UZSN) (1,0 / (1,0 + UZI))^{UZI} \quad (5)$$

$$UZI = 2,0 \times |0,5 \times (UZS/UZSN) - 1,0| + 1,0 \quad (6)$$

y cuando UZS/UZSN es mayor que dos el porcentaje está dado por:

$$P = 100 \times (1,0 - PRE) \quad (7)$$

$$PRE = 1,0 - (1,0 / (1,0 + UZI))^{UZI} \quad (8)$$

$$UZI = 2,0 \times |UZS/UZSN - 2,0| + 1,0 \quad (9)$$

donde;

P = Porcentaje de la detención superficial, del escurrimiento y del interflujo que se retiene en la zona superior del suelo.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

PRE = Porcentaje de la detención superficial, del escurrimiento y del interflujo que no se retiene en la zona superior del suelo.

UZSN = Capacidad nominal del almacenamiento de la zona superior del suelo.

UZS = Volumen almacenado en la zona superior del suelo

Para el cálculo de las pérdidas por evapotranspiración se supone que éstas ocurren a la tasa potencial para cualquier valor de la relación UZS/UZSN. La evapotranspiración que no es suplida por la zona superior se asigna a la zona inferior del suelo.

6. El agua que llega al almacenamiento de la zona inferior proviene de la infiltración directa o de la percolación del almacenamiento de la zona superior. De este almacenamiento el agua es removida por evapotranspiración o por percolación al agua subterránea.

El porcentaje de la infiltración directa más la percolación PG que entra al almacenamiento del agua subterránea es una función de la relación del almacenamiento de humedad de la zona inferior LZS/LZSN tal como se presenta en la Figura 7.

$$PG = 100 \times (1,0 - PRE) \quad (10)$$

Cuando LZS/LZSN es menor que uno PRE1 viene dado por:

$$PRE1 = 1,0 - ((1,0/(1,0 + LZI)) ** LZI) * LNRAT \quad (11)$$

Mientras que cuando LZS/LZSN es mayor que uno, PRE1 viene dado por:

$$PRE1 = (1,0/(1,0 + LZI)) ** LZI \quad (12)$$

Siendo;

$$LZI = 1,5 * ABS(LNRAT - 1,0) + 1,0 \quad (13)$$

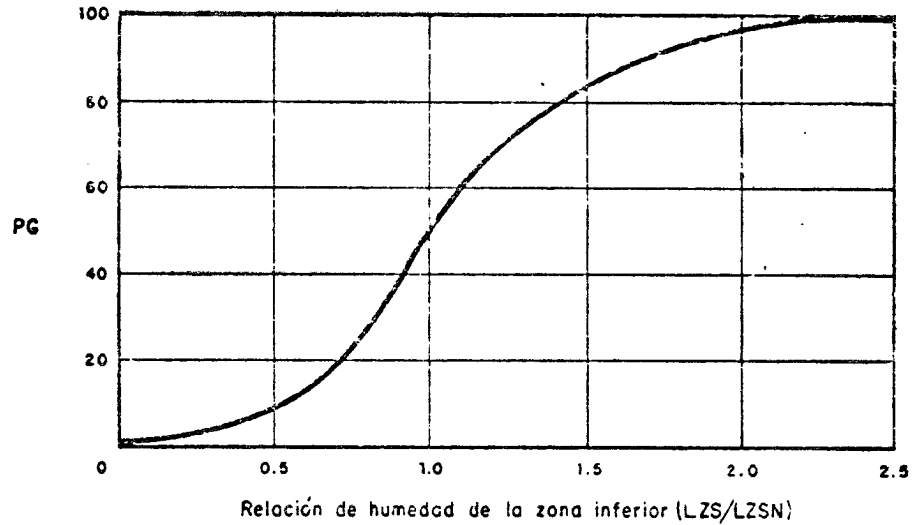


Figura 7. Humedad que entra al almacenamiento del agua subterránea

donde;

PG = Porcentaje de la humedad que entra al almacenamiento del agua subterránea.

PRE1 = Porcentaje de la infiltración que se retiene en la zona inferior.

LNRAT = LZS/LZSN, relación adimensional del almacenamiento de la zona inferior del suelo.

LZS = Volumen del almacenamiento de la zona inferior.

LZSN = Capacidad nominal del almacenamiento de la zona inferior

7. En la Figura 8, se representa el interflujo como una línea recta que muestra la infiltración transitoria para dicho proceso.

La variable $RATIO$ se define por:

$$RATIO = CC \times (1,0)^{LNRAT} \quad (14)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

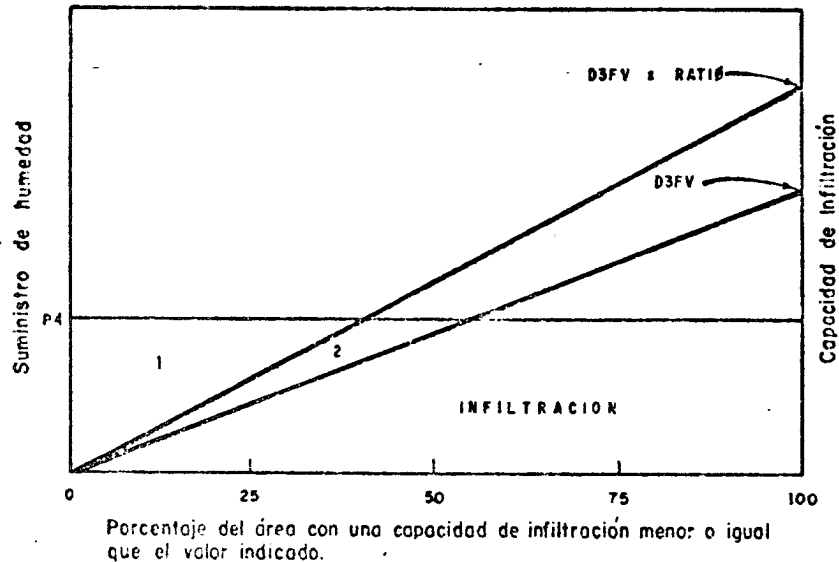


Figura 8. Distribución de frecuencia acumulada de la capacidad de infiltración (1) Incremento de la detención superficial (2) Incremento de la detención del interflujo.

donde;

CC = Índice de interflujo, gobierna el volumen asignado al interflujo.

LNRAT=LZS/LZSN, relación adimensional del almacenamiento de humedad de la zona inferior del suelo.

La ecuación (14) es una relación que resulta de la variación de la humedad del suelo, tal como se muestra en la Figura 9.

El interflujo que sale del almacenamiento de detención se calcula sobre un intervalo de tiempo de una hora, a partir de las ecuaciones siguientes:

$$\text{INTF} = \text{LIRC4} \times \text{SRGX} \quad (15)$$

$$\text{LIRC4} = 1,0 - (\text{IRC})^{1/24} \quad (16)$$

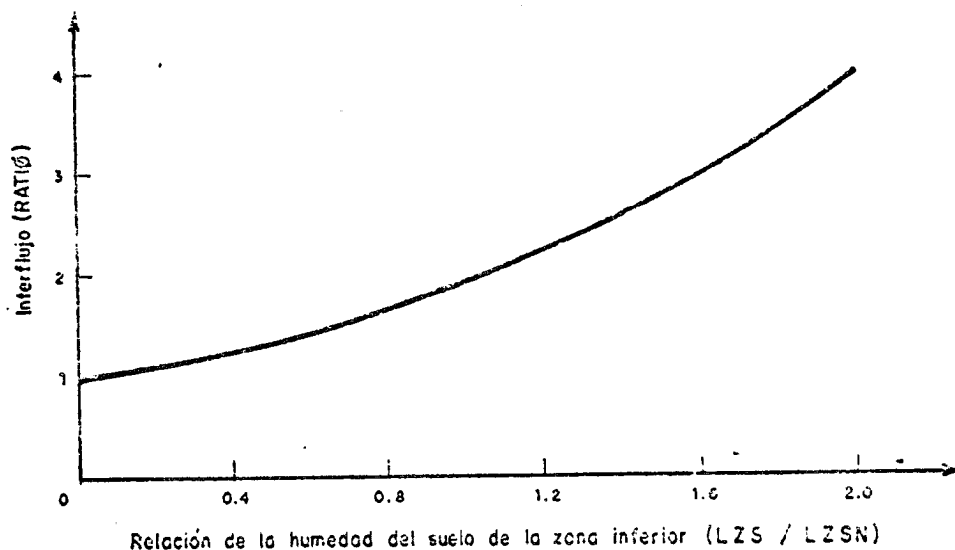


Figura 9.— Interflujo como una función de LZS/LZSN para CC=1.0

donde;

IRC = Coeficiente de recesión del interflujo

LIR₄ = Componente del almacenamiento del interflujo que entra a la descarga de éste.

SRGX = Almacenamiento de detención del interflujo.

8. Las ecuaciones (10), (11) y (12), determinan la recarga del agua subterránea en cada intervalo de tiempo. La parte del agua subterránea que pasa por percolación profunda al almacenamiento inactivo se asigna por el parámetro de entrada $K24L$.

El flujo subterráneo que sale del almacenamiento del agua subterránea, en cualquier intervalo de tiempo, está basado en el modelo simplificado de la Figura 10.

La descarga del acuífero es proporcional al producto del área de la

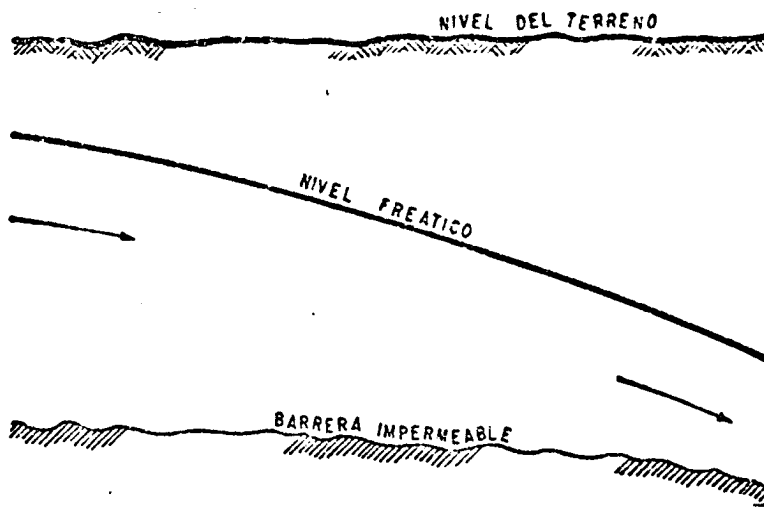


Figura 10.- Flujo del agua subterránea.

sección transversal y el gradiente de energía del flujo. El área representativa de la sección transversal del flujo se supone proporcional al almacenamiento del agua subterránea. El gradiente de energía se estima como la suma de un gradiente básico variable que depende del aumento del agua subterránea.

El flujo de salida del agua subterránea GWF en cualquier tiempo viene dado por:

$$F1 = F14 \times (1,0 - K24L) \times PA \quad (17)$$

$$GWF = LKK4 \times SGW \times (1,0 + KV \div GWS) \quad (18)$$

$$GWS = 0,97 \times (GWS + F1) \quad (19)$$

$$LKK4 = 1,0 - (KK24)^{1/24} \quad (20)$$

$$PA = 1,0 - AT \quad (21)$$

donde;

AT = Fracción del área del segmento ocupada por superficies impermeables.

F14 = Recarga del agua subterránea.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

GWF = Flujo de salida del agua subterránea

GWS = Índice antecedente basado en el flujo de entrada al almacenamiento del agua subterránea

KK24 = Coeficiente de recesión del agua subterránea

KV = Componente variable de la recesión del agua subterránea

K24L = Parte de la recarga del agua subterránea asignada a la percolación profunda.

SGW = Volumen en el almacenamiento del agua subterránea

9. El área impermeable se representa por el parámetro de entrada IMPV, el cual constituye una fracción del área total del segmento.

Según la Compañía Hydrocomp (1969) en cuencas no intervenidas, este parámetro está comprendido en el rango 0,00 a 0,05, mientras que en cuencas urbanas es necesario usar la Figura 11, en donde se obtiene IMPV como una función del área impermeable total medida en una fotografía aérea.

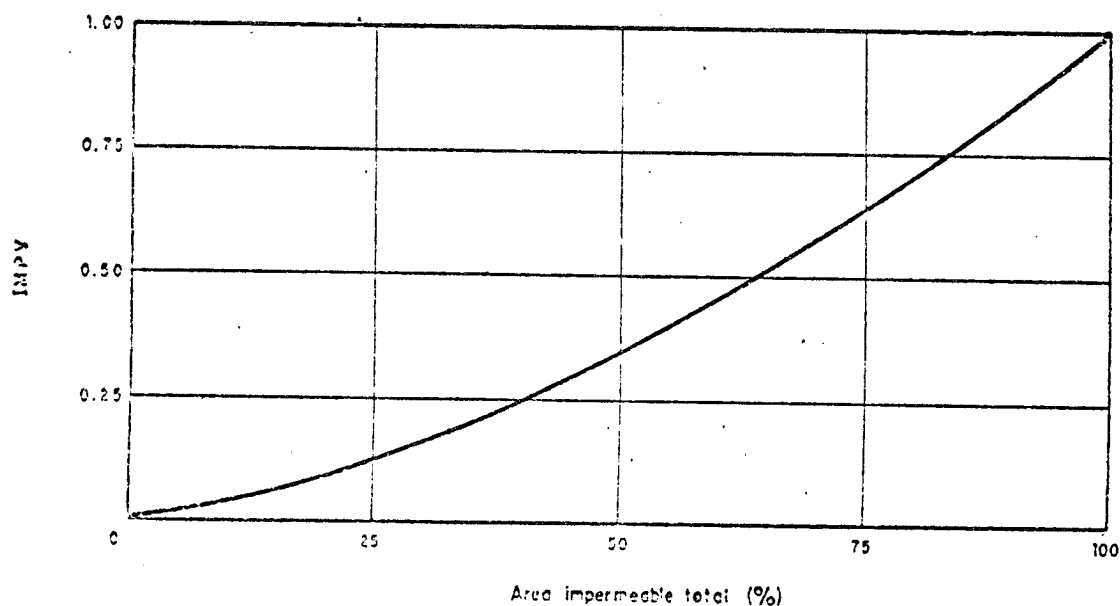


Figura 11. IMPV para cuencas urbanas como función del área impermeable total.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



10. En el modelo primero se trata de satisfacer la evapotranspiración potencial a partir del almacenamiento de intercepción, si esto no se logra se prueba con el almacenamiento de la zona superior, y si queda cuquier remanente entra como EP en la Figura 12.

La cantidad de agua perdida por evapotranspiración en la zona inferior cuando EP es menor que $K3 \times LNRAT$ viene dada por:

$$AETR = EP(1,0 - (EP/(2,0 \times K3 \times LNRAT))) \quad (22)$$

Cuando EP es mayor que $K3 \times LNRAT$ se tiene que:

$$AETR = 0,5 \times K3 \times LNRAT \quad (23)$$

donde;

AETR = Volumen de la evapotranspiración de la zona inferior

EP = Evapotranspiración potencial residual

K3 = Índice de pérdida de humedad por evapotranspiración en la zona inferior del suelo.

11. Para el tránsito de caudales se usa el método empírico desarrollado por Clark (1945), donde utiliza el histograma tiempo-área, tal como fue señalado en páginas anteriores.

La ecuación siguiente es la usada en el modelo para el tránsito de los caudales:

$$O_2 = \bar{I} - KS1 (\bar{I} - O_1) \quad (24)$$

donde;

O_2 = Caudal efluente al final del período

$\bar{I}$ = Caudal afluente promedio

KS1 = Constante de atenuación en el canal

O_1 = Caudal efluente al principio del período

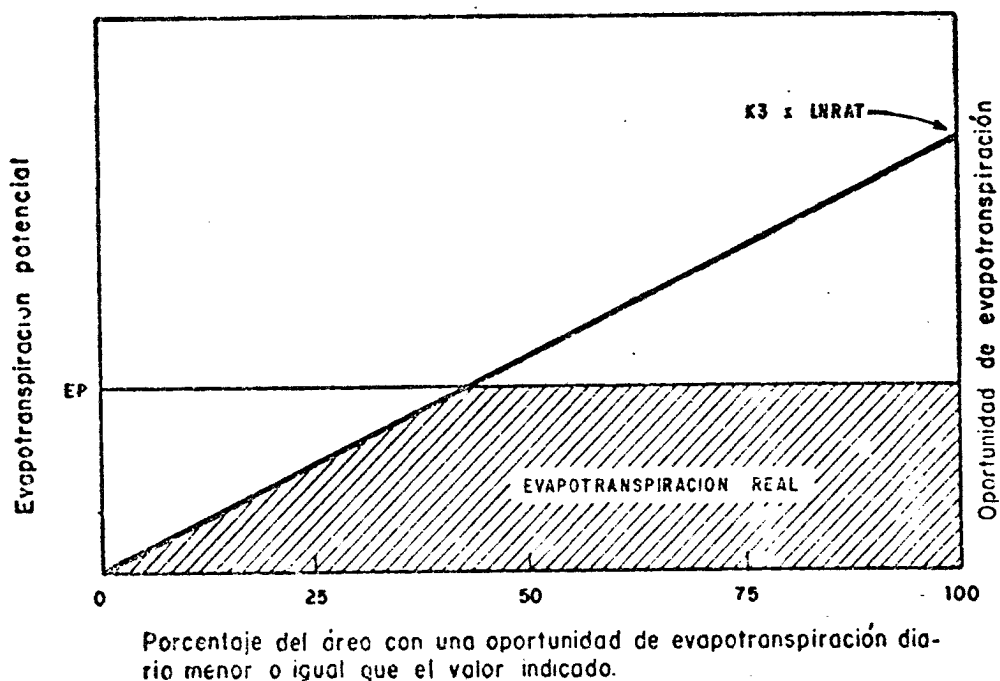


Figura 12. — Evapotranspiración real y potencial.

