TC454
S55

APLICACION DE TECNICAS DE OPTIMIZACION AL DISEÑO DE UN SISTEMA HIDRAULICO DE PROPOSITOS MULTIPLES

Por

Cláudio Simões Barbosa

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

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

SERBIULA - TULIO FEBRES CORDERO



CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL
DE AGUAS Y TIERRAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida - Venezuela
1975

17 JUL. 1978
BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

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

A G R A D E C I M I E N T O

Al Gobierno de Venezuela que, a través del programa de becas de la Oficina Central de Coordinación y Planificación (CORDIPLAN), ha posibilitado mi participación en el Curso de Postgrado del CIDIAT y la realización del presente estudio.

Al Dr. Germán Uzcátegui Briceño, Director Nacional del CIDIAT, quien ha dado completo apoyo material para la ejecución de este trabajo.

A la Universidad de Los Andes por permitir la intensiva utilización de los servicios de su Centro de Computación.

Especial agradecimiento y admiración, además de mi manifestación de aprecio, al Dr. Roger Amisial, Profesor Guía, quien ha dedicado con interés numerosas horas de orientación a la elaboración del estudio.

Al Ing. Orlando Puleo, quien ha colaborado, incluso en horas nocturnas, en la lucha contra los errores de computación.

Al Dr. Helios Silvestre, Jefe del Grupo de Análisis de Sistemas de la Dirección General de Recursos Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas, por sus esclarecimientos y colaboración en la utilización del programa MPS/360 en la computadora del MOP

A mis amigos y compañeros, Ing. Gustavo Piñeiro Cuevas, Ing Luis Francisco López e Ing, Marco Polo Rivero por sus informaciones técnicas y constantes palabras de aliento.

A mi amigo, Arquitecto Luis Eduardo Dugarte, quien ha colaborado en el dibujo de algunas figuras .

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

A todo el personal técnico y administrativo del CIDIAT y de la Universidad de Los Andes, que directa o indirectamente haya colaborado en la realización del presente estudio.

La entrega oportuna de este trabajo se logró gracias al extraordinario esfuerzo final realizado por el Departamento de Publicaciones del CIDIAT. La amable Srta. Magda León Burguera y el diligente Sr. Abdón Saavedra Sosa, han contribuido de forma decisiva en la mecanografía y reproducción, respectivamente, del material aquí presentado.

A mi amiga Ingº. Marlene Arias de Baptista y el Ingº. Luis Rázuri Ramírez, por haber realizado las revisiones para la versión definitiva de este trabajo, que ha sido mecanografiado por la gentil Sra. Nhora C. de Berrios .

A los Profesores, Dr. Germán Uzcátegui Briceño, Dr. Kousoum S. Sakhan y Dr. Roger Amisial, mi reconocimiento por su participación en el Comité de Tesis.

A la heróica Sra. María Simões Barbosa, mi adorada madre, para quien jamás habra suficientes palabras de agradecimiento.

Cláudio Simões Barbosa

Mérida, Venezuela
Mayo de 1975

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

C O N T E N I D O

Página

Agradecimiento..... ii

Lista de Tablas..... xi

Lista de Figuras..... xivv

Lista Parcial de Símbolos..... xvii

Resumen..... xxiii

Capítulo

I INTRODUCCION..... 1

Descripción del Sistema Guanare-Masparro..... 1

Antecedentes..... 4

Objetivos..... 5

General..... 5

Específicos..... 5

Importancia del Estudio..... 6

Presentación del Trabajo..... 7

Sistemas de Computación Utilizados..... 9

II DESCRIPCION DE LOS MODELOS DETERMINISTICO Y ESTOCASTICO DE PROGRAMACION LINEAL

Introducción..... 10

Terminología Utilizada..... 12

Planteamiento Determinístico..... 14

Planteamiento Estocástico..... 19

Resumen..... 32

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Capítulo	Contenido (continuación)	Página
III	DESCRIPCION DEL MODELO ESTOCASTICO DE PROGRAMACION SEPARABLE.....	35
	Introducción.....	35
	Terminología Utilizada.....	36
	Regla de Decisión.....	37
	Función Objetiva.....	39
	Restricciones.....	40
	Obtención del Volumen Optimo T.	40
	Seguridad del Embalse.....	46
	Continuidad.....	51
	Resumen.....	52
IV	OBTENCION DE LOS DATOS Y ESPECIFICACIONES PARA LA ADAPTACION DE LOS MODELOS AL SISTEMA MASPARRO.....	53
	Datos de Escorrentía	53
	Ajuste a una Distribución Log-Normal.....	53
	Demanda de Riego.....	59
	Derechos de Agua.....	60
	Volumen Muerto del Embalse.....	65
	Control de Avenidas.....	65
	Volúmenes de Almacenamiento Necesarios.....	65
	Pre Requerimientos.....	66
	Datos de Escorrentía en el Período Seco del Año.....	66

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Capítulo	Contenido (continuación).	Página
	Precipitación Directa sobre el Embalse.....	66
	Datos Mensuales de Evaporación...	69
	Datos Mensuales de Escorrentía en el Año más Seco.....	69
	Volúmenes Mensuales de Demanda Bruta de Riego.....	69
	Volúmenes Mensuales de Derechos de Agua.....	69
	Curva de Elevación-Capacidad.....	71
	Area Media del Espejo de Agua en el Embalse.....	71
	Entradas.....	72
	Datos Mensuales de Escorrentía...	73
	Hidrograma Unitario.....	73
	Caudal Base Estimado.....	73
	Curva Elevación-Capacidad.....	76
	Gasto Efluente Inicial por el Aliviadero.....	77
	Cota Estimada de la Cresta del Aliviadero.....	77
	Anchura del Aliviadero.....	80
	Programas de Computación.....	82
	Ajuste de los Datos Máximos de Escorrentía a una Distribución Gumbel.....	82
	Obtención de los Hidrogramas Afluentes al Embalse.....	83

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Capítulo	Contenido (continuación).	Página
	Tránsito de las Avenidas de Diseño por el Embalse.....	85
	Capacidad del Cauce.....	87
	Resumen.....	91
V	APLICACION DE LOS MODELOS DETERMINISTICO Y ESTOCASTICO DE PROGRAMACION LINEAL AL SISTEMA MASPARRO.	93
	Introducción.....	93
	Aplicación del Modelo Determinístico.	
	Restricciones.....	95
	Aplicación del Modelo Estocástico....	104
	Restricciones.....	104
	Resumen.....	111
VI	APLICACION DEL MODELO ESTOCASTICO DE PROGRAMACION SEPARABLE AL SISTEMA MASPARRO.	113
	Introducción.....	113
	Datos Económicos.....	114
	Costos del Proyecto.....	114
	Costo de la Presa, C1.....	115
	Costo de los Canales y Estructuras de Toma, C2.....	116
	Costo de Operación y Mantenimiento, C3	117
	Beneficios del Proyecto.....	117
	Función Objetiva.....	118

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Capítulo	Contenido (continuación):	Página
	Restricciones.....	120
	Obtención del Volumen T.....	120
	Seguridad del Embalse.....	121
	Limitación Agrológica.....	126
	Restricción Adicional.....	127
	Resultados.....	127
	Resumen.....	128
VII	MODELO DE MINIMIZACION DE COSTOS DEL USO CONJUNTO DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA.	
	Introducción.....	130
	Desarrollo del Sistema.....	131
	Agua Subterránea.....	135
	Capacidad y Recarga del Acuífero..	135
	Balance de las Reservas del Acuífero.....	137
	Costos del Agua Subterránea.....	139
	Costos Fijos.....	140
	Costos Variables.....	140
	Agua Superficial.....	141
	Costos del Agua Superficial.....	142
	Terminología Utilizada.....	148
	Función Objetiva.....	151
	Restricciones.....	156
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Primer Año.....	156

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Capítulo	Contenido (continuación).	Página
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Segundo Año....	163
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Tercer Año.....	165
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Cuarto Año.....	166
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Quinto Año.....	168
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Sexto Año.	170
	Construcción del Embalse empezando al Inicio del Séptimo Año....	172
	Variables de Definición.....	174
	Característica del Modelo.....	184
	Resultados.....	185
	Agua Superficial.....	186
	Capacidades Optimas.....	186
	Operación del Embalse.....	187
	Agua Subterránea.....	189
	Participación Porcentual.....	197
	Resumen.....	200
VIII	MODELO DE MAXIMIZACION DE BENEFICIOS DEL USO CONJUNTO DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA CON APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO.	
	Introducción.....	203

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Capítulo	Contenido (continuación)	Página
	Desarrollo del Sistema.....	203
	Terminología Utilizada.....	205
	Unidades.....	208
	Función Objetiva.....	208
	Sistema de Riego.....	209
	Agua Superficial.....	210
	Agua Subterránea.....	211
	Control de Inundaciones.....	212
	Energía.....	216
	Restricciones.....	221
	Resumen.....	227
IX	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	230
	Conclusiones.....	230
	Recomendaciones.....	237
Literatura Citada.....		242
Apéndice A.....		
Apéndice B.....		
Apéndice C.....		
Apéndice D.....		
Curriculum Vitae.....		