Duque (1977), presenta el listado del programa y el flujograma correspondiente del modelo Stanford IV, versión del National Weather Service, en donde se muestran los diferentes pasos y la secuencia de cálculo. Además, presenta las entradas, salidas y opciones del modelo.

Las entradas las clasifica en cuatro grupos: parámetros, valores, iniciales de algunas variables, entradas continuas y entradas constantes para la cuenca.

Las salidas las clasifica en tres grupos: datos iniciales, resultados intermedios y salidas finales.

Modelo de Tránsito Dinámico en Planicies Inundables

Mogollón (1979), desarrolla un modelo de tránsito de avenidas en planicies inundables tomando como sección transversal la verdadera topografía de las secciones en estudio, para de esta manera poder mapear la mancha de inundación producida por una avenida. Sigue los lineamientos dados por Fread (1976), quien usó en el desarrollo de su modelo una sección transversal como

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

el esquema dado por la Figura 13.

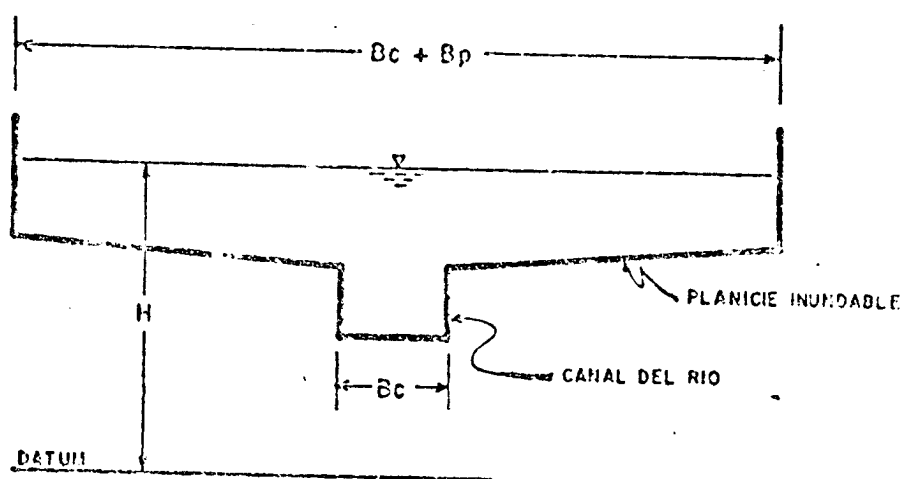


Figura 13. Sección Transversal Típica Utilizada por Fread

El principio básico del modelo es tratar en forma separada el flujo en canal y en la planicie inundable. El modelo se basa en una forma modificada de las ecuaciones unidimensionales de flujo no permanente, evitando así el uso de ecuaciones bidimensionales más complejas que consumen tiempo excesivo de computación.

Considera que para tratar el flujo en el canal y la planicie inundable separadamente, es importante que la geometría, rugosidad de Manning y demás características, tanto del canal como la planicie, se conserven en las ecuaciones unidimensionales gobernantes. Usa los subíndices *c* y *p* para señalar las variables pertenecientes al canal del río y a la planicie inundable respectivamente, escribiendo las ecuaciones unidimensionales de flujo no permanente de la siguiente manera:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x_c} = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial (Q_c^2 / A_c)}{\partial x_c} + g A_c \left(\frac{\partial h_c}{\partial x_c} + S_{fc} \right) = 0 \quad (40)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$\frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_p}{\partial X_p} - q = 0 \quad (41)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} + \frac{\partial (Q_p^2/A_p)}{\partial X_p} + g A_p \left(\frac{\partial h_p}{\partial X_p} + S_{fp} \right) - q V_1 X = 0 \quad (42)$$

en donde;

A = Área de la sección transversal

Q = Caudal

A_s = Área muerta de almacenamiento

h = Elevación de la superficie de agua, referida a un datum

S_f = Pendiente de fricción

q = Aportes laterales de flujo

V₁ X = Velocidad del flujo lateral en la dirección del eje X de la planicie inundable

X = Distancia a lo largo del eje longitudinal del canal o de la planicie inundable

t = Tiempo

g = Aceleración de la gravedad

Sumando los caudales del canal y de la planicie inundable, las ecuaciones de flujo no permanente del flujo combinado se convierten en:

$$\frac{\partial (A_c + A_p + A_s)}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial X_c} + \frac{\partial Q_p}{\partial X_p} - q = 0 \quad (43)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (Q_c + Q_p)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_c^2/A_c)}{\partial X_c} + \frac{\partial (Q_p^2/Q_p)}{\partial X_p} + g A_c \left(\frac{\partial h_c}{\partial X_c} + S_{fc} \right) \\ & + g A_p \left(\frac{\partial h_p}{\partial X_p} + S_{fp} \right) - q V_1 X = 0 \end{aligned} \quad (44)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Las ecuaciones (43) y (44), solamente contienen cuatro incógnitas Q_c , Q_p , h_c , y h_p , ya que A puede expresarse como función de h ; S_f puede expresarse como función de Q y h , y q , $V_1 X$, g , X , t son cantidades conocidas.

Como primera aproximación supone que la superficie del agua es horizontal en todas las secciones transversales del río y planicie de inundación, como se ilustra en la Figura 14.

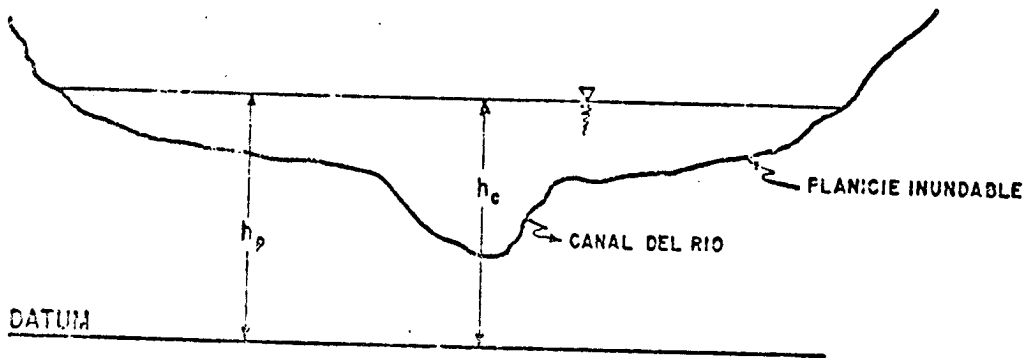


Figura 14. Condición de Superficie de Agua Horizontal en la Sección Transversal Típica.

Otra suposición es que la pendiente de fricción, S_f , en el canal y en la planicie inundable se puede expresar por la ecuación de Manning.

Establece una relación aproximada entre el flujo del canal y de la planicie inundable, usando la ecuación de Manning.

Obtiene las ecuaciones diferenciales que rigen el flujo unidimensional en un río a través de una planicie inundable, con sólo dos incógnitas que son el caudal total Q y la elevación de la superficie de agua:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (\phi Q)}{\partial X_c} + \frac{\partial (TQ)}{\partial X_p} - q = 0 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\phi^2 Q^2 / A_c)}{\partial X_c} + \frac{\partial (T^2 Q^2 / A_p)}{\partial X_p} + g A_c \left(\frac{\partial h}{\partial X_c} + S_{fc} \right) \\ + g A_p \left(\frac{\partial h}{\partial X_p} + S_{fp} \right) - q V_1 X = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

en donde;

$$A = A_c + A_p + A_g \quad (47)$$

$$Q = Q_c + Q_p \quad (48)$$

$$\varphi = Q_c/Q \quad (49)$$

$$\gamma = Q_p/Q \quad (49)$$

La ecuación (45) es la ecuación de continuidad y la ecuación (46) es la ecuación de cantidad de movimiento, la cual desprecia las consideraciones de cantidad de movimiento para el intercambio lateral de flujo entre el canal y la planicie.

Las ecuaciones (45) y (46) son un sistema de ecuaciones diferenciales parciales del tipo hiperbólico. Ellas contienen dos variables independientes x y t ; y dos variables dependientes, Q y h ; los términos restantes son función de x , t , h y Q , o son constantes. Estas ecuaciones no pueden resolverse analíticamente, por lo que escogió un método numérico de solución.

Escogió como método numérico de solución del modelo dinámico para el tránsito de avenidas en planicies inundables, el método implícito de los cuatro puntos por diferencias finitas. Este método basa su resolución en una red rectangular formada por los intervalos de distancia y los intervalos de tiempo asumidos para la solución de un problema específico. Las diferentes secciones en que se divide el tramo en estudio están representadas por las líneas verticales de la red rectangular y las diferentes líneas de tiempo están representadas por las líneas horizontales. Las líneas de tiempo las denomina por la letra J y las secciones por la letra i .

El método implícito de los cuatro puntos utiliza las aproximaciones de diferencias finitas siguientes:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{K_i^{J+1} + K_{i+1}^{J+1} - K_i^J - K_{i+1}^J}{2\Delta t} \quad (51)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$\frac{\partial K}{\partial x} = \frac{\theta (K_{i+1}^{j+1} - K_i^{j+1}) + (1 - \theta) (K_{i+1}^j - K_i^j)}{\Delta x} \quad (52)$$

$$K = \frac{\theta (K_i^{j+1} + K_{i+1}^{j+1}) + (1 - \theta) (K_i^j + K_{i+1}^j)}{2} \quad (53)$$

en donde;

K = Variable cualquiera de las ecuaciones de continuidad

θ = Factor de ponderación

Δx = Intervalo de distancia

Δt = Intervalo de tiempo

En cuanto a la influencia del factor de ponderación, θ , Fread (1976), establece las siguientes conclusiones:

1. El método es incondicionalmente estable para $0,5 \leq \theta \leq 1,0$
2. El método es más exacto cuando $\theta = 0,5$ y menos exacto cuando $\theta = 1,0$
3. Recomienda para el factor de ponderación, θ un valor de 0,55

El método implícito de los cuatro puntos por las diferencias finitas se ilustran en la Figura 15.

La geometría y características hidráulicas tanto en el canal como en la planicie inundable obedecerán a los esquemas dados por las Figuras 16 y 17.

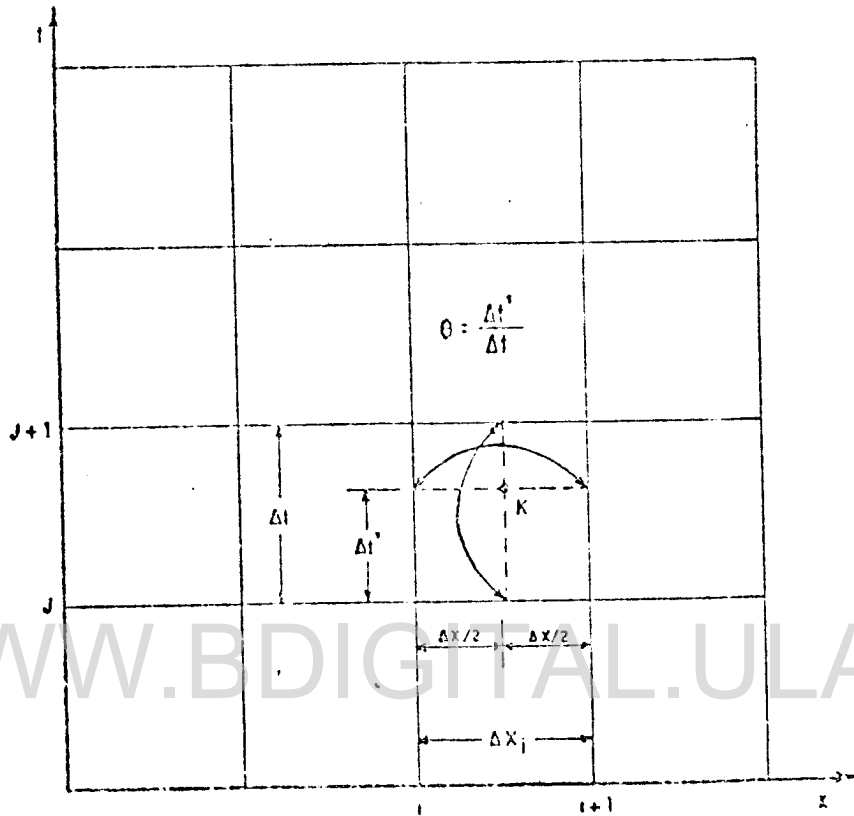


Figura 15. Esquema del Método Implícito de los Cuatro Puntos.

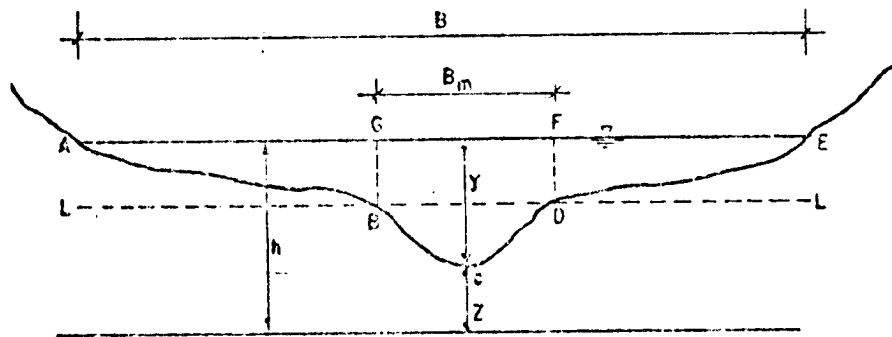


Figura 16. Sección Típica del Río y su Planicie Inundable Utilizada en el Modelo.

donde;

- B = Ancho máximo alcanzado por la mancha de inundación en la sección transversal en estudio
- B_m = Ancho máximo del canal del río
- Y = Tirante del agua en el canal
- Z = Elevación del fondo del canal respecto a un datum
- h = Elevación de la superficie del agua respecto a un datum
- L-L = Divisoria donde cambian las características propias del canal y de la planicie
- A_c = Área en el canal constituida por la región BCDG
- A_p = Área en la planicie, constituida por la suma de las regiones ABG y DEF
- P_c = Perímetro mojado en el canal, constituido por el segmento BCD
- P_p = Perímetro mojado en la planicie, constituido por la suma de los segmentos AB y DE

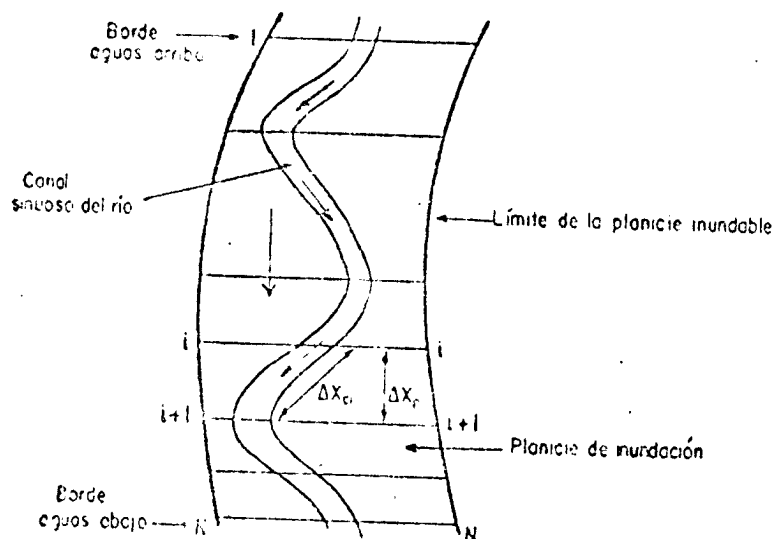


Figura 17. Planta del Río con su Correspondiente Planicie de Inundación.

en donde;

ΔX_{ci} = Intervalo de distancia para el canal en el tramo i

ΔX_{pi} = Intervalo de distancia para la planicie en el tramo i

Establece que al aplicar las ecuaciones a los $N-1$ tramos en que se divide la extensión en estudio, ver Figura 18, se obtienen un total de $2(N-1)$ ecuaciones con $2N$ incógnitas, y las condiciones de borde aportarán las dos ecuaciones adicionales necesarias.

Considera las condiciones de borde, que consisten en la descripción del flujo en los extremos de la extensión en estudio, las cuales deben conocerse para todo el período de tránsito. Estas condiciones están dadas por:

1. Un limnigrama en cualquiera de los extremos del canal

$$h_i^{j+1} - h(T^{j+1}) = 0 \quad i = 1 \text{ ó } N \quad j = 1 \dots NT \quad (54)$$

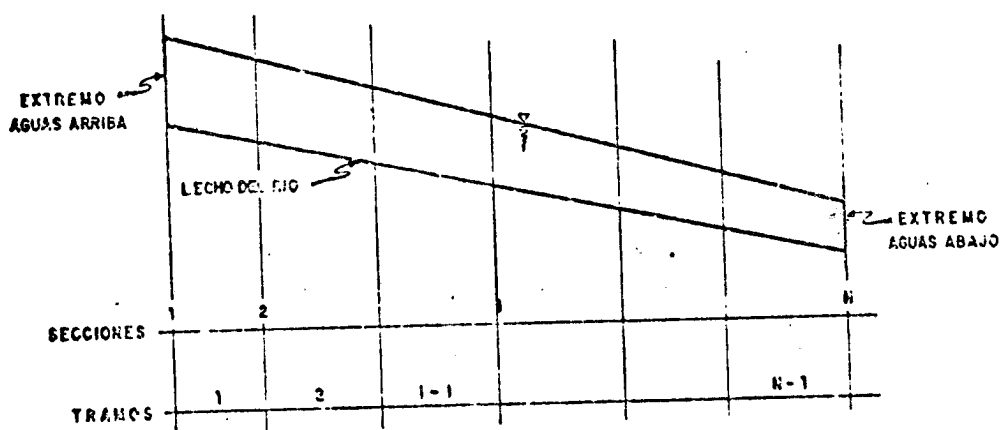


Figura 18. Distribución de Secciones y Tramos en que se divide la Extensión del Río en Estudio.

donde;

N = Extremo del canal aguas abajo

NT = Número de líneas de tiempo

$n(t^{J+1})$ = Niveles en función del tiempo

2. Un hidrograma en cualquiera de los extremos del canal

$$Q_i^{J+1} - Q(t^{J+1}) = 0 \quad i = 1 \text{ ó } N \quad J = 1 \dots NT \quad (55)$$

Otra condición de borde en el extremo aguas abajo es la relación nivel-descarga.

$$\left(\frac{AR^{2/3}}{n} S^{1/2} \right) N^{J+1} - Q_N^{J+1} = 0 \quad (56)$$

Luego, para resolver las ecuaciones modificadas para el estudio de canales con planicies de inundación, aproximadas mediante diferencias finitas, más las dos ecuaciones de borde, aplicadas a cada uno de los $N-1$ tramos en estudio, utiliza en método de Newton-Raphson, ya que resulta un sistema de $2N$ ecuaciones con $2N$ incógnitas de forma no lineal, así:

$$\begin{aligned} B1(h_1, Q_1) &= 0 \\ C1(h_1, Q_1, h_2, Q_2) &= 0 \\ M1(h_1, Q_1, h_2, Q_2) &= 0 \\ C_i(h_i, Q_i, h_{i+1}, Q_{i+1}) &= 0 \\ M_i(h_i, Q_i, h_{i+1}, Q_{i+1}) &= 0 \\ C_{N-1}(h_{N-1}, Q_{N-1}, h_N, Q_N) &= 0 \\ M_{N-1}(h_{N-1}, Q_{N-1}, h_N, Q_N) &= 0 \\ B_N(h_N, Q_N) &= 0 \end{aligned} \quad (57)$$

donde;

E = Función que representa los bordes del canal

C = Función que representa la ecuación de continuidad

M = Función que representa la ecuación de cantidad de movimiento

En el método de Newton-Raphson, los cálculos comienzan asignando valores de ensayo a las $2N$ incógnitas. Al sustituir estos valores de ensayos en el sistema de ecuaciones no lineal se obtienen $2N$ residuales. Los residuales son los valores del lado derecho del sistema de ecuaciones (57), después de sustituir los valores de ensayo para las incógnitas.

La solución del sistema de ecuaciones (57) se obtiene cuando los valores de ensayo convergen a los valores reales, estos valores de ensayo se siguen ajustando hasta que los residuales desaparezcan o se reduzcan a un valor tolerable o criterio de convergencia ϵ .

Los residuales y las derivadas parciales del sistema de ecuaciones (57) se relacionan según el método de Newton-Raphson de la siguiente manera:

$$\frac{\partial B_1}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial B_1}{\partial Q_1} dQ_1 = -RB_1^K$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial C_1}{\partial Q_1} dQ_1 + \frac{\partial C_1}{\partial h_2} dh_2 + \frac{\partial C_1}{\partial Q_2} dQ_2 = -RC_1^K$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial M_1}{\partial Q_1} dQ_1 + \frac{\partial M_1}{\partial h_2} dh_2 + \frac{\partial M_1}{\partial Q_2} dQ_2 = -RM_1^K$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial h_i} dh_i + \frac{\partial C_i}{\partial Q_i} dQ_i + \frac{\partial C_i}{\partial h_{i+1}} dh_{i+1} + \frac{\partial C_i}{\partial Q_{i+1}} dQ_{i+1} = -RC_i^K$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$\frac{\partial M_i}{\partial h_i} dh_i + \frac{\partial M_i}{\partial Q_i} dQ_i + \frac{\partial M_i}{\partial h_{i+j}} dh_{i+1} + \frac{\partial M_i}{\partial Q_{i+1}} dQ_{i+1} = -RM_i^K \quad (58)$$

$$\frac{\partial C_{N-1}}{\partial h_{N-1}} dh_{N-1} + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial Q_{N-1}} dQ_{N-1} + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial h_N} dh_N + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial Q_N} dQ_N = -RC_{N-1}^K$$

$$\frac{\partial M_{N-1}}{\partial h_{N-1}} dh_{N-1} + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial Q_{N-1}} dQ_{N-1} + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial h_N} dh_N + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial Q_N} dQ_N = -RM_{N-1}^K$$

$$\frac{\partial B_N}{\partial h_N} dh_N + \frac{\partial B_N}{\partial Q_N} dQ_N = -RB_N^K$$

Este sistema de ecuaciones (58) es lineal y está constituido por $2N$ incógnitas dh_i y dQ_i . Los valores de las incógnitas fundamentales en la $(k+1)^{\circ}$ iteración están dados por las relaciones siguientes:

$$h_i^{k+1} = h_i^k + dh_i \quad (59)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + dQ_i \quad (60)$$

El procedimiento se aplica las veces que sean necesarias, hasta que la diferencia entre los valores de cualquier incógnita en dos iteraciones sucesivas sea menor que el correspondiente criterio de convergencia, ϵ , es decir:

$$h_i^{k+1} - h_i^k < \epsilon_h \quad (61)$$

$$Q_i^{k+1} - Q_i^k < \epsilon_Q \quad (62)$$

donde;

h_i^{k+1} = Valor de la incógnita h en la $(k+1)^{\circ}$ iteración

h_i^k = Valor de la incógnita h en la k° iteración

Q_i^{k+1} = Valor de la incógnita Q en la $(K + 1)^{\circ}$ iteración

Q_i^k = Valor de la incógnita Q en la K° iteración

ε_h = Criterio de convergencia para la incógnita h

ε_Q = Criterio de convergencia para la incógnita Q

Resuelve el sistema de ecuaciones (58), el cual en forma matricial, se puede escribir así:

$$|D| \cdot |X| = |R|$$

donde;

$|D|$ = Matriz de coeficientes dada por las derivadas parciales del sistema de ecuaciones (58)

$|X|$ = Vector formado por las incógnitas dh_i y dQ_i del sistema de ecuaciones (58)

$|R|$ = Vector dado por los valores residuales obtenidos al sustituir los valores de ensayo para las incógnitas fundamentales h_i^{J+1} , h_{i+1}^{J+1} , Q_i^{J+1} , Q_{i+1}^{J+1} , en el sistema de ecuaciones (57)

Mogollón (1979), realiza las predicciones para las incógnitas fundamentales h_i^{J+1} , Q_i^{J+1} , h_{i+1}^{J+1} , Q_{i+1}^{J+1} y posteriormente hace una descripción detallada desde el punto de vista de programación del método dinámico de mapeo de planicies inundables presentando su respectivo fluigrama y las equivalencias de las variables utilizadas en lenguaje Fortran IV.

En el presente estudio se usa el modelo Stanford IV, versión National Weather Service, para simular los procesos del ciclo hidrológico en la cuenca del río Acarigua, y obtener los hidrogramas de crecientes en la estación Puente Acarigua. Este modelo ha sido aplicado en un gran número de cuencas en el País, lo que demuestra la aceptable representación que hace del ciclo hidrológico.

Con el modelo Stanford IV se pueden simular los hidrogramas de crecientes, considerando la existencia de embalses en la cuenca bajo estudio, ya que el mismo permite la incorporación de un subprograma que ejecute el tránsito de crecientes a través de los reservorios. Esto representa una ventaja con respecto al método usado por FUDECO (1978), para obtener los hidrogramas de crecientes en la estación Puente Acarigua.

En este estudio, a diferencia de la metodología usada por FUDECO (1978) se evalúa el efecto de los embalses Yacambú y Dos Bocas, en base a los daños por inundación que se esperan en las tierras agrícolas adyacentes al río Acarigua.

CAPITULO III

HIDROGRAMAS DE CRECIENTES DEL RIO ACARIGUA EN LA ESTACION PUENTE ACARIGUA

En este capítulo se obtienen los hidrogramas de crecientes del río Acarigua para diferentes frecuencias o períodos de retorno y diferentes alternativas de embalses. Se usa el modelo de simulación hidrológica Stanford IV, versión National Weather Service, modificado para simular el tránsito de avenidas a través de los embalses propuestos y así obtener los hidrogramas de las crecientes a la salida de la cuenca.

Preparación de los Datos de Lluvia que serán Usados en el Modelo Stanford IV

El modelo Stanford IV requiere datos de lluvia distribuida horariamente. En la Tabla 5, se presentan las estaciones utilizadas por el Ministerio de Obras Públicas (1976).

De estas estaciones se escogieron cuatro, de acuerdo al período de registro de esorrentía diaria observada en las estaciones hidrométricas Paso Angostura y El Cajón, que corresponde al período julio 1969 -marzo 1972, que posteriormente se usarán en la calibración del modelo, y además, dichas estaciones están bien distribuidas dentro del área de la cuenca. Las estaciones seleccionadas se presentan en la Tabla 6, y su ubicación dentro de la cuenca en la Figura 19.

Para el período 1969-1972 existen los datos de lluvia horaria registrados por la estación Hacienda Camburito y los datos de lluvia diaria medidos por las estaciones El Guamito, Paso Angostura y Caspito.

Los datos de lluvia horaria de la estación Hacienda Camburito son datos acumulados tomados directamente de las planillas M-7 usadas por la Dirección de Hidrología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Estos datos fueron desacumulados mediante el uso de un programa de computación llamada DESACUM, elaborado en lenguaje Fortran IV y disponible en la

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

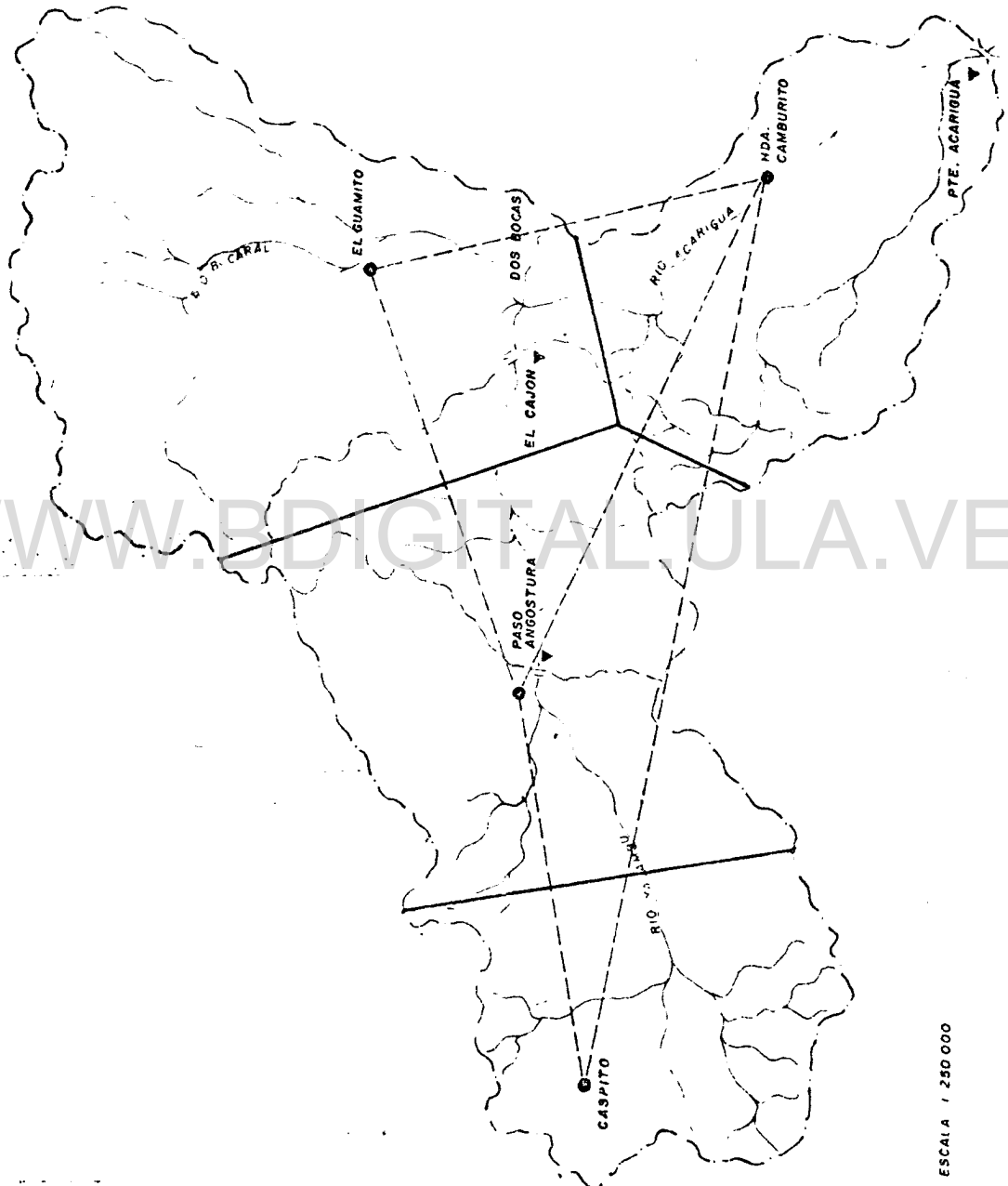


Figura 19. Ubicación de las Estaciones Pluviométrica e Hidrométricas en la Cuenca del Rfo Acarigua.

Tabla 5. Estaciones Pluvio-evaporimétricas Usadas por el MOP en el Estudio Hidrológico del río Acarigua en Dos Bocas.

Estación	Edo.	Serial	Lat.	Long.	Org.	Tipo	Inst.	Elim.	Interr.
Las Cumbres	LA	2287	09-52	69-20	OS	PR	06-68		
Cruz de Machadera	LA	2221	09-49	69-25	OS	PR	08-68		
Las Delicias	LA	2288	09-49	69-19	OS	PR	06-68		
El Guamito	LA	2289	09-46	69-20	OS	PE	06-68		
La Cruz	LA	2233	09-40	69-35	OS	PR	06-69		
Aguas Negras	LA	1220	09-48	69-30	OS	PR	02-64		
Cubiro	LA	2225	09-47	69-35	OP	PC PE	10-41 10-57	10-57	45 al 49
Zancudo	LA	1222	09-46	69-34	OS	PR	02-64		
Sangre	LA	2234	09-45	69-39	OP	PC PR	01-42 01-71	12-70	48 al 49
Caspito	LA	2231	09-39	69-40	OS	PR	08-68		
Parque Yacambú	LA	2232	09-43	69-35	OS	PR	08-68		
La Escalera	LA	2236	09-43	69-31	OS	PR	06-69		
Hda. Guache	PO	2253	09-26	69-21	OP	PE	06-51		52
Miracuy	LA	2219	09-37	69-33	OS	PR	08-69		
Paso Angostura	LA	2227	09-42	69-31	OS	PE	08-68		
Hda. Camburito	PO	2246	09-36	69-18	OP	PR	11-55	05-76	
Auro	LA	2228	09-42	69-14	OP	PR	07-56		
Acarigua	PO	2264	09-35	69-14	SM	PE	01-70		
Sarare	LA	2229	09-47	69-10	OP	PC PR	08-45 04-57	04-57	Muchas
Tocuyo Caja de Agua		2222	09-47	69-40	OP	PE	-51	-74	-
Quibor		2210	09-55	69-38	OP	PE	-45		

licencia del Banco de Precipitación del CIDIAT.

El programa DESACUM fue elaborado con la finalidad de desacomular los datos de lluvia cada hora de una forma rápida y sencilla. El formato de entrada de datos es el mismo que usa la Dirección de Hidrología para perforar los datos de las planillas M-7 en tarjetas IBM y el formato de salida corresponde al formato de entrada de datos de lluvia del modelo Stanford IV.

En el Anexo A.1, se presentan los datos de lluvia horaria acumulada de la estación Hacienda Camburito. En el Anexo B.1, se presenta el flujograma del programa DESACUM.

En el Anexo C.1, se presenta el listado del programa DESACUM, y en el Anexo D.1, se presentan los resultados de la aplicación de dicho programa.