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Página
2. 1	Valores de la Distribución Acumulada Normal Tipificada.....	25
4. 1	Río Masparro en Puente Masparro. Gastos Medios Mensuales en m^3/seg.....	54
4. 2	Río Masparro en Puente Masparro. Volúmenes Escurridos Mensuales en $10^6 m^3$.	55
4. 3	Río Masparro en Puente Masparro. Gastos Máximos Instantáneos en m^3/seg...	56
4. 4	Río Masparro en Puente Masparro. Volúmenes Escurridos Anuales (VE) en $10^6 m^3$. Gastos Máximos Instantáneos (GM) en m^3/s.	57
4. 5	Nomenclatura Utilizada en la Figura 4.3	68
4. 6	Estación Climatológica La Marqueseña. Precipitaciones Mensuales Medias (PREC) en mm. Evaporación sobre el futuro embalse (EVAP) en mm.....	70
4. 7	Balance Hidrológico para la Estimación de la Cota de la Cresta del Aliviadero.	78
4. 8	Resultados Obtenidos en el Programa de Ajuste de los Datos Máximos de Escorrentía del Río Masparro a una Distribución Gumbel.....	84

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla	Título	Página
4. 9	Resultados Obtenidos en el Programa de Tránsito de Avenidas por el Embalse.....	88
5. 1	Sistema Masparro. Necesidades Mensuales de Agua, q_i	94
5. 2	Río Masparro en Puente Masparro. Máximos y Mínimos Volúmenes Escurridos Mensuales.....	96
5. 3	Resultados Obtenidos en el Programa de Ajuste de los Datos de Volúmenes Escurridos Mensuales del Río Masparro a una Distribución Log-Normal.....	105
7. 1	Sistema Masparro. Período de Desarrollo del Sistema. Necesidades de Agua.	133
7. 2	Sistema Masparro. Balance de las Reservas del Acuífero.....	138
7. 3	Río Masparro en Puente Masparro-Sistema Masparro. Máximos y Mínimos Volúmenes Escurridos Mensuales. Períodos de Registro y Vidas Utiles Correspondientes a cada Alternativa de Inicio de la Construcción del Embalse. Volumen Muerto Necesario.....	143
7. 4	Ecuaciones del Costo Actualizado del Agua Superficial en Función de la Capacidad del Embalse.....	150

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla	Título	Página
7. 5	Sistema Masparro. Contribución del Agua Subterránea.....	199
8. 1	Ejemplo para la Obtención de los Beneficios del Control de Inundaciones. Mes de Enero.....	213

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1. 1	Ubicación del Sistema Guanare-Masparro en Venezuela.....	2
1. 2	Plano de Conjunto del Sistema Guanare-Masparro.....	3
1. 3	Río Masparro en Sitio de Presa.....	8
2. 1	Distribución Normal Tipificada.....	23
2. 2	Ajuste Gráfico a una Distribución Log-Normal.....	28
3. 1	Interpretación de la Regla de Decisión.....	37
3. 2	Representación Gráfica de la Función $(\frac{1-a}{1+a})^{1/2}$	45
3. 3	Representación Gráfica de la Función $(\frac{1-a}{a})$.....	49
4. 1	Perfil del Suelo Ilustrando el caudal de Retorno.....	61
4. 2	Esquema del Sistema Masparro Utilizado en la Determinación de los Derechos de Agua.....	62
4. 3	Esquema para la Obtención de los Volúmenes V de almacenamiento para el Control de Crecidas.....	67

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura	Título	Página
4.4.	Curvas de Elevación-Capacidad y Elevación-Area del Espejo de Agua.....	12
4. 5	Hidrograma Unitario del Río Masparro.	74
4. 6	Curva de Descenso Compuesta.....	75
4. 7	Curvas de Iteración para el Tránsito de Avenidas por Embalses.....	86
4. 8	Hidrogramas Afluente y Efluente.....	87
6. 1	Ilustración del Método Delta.....	123
7. 1	Esquema Indicativo de las Distintas Alternativas para el Inicio del la Construcción del Embalse.....	139
7. 2	Esquema Ilustrativo del Inicio de la Operación del Embalse para las Distintas Alternativas.....	152
7. 3	Esquema Ilustrativo del Programa de Inversiones y Gastos de Operación y Mantenimiento para el Agua Subterránea.....	152
7. 4	Esquema Ilustrativo para la Restricción 5.....	159
7. 5	Costos del Proyecto para las Distintas Alternativas.....	185 a.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura	Título	Página
7. 6.	Uso Conjunto del Agua Superficial y Subterránea, Alternativas	190
7. 7	Participación Porcentual del Agua Subterránea.....	198
8.1.1	Relación entre Nivel y Descarga del Río.....	214
8.1.2	Relación entre Nivel y Daños del Río.	214

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA PARCIAL DE SIMBOLOS

a	parámetro de decisión,
a_m	fracción de la capacidad del embalse correspondiente al volumen muerto del mismo,
a_o	fracción de la capacidad del embalse con que se inicia la operación del mismo,
AR	área total bajo riego,
B	valor actualizado del beneficio bruto resultante de la entrega anual de una unidad de volumen para consumo,
B_i, b_i	parámetro de decisión relativo al mes i,
BC	Valor actualizado del beneficio atribuible al control de inundaciones,
BEN	Valor actualizado del beneficio neto del Sistema,
BG	Valor actualizado del beneficio atribuible a la producción de energía hidroeléctrica,
BR	Valor actualizado del beneficio atribuible al sistema de riego,
C	Capacidad del embalse, también valor actualizado del costo total, por unidad de volumen, de las obras relativas al aprovechamiento del agua superficial,
c	capacidad del embalse,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

CCH	valor actualizado del costo de la central hidroeléctrica,
CG	valor actualizado del costo de producción de energía hidroeléctrica,
COSTO	valor actualizado del costo total del proyecto,
COSTSUB	valor actualizado del costo total del agua subterránea en el proyecto,
COSTSUP	valor actualizado del costo total del agua superficial en el proyecto,
DBR	demanda bruta de riego,
DER	derechos de agua,
Dem	demanda de riego por unidad de área,
Der	derechos de agua por unidad de área.
E	indicador del valor esperado de una distribución probabilística,
E_t	energía hidroeléctrica producida en el mes t,
$F^{-1}(\alpha)$	indicador del percentil de orden α de una distribución probabilística,
FT	factor técnico de producción de energía hidroeléctrica,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

f_k factor de valor presente para k años de interés a la tasa de interés del 8% al año,

f_k factor de valor presente para k anualidades a la tasa de interés del 8% al año,

ff_k factor de valor futuro para k años de interés a la tasa de interés del 8% al año,

f_i volumen mácimo permisible cedido por el embalse en el mes i,

F_{R_i} función de distribución acumulada relativa a los datos de escorrentía correspondientes al mes i,

H altura efectiva de caída para producción de energía hidroeléctrica,

i índice que identifica las variables que asumen valores característicos para los distintos meses del año, también indicador de un determinado año en el horizonte de un modelo,

k capacidad del embalse,

K_i volumen máximo de almacenamiento en el mes i para un embalse desprovisto de borde libre para el control de avenidas,

k índice que identifica un determinado año en el horizonte de un modelo,

n número total de año en el horizonte de un modelo,

p indicador de probabilidad, también potencia hidroeléctrica,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

PA	producción anual de un pozo,
q_i	necesidades de agua en el mes i del año, también volumen aportado al embalse durante el año i,
R_i	variable aleatoria correspondiente al volumen probable aportado al embalse durante el mes i ,
R_t, r_t	volumen aportado al embalse durante el mes t,
RA	recarga natural anual del acuífero,
r_i^{α}	percentil de orden α de una distribución probabilística,
$S_{mín}$, $s_{mín}$	volumen muerto del embalse,
S_t, s_t	almacenamiento en el embalse al final del mes t,
SBCB	saldo del balance de costos y beneficios conocidos en una determinada fase de un proyecto hidráulico,
SS_k	almacenamiento en el acuífero al final del año k,
SS_o	almacenamiento inicial en el acuífero,
s_i	almacenamiento en el embalse al final del año i,
s_o	almacenamiento inicial en el embalse,
T	volumen anual óptimo a ser cedido por el embalse,
t	índice que identifica el valor de una variable pa-

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

	ra cualquier mes de cualquier año a lo largo del horizonte de un modelo,
V	indicador de la varianza de una distribución probabilística,
V_i, v_i	volumen correspondiente al borde libre necesario en el embalse al final del mes i para control de avenidas en el mes i + 1,
$VT_{máx}$	volumen máximo turbinable en un mes cualquiera,
VT_t	volumen turbinado durante el mes t
X_t, x_t	volumen total de agua a ser cedido por el embalse durante el mes t,
XSk	volumen total bombeado del acuífero durante el año k,
xs_t	volumen total bombeado del acuífero durante el mes t ,
y_i	volumen total de agua a ser cedido por el embalse durante el año i,
z	variable reducida o tipificada de una distribución probabilística,
$z(\alpha_i)$	percentil de orden α de la distribución probabilística relativa a los datos de escorrentía correspondientes al mes i,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

LISTA PARCIAL DE SIMBOLOS (continuación)

α nivel de probabilidad fijado para que cumpla una determinada restricción de un modelo ,

σ indicador de la desviación típica de una distribución probabilística.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

RESUMEN

Aplicación de Técnicas de Optimización al Diseño de un Sistema Hidráulico de Propósitos Múltiples

por

Cláudio Simões Barbosa

Universidad de Los Andes, 1975
Facultad de Ingeniería Civil
Profesor Guía. Dr. Roger A. Amisial

Un aspecto que ha influido decisivamente en la aplicación de las técnicas de optimización al planeamiento de los recursos hidráulicos es el hecho de enfocar el desarrollo de una cuenca en forma integral, dada la creciente escasez del recurso agua y la actual y general aceptación del Derecho Público como legítimo instrumento determinante del uso del agua.