Tabla 6. Estaciones Pluvio-evaporimétricas Seleccionadas

Nombre de la Estación	Serial	Fecha de Instalación
Hacienda Camburito	2246	11-55
El Guamito	2289	06-68
Paso Angostura	2227	08-68
Caspito	2231	08-68

Se desarrolló una metodología para asegurar la entrada de datos de lluvia horaria al modelo Stanford IV, aprovechando así los datos disponibles, tanto diarios como horarios, provenientes de las estaciones presentadas en la Tabla 6. La metodología empleada fue la siguiente:

1. Se calculó la lluvia media diaria sobre la cuenca con los datos de los pluviómetros o cántaros y del pluviógrafo o registrador, usando el método de los polígonos de Thiessen. En la Figura 20, se presenta el trazado de los polígonos de Thiessen en la cuenca del río Acarigua. Se usa la ecuación siguiente:

$$LLUPRO = \frac{SUMA \pm AREAPE + LLUCAN}{AREACU} \quad (63)$$

donde,

LLUPRO = Lluvia diaria promedio en la cuenca
 SUMA = Lluvia total diaria en el registrador
 AREAPE = Area de influencia del registrador
 LLUCAN = Sumatoria del producto de la lluvia diaria de cada cántaro por su área de influencia
 AREACU = Area de la cuenca

2. Se calcularon los porcentajes de lluvia horaria con respecto al total diario en el registrador base, usando la ecuación siguiente:

$$PORCEN = LLUV/SUMA \quad (64)$$

donde;

PORCEN = Porcentaje de lluvia horaria en el registrador
 LLUV = Lluvia registrada en una hora determinada

3. La lluvia media diaria calculada en el punto 1, se distribuye horariamente de acuerdo a los porcentajes de lluvia horaria calculados en el punto 2. A continuación se presenta la ecuación usada:

$$LLUVH = LLUPRO \cdot PORCEN \quad (65)$$

donde;

LLUVH = Lluvia horaria calculada a partir de la lluvia diaria promedio en la cuenca

En este método se han considerado dos aspectos muy importantes:

- El desfase existente entre los datos horarios del registrador, donde el día corresponde al período comprendido entre las 12 PM y 12 PM del día siguiente, y los datos diarios de los cántaros donde el día corresponde al pe-

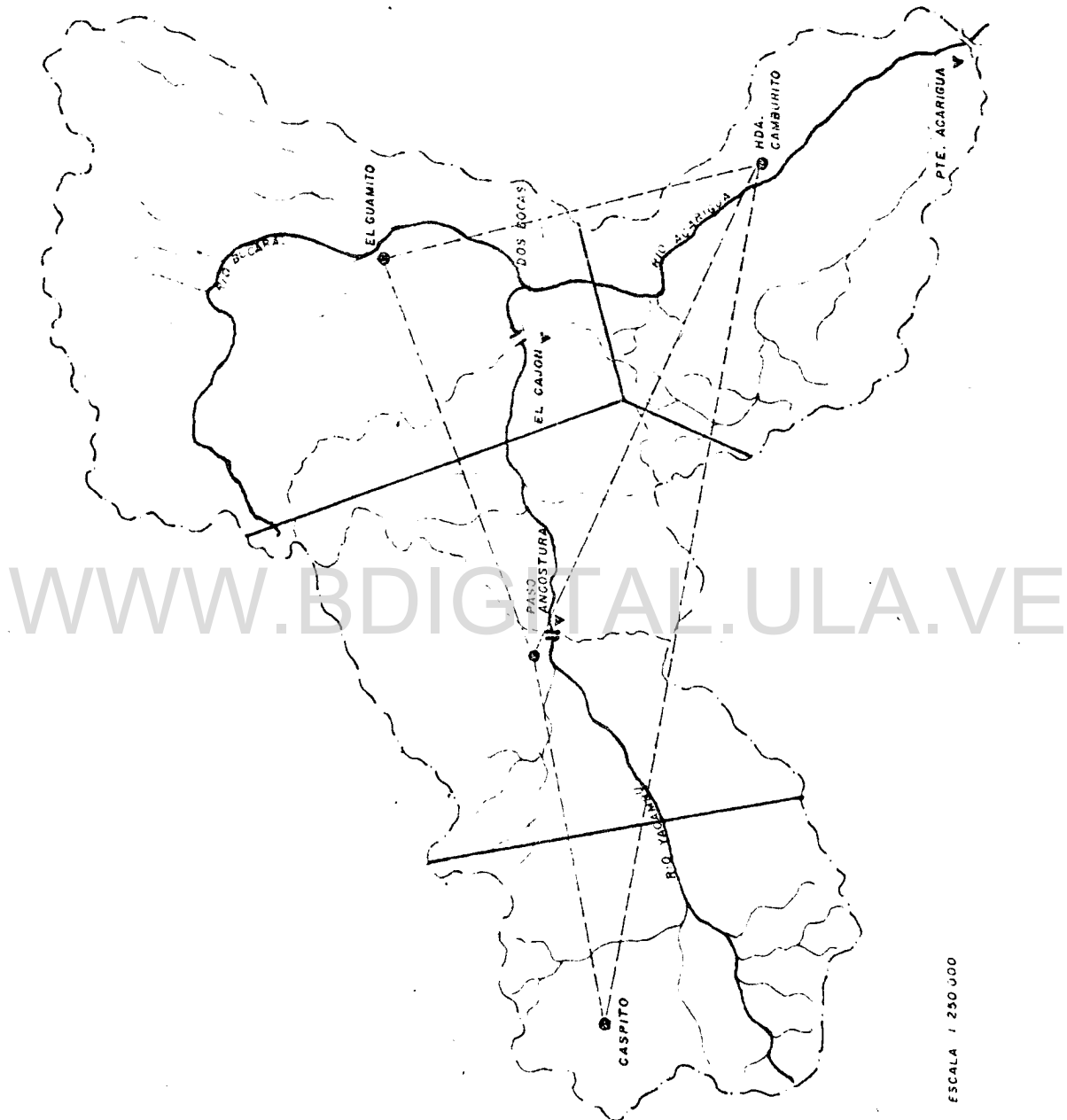


Figura 20: Trazado de los Polígonos de Thiessen en la Cuenca del Río Acarigua

		del día = 2, si corresponde a las 12 segundas horas del día.
PREC (I)	12F5.2	Lluvia horaria
NANO		Año
MES	212	Mes
LLUCA (K1, I)	11F6.1	Lluvia diaria de cada cántaro

De acuerdo a lo anterior, en una tarjeta irán perforados los datos del área de influencia de cada cántaro, y existirán dos grupos de tarjetas con los datos siguientes:

- Un grupo de tarjetas con los datos de lluvia horaria del registrador base, donde cada tarjeta contiene 12 datos de lluvia correspondiente a las 12 primeras ó 12 segundas horas del día.

- Un grupo de tarjetas con los datos de lluvia diaria de los cántaros, donde cada tarjeta contiene 10 ó 11 datos dependiendo si el mes tiene 30 ó 31 días, es decir, irán 3 tarjetas por mes y por cántaro.

En el Anexo A.2, se presentan los datos de lluvia diaria de las estaciones El Guamito, Paso Angostura y Caspito.

En el Anexo B.2, se presenta el flujograma del programa SEGREG, en el Anexo C.2, se presenta un listado de dicho programa y en el Anexo D.2, se presentan los resultados de su aplicación.

Calibración del Modelo Stanford IV para la Cuenca del Río Acarigua

La calibración del modelo Stanford IV consiste en ajustar una serie de parámetros tanto de la cuenca como del modelo, hasta que el volumen y la distribución de la escorrentía simulada se asemeje lo mejor posible a la escorrentía observada.

río comprendido desde las 8 AM y las 8 AM del día siguiente.

- Cuando el pluviógrafo no registra lluvia durante un día determinado, el dato de lluvia media diaria calculada es distribuido horariamente en base al registro del mismo día y mes de otro año.

Esta metodología fue aplicada en la realización de un programa de computación que permitiera el cálculo rápido de los datos de lluvia horaria a usarse como datos de entrada al modelo Stanford IV, en el caso de existir en la cuenca una sola estación registradora de lluvia, y varias estaciones medidoras de lluvia. El programa fue hecho en lenguaje FORTRAN IV y se denomina SEGREG.

Entradas del Programa

Area de influencia de cada cántaro

Lluvia Horaria

Lluvia Diaria

1 Estación de lluvia horaria

5 Estaciones de lluvia diaria

Descripción de Variables

VARIABLE	FORMATO	SIGNIFICADO
AREACA (1)	F6.1	Area de influencia de cada cántaro
ESTA	5A1	Nombre de la estación
NSERI	14	Número del serial de la estación
NANO		Año
MES	313	Mes
NDIA		Día
NHORA	12	= 1, si corresponde a las 12 primeras horas

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

racterísticos para la cuenca:

K1	= Relación entre el promedio de precipitación del segmento con respecto al promedio de precipitación puntual.
IMPV	= Fracción del área del segmento ocupado por superficies impermeables.
EPXM	= Valor máximo del almacenamiento de intercepción.
UZSN	= Almacenamiento nominal de la zona superior del suelo.
LZSN	= Almacenamiento nominal de la zona inferior del suelo.
CB	= Índice nivelador de la infiltración.
CC	= Índice de interflujo.
K3	= Índice de pérdida de humedad de la zona inferior por evapotranspiración.
K24L	= Porción de la recarga de agua subterránea asignada a la percolación profunda.
K24EL	= Evapotranspiración desde el almacenamiento del agua subterránea.
L	= Distancia media recorrida por el escurrimiento en la cuenca.
SS	= Pendiente media de la cuenca.
NN	= Coeficiente de Manning.
IRC	= Constante de recesión del interflujo.
KK24	= Coeficiente de recesión del agua subterránea.
KV	= Componente variable de la recesión del agua subterránea.

Para la calibración del modelo se necesitan los valores iniciales de las siguientes variables.

Para realizar la calibración del modelo en una cuenca determinada, es necesario la existencia de datos de caudales observados en uno o varios sitios ubicados a lo largo del cauce principal. Estos sitios se denominan puntos de flujo y representan la salida de una subárea de la cuenca.

En este estudio se consideran como puntos de flujo o puntos de cálculo de caudal, las estaciones hidrométricas existentes en la cuenca del río Acarigua las cuales se presentan con sus respectivos períodos de registro en la Tabla 7.

Tabla 7. Puntos de Flujo Usados en la Calibración del Modelo

Nombre del punto de flujo	Período de registro
1. Yacambú en Paso Angostura	69-72
2. Yacambú en El Cajón	69-72
3. Acarigua en Puente Acarigua	51-78

En la Figura 21, se presenta la ubicación de los puntos de flujo. En base a los períodos de registro disponibles de caudales medios diarios en las estaciones presentadas en la Tabla 7, se seleccionó el período 1969-1972 para la calibración del modelo.

Como entradas continuas al modelo se suministra la siguiente información:

1. Datos de evaporación diaria medida en tina tipo A. Se usan las Estaciones El Guamito y Paso Angostura, cuya ubicación se presentó en la Figura 19.

2. Datos de precipitación horaria calculados mediante el programa SECREG se identifican como Acarigua I, Acarigua II y Acarigua III, correspondientes a los puntos de flujo 1, 2 y 3 respectivamente.

3. Datos de caudales medios diarios observados en los puntos de flujo presentados en la Tabla 7.

Otra información de entrada al modelo son los siguientes parámetros ca-

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

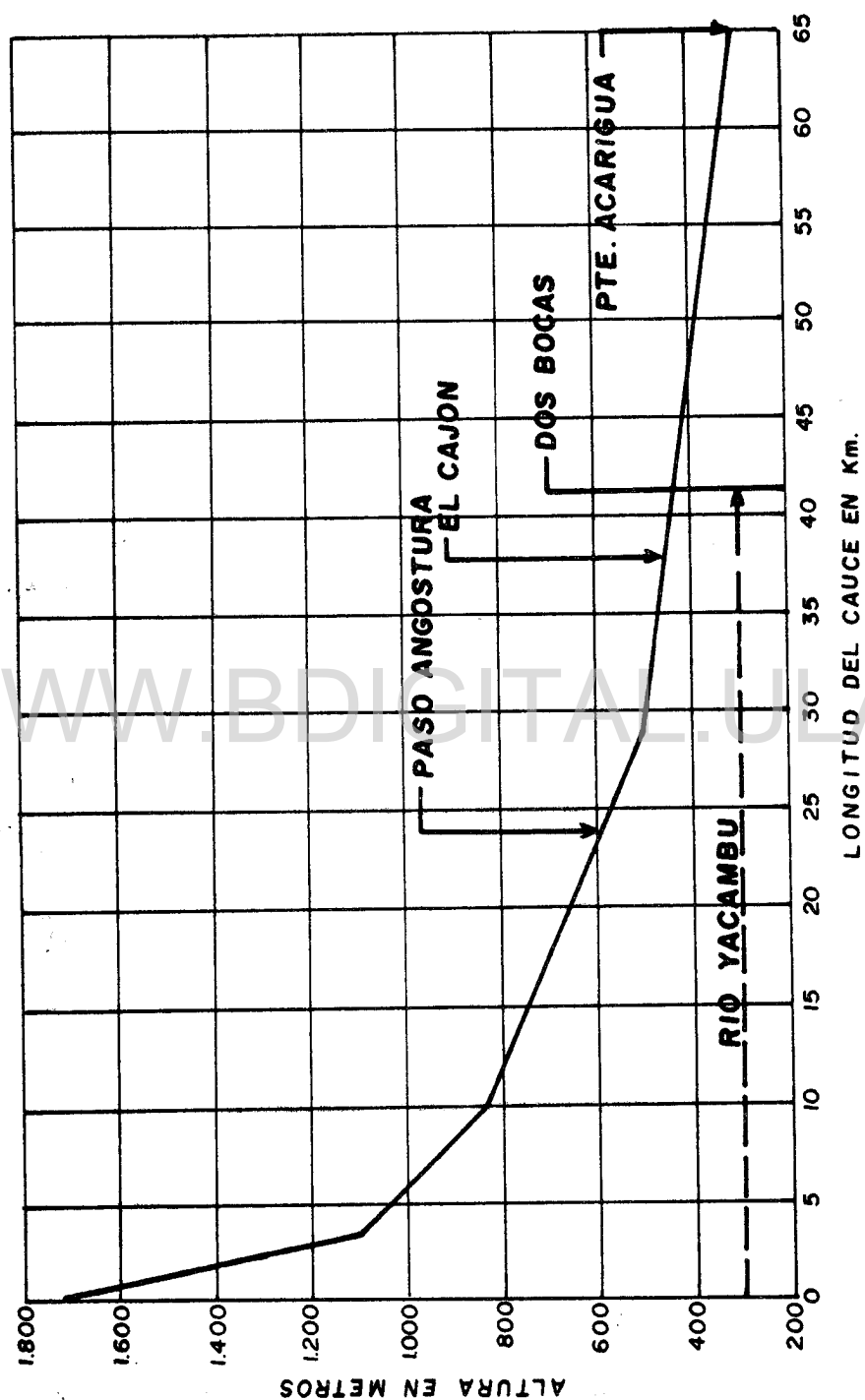


Figura 22. Perfil longitudinal del río Yacambú.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



Figura 21. Ubicación de Isocronas y de los Sigüientes Puntos de Flujos:

- (1) Río Yacambú en Paso Angostura
- (2) Río Yacambú en El Cajón
- (3) Río Acarigua en Puente Acarigua.

UZS	= Almacenamiento inicial de la zona superior
LZS	= Almacenamiento inicial de la zona inferior
GWS	= Valor inicial del almacenamiento antecedente del agua subterránea
SGW	= Almacenamiento inicial del agua subterránea
RES	= Almacenamiento inicial de detención superficial
SRGX	= Almacenamiento inicial de detención del interflujo
SCEP	= Valor inicial del almacenamiento de intercepción
AEPI	= Índice de evapotranspiración antecedente

Además, se dan las siguientes entradas constantes para cada punto de flujo:

AREA	= Área de influencia del punto de flujo en Km^2
KS1	= Parámetro de atenuación en el canal o constante K
RTEIN	= Intervalo de tránsito en horas
ELEMS	= Número de elementos en el histograma tiempo-área
TIMEAR	= Histograma tiempo-área en %
GAGEAR	= Número de la estación de medición de precipitación que va a usar en cada elemento del TIMEAR
ADDFW1 y ADDFW2	= Puntos de flujo que entran en cada elemento del TIMEAR

Para el cálculo del hidrograma tiempo-área se usó la Figura 21, donde se presenta el trazado de las isocronas.

En las Figuras 22 y 23, se presenta un perfil longitudinal de los ríos Yacambú y Bucaral, usado en el cálculo del tiempo de concentración. Este último

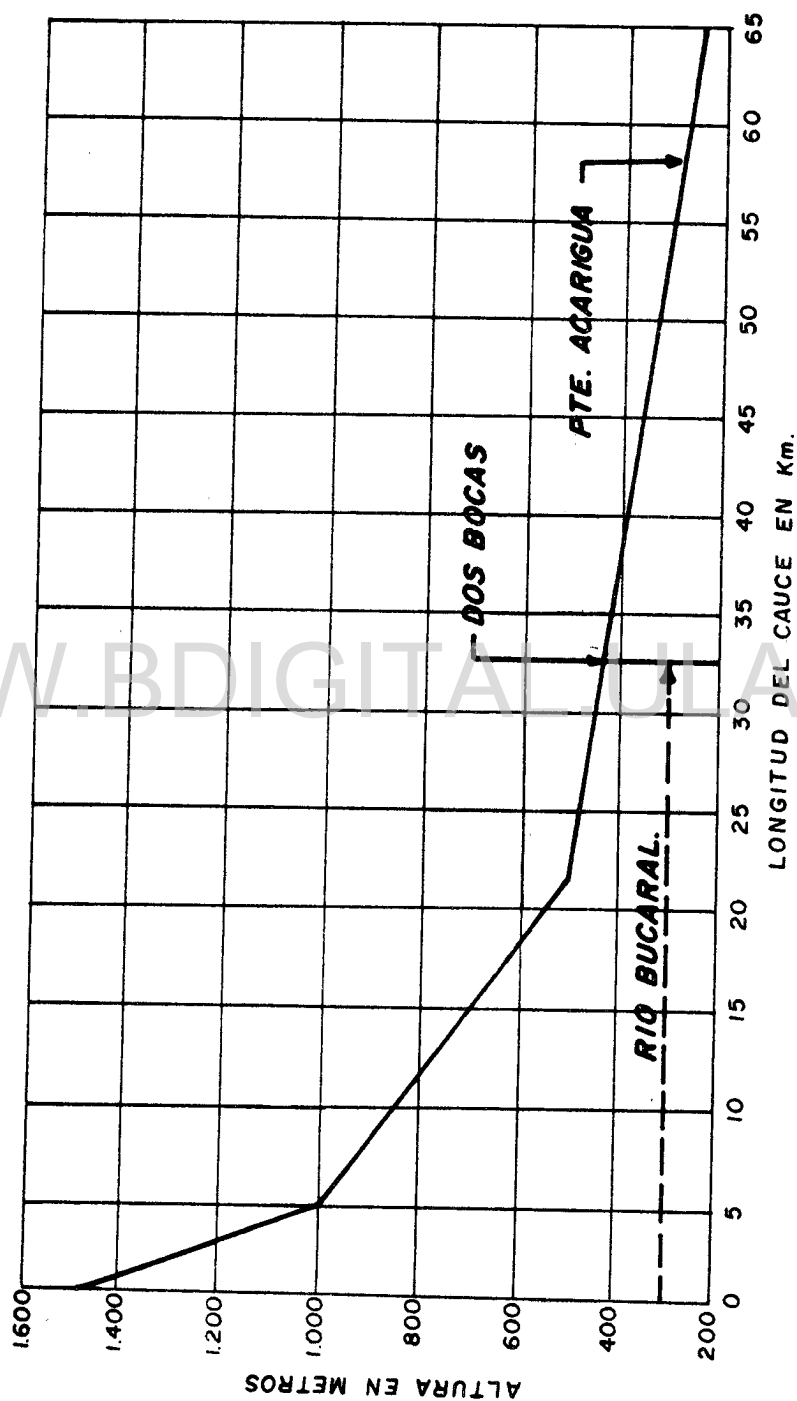


Figura 23. Perfil longitudinal del río Bucaral.

mo se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$T_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,387} \quad (66)$$

donde;

T_c = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce en Km

H = Desnivel en m

En cuanto a los datos de evaporación, se multiplican por un factor de ajuste mensual para estimar la evapotranspiración potencial, y se multiplican por un factor de ajuste estacional, es decir, se ajustan los datos al área de influencia de cada estación medidora de precipitación. Estos factores se identifican como PEADJ y GAGEPE respectivamente.

Los valores para dar inicio a la calibración del modelo se estiman a partir de algunos procedimientos presentados por Duque (1979).

En el Anexo A.3, se presentan los valores de los parámetros usados en la calibración del modelo.

En el Anexo D.3, se presentan los resultados de la calibración del modelo. En la Figura 24, se presenta una parte de la calibración del modelo en la cuenca del río Acarigua.

Adaptación del Programa EMBAL al Modelo Stanford IV para Simular el Tránsito de Crecientes a través de los Embalses Yacambú y Dos Bocas

Para simular hidrogramas de crecientes con el modelo Stanford IV, se introducen como datos de entrada al modelo calibrado para la cuenca, los datos de lluvia horaria de una tormenta determinada. Esto, sin tomar en consideración la existencia de reservorios o embalses para la cuenca.

En este estudio se modifica la estructura del modelo Stanford IV, al

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

adaptarle como subrutina un programa que calcula el tránsito de crecientes a través de los embalses ubicados en la cuenca del río Acarigua.

El procedimiento de cálculo fue programado en lenguaje Fortran IV y se llama EMBAL, consistente en un balance de entradas y salidas en el embalse, siguiendo la regla de operación normal. Se usa la ecuación de continuidad, que se presenta a continuación:

$$S2 = S1 + QA - QE \quad (67)$$

donde;

$S2$ = Almacenamiento al final del período de tiempo

$S1$ = Almacenamiento al inicio del período de tiempo

QA = Entradas al sistema durante el período de tiempo

QE = Salidas del sistema en el período de tiempo

Se consideran entradas, el volumen de escorrentía horaria entrante en la cola del embalse y el volumen de precipitación horaria caída en el embalse.

Se consideran salidas, el volumen de evaporación horaria en el embalse, y el volumen de agua correspondiente a la descarga del aliviadero, a la descarga del desagüe de fondo y/o la entrega por trasvase.

En la Figura 25, se presenta la ubicación de los embalses propuestos en la cuenca del río Acarigua: Yacambú y Dos Bocas.

Los embalses Yacambú y Dos Bocas serán destinados para diferentes usos: abastecimiento poblacional, riego, generación de electricidad y control de crecientes como uso complementario. Esto significa, que los embalses deberán mantenerse a nivel normal para cumplir con las demandas previstas. Entonces al llegar la creciente a la cola del embalse, éste se encontrará a volumen normal.

Al usar la ecuación 67, en el cálculo, se presentan las situaciones siguientes:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

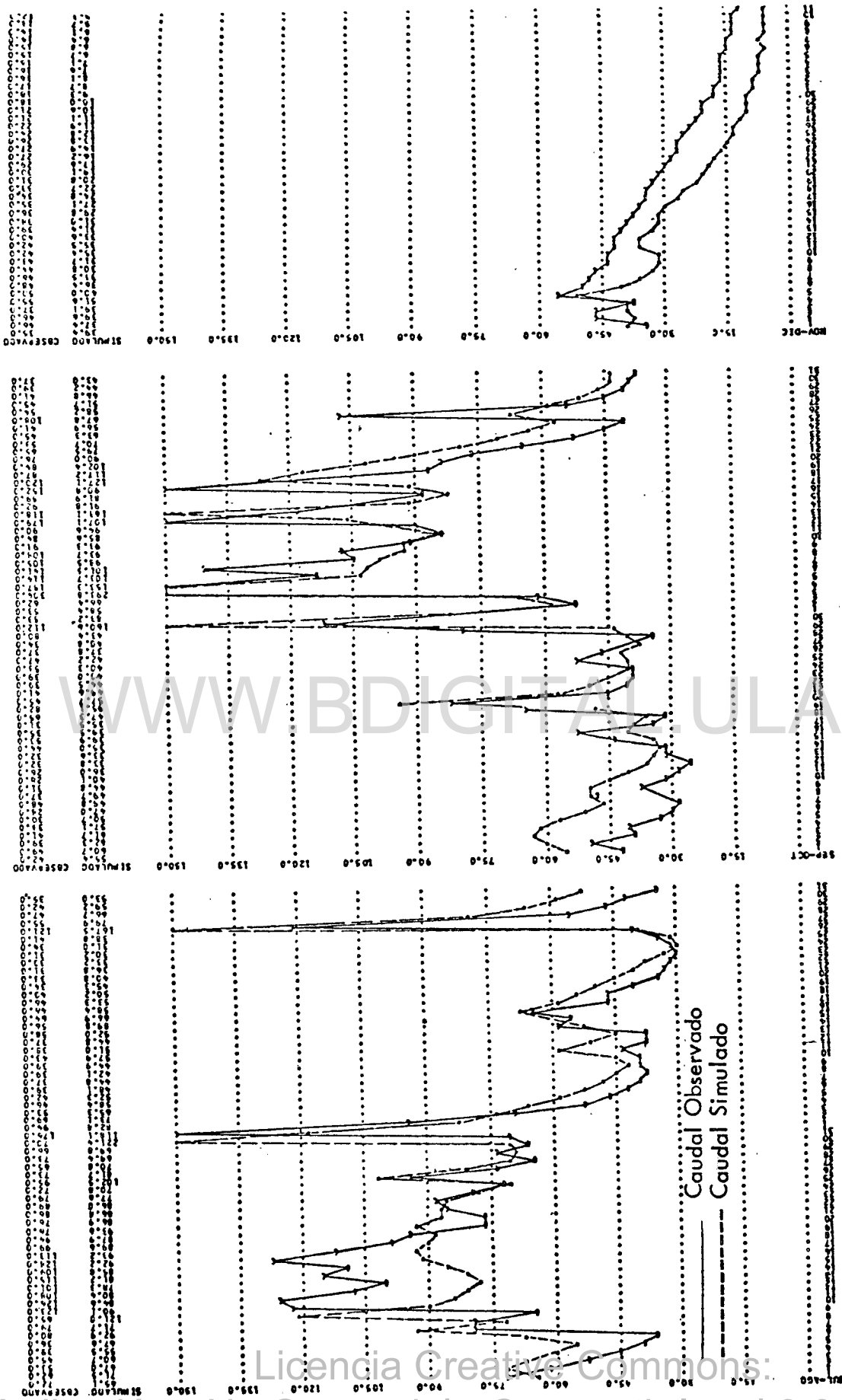


Figura 24. Parte de la calibración del modelo STANFORD IV en la cuenca del río Acarigua.

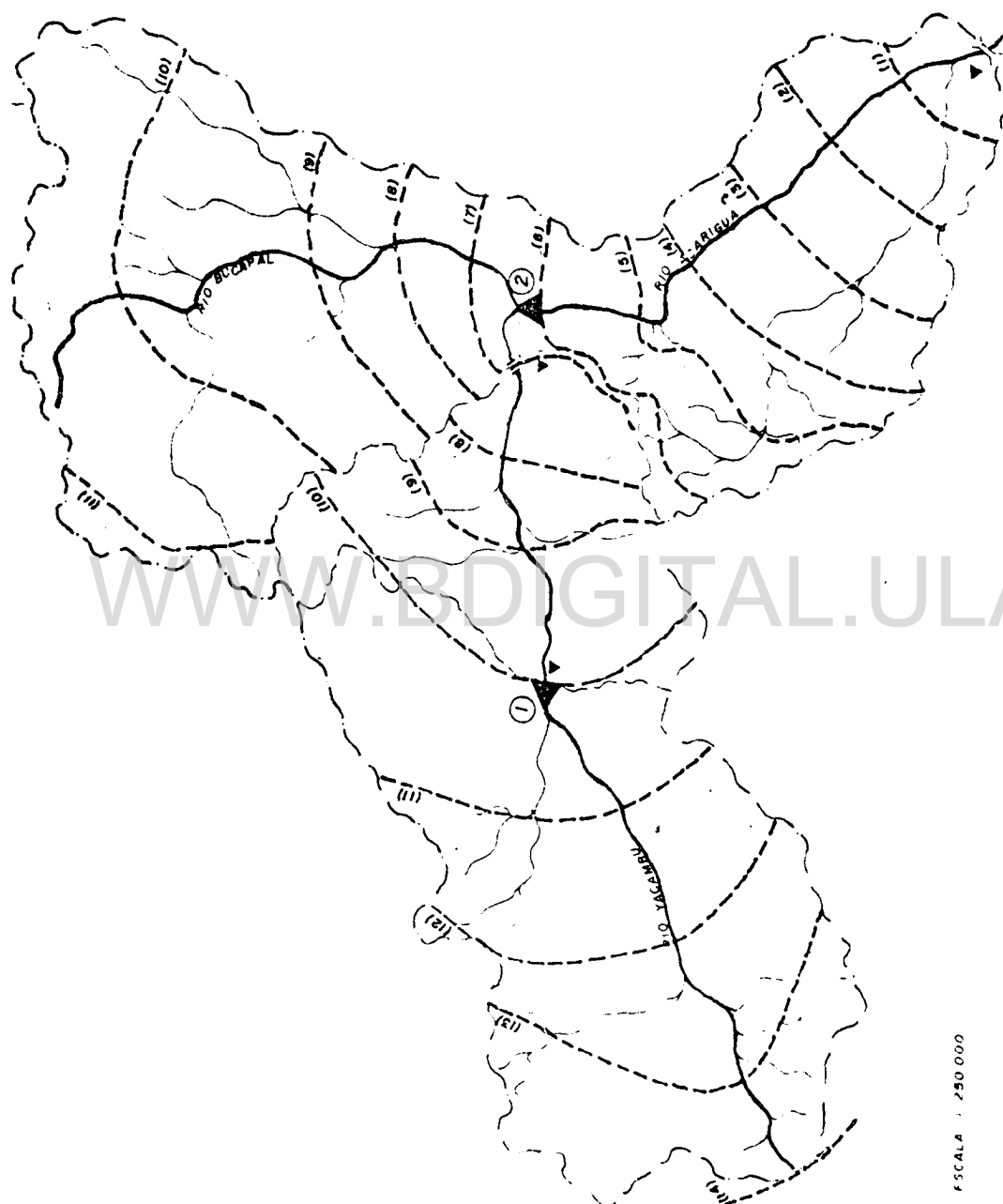


Figura 25. Isocronas y Puntos de Flujos en los Sitios de Presa Siguietes:
 (1) Presa Yacambú
 (2) Presa Dos Bocas

1. Si el almacenamiento al final del período es mayor que el volumen normal del embalse, entra en funcionamiento el aliviadero y la toma de fondo.

2. Si el almacenamiento al final del período es menor que el volumen normal y mayor que el volumen muerto, se chequea si la disponibilidad de agua garantiza la entrega prevista; si el agua disponible es menor que la demanda, se entrega la cantidad disponible.

3. Si el almacenamiento al final del período es menor que el volumen muerto, no se realiza la entrega prevista.

Para el cálculo de los hidrogramas de las crecientes, el modelo considera como flujo, el correspondiente a la descarga del aliviadero y/o la descarga del desagüe de fondo del embalse, es decir, el flujo resultante del tránsito a través del embalse. Este flujo a la salida del embalse es transitado por el cauce del río hasta el siguiente punto de flujo, y si en este último también existe un embalse se procede de igual forma.

Descripción de variables y datos de la subrutina EMBAL:

Vol (IPT) = Volumen normal del embalse ubicado en un punto de flujo determinado. Es un dato de entrada al modelo.

EG = Volumen entregado desde el embalse.

TRASV(IPT) = Entrega de agua por trasvase desde el embalse ubicado en un punto de flujo determinado. Es un dato de entrada al modelo.

TOMA (IPT) = Entrega de agua fija por el desagüe de fondo, para control de calidad del agua. Es un dato de entrada al modelo.

EV = Volumen de evaporación desde el embalse en el período de tiempo.

E (I) = Lámina de evaporación desde el embalse en el período de tiempo. Se determina en el programa principal.

AREA(J) = Area de inundación del vaso del embalse que corresponde al volumen del embalse en el período de tiempo.

Este valor es el resultado de la interpolación que realiza la subrutina IMPOL.

- QE = Volumen total de agua saliente desde el embalse en el período de tiempo.
- P(I) = Lámina de precipitación entrante al embalse en el período de tiempo. Se calcula en el programa principal.
- FLOW(IPT,I) = Volumen de agua entrante en la cola del embalse, en el período de tiempo. Se calcula en la subrutina CHANEL.
- QA = Volumen total de agua entrante al embalse en el período de tiempo.
- S1 = Volumen de agua almacenado en el embalse al inicio del período de tiempo.
- S2 = Volumen de agua almacenado en el embalse al final del período de tiempo.
- VONOR(IPT) = Volumen normal del embalse ubicado en el punto de flujo correspondiente. Dato de entrada al modelo.
- TER = Volumen de agua en el embalse, calculado para chequear el balance disponibilidad-demanda.
- VOMUE (IPT) = Volumen de agua correspondiente al nivel muerto en el embalse. Dato de entrada al modelo.
- DISP = Volumen de agua disponible en el embalse en el período de tiempo.
- QL(J) = Flujo descargado por el aliviadero, correspondiente al volumen del embalse en el período de tiempo. Este valor es el resultado de la interpolación que realiza la subrutina EMBAL.
- QD(J) = Flujo descargado por el desagüe de fondo del embalse, correspondiente al volumen del embalse en el período de tiempo. Este valor es el resultado de la interpolación que realiza la subrutina EMBAL.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ALIV = Volumen descargado por el aliviadero en el período de tiempo.
 QDES = Volumen descargado por el desagüe de fondo en el período de tiempo.

Dentro de la subrutina EMBAL se llama la subrutina IMPOL, la cual ejecuta la interpolación de los valores de las curvas del embalse: curvas áreas-capacidades, descarga del desagüe de fondo y descarga del aliviadero. Estos valores se dan como datos de entrada al modelo.

Descripción de variables y datos de la subrutina IMPOL:

NZ(IPT) = Número total de datos tabulares de las curvas del embalse ubicado en un punto de flujo determinado.

VOEXT(IPT)=Volumen de agua extraordinario del embalse ubicado en un punto de flujo determinado. Corresponde al volumen máximo de agua que puede aceptar el embalse sin poner en peligro la presa.

A = Volumen del embalse al inicio del período de tiempo.

V(IPT,J) = Valores tabulares de los volúmenes del embalse para diferentes niveles de agua. Corresponde a los datos de las curvas del embalse ubicado en un punto de flujo determinado.

AA = Factor de interpolación, calculado en base a la ubicación del valor del volumen inicial del embalse, dentro de los datos tabulares de las curvas del embalse considerado.

AREA2(IPT,J) = Valores tabulares del área de inundación para diferentes niveles de agua del vaso del embalse ubicado en un punto de flujo determinado.

QAL(IPT,J) = Valores tabulares de la descarga del aliviadero para diferentes niveles de agua en el embalse ubicado en un punto de flujo determinado.