Actualmente se desarrolla en Venezuela el proyecto Guanare-Masparro. La inmensa potencialidad de este Sistema constituye una excelente oportunidad para estudiar conjuntamente sus alternativas de aprovechamiento múltiple mediante el Análisis de Sistemas. En este trabajo se ilustra esta posiblilidad mediante el estudio del Sistema Masparro sirviendo a los propósitos principales de riego, control de inundaciones y calidad del agua. En primer lugar se ha estudiado el aprovechamiento exclusivo del agua superficial mediante la programación lineal. Este estudio ha sido realizado mediante el criterio de minimización de la capacidad del embalse según los enfoque determinístico y estocástico. La utilización del agua superficial también ha sido estudiada mediante un modelo estocástico de programación separable, según el criterio de maximización de beneficios. En una segunda etapa se

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ha introducido el agua subterránea como fuente de agua para riego, manteniendo los propósitos citados, según el criterio de minimización de costos. A este estudio se ha incluido el planteo del aprovechamiento hidroeléctrico del río Masparro con un modelo de maximización de beneficios netos. Se ha puesto de manifiesto las ventajas y limitaciones de los diferentes modelos, criterios y enfoques utilizados, en particular las ventajas del enfoque estocástico sobre el determinístico. Se ha enfatizado la conveniencia del modelo de programación separable y del criterio de maximización de beneficios netos para encarar el desarrollo hidráulico con fines múltiples.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

CAPITULO I

INTRODUCCION

Descripción del Sistema Guanare-Masparro

Este sistema comprende la extensa área ubicada entre los ríos Guanare, Tucupido, Boconó y Masparro, dentro de la Región 4, Llanos Centrales y Occidentales, del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. La situación geográfica de esta zona en el territorio venezolano es ilustrada en la Figura 1.1. Esta región es una de las más importantes del país desde el punto de vista agropecuario, con un millón de hectáreas de tierra de buena calidad.

El plan de conjunto del área en estudio puede ser observado en la Figura 1.2. Los ríos principales que atraviesan esta área son originarios de la región andina que al llegar al llano, salen periódicamente de sus cauces, inundando parte de esta zona, durante un largo período del año. La deficiencia local de drenaje contribuye a agravar el problema.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

El objetivo principal del proyecto es el aprovechamiento de 350.000 Ha. de tierra mediante la construcción de presas en los ríos Guanare, Tucupido, Boconó y Masparro, con la finalidad de abastecimiento de agua para riego y de control de inundaciones.

El proyecto incluye el aprovechamiento hidroeléctrico del río Boconó, mediante la instalación de una planta de 60.000 KW. El aprovechamiento hidroeléctrico de las demás presas está en fase de estudio por la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico, CADAFE (Gabaldón, 1974).

El Ministerio de Obras Públicas también considera la posibilidad de la utilización del agua subterránea en el proyecto de riego.

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

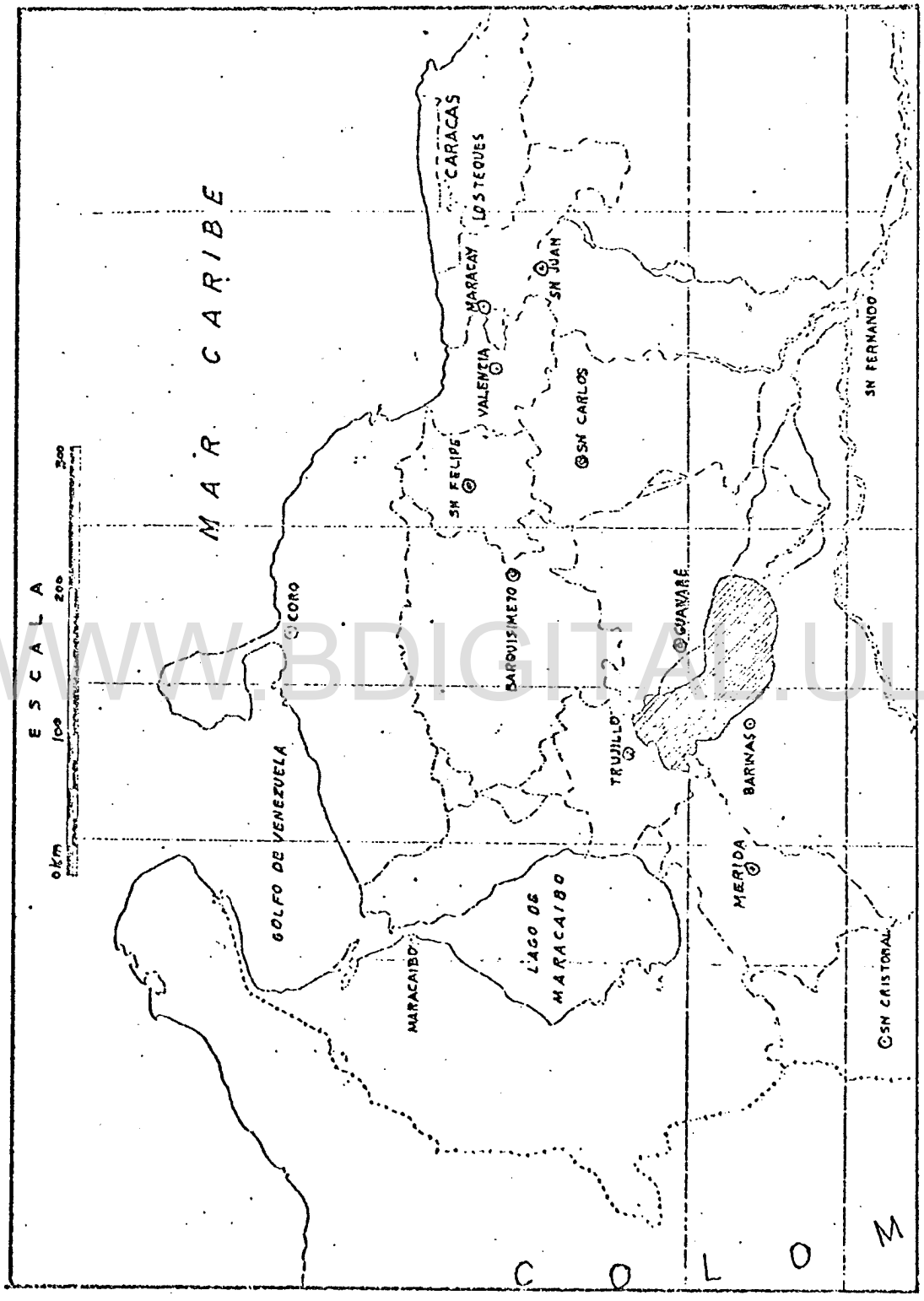


Figura 1.1. Ubicación del Sistema Guanare-Masparro en Venezuela. Tomado de Flores (1974).