QTOM(IPT,J) = Valores tabulares de la descarga del desagüe de fondo para diferentes niveles de agua en el embalse ubicado en un punto de flujo determinado.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
 (CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 8. Láminas de lluvias máximas ocurridas en la cuenca del río Acarigua, durante el período 1968-1979.
Láminas en mm

ESTACION	FECHA DE OCURRENCIA POR AÑO											
	16-10-68	22-10-69	20-10-70	4-10-71	23-6-72	3-10-73	18-9-74	16-11-75	18-5-76	17-10-77	01-07-78	31-05-79
Hacienda Camburito	3,4	62,5	103,0	68,6	53,0	20,0	74,9	-	-	22,6	31,1	25,0
El Guamito	80,9	60,4	53,0	50,7	58,0	30,1	-	30,2	204,6	-	-	-
Paso Angostura	40,6	33,8	89,6	138,0	59,7	48,4	-	55,2	160,7	41,4	45,8	46,8
Caspito	17,8	0,8	61,8	66,8	67,8	32,4	-	12,0	84,3	15,0	35,7	73,0

De acuerdo a esta modificación hecha al modelo Stanford IV, el mismo puede aceptar hasta 10 embalses, es decir, un embalse en cada punto de flujo.

En el Anexo B.3, se presentan los flujogramas de las subrutinas EMBAL e IMPOL. En el Anexo C.3, se presenta un listado del modelo Stanford IV con las subrutinas EMBAL e IMPOL incorporadas al mismo.

Análisis de Frecuencias de Lluvias Máximas en la Cuenca del Río Acarigua

Para realizar el análisis de frecuencias de lluvias máximas en la cuenca del río Acarigua, se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Se escogió la mayor tormenta ocurrida en la cuenca, durante el período de funcionamiento de las estaciones presentadas en la Tabla 6.

En la Tabla 8, se presentan los datos de láminas de lluvias máximas ocurridas en el período 1968-1979, tomados de los anuarios pluviométricos del MOP y de las planillas modelo M-7 del MOP.

Se observa en la Tabla 8 que los máximos valores de lluvia durante el período 1968-1979, corresponden al día 18-05-76.

2. Se calcularon las láminas de lluvia máxima para una duración de 12 horas en la estación El Guamito, por ser ésta la que registró el valor máximo de lluvia durante el día 18-05-76,

En la Tabla 9, se presenta dicha información.

3. Los valores de la Tabla 9, se ajustaron a una distribución extrema Tipo I, es decir, se ajustó a una distribución empírica, una distribución teórica, usando el método analítico, y la prueba de Smirnov Kolmogorov como prueba de ajuste.

Al utilizar el método analítico es necesario estimar dos parámetros, que son α y β , que forman parte de la ecuación que da la probabilidad acumulada.

Tabla 9. Láminas de Lluvias Máximas para 12 Horas de Duración.
Estación: El Guamito

Año	Pm
1968	80,9
1969	42,5
1970	53,0
1971	44,0
1972	36,0
1973	30,1
1975	30,2
1976	197,0

$$F(X \geq X_m) = 1 - e^{-e^{-\alpha(X_m - \beta)}} \quad (68)$$

La media y la desviación típica de esta distribución vienen dadas por:

$$\bar{X} = \beta + \frac{0,5772}{\alpha} \quad (69)$$

$$S = \frac{\pi}{\sqrt{6} \times \alpha} = \frac{1,281}{\alpha} \quad (70)$$

A partir de las ecuaciones 69 y 70, se obtienen los parámetros α y β .

$$\alpha = \frac{1,281}{s} \quad y \quad \beta = \bar{X} - 0,45 s$$

La media y la desviación típica para los datos de la Tabla 9 son:

$$\bar{P} = 64,21$$

$$S_p = 56,10$$

Reemplazando $\bar{P}$ y S_p por sus valores se tiene que:

$$\alpha = \frac{1,281}{56,10} = 0,0228342$$

$$\beta = 64,21 - 0,45 \times 56,10 = 38,965$$

Entonces:

$$F(P \geq P_m) = 1 - e^{-e^{-0,0228342 (P_m - 38,965)}} \quad (68)$$

En la Tabla 10, se presentan los valores del método analítico de ajuste.

Para realizar la prueba de ajuste se usó el método de Smirnov Kolmogorov, cuya prueba se presenta en la Tabla 11.

Tabla 10. Ajuste Analítico de los Datos de Lluvia Máxima de la Estación El Guamito, a la Distribución Gumbel Tipo I.

m	Lluvia Máxima P_m	Distac. Teórica $P_T(P \geq P_m)$	Dist. Empírica $P_e(P \geq P_m)$	
			$\frac{m}{n+1}$	%
1	197,0	2,57		11,11
2	80,9	31,63		22,22
3	53,0	51,52		33,33
4	44,0	58,99		44,44
5	36,0	65,77		66,67
7	30,2	70,64		77,78
8	30,1	70,72		88,89

Tabla 11. Prueba de Smirnov Kolmogorov para el Ajuste Analítico

Lluvia Máxima P_m	Dist. Teórica $P_r (P \geq P_m)$	Dist. Empírica $P_e (P \geq P_m)$	Desviaciones $\Delta = P_T - P_e $
	%	$\frac{m}{n+1}$ %	%
197,0	2,57	11,11	8,54
80,9	31,63	22,22	9,41
53,0	51,52	33,33	18,19
44,0	58,99	44,44	14,55
42,5	60,26	55,56	4,70
36,0	65,77	66,67	0,90
30,2	70,64	77,78	7,14
30,1	70,72	88,89	18,17

De la Tabla 11 se escogió el $\Delta_{\max} = 0,1819$ y de la Tabla 12 se obtuvo el valor crítico Δ_0 del Estadístico de Smirnov-Kolmogonov para $n = 8$ y un nivel de cofianza $\alpha = 5\%$, entonces:

$$\Delta_{\max} = 0,1819$$

$$\Delta_0 = 0,47, \text{ este valor fue interpolado}$$

Como $\Delta_{\max}$ es menor que Δ_0 aceptamos el ajuste analítico

4. Una vez aceptado el ajuste, se calcularon las lluvias máximas para diferentes períodos de retorno en la estación El Guamito, usando la ecuación (71). En la Tabla 13, se presentan estos resultados.

5. Se calculó la lluvia media en el área de influencia de las estaciones El Guamito, Paso Angostura y Caspito. La estación Hacienda Camburito no se consideró, ya que por interrupción no registró la lluvia del 18-05-76.

Tabla 12. Valor Crítico Δ_0 del Estadístico de Smirnov-Kolmogorov, para Varios Valores de α Comunmente Usados en Hidrología. Tomado de Yevjevich.

(1973)

N	Niveles de Confianza α			
	0,20	0,10	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,30	0,34	0,40
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,20	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23

Tabla 13. Lluvias Máximas para Diferentes Períodos de Retorno en la Estación El Guamito

Período de Retorno	Lluvia Máxima	
T_R	$P(P \geq P_m)$	P_m
50	0,02000	209,8
100	0,01000	240,4
200	0,00500	270,9
500	0,00200	311,1
1000	0,00100	341,5
2000	0,00050	371,8
5000	0,00020	411,9
10000	0,00010	442,3
50000	0,00002	512,8
100000	0,00001	543,2

Para calcular la lluvia media se usó el método de las isoyetas. En la Figura 26, se presenta el plano de isoyetas de la tormenta ocurrida el 18-05-76, en la cuenca del río Acarigua, para una duración de 12 horas. Como área de influencia de las estaciones, se usó el área determinada al aplicar el método de los polígonos de Thiessen en el programa SEGREG.

En las Tablas 14, 15 y 15, se presentan los cálculos de la lluvia media para 12 horas de duración por el método de las isoyetas.

6. Con las lluvias medias calculadas en el área de influencia de cada estación, se establece una relación entre éstas y la lluvia máxima para 12 horas de duración caída en la cuenca durante el día 18-05-76. Esta relación se llama K, y se calcula para cada estación:

$$\text{Estación El Guamito, } K_G = \frac{\bar{P}_G}{P_{\max}} = \frac{164,3}{197,0} = 0,83$$

$$\text{Estación Paso Angostura, } K_{pa} = \frac{\bar{P}_{pa}}{P_{\max}} = \frac{140,8}{197,0} = 0,71$$

$$\text{Estación Caspito, } K_c = \frac{\bar{P}_c}{P_{\max}} = \frac{102,3}{197,0} = 0,52$$

7. Se calculan las lluvias máximas para diferentes períodos de retorno en el área de influencia de cada estación. Esto se obtiene al multiplicar los datos de lluvia máxima presentados en la Tabla 13, por el respectivo valor de K.

En la Tabla 17, se presentan estos resultados.

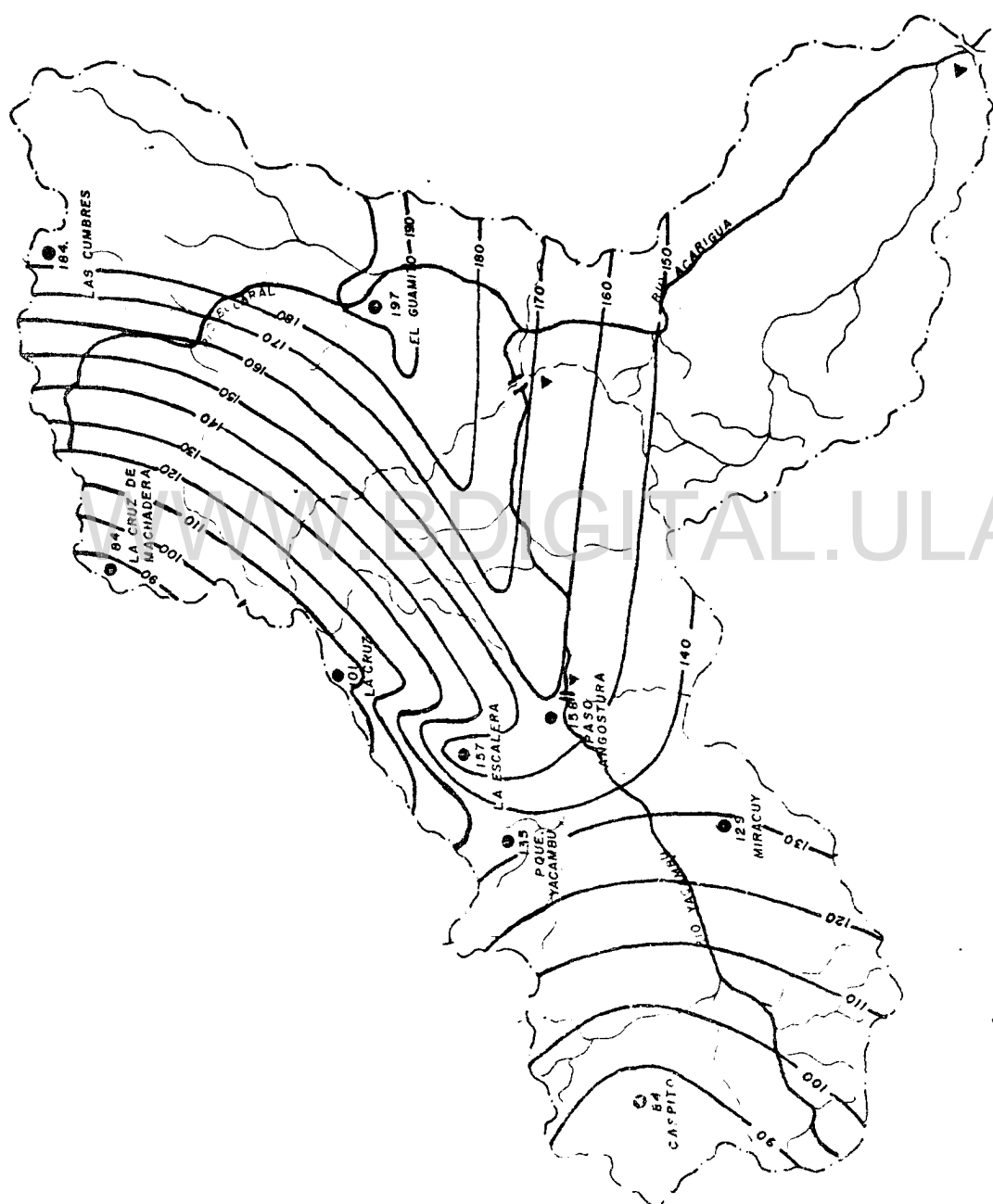


Figura 26. Isoyetas de la Tormenta Ocurrida el 18-05-76 en la Cuenca

del Río Acarigua

Duración= 12 horas

Unidades= m.m.

Tabla 14. Cálculo de la lluvia media por el método de las isoyetas en el área de influencia de la estación El Guaimito.

Isoyeta	Area acumulada km ²	Area parcial km ²	$\bar{P}_i$ mm	$\Delta A \times \bar{P}_i$ km ² x mm
197	0,0			
190	13,5	13,5	193,5	261,3
180	149,2	135,7	185,0	25104,5
170	196,0	46,8	175,0	8190,0
160	238,1	42,1	655,0	6946,5
150	256,8	18,7	155,0	2898,5
140	270,9	14,0	145,0	2030,0
130	289,3	18,5	135,0	2497,5
120	303,8	14,5	125,0	1812,5
110	316,3	12,5	115,0	1437,5
100	328,3	12,0	105,0	1260,0
90	336,0	7,7	95,0	731,5
80	340,0	4,0	85,0	340,0
				<u>55860,8</u>

$$\bar{P}_G = \frac{55860,8}{340,0} = 164,3 \text{ mm}$$

Tabla 15. Cálculo de la lluvia media por el método de las isoyetas en el área de influencia de la estación Paso Angostura.

Isoyeta	Area acumulada km ²	Area parcial km ²	$\bar{P}_i$ mm	$\Delta A \times \bar{P}_i$ km ² x mm
180	0,0			
170	7,1	7,1	175,0	1242,5
160	34,5	27,4	165,0	4521,0
150	77,8	43,3	155,0	6711,5
140	126,9	49,1	145,0	7119,5
130	177,9	51,0	135,0	6885,0
120	226,9	49,0	125,0	6125,0
110	243,9	17,0	115,0	1955,0
100	250,0	6,1	105,0	640,5
				<u>35200,0</u>

$$\bar{P}_{pa} = \frac{35200,0}{250,0} = 140,8 \text{ mm.}$$

Tabla 16. Cálculo de la Lluvia Media por el Método de las Isoyetas en el Area de Influencia de la Estación Caspito.

Isoyeta	Area Acumulada Km ²	Area Parcial Km ²	$\bar{P}_i$ mm	$\Delta A \times \bar{P}_i$ Km ² x mm
130	0,0			
120	10,8	10,8	125,0	1350,0
110	48,3	37,5	115,0	4312,5
100	93,5	45,2	105,0	4746,0
90	132,4	38,9	95,0	3695,5
80	165,0	32,6	85,0	2771,0
				<u>16875,0</u>

$$\bar{P}_c = \frac{16875,0}{165,0} = 102,3 \text{ mm}$$

Determinación de los Hidrogramas de Crecientes en la Estación Puente Acarigua, para diferentes Alternativas de Embalses y Diferentes Períodos de Retorno.

Para obtener los hidrogramas de crecientes en la estación Puente Acarigua, considerando las diferentes alternativas de embalses en la cuenca, se usa el modelo Stanford IV, previamente calibrado y con las subrutinas EMBAL e IMPOL incorporadas al mismo.

En la Figura 24, se presentan los tres puntos de flujo a considerar: Yacambú en Paso Angostura, Acarigua en Dos Bocas y Acarigua en Puente Acarigua, y la ubicación de las isocronas en la cuenca. De acuerdo a esto, se tiene un punto de flujo en cada sitio de presa y un punto de flujo en la estación puente Acarigua a la salida de la cuenca.

Alternativas de embalses para control de crecientes

En el presente estudio se consideran seis alternativas, para evaluar el efecto de los embalses Yacambú y Dos Bocas en el control de crecientes del río Acarigua.

Tabla 17. Lluvias Máximas para 12 Horas de Duración y Diferentes Períodos de Retorno, en el Área de Influencia de las Estaciones El Guamito, Paso Angostura y Caspito.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
T_R	P_m Estación El Guamito	P_m Área de In- fluencia El Guamito	P_m Área de In- fluencia Paso Angos- tura	P_m Área de In- fluencia Caspito
50	209,8	174,1	148,9	109,1
100	240,4	199,5	170,7	125,0
200	270,9	224,8	192,3	140,9
500	311,1	258,2	220,9	161,8
1.000	341,5	283,4	242,5	177,6
2.000	371,8	308,6	264,0	193,3
5.000	411,9	341,9	292,4	214,2
10.000	442,3	367,1	314,0	230,0
50.000	512,8	425,6	364,0	266,7
100.000	543,2	450,9	385,7	282,5

$$(3) = (2) \times K_G; \quad (4) = (2) \times K_{pa}; \quad (5) = (2) \times K_c$$

1. Sin obras, es decir, sin considerar los embalses propuestos
2. Funcionando sólo el embalse Yacambú
3. Funcionando el embalse Yacambú y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo abierta completamente.
4. Funcionando el embalse Yacambú y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo $3/4$ partes abierta.
5. Funcionando el embalse Yacambú, y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo $1/2$ parte abierta.

6. Funcionando el embalse Yacambú y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo $1/4$ parte abierta.

Datos de Entrada al Modelo Stanford IV, calibrando para la Cuenca del Río Acarigua.

Para simular crecientes con el modelo Stanford IV calibrado, considerando la existencia de los embalses Yacambú y Dos Bocas, se requieren las siguientes entradas:

1. Datos de lluvias máximas para una duración escogida y diferentes períodos de retorno, distribuidas horariamente.

En el presente estudio se usan los datos de lluvias máximas presentadas en la Tabla 17. Estos datos son valores totales de 12 horas, y para distribuirlos horariamente se usó el procedimiento siguiente:

A. Se calcularon los porcentajes horarios correspondientes a la lluvia máxima de 12 horas de duración, registrada en la estación El Guamito, el día 18-05-76.

B. Se obtiene la lluvia horaria en el área de influencia de cada estación usada en el estudio, multiplicando los datos de lluvia máxima para diferentes períodos de retorno presentados en la Tabla 17, por el porcentaje calculado en el punto A.

En la Tabla 18, se presenta el cálculo de los porcentajes horarios.

2. Datos de evaporación media diaria en la cuenca.

En este estudio se usan los datos de evaporación media diaria medidos en la estación Paso Angostura, por ser la única estación con la información disponible,

3. Los datos correspondientes a las curvas áreas-capacidades, curva de descarga del desagüe de fondo de los embalses a considerar en el estudio.

En este estudio, se incluyen como datos de entrada las curvas de los embalses Yacambú y Dos Bocas.

En el caso de la presa Dos Bocas se dan diferentes valores de la descarga del desagüe de fondo, de acuerdo a las cuatro aberturas de compuerta con sideradas en el estudio realizado por FUDECO (1978). Para calcular estos valo res se usaron las ecuaciones siguientes:

Compuerta totalmente abierta:

$$Q = 76,15 (H + 1,0)^{1/2} \quad (72)$$

Compuerta abierta tres cuartas partes

$$Q = 63,40 (H + 1,0)^{1/2} \quad (73)$$

Compuerta abierta la mitad

$$Q = 40,43 (H + 1,0)^{1/2} \quad (74)$$

Compuerta abierta la cuarta parte,

$$Q = 21,86 (H + 1,0)^{1/2} \quad (75)$$

En el Anexo A.4, se presentan las entradas del modelo Stanford IV, versión NWS, modificado para simular el tránsito de crecientes a través de embalses.

Salidas Finales del Modelo

Se obtienen como resultados, los valores de los caudales horarios simulados en cada punto de flujo. Es decir, los valores de los hidrogramas de las crecientes de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 50000 y 100000 años, para cada alternativa considerada. A manera de ilustración, se presentan en los Anexos D.4, D.5, D.6, D.7, D.8 y D.9, los valores del hidrograma de la creciente de 50 años para cada alternativa considerada.

Tabla 18. Cálculo de los Porcentajes de Lluvia Horaria en la Estación El Guamito.

Hora	Lluvia en cm.	%
02	0,00	0,00
03	0,00	0,00
04	0,18	0,91
05	0,96	4,88
06	2,58	13,10
07	2,52	12,79
08	5,02	25,48
09	4,96	25,18
10	3,04	15,43
11	0,26	1,32
12	0,14	0,71
13	<u>0,04</u>	0,20
TOTAL =		19,70

Porcentajes de Atenuación de Picos en la Estación Puente Acarigua

El porcentaje de atenuación de picos para las diferentes alternativas de embalses, alternativas 2, 3, 4, 5 y 6, se calcula en base a los picos de las crecientes obtenidas al considerar la alternativa sin obras.

Los datos de Q pico para diferentes T_R , se obtienen de los hidrogramas presentados en el Anexo D.4.

En la Tabla 19, se presentan los porcentajes de atenuación de picos, para diferentes alternativas de embalses.

Tabla 19. Porcentajes de Atenuación de Picos en la Estación Puente Acarigua

Alternativa	T _R									
	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	50000	100000
2	0,2	2,8	3,6	5,6	6,8	7,8	8,9	9,2	10,5	11,0
3	23,7	36,4	47,0	57,1	60,4	59,3	60,6	61,4	62,0	59,6
4	33,2	46,0	55,4	60,1	60,4	60,2	61,1	61,4	62,0	60,2
5	55,3	58,7	59,4	60,1	60,4	60,7	61,1	61,4	62,0	61,2
6	57,8	58,7	59,4	60,1	60,4	60,7	61,1	61,4	62,0	61,2

CAPITULO IV

DETERMINACION DE LA MANCHA DE INUNDACION DEL RIO ACARIGUA

En este capítulo se determina el perfil o mancha de inundación del río Acarigua, para crecientes de períodos de retorno de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 50000 y 100000 años, y para las diferentes alternativas de embalses presentadas en el capítulo III.

Para el cálculo de la mancha de inundación se usa el modelo de tránsito dinámico en planicies inundables desarrollado por Mogollón (1979), el cual fue programado en lenguaje FORTRAN IV, y recibe el nombre de PLANICIE. El modelo utiliza como sección transversal la verdadera topografía de las secciones en estudio y toma en cuenta el efecto de meandro del río dentro de la planicie.

Mogollón (1979), recomienda la aplicación del modelo de tránsito dinámico en planicies inundables, en casos de ríos con pendientes bajas y con su planicie de inundación bien definida. Igualmente recomienda utilizar en lo posible intervalos de distancia menores de cinco mil metros e intervalos de tiempo mayores de mil segundos, con la finalidad de evitar problemas de inestabilidad.

Entrada de Datos al Modelo de Tránsito Dinámico en Planicies Inundables

El modelo de tránsito dinámico en ríos con planicie de inundación, requiere como datos de entrada la información siguiente:

1. Hidrograma de entrada

En el presente estudio se usan los hidrogramas de crecientes para diferentes períodos de retorno y diferentes alternativas de embalses, simulados en la estación Puente Acarigua mediante el modelo Stanford IV.

2. La topografía real de cada una de las secciones transversales del cauce del río y su planicie de inundación.

En este estudio se levantaron secciones transversales cada 1000 m en el cauce y la planicie de inundación del río Acarigua, desde la estación puente

Acarigua ubicada en la Carretera Nacional Acarigua-Guanare, hasta su desembocadura en el río Portuguesa. Este proyecto tiene una longitud de 88,8 Km.

3. Condiciones iniciales de flujo en la longitud estudiada del río.

4. Las características físicas tanto del cauce como la planicie de inundación del río.

La versión del modelo usada en el estudio del río Acarigua tiene capacidad para veinte secciones y cien intervalos de tiempo.

Descripción de las Variables de Entrada, Utilizadas en el Modelo

AM (I, K)	Datos tabulares del área mojada para diferentes niveles en cada sección en estudio.
AMAX(1)	Area máxima de flujo en el cauce del río antes del desborde.
BM (I, K)	Datos tabulares del ancho superficial para diferentes niveles en cada sección en estudio
BMAX (I)	Ancho máximo de flujo en el cauce del río antes del desborde
CRG	Coeficientes de rugosidad de Manning para el cauce del río
CRP	Coeficiente de rugosidad de Manning en la planicie
DET (J)	Intervalo de tiempo utilizado para el tránsito
DEXC (L)	Intervalo de distancia entre secciones a lo largo del cauce
DEXP (L)	Intervalo de distancia entre secciones a lo largo de la planicie
I	Indice que va del 1 al número total de secciones estudiadas, N
J	Indice que va del 1 al número total de intervalos de tiempo tomados, NT

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

K	Índice que va del 1 al número total de medidas tabulares tomadas en cada sección, NM
L	Índice que va del 1 al número total de subtramos estudiados N-1
N	Número total de secciones estudiadas
NM	Número total de medidas tabulares, hechas en cada sección, el programa acepta un máximo de 50 medidas tabulares en cada sección.
NT	Número total de intervalos de tiempo para el tránsito
PM(I,K)	Datos tabulares del perímetro mojado para diferentes niveles en cada sección en estudio
PMAX(1)	Perímetro mojado máximo del flujo en el cauce del río, antes del desborde
Q (1,1)	Caudal en cada sección en estudio, al inicio del tránsito
Q (1, J)	Datos del Hidrograma de entrada
SOC	Pendiente promedio a lo largo del cauce del río
SOP	Pendiente promedio a lo largo de la planicie
TETA	Factor de ponderación propio del método numérico utilizado
YN(I, K)	Datos tabulares la profundidad para diferentes niveles en cada sección en estudio

En la Figura 27, se presenta un esquema ilustrativo para la obtención de los datos tabulares del área, profundidad, perímetro mojado y ancho superficial en cada sección en estudio.

Cambios realizados a la entrada de datos.

Para lograr el adecuado funcionamiento del modelo, se realizaron los siguientes cambios a la entrada de datos:

1. Las secciones trenzadas del río, se cambiaron por secciones rectangulares equivalentes, conservando el ancho superficial y el área transversal real. El modelo fue diseñado para secciones irregulares no trenzadas.

2. El intervalo de distancia entre secciones a lo largo del cauce y la planicie del río, se cambió de su valor inicial de 1000 a 500 y se determinaron los datos tabulares a partir de secciones promedios calculadas en base al estudio topográfico realizado cada kilómetro.

3. El intervalo de tiempo utilizado para el tránsito fue variado, de su valor inicial de 3600 a 1200.

Al presentarse problemas de inestabilidad en las secciones en estudio, se varió el factor de ponderación TETA, propio del método numérico utilizado, entre el valor inicial 0,55 y el valor de 0,90.

Cálculo de la mancha de inundación para diferentes alternativas de uso de embalses y para diferentes períodos de retorno.

Una vez realizados los cambios en la entrada de datos del modelo, se obtienen las salidas para las diferentes crecientes simuladas en el Capítulo III.

- Salidas del modelo.

A continuación se presentan las variables de salida, dadas por el modelo de tránsito dinámico en planicies inundables, con su correspondiente equivalencia.

- ALMAX (I) Tirante máximo alcanzado en cada sección en estudio durante todo el período de tránsito.
- BS (I) Ancho superficial alcanzado por el flujo en cada sección en estudio, para cualquier intervalo de tiempo.
- I Parámetro que indica la sección en estudio considerada
- Q(I) Caudal que pasa por cada sección en estudio, para cualquier intervalo de tiempo.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Para determinar la mancha de inundación, los valores de $BS(I)$ son llevados a un plano de Cartografía Nacional, a escala 1:25.000, donde uniendo los valores ploteados en cada sección, se obtienen los límites de la inundación. Este procedimiento se repite para cada creciente y alternativa considerada.

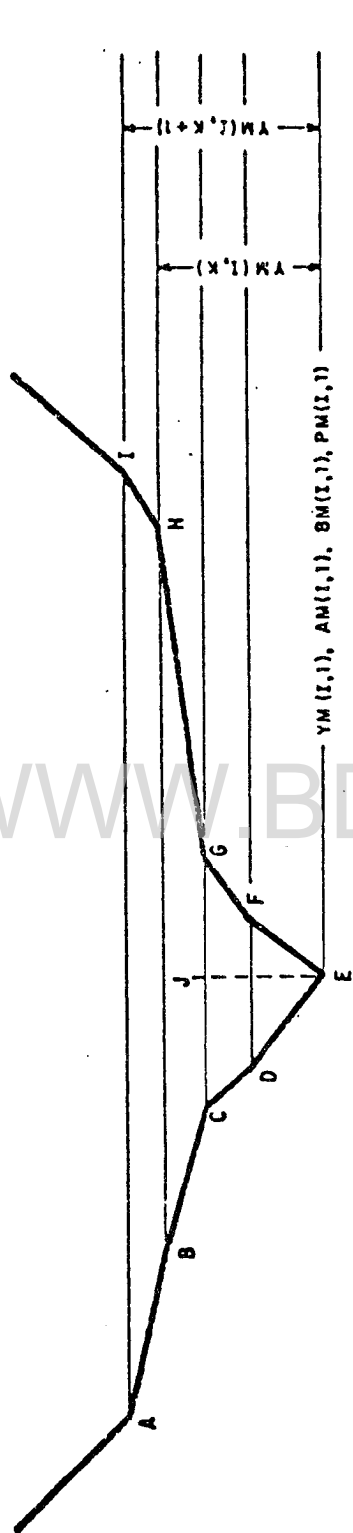
Se obtiene como resultado un conjunto de 6 planos con 10 manchas de inundación cada uno, producto de 6 alternativas diferentes y 10 crecientes con períodos de retorno de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 50000 y 100000 años.

En el presente estudio se determina la mancha de inundación sólo para las primeras 20 secciones del río, es decir, entre las progresivas 0 + 000 y 9 + 500, motivado a limitaciones de tiempo que no permite cubrir el resto, considerando un promedio de 15 minutos por corrida en la computadora y un total de 60 corridas que se deben realizar para cada tramo de 20 secciones del río.

En el Anexo A.5, se presentan los datos de entrada al modelo con su respectivo formato.

En el Anexo C.4, se presenta un listado del programa y en los Anexos D.10, D.11, D.12, D.13, D.14 y D.15 se presentan los resultados de su aplicación, para la creciente con períodos de retorno de 50 años y para cada alternativa considerada.

En los Anexos E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 y E.6, se presentan los planos con las manchas de inundación para diferentes alternativas y para diferentes crecientes.



En donde:

$AM(I, K)$	Está representada por el área encerrada entre los puntos BCD y FGH
$PM(I, K)$	Está representada por la suma de los segmentos BC , CD , DE , EF , FG y GH
$BM(I, K)$	Está representada por el segmento BH
$AMAX(I)$	Está representada por el área encerrada entre los puntos $CDEFG$
$PMMAX(I)$	Está representada por la suma de los segmentos CD , DE , EF y FG
$BMAX(I)$	Está representada por el segmento CG
$YMAX(I)$	Está representada por la altura EJ

Figura 27. Esquema ilustrativo para la Obtención de los Datos Tabulares del Área, Profundidad, Perímetro Mojado y Ancho Superficial en Cada Sección en Estudio.

CAPITULO V

ESTIMACION DEL VALOR ESPERADO DE DAÑOS POR INUNDACION DEL RIO ACARIGUA

En este capítulo se hace una estimación de las pérdidas por inundación promedio anual en las tierras agrícolas adyacentes al río Acarigua.

Cálculo del Area Inundada

En el presente estudio se determina el área inundada por el río Acarigua, tomando como base la mancha de inundación calculada en el Capítulo IV. Se calcula el área cuyos límites se señalan en los planos presentados en el Anexo E.1, para diferentes alternativas y diferentes crecientes de frecuencia conocida.

El área inundada servirá de base para la estimación de los daños por inundación.

En la Tabla 20, se presenta el número de hectáreas inundadas para cada creciente y alternativa considerada. Las alternativas se enumeran del 1 al 6, y corresponden a las señaladas en el Capítulo III.

Cálculo de las Pérdidas por Inundación

De acuerdo al MAC (1978), las tierras adyacentes al río Acarigua son de vocación agrícola, donde se encuentran establecidos principalmente cultivos anuales y bianuales, tales como cereales, oleaginosas, leguminosas, raíces y tubérculos, tabaco y hortalizas.

En el presente estudio se calculan las pérdidas por inundación, en bo lívares, partiendo del supuesto de que al ocurrir la inundación toda la superficie se encuentra cultivada de maíz, ya que el mismo predomina en el área adyacente al río Acarigua, y potencialmente son tierras aptas para dicho cultivo. Además, se supone que el cultivo está próximo a cosecharse, al ocurrir la inundación.

Partiendo del supuesto anterior, se calculan los daños multiplicando el área inundada en hectáreas por el ingreso bruto por hectárea del cultivo

Tabla 20. Area inundada por el río Acarigua, en hectáreas

Alternativa	Período de Retorno de la Avenida en años									
	50	100	200	500	1000	2000	5000	10.000	50.000	100.000
1	559	803	1029	1277	1449	1577	1729	1859	2094	2205
2	547	765	976	1192	1345	1460	1612	1724	1937	2046
3	362	393	431	443	493	565	708	789	988	1118
4	239	305	399	420	480	554	684	775	977	1113
5	156	199	282	361	444	501	648	745	954	1099
6	148	173	273	341		480	620	726	936	1076

de maíz, es decir, el valor del costo de producción, más el beneficio que deja de percibir el agricultor al perder la cosecha. Se utiliza como ingreso bruto, Bs. 2.800,00/Ha., valor tomado del MAC (1980).

En la Tabla 21, se presentan los daños por inundación del río Acarigua para cada creciente y alternativa considerada.

Tabla 21. Daños por Inundación del Río Acarigua, en Bolívars.

T_R	ALTERNATIVA					
	1	2	3	4	5	6
50	1.565.200	1.531.600	1.013.600	669.200	436.800	414.400
100	2.248.400	2.142.000	1.100.400	854.000	557.200	484.400
200	2.881.200	2.732.800	1.206.800	1.117.200	789.600	764.400
500	3.575.600	3.337.600	1.240.400	1.176.000	1.010.800	954.800
1000	4.057.200	3.766.000	1.380.400	1.344.000	1.243.200	1.170.400
2000	4.415.600	4.088.000	1.582.000	1.551.200	1.402.800	1.344.000
5000	4.841.200	4.513.600	1.982.400	1.915.200	1.814.400	1.736.000
10000	5.205.200	4.827.200	2.209.200	2.170.000	2.086.000	2.032.800
50000	5.863.200	5.423.600	2.766.400	2.735.600	2.671.200	2.620.800
100000	6.174.000	5.728.800	3.130.400	3.116.400	3.077.200	3.012.800

Conociendo los daños por inundación de las diferentes crecientes, y su probabilidad de ocurrencia, se calcula el valor esperado de daños anuales para cada alternativa considerada. El procedimiento empleado es el siguiente:

1. Para cada una de las 10 crecientes utilizadas se calcula la probabilidad de éxito, $P(Q \geq Q_m)$, a partir del período de retorno T_R . Se usa la ecuación:

$$P(Q \geq Q_m) = \frac{1}{T_R}$$

2. Se calcula la probabilidad de ocurrencia de un valor igual al Q_m , a partir de la ecuación:

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

3. Se multiplica el daño promedio por inundación, D_p , por el valor de ΔP .

4. Se realiza la sumatoria del producto de $D_p \times \Delta P$.

En las Tablas 21, 22, 23, 24, 25 y 26, se presenta el cálculo del valor esperado de daños anuales para cada alternativa considerada.