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

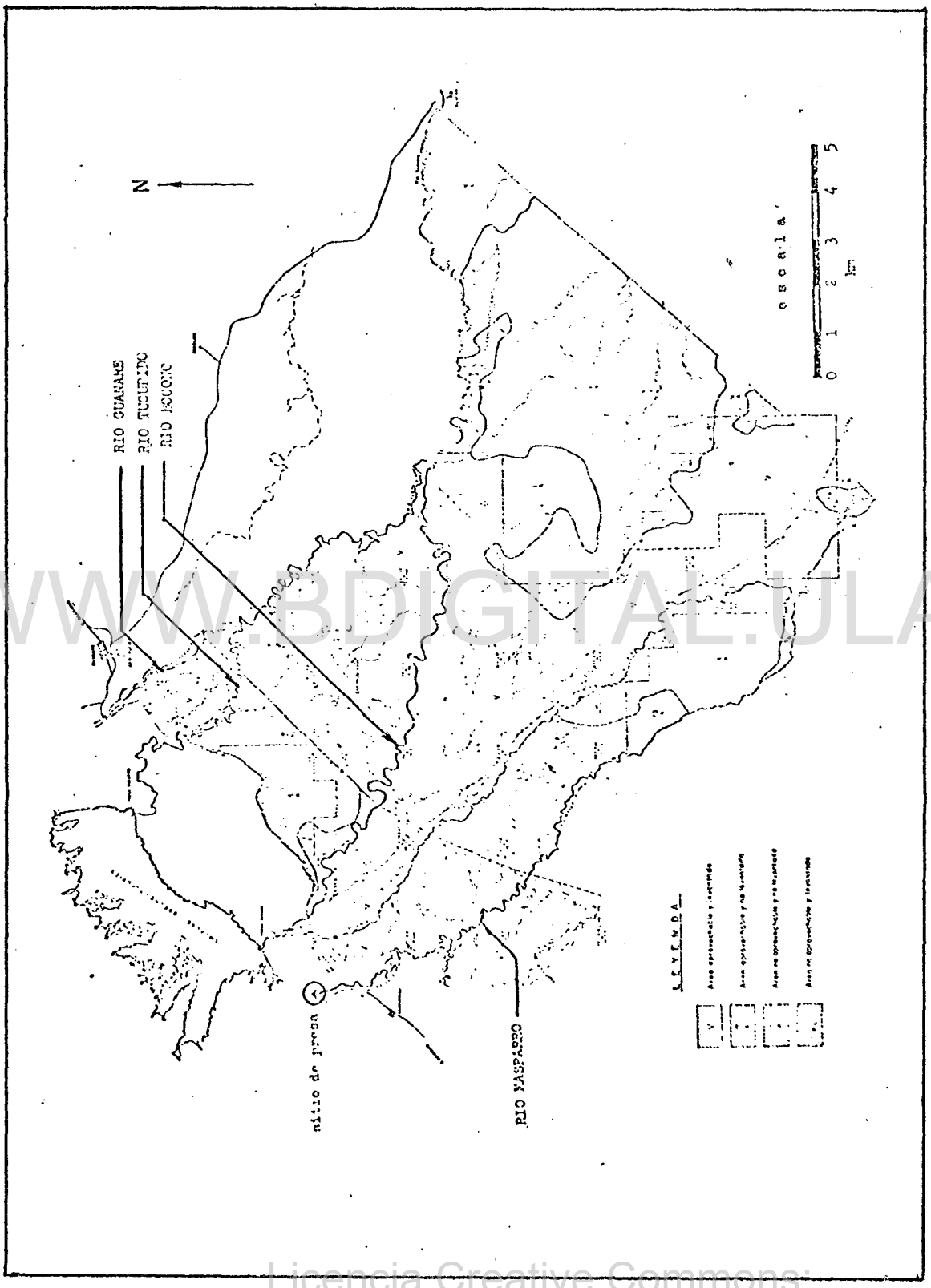


Figura 1.2. Plano de Conjunto del Sistema Guanare-Masparro. Tomado de OTEHA (1967).

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Antecedentes

Los primeros informes relativos al desarrollo de la zona, se refieren a su aprovechamiento parcial, mediante la utilización exclusiva de los ríos Boconó y Tucupido.

Las investigaciones llevadas a efecto por la División de Hidrología del MOP (Ramos, 1970), hicieron constar el gran potencial de las reservas de agua subterránea en el área. Posteriormente el MOP (1971) analizó detalladamente la hidrogeología en la región ubicada entre los ríos Boconó y Masparro. Este estudio que comprende una superficie de 50.000 Ha, fue complementado con investigaciones geofísicas realizadas por GEOSCA (1973). OTEHA (1970) y CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971) realizaron estudios de disponibilidad y costos de agua superficial para los Sistemas Boconó-Tucupido y Boconó-Masparro, respectivamente. Flores (1974), basándose en los informes citados, elaboró un estudio para determinar la mejor combinación del uso conjunto del agua subterránea y superficial. A tal fin aplicó un algorítmo simplificado mediante la programación lineal, con el propósito de minimizar los costos de abastecimiento de agua para el proyecto de riego.

La reciente decisión de desarrollo del Sistema Guanare-Masparro en su totalidad (MOP, 1974) se debe en gran parte a la Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, formada por representantes del Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Agricultura y Cría y de otras instituciones nacionales e internacionales.

La factibilidad del uso de métodos de optimización al desarrollo de los recursos hidráulicos fue enunciada por Maass et al (1962), quienes utilizaron la programación lineal para seleccionar una entre varias alternativas de uso y fuentes de agua en una zona. San Martín y Viso (1966) ilustraron la posiblidad de

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

aplicar el método de Maass et al (1962) al desarrollo hidráulico en Venezuela, utilizando la cuenca alta del río Guanare, con una superficie de 1.310 Km^2.

Flores (1974) reconoció, que la formulación simplificada utilizada en sus análisis mediante la programación lineal para determinar la mejor combinación del uso conjunto de agua subterránea y superficial para el proyecto de riego, no era la más adecuada, en vista de que las funciones involucradas no eran todas lineales y debido también a la naturaleza estocástica de los fenómenos. El problema de las funciones no lineales puede ser solucionado para funciones convexas y medianamente cóncavas, mediante el empleo de la programación lineal separable (IBM, 1968).

Es necesario al considerar otros propósitos distintos al riego, tal que el control de inundaciones o análisis de la operación del Sistema, que se tomen en cuenta los aportes mensuales a los embalses. Estos aportes se pueden considerar usando métodos determinísticos o estocásticos. Los métodos estocásticos permiten introducir los aspectos probabilísticos de ciertos fenómenos, lo que se logra a través de la programación lineal estocástica.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es la aplicación de distintas técnicas de optimización para el diseño y operación de sistemas de abastecimiento de agua para riego, control de calidad del agua, control de inundaciones y aprovechamiento hidroeléctrico en el Sistema Masparro.

Los objetivos específicos son:

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

1. Identificar las diferentes fuentes y usos del agua en la zona en estudio;

2. Estudiar el problema del desarrollo integral del sistema mediante programaciones lineal y separable, según los enfoques determinístico y estocástico.

Importancia del Estudio

La importancia del estudio se pone de relieve en los siguientes puntos:

1. La utilización del Análisis de Sistemas en el desarrollo de los recursos hidráulicos constituye actualmente una necesidad, debido a que en la actualidad es una de las formas más racionales de lograr el estudio de aprovechamiento integral de una cuenca;

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

2. La información resultante de este trabajo, en Venezuela podría servir de ayuda a futuras decisiones con respecto al proyecto Guanare-Masparro;

3. La aplicación reciente de los modelos matemáticos al planeamiento, diseño y operación de los sistemas de recursos hidráulicos, hace que sean de uso limitado en los países en vías de desarrollo, los cuales cuentan con un número reducido de profesionales especializados en este campo. Este estudio podría ayudar a la divulgación de tales técnicas en América Latina;

4. Las angustiosas necesidades en los países en vías de desarrollo, muchas veces hacen que sean completamente olvidados en los planes, los principios básicos de protección del medio ambiente, tales principios deben ser toma

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

dos como normas en el planeamiento de los recursos hidráulicos. Este trabajo sirve como advertencia para que se eviten las desastrosas consecuencias ecológicas que ha registrado la experiencia en los países desarrollados.

Presentación del Trabajo

El presente trabajo enfoca la construcción y operación del embalse Masparro atendiendo a los propósitos citados. La Figura 1.3 ilustra la ubicación del sitio de presa designado por el MOP (1973).

En todas las etapas de este trabajo, la dilución del flujo de retorno de la zona de riego y la preservación de la vida acuática son considerados como compromisos a ser garantizados por el embalse.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En los Capítulos II y III, son presentados y discutidos modelos de programación lineal y separable, mediante los enfoques determinístico y estocástico, según distintos criterios de decisión. El Capítulo IV describe los procedimientos para la obtención de los datos y especificaciones necesarios para la adaptación de los modelos presentados al Sistema Masparro. Los dos Capítulos siguientes ilustran la aplicación de los modelos presentados. En el Capítulo VII se introduce el agua subterránea como alternativa de fuente de agua para riego, mediante el planteo y la aplicación de un modelo para la minimización de los costos del Sistema. Un modelo similar al anterior se plantea en el Capítulo VIII considerando el posible aprovechamiento hidroeléctrico del río Masparro, mediante el criterio de maximización de los beneficios netos del sistema. El último Capítulo se constituye de comentarios relativos a conclusiones y recomendaciones resultantes del estudio realizado.