Tabla 22. Cálculo del Valor Esperado de Daños Anuales para la Alternativa 1, en Bolívars.

Q	T_R	$P(Q > Q_m)$	ΔP	Daños	D_p	$D_p \times \Delta P$
750	20	0,05000		0		
			0,03000		782.6000	23.478,00
1018	50	0,02000		1.565,200		
			0,01000		1.906.800	19.068,00
1303	100	0,01000		2.248.400		
			0,00500		2.564.800	12.824,00
1600	200	0,00500		2.881.200		
			0,00300		3.228.400	9.685,20
1998	500	0,00200		3.575.600		
			0,00100		3.816.400	3.816,40
2306	1000	0,00100		4.057.200		
			0,00050		4.236.400	2.118,20
2619	2000	0,00050		4.415.600		
			0,00030		4.628.400	1.388,52
3038	5000	0,00020		4.841.200		
			0,00010		5.023.200	502,32
3362	10000	0,00010		5.205.200		
			0,00008		5.534.200	442,74
4124	50000	0,00002		5.863.200		
			0,00001		6.018.600	60,19
4456	100000	0,00001		6.174.000		
						<u>73.383,57</u>

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 23. Cálculo del Valor Esperado de Daños Anuales para la Alternativa 2, en Bolívars.

Q	T _R	P(Q ≥ Q _m)	ΔP	Daños	C _p	D _p x ΔP
720	20	0,05000		0		
			0,03000		765.800	22.974,00
1016	50	0,02000		1.531.600		
			0,01000		1.836.800	18.368,00
1267	100	0,01000		2.142.000		
			0,00500		2.437.400	12.187,00
1543	200	0,00500		2.732.800		
			0,00300		3.035.200	9.105,60
1886	500	0,00200		3.337.600		
			0,00100		3.551.800	3.551,80
2149	1000	0,00100		3.766.000		
			0,00050		3.927.000	1.963,50
2415	2000	0,00050		4.088.000		
			0,00030		4.300.800	1.290,24
2767	5000	0,00020		4.513.600		
			0,00010		4.670.400	482,72
3054	10000	0,00010		4.827.200		
			0,00008		5.125.400	410,03
3690	50000	0,00002		5.423.600		
			0,00001		5.576.200	55,76
3968	100000	0,00001		5.728.800		
						70.388,65

Tabla 24. Cálculo del Valor Esperado de Daños para la Alternativa 3, en Bolívars

Q	T _R	P(Q ≥ Q _m)	ΔP	Daños	D _p	D _p x ΔP
700	20	0,05000		0		
			0,03000		506.800	15.204,00
777	50	0,02000		1.013.600		
			0,01000		1.057.000	10.570,00
829	100	0,01000		1.100.400		
			0,00500		1.153.600	5.768,00
848	200	0,00500		1.206.800		
			0,00300		1.223.600	3.670,80
858	500	0,00200		1.240,40		
			0,00100		1.310.400	1.310,40
914	1000	0,00100		1.380.400		
			0,00050		1.481.200	740,60
1067	2000	0,00050		1.582.000		
			0,00030		1.782.200	534,66
1197	5000	0,00020		1.982.400		
			0,00010		2.095.800	209,58
1298	10000	0,00010		2.209.200		
			0,00008		2.487.800	199,02
1568	50000	0,00002		2.766.400		
			0,00001		2.948.400	29,48
1799	100000	0,00001		3.130.400		
						30.236,54

Tabla 25. Cálculo del Valor Esperado de Daños para la Alternativa 4, en Bolívars.

Q	T _R	P(Q ≥ Q _m)	ΔP	Daños	D _p	D _p x ΔP
525	20	0,05000		0		
			0,03000			
680	50	0,02000		669.200	334.600	10.038,00
			0,01000		761.600	7.616,00
704	100	0,01000		854.000		
			0,00500		985.600	4.928,00
714	200	0,00500		1.117.200		
			0,00300		1.146.600	3.429,80
798	500	0,00200		1.176.000		
			0,00100		1.260.000	1.260,00
914	1000	0,00100		1.344.600		
			0,00050		1.447.600	723,80
1042	2000	0,00050		1.551.200		
			0,00030		1.733.200	519,96
1182	5000	0,00020		1.915.200		
			0,00010		2.042.600	204,26
1298	10000	0,00010		2.170.000		
			0,00008		2.452.800	196,22
1568	50000	0,00001		2.735.600		
			0,00001		2.926.000	29,26
1774	100000	0,00001		3.116.400		
						28.953,30

Tabla 26. Cálculo del Valor Esperado de Daños Anuales para la Alternativa 5, en Bolívars

Q	T _R	P(Q ≥ Q _m)	ΔP	Daños	D _p	D _p x ΔP
300	20	0,05000		0		
			0,03000			
455	50	0,02000		436.800	218.400	6.552,00
			0,01000		497.000	4.970,00
538	100	0,01000		557.200		
			0,00500		673.400	3.367,00
650	200	0,00500		789.600		
			0,00300		900.200	2.700,60
798	500	0,00200		1.010.800		
			0,00100		1.127.000	1.127,00
914	1000	0,00100		1.243.200		
			0,00050		1.323.000	661,50
1030	2000	0,00050		1.402.800		
			0,00030		1.608.600	482,58
1182	5000	0,00020		1.814.400		
			0,00010		1.950.200	195,02
1298	10000	0,00010		2.086.000		
			0,00008		2.378.600	190,29
1568	50000	0,00002		2.671.200		
			0,00001		2.874.200	28,74
1728	100000	0,00001		3.077.200		
						20.274,73

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 27. Cálculo del Valor Esperado de Daños Anuales para la Alternativa 6, en Bolívares.

Q	T _R	P(Q ≥ Q _m)	ΔP	Daños	D _p	D _p x ΔP
280	20	0,05000		0		
			0,03000		207.200	6.216,00
430	50	0,02000		414.000		
			0,01000		449.400	4.494,00
538	100	0,01000		484.400		
			0,00500		624.400	3.122,00
650	200	0,00500		764.400		
			0,00300		859.600	2.578,80
798	500	0,00200		954.800		
			0,00100		1.062.600	1.062,62
914	1000	0,00100		1.170.400		
			0,00050		1.257.200	628,60
1030	2000	0,00050		1.344.000		
			0,00030		1.540.000	462,00
1182	5000	0,00020		1.736.000		
			0,00010		1.884.400	188,44
1298	10000	0,00010		2.032.800		
			0,00008		2.326.800	186,14
1568	50000	0,00002		2.620.800		
			0,00001		2.816.800	28,17
1728	100000	0,00001		3.012.800		
						18.966,77

Estos son los daños anuales por inundación, que se esperan en el tramo del río Acarigua, ubicado entre las progresivas 0 + 000 y 9 + 500.

CAPITULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos, al comparar los daños por inundación que se esperan con cada alternativa de embalse propuesta y discutir el efecto que tendrán los embalses en el control de crecientes del río Acarigua.

Comparación de Alternativas de Uso de Embalses

La comparación de las diferentes alternativas de uso de embalses para control de crecientes en el río Acarigua, se realiza en base a los resultados del cálculo del valor esperado de daños anuales.

En la Tabla 28, se presenta un resumen del valor esperado de daños anuales, en bolívares, para cada alternativa considerada.

Tabla 28. Valor Esperado de Daños Anuales para las Diferentes Alternativas.

Alternativa	Valor Esperado de Daños en Bs
1	73.383,57
2	70.388,65
3	38.236,54
4	28.955,30
5	20.274,73
6	18.966,77

En la Tabla 28, se observa, que los daños anuales son menores al usar los embalses Yacambú y Dos Bocas para el control de crecientes. Con la alternativa 2, funcionando sólo el embalse Yacambú, se obtienen beneficios anuales

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

por reducción de daños en Bs. 2.994,92; con la alternativa 3, funcionando el embalse Yacambú, y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo abierta completamente, se reducen los daños en Bs. 35.147,03; con la alternativa 4, funcionando el embalse Yacambú y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo abierta 3/4 partes, se reducen los daños en Bs. 44.428,27; con la alternativa 5, funcionando el embalse Yacambú y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo abierta la mitad, se reducen los daños en Bs. 53.108,84, con la alternativa 6, funcionando el embalse Yacambú y el embalse Dos Bocas con la compuerta del desagüe de fondo abierta 1/4 parte, se reducen los daños en Bs. 54.416,80.

Discusión del Efecto de los Embalses Yacambú y Dos Bocas, sobre las Inundaciones en las Areas Agrícolas Adyacentes al Río Acarigua.

Para considerar el efecto que tendrán los embalses Yacambú y Dos Bocas, sobre las inundaciones en las áreas agrícolas adyacentes al río Acarigua, se calcula el porcentaje de reducción de daños en base a los daños anuales que se esperan con la alternativa sin obra. Antes, se determina un promedio de los daños a esperar con las alternativas 3, 4, 5 y 6, para conocer el efecto del embalse Dos Bocas en la reducción de daños por inundaciones.

El valor esperado de daños anuales promedio de las alternativas 3, 4, 5 y 6 es de Bs. 26.608,34.

- Cálculo de los porcentajes de reducción de daños:

% de reducción de daños funcionando sólo el embalse Yacambú.

$$\% = \frac{73.383,57 - 70.388,65}{73.383,57} = 4,08\%$$

% de reducción de daños funcionando los embalses Yacambú y Dos Bocas.

$$\% = \frac{73.383,57 - 26.608,34}{73.383,57} = 63,74\%$$

Como se observa, los daños por inundación en las áreas agrícolas adyacentes al río Acarigua, se podrán reducir en un 4,08% funcionando sólo el embalse Yacambú y en un 63,74% funcionando simultáneamente los embalses Yacambú y Dos Bocas.

En la Tabla 19, se presentan los porcentajes de atenuación de picos en la estación Puente Acarigua, calculados a partir de las crecientes simuladas con el modelo Stanford IV, versión National Weather Service. Según estos resultados, al entrar en funcionamiento el embalse Yacambú, las crecientes en la estación Puente Acarigua se reducirán entre 0,2% y 11,0% dependiendo del período de retorno de la creciente, y al entrar en funcionamiento los embalses Yacambú y Dos Bocas, las crecientes se reducirán entre 23,7% y 62,0%. Al comparar estos resultados con los presentados por FUDECO (1978), se observa una notable diferencia, debido al uso de una metodología distinta a la desarrollada en este estudio.

Discusión de los Resultados

A continuación se presenta una discusión de los resultados obtenidos en el estudio.

La reducción de los picos de las crecientes en la estación Puente Acarigua, por el efecto amortiguador de los embalses Yacambú y Dos Bocas, es índice del buen funcionamiento de la subrutina EMBAL, incorporada al modelo Stanford IV, para simular el tránsito de crecientes a través de los embalses propuestos. En los resultados se puede apreciar que el embalse Dos Bocas tendrá un mayor efecto amortiguador de las crecientes, que el embalse Yacambú, por su mayor tamaño y su ubicación dentro de la cuenca.

Los resultados obtenidos en las primeras corridas del modelo de tránsito dinámico en planicies inundables, indican la existencia de problemas de inestabilidad del modelo, en el trayecto del río donde la sección transversal del cauce es del tipo trenzada. Al modificar las secciones trezadas por secciones equivalentes de un solo cauce, e introducir este cambio en la entrada de datos del modelo, los resultados del tránsito de crecientes con períodos de retorno entre 50 y 1000 años fueron aceptables, ya que no presentaron pro-

blemas de inestabilidad. Por el contrario, los resultados de los tránsitos de crecientes con períodos de retorno mayores de 1000 años, indicaron problemas de inestabilidad del modelo, motivado a los fuertes cambios en los valores de caudales del hidrograma utilizado.

Los resultados finales de los tránsitos de crecientes, se obtuvieron al variar en la entrada de datos, el valor del factor de ponderación TETA, propio del método numérico de solución del modelo. El valor inicial de 0,55 se fue incrementando en la medida que las crecientes aumentarían en magnitud, hasta un valor de 0,95 para la mayor creciente transitada, reduciéndose el problema de inestabilidad del modelo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se señalan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

Conclusiones

1. Los picos de las crecientes en la estación Puente Acarigua se reducen entre 0,2% - 11,0% funcionando sólo el embalse Yacambú y entre 23,7 - 62,0% funcionando simultáneamente los embalses Yacambú y Dos Bocas.
2. En el trayecto del río, donde las secciones son del tipo trezado, el modelo de tránsito dinámico en planicies inundables presenta problemas de inestabilidad.
3. Al variar entre 0,55 y 0,95 el factor de ponderación TETA, propio del método numérico de solución del modelo de tránsito dinámico en planicies inundables, se reducen los problemas de inestabilidad de dicho modelo.
4. Los daños por inundaciones en las áreas agrícolas adyacentes al río Acarigua, se reducen en un 4,08% funcionando sólo el embalse Yacambú, y en un 63,74% funcionando simultáneamente los embalses Yacambú y Dos Bocas.

Recomendaciones

1. Utilizar diferentes niveles de embalses, al evaluar su efecto en el control de crecientes, mediante el uso del modelo de simulación hidrológica Sranford IV.
2. Hacer variar el valor del factor TETA dentro del modelo de tránsito dinámico en planicies inundables, para evitar los problemas de inestabilidad del modelo.
3. Determinar la mancha de inundación y las pérdidas económicas por inundación del río Acarigua, desde la progresiva 9 + 500 hasta la progresiva 88 + 800, para conocer el efecto de los embalses Yacambú y Dos Bocas sobre el

control de inundaciones en toda la longitud del río.

4. Determinar la mancha de inundación del río Acarigua, considerando otras alternativas para el control de inundaciones, obras civiles como diques, rectificaciones, derivaciones y dragado.

5. Realizar una evaluación económica de las medidas alternativas para control de crecientes en el río Acarigua, incluyendo los beneficios y los costos de los demás usos de dichas medidas.

6. Probar otros métodos para determinar el perfil o mancha de inundación en el río Acarigua, con la finalidad de comparar los resultados, con los obtenidos con el modelo de tránsito dinámico en planicies inundables.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

CAPITULO VIII

LITERATURA CITADA

- Amisial, R. A. 1976. Nociones de Probabilidad con Aplicaciones en la Ingeniería. CIDIAT. Mérida, Venezuela 131 pp.
- _____. 1978. Distribuciones Teóricas Comunmente Utilizadas en Hidrología. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 64 pp.
- COPLANARH. 1976. La Problemática de las Inundaciones en Venezuela. Lineamientos Generales de una Metodología para el Estudio del Problema en Areas Rurales y Urbanas. Volumen I, Publicación N° 48. Caracas, Venezuela. 40 pp.
- Crawford, N. H. y R. K. Linsley. 1966. Digital Simulation in Hydrology. Stanford Watershed Model IV. Stanford University. Department of Civil Engineering, Tecnical Report N° 39. Stanford California 210 pp.
- Sempsey, C. 1968. The Effects of Geographical and Climatic Setting on the Economic Aduantages of Alternative Flood Control Measures. University of Kentucky, Water Resorces Institute Lexington, Kentucky.
- Duque, R. A. 1977. Análisis de un Modelo Hidrológico para la Simulación de la Escorrentía. Tesis presentada para optar al título de Magister Scientiae CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- _____. 1979. Modelo de Simulación Paramétrica Stanford IV. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Fread, D. L. 1976. Theoretical Devolpment of Implicit Dynamic Routing Model Dynamic Routing Seminar, Lower Mississippi River Forecast Center, Slidel, Lousiana.
- FUDECO, 1973. II^o Inventario de Aguas Superficiales de la Región Centro Occidental. Barquisimeto, Venezuela. 384 pp.
- _____. 1978. Estudio de Factibilidad del Embalse Dos Bocas. Volumen I. Barquisimeto, Venezuela.
- _____. 1978. Estudio de Factibilidad del Embalse Dos Bocas. Volumen II. Barquisimeto, Venezuela.

- Gallardo, G. R. 1978. Estudio de Alternativas para el Control de Crecientes en la Cuenca Baja del Río Chama. Tesis presentada para optar al título de Magister Scientiae. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- James, L.D. 1968. Economic Analysis of Alternative Flood Control Measures. University of Kentucky, Water Resources Institute. Lexington, Kentucky
- Kuiper, E. 1969. Desarrollo de los Recursos Hidráulicos. Trad. Hermes Espinoza e Hidalgo Guillén. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Linsley, R. K., M. A. KOHLER y L. H. Paulus. 1967. Hidrología para Ingenieros. Mc. Graw-Hill. New York. 350 pp.
- Mogollón, J. R. 1979. Simulación Hidrológica para el Estudio de Planicies Inundables. Tesis presentada para optar al título de Magister Scientiae CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Uzcátegui, G. 1976. Hidrología General. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Venezuela. Ministerio de Agricultura y Cría. Región Centro Occidental. Coordinación Programa Catastro. 1978. Uso Actual de la Tierra del Estado Portuguesa. Acarigua. Venezuela.
- Venezuela, Ministerio de Agricultura y Cría. Centro de Investigaciones Agropecuarias de la Región Centro Occidental. 1980. Informe Técnico sobre Costos de Producción por Hectáreas Estimados para Empresas Campesinas en el Estado Portuguesa. Araure. Venezuela.
- Venezuela, Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Dirección de Información Básica. División de Hidrología. 1976. Estudio Hidrológico del río Acarigua en Dos Bocas. Caracas. Venezuela.
- Venezuela, Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Dirección de Información Básica. División de Hidrología 1975. Estudio Hidrológico del Río Yacambú en Paso Angostura. Caracas. Venezuela.