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

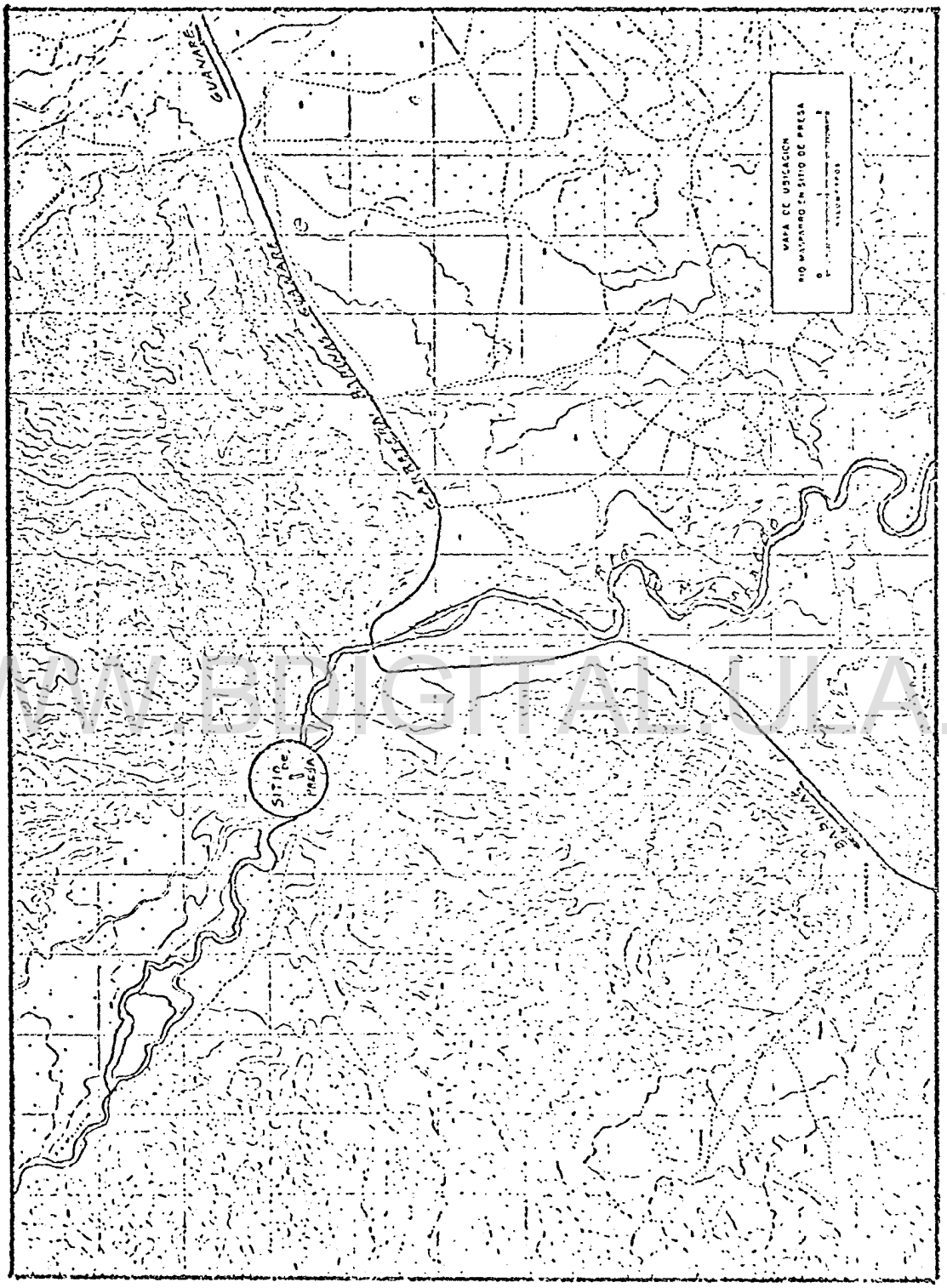


Figura 1.3. Río Masparro en Sitio de Presa. Tomado del MOP (1973).

WWW.BIBLIOTECA.UCLA.VE

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

Sistemas de Computación Utilizados

Para la ejecución de los programas en FORTRAN IV y para las aplicaciones del programa LPS/360 de la IBM (1969), se utilizó el Sistema IBM/360-40 del Centro de Computación de la Universidad de Los Andes. La aplicación del programa MPS/360 de la IBM (1968) ha sido realizada en el Sistema IBM/360-50 del Centro de Computación del Ministerio de Obras Públicas.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

CAPITULO II

DESCRIPCION DE LOS MODELOS DETERMINISTICO Y ESTOCASTICO DE PROGRAMACION LINEAL

Introducción

Los modelos propuestos por Revelle et al (1969), tienen por objetivo la minimización de la capacidad de un embalse de propósitos múltiples y la obtención de una regla general de operación del embalse, llamada Regla de Decisión Lineal. Aparentemente esta regla fue introducida por Charnes et al (1958), al estudiar un problema de producción de aceite refinado para calefacción, cuyo consumo tiene características estocásticas. Se estableció que la cantidad de aceite refinado en cada período era una función lineal de la demanda en el período anterior.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La Regla de Decisión Lineal, aplicada a un embalse, establece que el volumen total de agua cedido por el embalse, por medio de tomas, aliviaderos u otras estructuras en un determinado espacio de tiempo, es función del almacenamiento al final del período anterior y de un parámetro de decisión característico del período considerado,

$$x = s-b$$

donde,

x = cantidad total de agua cedida por el embalse en un período.
s = volumen de agua almacenado al final del período anterior.
b = parámetro de decisión característico del período considerado.

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

Como se podrá observar en el desarrollo del modelo, no se trata de un rígido postulado. De antemano se conoce la imposibilidad de pronosticar el comportamiento futuro de los fenómenos de la naturaleza. Por lo tanto, la regla se aplica a condiciones normales con respecto a las informaciones históricas disponibles o en estimaciones que en base a ellas pueden ser hechas. Se puede observar en la ecuación representativa de la regla, que no se toma en cuenta el volumen de agua aportado por el río en el período considerado. En consecuencia la regla no debe ser confundido con una ecuación de continuidad que sí considera el aporte referente a ese período. Sin embargo, es posible la ocurrencia de períodos en que el parámetro de decisión, obtenido por optimización, sea negativo,

$$x = s-(-b)$$

$$x = s+b$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Un valor negativo del parámetro de decisión significa que la cantidad de agua, s, almacenada en el embalse al final del período anterior, es inferior a la cantidad óptima de agua, x, a ser cedida en el período considerado. En este caso hay que contar con el volumen de agua aportado por el río en el período. Pero hay que considerar que existe la probabilidad de que este aporte en el futuro pueda resultar insuficiente para garantizar la cantidad óptima de agua, x, a ser cedida. En el planteo determinístico tal eventualidad puede presentarse en el futuro si los aportes en un mes son inferiores a todos los observados en el registro disponible. Entonces, si se adopta este análisis determinístico, uno debe estar preparado a aceptar las consecuencias de un aporte insuficiente durante un período.

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

Terminología Utilizada

El objetivo de la presa a ser dimensionada en los modelos determinístico y estocástico, es proveer un flujo efluente para dilución de desechos, abastecimiento de agua para consumo humano, recreación y control de inundaciones. Las necesidades de consumo aguas abajo de la presa, q_i, son conocidad y distintas para cada mes del año. La cantidad total de agua cedida por el embalse en un período t, de la vida útil de la obra, se designa por x_t.

Aguas abajo de la presa, son conocidos los límites máximos mensuales, f_i, para evitar inundaciones de las planicies y la erosión del cauce. Como se observará adelante, en términos reales, este planteamiento es cuestionable considerando la escala de tiempo en que el problema es tratado. Además el control de inundaciones determina la necesidad de un borde libre, v_i, al final de cada mes para control de avenidas en el mes siguiente.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Por razones de estética y recreación se establece la necesidad de un volumen mínimo de almacenamiento, s_{min}, válido para toda la vida útil de la obra.

Se dispone de n años de datos de escorrentía, o sea,12 n meses. El modelo es identificado por las siguientes variables:

i = índice que identifica las variables que asumen valores característicos para los distintos meses del año. Toma valores enteros de 1 a 12.

t = índice que identifica el valor de una variable para cualquier mes de cualquier año a lo largo de la vida útil de la obra. Toma valores enteros de 1 a 12n.

q_i = demanda de agua en el mes i del año.

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

fi = volumen máximo permisible cedido por el embalse durante el mes i del año.

v_i = volumen correspondiente al borde libre necesario al final del mes i para control de avenidas en el mes i+1.

b_i = parámetro de decisión relativo al mes i, a ser determinado.

r_t = volumen de agua aportado al embalse durante el mes t del período de vida útil de la obra.

s_t = almacenamiento al final del mes t, a ser determinado.

x_t = volumen total de agua cedido por el embalse durante el mes t, a ser determinado.

s_{min} = almacenamiento mínimo del embalse determinado por las necesidades de estética y recreación, conocido como una fracción a_m de la capacidad del embalse.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

s_o = almacenamiento al inicio de la operación del embalse conocido como una fracción a_o de la capacidad del embalse.

c = capacidad del embalse a ser determinada.

Las variables citadas, desde q_i hasta c son expresadas en unidades de volumen.

La relación entre t e i es dada por:

$i = t$	si	$t<12$
$i = 12$	si	$t=12k$
$i = t \pmod{12}$	si	$t>12$ y $t \neq 12k$

donde $k = 1,\ldots,n$, siendo n el número de años de registro.

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

Por ejemplo, para el 27º mes se tiene t = 27. El índice i se obtiene por la fórmula i=t(mod 12), ya que en este caso, t no es menor ni tampoco múltiplo de 12. El valor de i se obtiene como el resto de la división de t por 12. O sea, i=3 ya que 27= (12x2)+3. Este valor de i corresponde al mes de marzo de 3º año de la vida útil de la obra.

Planteamiento Determinístico

Las ecuaciones que gobiernan el modelo son,

1) la regla de decisión lineal, ya discutida,

$$x_t = s_{t-1} - b_i \qquad (2.1)$$

2) la ecuación de continuidad del sistema, que traduce el balance hidrológico debido al cambio de almacenamiento en el embalse de un período a otro,

$$s_t = s_{t-1} - x_t + r_t \qquad (2.2)$$

O sea, el almacenamiento al final de un período t es igual al almacenamiento al final del período anterior, menos la cantidad de agua cedida por el embalse durante el período, más el volumen aportado por el río durante el mismo período.

Combinando las ecuaciones (2.1)y (1.2) se obtiene:

$$s_t = b_i + r_t \qquad (2.3)$$

La ecuación (2.3) para el período inmediatamente anterior es,

$$s_{t-1} = b_{i-1} + r_{t-1} \qquad (2.4)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Sustituyendo la ecuación (2.4) en la regla de decisión lineal, ecuación (2.1), se obtiene,

$$x_t = b_{i-1} - b_i + r_{t-1} \qquad (2.5)$$

El conjunto de restricciones que traducen matemáticamente las limitaciones físicas y operacionales del sistema es representado por el siguiente conjunto de inecuaciones,

$$c - s_t \geq v_i \qquad (2.6)$$

$$s_t \geq s_{min} \qquad (2.7)$$

$$x_t \geq q_i \qquad (2.8)$$

$$x_t \leq f_i \qquad (2.9)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La restricción (2.6) significa que al final del mes t, el volumen vacío disponible debe ser superior o igual al volumen v_i previsto para contener las probables crecidas del próximo mes. La restricción (2.7) dice que el almacenamiento al final de cualquier mes t, tiene que ser igual o superior al volumen mínimo fijado por las necesidades estéticas y recreativas. La restricción (2.8) indica que la cantidad total de agua cedida por el embalse debe ser mayor o igual a las necesidades mensuales q_i prefijadas para consumo aguas abajo del embalse. La restricción (2.9) dice que la cantidad total de agua cedida por el embalse no debe sobrepasar los límites admisibles del cauce.

Sustituyendo las ecuaciones (2.3) y (2.5) en las cuatro inecuaciones, (2.6), (2.7), (2.8) y (2.9) y ubicando las incógnitas al lado izquierdo de las mismas se obtiene,

$$c - b_i \geq v_i + r_t \qquad (2.10)$$

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

$$a_m c - b_i \leq r_t \quad (2.11)$$

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - r_{t-1} \quad (2.12)$$

$$b_{i-1} - b_i \leq f_i - r_{t-1} \quad (2.13)$$

donde, $i = 1,\ldots,12$

$t = 1,\ldots,12n$

Considerando que cada una de estas restricciones se repite 12n veces, el problema presenta 4x12n restricciones para los n años de registro. Por ejemplo, si se tiene n=20 años, cada restricción se repite 12 veces para cada año de registro. De manera que se llega a 12x4= 48 restricciones para cada año. Luego, el número total de restricciones para 20 años de registro es de 12x4x20 = 960.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Sin embargo esta formulación puede ser grandemente simplificada al considerarse que en cada uno de los cuatro conjuntos de restricciones, siempre habrá una para cada mes i, que sería más restrictiva que las demás. En otros términos, una sola de las n restricciones correspondientes a un mes i es activa, mientras que las demás (n-1) son pasivas. En consecuencia, para todos los efectos, es lo mismo escribir,

$$c - b_i \geq v_i + \text{máx } r_{[i+12(k-1)]} \quad (2.14)$$

donde, $i = 1,\ldots,12$, $k = 1,\ldots,n$

$$a_m c - b_i \leq \text{mín } r_{[i+12(k-1)]} \quad (2.15)$$

donde, $i = 1,\ldots,12$, $k = 1,\ldots,n$

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

$$b_{i-1}-b_i \geq q_i\text{-mín } r_{[i-1+12(k-1)]} \qquad (2.16)$$

donde, $i = 1,\ldots,11$, $k = 1,\ldots,n$

$$b_{12}-b_1 \geq q_1\text{-mín } r_{[12+12(k-1)]} \qquad (2.17)$$

donde, $k = 1,\ldots,n$

$$a_o c-b_1 \geq q_1 \qquad (2.18)$$

$$b_{i-1}-b_i \leq f_i\text{-máx } r_{[i-1+12(k-1)]} \qquad (2.19)$$

donde, $i = 1,\ldots,11$, $k = 1,\ldots,n$

$$b_{12}-b_1 \leq f_1\text{-máx } r_{[12+12(k-1)]} \qquad (2.20)$$

donde, $k = 1,\ldots,n$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$a_o c-b_1 \leq f_1 \qquad (2.21)$$

En otros términos, en vez de utilizar las n inecuaciones para un mes, es suficiente plantear una sola inecuación, en la que r tenga,como valor, según el caso, el mayor o el menor aporte observado en ese mes durante los n años disponibles. Por lo tanto, para cualquier tiempo de registro relativamente largo, el modelo siempre tendrá 50 restricciones en vez de las 48n iniciales.

Las restricciones (2.18) y (2.21) son obtenidas combinando las expresiones (2.1) y (2.8) por una parte y (2.1) y (2.9) por otra parte, para el primer mes de operación del embalse. Esto se debe a que las restricciones (2.12) y (2.13) aplicadas al primer período de la operación del embalse se quedarían,

$$b_o-b_1 \geq q_1-r_o$$

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

y

$$b_o - b_1 \leq f_1 - r_o$$

No tiene sentido escribir los parámetros de decisión ni los aportes antes del inicio de la operación del embalse Considerando el carácter activo de esas restricciones, se las ha escrito según sus formulaciones originales expresadas por las inecuaciones (2.8) y (2.9) y sustituyendo x_t por su valor dado por la ecuación (2.1). Las restricciones (2.8) y (2.9) para el primer período de operación son,

$$x_1 \geq q_1$$

$$x_1 \leq f_1$$

La ecuación (2.1) para el primer mes toma la siguiente forma:

$$x_1 = s_o - b_1 = a_o c - b_1$$

Combinando estas últimas expresiones se obtiene:

$$a_o c - b_1 \geq q_1$$

$$a_o c - b_1 \leq f_1$$

El modelo se reduce a 50 restricciones y a 13 incógnitas, la capacidad y los 12 parámetros de decisión. Siendo todas las restricciones lineales, es posible aplicar la programación lineal para determinar la capacidad mínima del embalse y los valores de los parámetros que optimizan su operación.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Planteamiento Estocástico

Las restricciones examinadas anteriormente en el modelo de - terminístico, garantizarían la operación del embalse para todo el rango de observaciones pertinentes a los 20 años de registro disponibles. Por otro lado no pueden garantizar que los aportes futuros se queden dentro de este rango. Para cada mes habrá una probabilidad de 2/(n+1) de que ésto ocurra.

Sean los n valores observados, considerados como eventos aleatorios, componentes de una muestra de una población. Ordenando los datos en forma decreciente, la probabilidad empírica de que uno de estos valores sea sobrepasado por un elemento de la muestra, según la definición de Weibull es:

$$P = \frac{m}{n+1}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

donde,

p = probabilidad de ocurrencia de un valor igual o superior al valor observado de orden m.

m = número de orden de cada elemento de la muestra, o sea, m = 1,...,n.

n = número de elementos de la muestra.

La probabilidad (PM) de que el mayor elemento de la muestra (QM), de orden m = 1, sea igualado o sobrepasado por otro elemento (Q) de la muestra es,

$$PM = P\ (Q \geq QM) = \frac{1}{n+1}$$

Si los datos son ordenados en forma creciente, la fórmula de Weibull expresa la probabilidad de que cada elemento de la muestra no sea sobrepasado por cualquier otro elemento de esta muestra. Luego la probabilidad (Pm) de que ocurra un elemento cuyo valor es inferior al menor valor de la muestra (Qm), de orden m=1,

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

es,

$$P_m = P(Q \leq Qm) = \frac{1}{n+1}$$

Por lo tanto, la probabilidad (P), de que ocurra un aporte que no se quede dentro del rango de los datos disponibles, es la suma de la probabilidad de que este aporte sea superior al mayor valor observado, con la probabilidad de que sea inferior al menor valor observado,

$$P = PM+Pm = \frac{2}{n+1}$$

En vista de estas consideraciones, el planteamiento determinístico está sujeto a dos limitaciones:

1) El planteamiento determinístico no define explícitamente la confiabilidad con que se podrá operar el embalse mediante la regla de decisión lineal.

2) La confiabilidad del buen desempeño de la operación es fijada únicamente por el número de años de registro y no según el criterio de quien ha de tomar la decisión. Con el registro de n años, existe la probabilidad de $\frac{n-1}{n+1}$ de que los valores sean comprendidos entre el rango observado. Convendría dar al ejecutivo la oportunidad de incluír en el proceso de decisión su propio grado de creencia en ciertos eventos relacionados con el diseño.

En el planteamiento estocástico, el aporte en el mes i es tratado como una variable aleatoria, Ri, con la siguiente función de distribución acumulada,

$$F_{R_i}(r) = P(R_i \leq r)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

O sea, para cualquier gasto r, en un mes i, es posible estimar la probabilidad de que este gasto sea o no sobrepasado, examinándose la función de distribución acumulada correspondiente a este mes.

En el modelo estocástico, las restricciones son expresadas como limitaciones en el riego admisible de que falten los requerimientos de funcionamiento del embalse este riesgo es fijado por el proyectista.

Las condiciones para el funcionamiento del embalse son las mismas, cambiándose ahora únicamente los aportes históricos, r_t, por la variable aleatoria, R_i,

$$c-b_i \geq v_i+R_i \tag{2.22}$$

$$b_i \geq s_{mín}-R_i \tag{2.23}$$

$$b_{i-1}-b_i \geq q_i-R_{i-1} \tag{2.24}$$

$$b_{i-1}-b_i \leq f_i-R_{i-1} \tag{2.25}$$

Se escriben ahora las restricciones de acuerdo al grado de confiabilidad que uno desee.

Para la restricción (2.22), referente al borde libre para control de crecidas, se desea que ésta se verifique para una probabilidad α_1 correspondiente a un número grande de veces,

$$P[c-b_i \geq v_i+R_i] \geq \alpha_1.$$

o sea,

$$P[R_i \leq c-b_i-v_i] \geq \alpha_1 \tag{2.26}$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La hipótesis de que los R_i son variables aleatorias se basa en que no se pueden predecir con certeza en un mes dado. Además se supone que los datos de los distintos meses de los años de registro constituyen una muestra aleatoria, o sea, que existe completa independencia entre los elementos de esta muestra. En otros términos, es necesario que los coeficientes de autocorrelación entre los elementos de la muestra sean pequeños.

Según la definición de la función de distribución acumulada, es lo mismo escribir,

$$F_{R_i}(c-b_i-v_i) \geq \alpha_1$$

ó

$$P\left[R_i \leq c-b_i-v_i\right] \geq \alpha_1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Para la aplicación de esta restricción a la programación lineal, se utiliza en vez de esta formulación, subordinada a la probabilidad α_1, una formulación lineal equivalente, subordinada al porcentil $r_i(\alpha_1)$ de la distribución, correspondiente a α_1.

Esta conversión también se basa en las asunciones de la independencia entre los elementos R_i de la distribución probabilística, y en las hipótesis de que c, b_i y v_i son constantes.

Si, por ejemplo, la distribución de los R_i se ajustase a una distribución normal, de acuerdo a las hipótesis hechas, sería válido escribir,

$$P\left[\frac{R_i-E(R_i)}{\sigma(R_i)} \leq \frac{(c-b_i-v_i)-E(R_i)}{\sigma(R_i)}\right] \geq \alpha_1 \qquad (2.27)$$

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

donde,

$E(R_i)$ = valor esperado de los R_i

$\sigma(R_i)$ = desviación típica de la distribución de los R_i

El término en la parte izquierda de la expresión entre corchetes de la inecuación (2.27) es conocido como variable reducida o tipificada, z,

$$z = \frac{R_i - E(R_i)}{\sigma(R_i)}$$

o también factor de frecuencia de la distribución normal (Amisial, 1974).

Para cada elemento R_i se calcula la variable reducida correspondiente. Se obtiene entonces la probabilidad α_i correspondiente a R_i entrando con el valor de z calculado, en la curva de distribución normal tipificada, con media igual a cero y desviación típica igual a la unidad. En la Figura 2.1 se ilustra la distribución normal tipificada con la probabilidad α_i, de que z sea inferior o igual al nivel z (α_i) correspondiente.

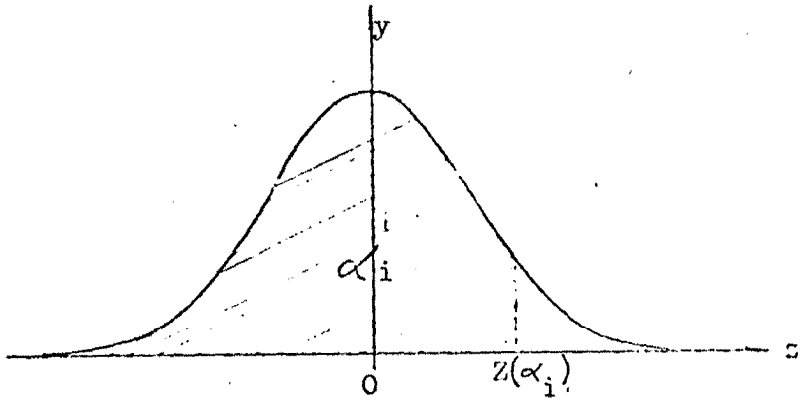


Figura 2.1. Distribución Normal Tipificada

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La ecuación que representa la curva de la Figura 2.1, ó función de densidad, expresa la ordenada de la curva para un determinado valor de z,

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad e^{-\frac{1}{2} z^2}$$

La probabilidad α_i de que la variable normal reducida z sea inferior a un valor de $z(\alpha_i)$ es dada por,

$$\alpha_i = P|z-z(\alpha_i)| = \int_{-\infty}^{z(\alpha_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad e^{-\frac{1}{2} z^2} \quad dz$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Esta probabilidad es representada por el área sombreada bajo la curva de la Figura 2.1. Las probabilidades así calculadas para la distribución normal tipificada se presentan en la Tabla 2.1 y se encuentran tabuladas en textos de estadística. El valor z (α) también es conocido como el percentil de orden α de la distribución.

Por lo tanto, para cada área correspondiente a una probabilidad fijada, α_K, habrá siempre uno y sólo un valor constante, $z(\alpha_K')$, para el cual se verifica la restricción,

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

Tabla 2.1

VALORES DE LA DISTRIBUCION ACUMULADA NORMAL TIPIFICADA

$$F_U(u) = P(U \leq u) = \int_{-\infty}^{u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2 z^2} dz$$

Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.500000	0.503989	0.507978	0.511966	0.515953	0.519939	0.523922	0.527903	0.531881	0.535856
0.1	0.539828	0.543795	0.547758	0.551717	0.555670	0.559618	0.563559	0.567495	0.571424	0.575345
0.2	0.579260	0.583166	0.587064	0.590954	0.594835	0.598706	0.602568	0.606420	0.610261	0.614092
0.3	0.617911	0.621719	0.625516	0.629300	0.633072	0.636831	0.640576	0.644309	0.648027	0.651732
0.4	0.655422	0.659097	0.662757	0.666402	0.670031	0.673645	0.677242	0.680822	0.684386	0.687933
0.5	0.691462	0.694974	0.698468	0.701944	0.705402	0.708840	0.712260	0.715661	0.719043	0.722404
0.6	0.725747	0.729069	0.732371	0.735653	0.738914	0.742154	0.745373	0.748571	0.751748	0.754903
0.7	0.758036	0.761148	0.764237	0.767305	0.770350	0.773373	0.776373	0.779350	0.782304	0.785236
0.8	0.788145	0.791030	0.793892	0.796731	0.799546	0.802337	0.805105	0.807850	0.810570	0.813267
0.9	0.815940	0.818589	0.821214	0.823814	0.826391	0.828944	0.831472	0.833977	0.836457	0.838913
1.0	0.841345	0.843752	0.846136	0.848496	0.850830	0.853140	0.855428	0.857690	0.859929	0.862143
1.1	0.864334	0.866500	0.868643	0.870762	0.872857	0.874928	0.876976	0.879000	0.881000	0.882977
1.2	0.884930	0.886860	0.888767	0.890651	0.892512	0.894350	0.896165	0.897958	0.899727	0.901475
1.3	0.903199	0.904902	0.906582	0.908241	0.909877	0.911492	0.913085	0.914657	0.916207	0.917736
1.4	0.919243	0.920730	0.922196	0.923641	0.925066	0.926471	0.927855	0.929219	0.930563	0.931888
1.5	0.933193	0.934478	0.935745	0.936992	0.938220	0.939429	0.940620	0.941792	0.942947	0.944083
1.6	0.945201	0.946301	0.947384	0.948449	0.949497	0.950529	0.951543	0.952540	0.953521	0.954486
1.7	0.955435	0.956367	0.957284	0.958185	0.959070	0.959941	0.960796	0.961636	0.962462	0.963273
1.8	0.964070	0.964852	0.965620	0.966375	0.967116	0.967843	0.968557	0.969258	0.969946	0.970621
1.9	0.971283	0.971933	0.972571	0.973197	0.973810	0.974412	0.975002	0.975581	0.976148	0.976705
2.0	0.977250	0.977784	0.978308	0.978822	0.979325	0.979818	0.980301	0.980774	0.981237	0.981691
2.1	0.982136	0.982571	0.982997	0.983414	0.983823	0.984222	0.984614	0.984997	0.985371	0.985738
2.2	0.986097	0.986447	0.986791	0.987126	0.987455	0.987776	0.988089	0.988396	0.988696	0.988989
2.3	0.989276	0.989556	0.989830	0.990097	0.990358	0.990613	0.990863	0.991106	0.991344	0.991576
2.4	0.991802	0.992024	0.992240	0.992451	0.992656	0.992857	0.993053	0.993244	0.993431	0.993613
2.5	0.993790	0.993963	0.994132	0.994297	0.994457	0.994614	0.994766	0.994915	0.995060	0.995201
2.6	0.995339	0.995473	0.995604	0.995731	0.995855	0.995975	0.996093	0.996207	0.996319	0.996427
2.7	0.996533	0.996636	0.996736	0.996833	0.996928	0.997020	0.997110	0.997197	0.997282	0.997365
2.8	0.997445	0.997523	0.997599	0.997673	0.997744	0.997814	0.997882	0.997948	0.998012	0.998074
2.9	0.998134	0.998193	0.998250	0.998305	0.998359	0.998411	0.998462	0.998511	0.998559	0.998605
3.0	0.998650	0.998694	0.998736	0.998777	0.998817	0.998856	0.998893	0.998930	0.998965	0.998999
3.1	0.999032	0.999065	0.999096	0.999126	0.999155	0.999184	0.999211	0.999238	0.999264	0.999289
3.2	0.999313	0.999336	0.999359	0.999381	0.999402	0.999423	0.999443	0.999462	0.999481	0.999499
3.3	0.999516	0.999533	0.999550	0.999566	0.999581	0.999596	0.999610	0.999624	0.999637	0.999650
3.4	0.999663	0.999675	0.999687	0.999698	0.999709	0.999720	0.999730	0.999740	0.999749	0.999758
3.5	0.999767	0.999776	0.999784	0.999792	0.999800	0.999807	0.999814	0.999821	0.999828	0.999835
3.6	0.999841	0.999847	0.999853	0.999858	0.999864	0.999869	0.999874	0.999879	0.999883	0.999888
3.7	0.999892	0.999896	0.999900	0.999904	0.999908	0.999911	0.999915	0.999918	0.999922	0.999925
3.8	0.999928	0.999931	0.999933	0.999936	0.999938	0.999941	0.999943	0.999946	0.999948	0.999950
3.9	0.999952	0.999954	0.999956	0.999957	0.999959	0.999961	0.999962	0.999964	0.999965	0.999967
4.0	0.999968	0.999970	0.999971	0.999972	0.999973	0.999974	0.999975	0.999976	0.999977	0.999978

FUENTE: [illegible]

WWW.ULA.VE

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

$$P\left[\frac{Ri-E(Ri)}{\sigma\,(Ri)} \leq \frac{(c-bi-vi)-E(Ri)}{\sigma\,(Ri)}\right] \geq \alpha_K \qquad (2.28)$$

El miembro derecho de la inecuación entre corchetes es constante por hipótesis. Además, como hay un sólo valor $z(\alpha_K)$ en este miembro, para el cual la restricción (2.28) se verifica, se debe tener,

$$\frac{Ri-E(Ri)}{\sigma\,(Ri)} \leq z(\alpha_K)$$

En otros términos, la restricción probabilística se transforma en,

$$Ri \leq E(Ri)+z\,(\alpha_K) \times \sigma\,(Ri)$$

Obsérvese que el miembro derecho de esta restricción es el percentil $r_i(\alpha_K)$ correspondiente a la probabilidad α_K de la distribución normal, determinado por medio de la variable reducida correspondiente, $z(\alpha_K)$, ó factor de frecuencia de la distribución normal.

$$r_i\,(\alpha_K) = E(Ri)+z(\alpha_K)+\sigma(Ri)$$

Con base en estas consideraciones, la restricción (2.26), referente al borde libre para el control de crecidas, puede ser escrita,

$$c-b_i-v_i \geq r_i\,(\alpha_1) \qquad (2.29)$$

Además del Método del Factor de Frecuencia, existen distintas formas para determinar los percentiles de una distribución teórica, dependiendo del método de ajuste utilizado. Como ilustración, se han ploteado los datos de volúmenes escurridos referentes al mes de mayo del río Masparro en Puente Masparro.(1952-1973), en

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

papel log-normal (Figura 2.2). La recta ajustada define pues la función,

$$F_{R_5}(r) = P[R_5 \leq r]$$

De acuerdo al ajuste gráfico hecho, la probabilidad de que ocurra un volumen igual o inferior a 200×10^6 m^3 en el mes de mayo, es de 92%, o sea,

$$F_{r_5}(200 \times 10^6) = P[R_5 \leq 200 \times 10^6] = 0,92$$

Adoptando un nivel $\alpha_1 = 0,92$ para la restricción (2.29),

$$c - b_5 - v_5 \geq r_5(0,92)$$

donde,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$r_5(0,92) = r_5^{.92} = 200 \times 10^6 \ m^3$$

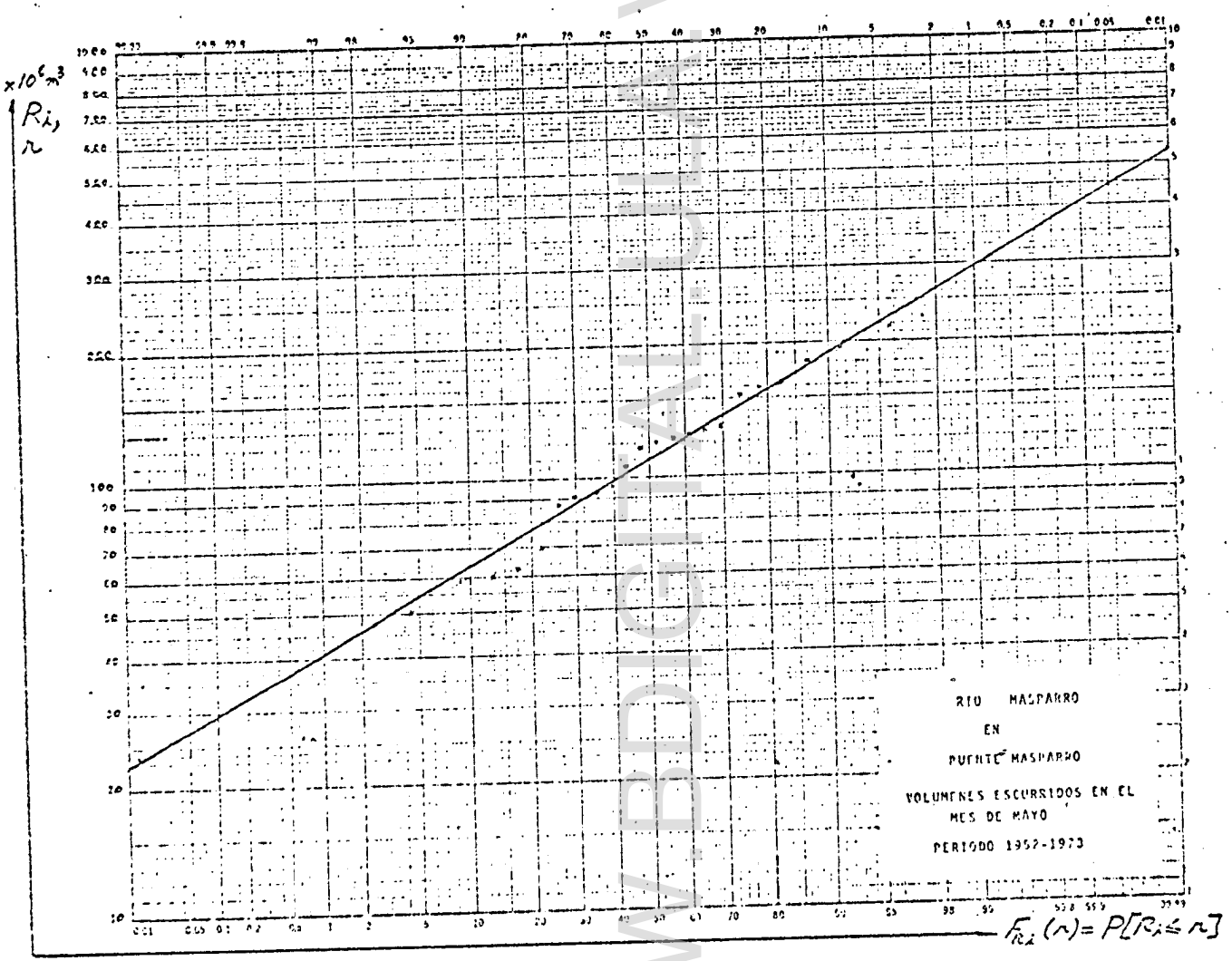
O sea, 200×10^6 m^3 es el nonagésimo segundo percentil de la distribución teórica de los volúmenes escurridos en el mes de mayo.

Volviendo a la restricción (2.29), se ubican ahora las incógnitas al lado izquierdo de la inecuación y se tiene finalmente,

$$c - b_i \geq v_i + r_i^{\alpha_1}$$

A pesar de ser idéntica a la formulación determinística, la formulación estocástica es realista e impide la interpretación de la regla de decisión lineal como infalible. En otros términos, en la formulación estocástica no se considera la regla de decisión como una especificación de la cantidad exacta de agua a ser cedi-

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



REPUBLICA DE VENEZUELA
BIBLIOTECA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE ADQUISICIONES
TULIO FEBRES CORDERO
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MERIDA

Figura 2.2. Ajuste Gráfico a una Distribución Log-Normal.

WWW.BDIGITAL.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución NO Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

da por el embalse en el mes siguiente.

Adoptando un nivel de α_2 para la restricción (2.23), referente al almacenamiento mínimo a ser mantenido en el embalse, viene,

$$P\left[b_i \geq s_{min}-R_i\right] = P\left[R_i \geq s_{min}-b_i\right] \geq \alpha_2 ,$$

$$1-P\left[R_i \leq s_{min}-b_i\right] \geq \alpha_2,$$

$$P\left[R_i \leq s_{min}-b_i\right] = F_{R_i}(s_{min}-b_i) \leq 1-\alpha_2 ,$$

$$s_{min}-b_i \leq r_i^{1-\alpha_2}$$

$$a_m c-b_i < r_i^{1-\alpha_2} \qquad (2.30)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Por ejemplo, en la Figura 2.2, con $\alpha_2 = 0.92$ se tiene que,

$$r_5^{1-.92} = r_5^{.08}$$

es el octavo percentil, que puede ser obtenido del gráfico como 60×10^6 m^3.

La restricción (2.24), referente a necesidades de consumo se transforma en,

$$P\left[b_{i-1}-b_i \geq q_i-R_{i-1}\right] = P\left[R_{i-1} \geq q_i-b_{i-1}-b_i\right] \geq \alpha_3 ,$$

$$1-P\left[R_{i-1} \leq q_i-b_{i-1}+b_i\right] \geq \alpha_3 ,$$

$$P\left[R_{i-1} \leq q_i-b_{i-1}+b_i\right] \leq 1-\alpha_3 ,$$

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

$$F_{R_{i-1}}(q_i - b_{i-1} + b_i) \leq 1-\alpha_3,$$

$$q_i - b_{i-1} + b_i \leq r_{i-1}^{1-\alpha_3},$$

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - r_i^{1-\alpha_3} \qquad (2.31)$$

Como en el modelo determinístico, esta restricción se aplica para i = 2,...,12. Para i = 1, toma la forma siguiente,

$$b_{12} - b_1 \geq q_1 - r_{12}^{1-\alpha_3} \qquad (2.32)$$

Además, la restricción (2.18), de la formulación determinística, se aplica también aquí, o sea,

$$a_o c - b_1 \geq q_1 \qquad (2.33)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Para un nivel α_4 , la restricción (2.25), que pone un límite superior sobre el volumen de agua devuelto al cauce, durante un mes i se escribe,

$$P\left[b_{i-1} - b_i \leq f_i - R_{i-1} \right] = P\left[R_{i-1} \leq f_i - b_{i-1} + b_i \right] \geq \alpha_4 ,$$

$$F_{R_{i-1}}(f_i - b_{i-1} + b_i) \geq \alpha_4 ,$$

$$f_i - b_{i-1} + b_i \geq r_{i-1}^{\alpha_4} ,$$

$$b_{i-1} + b_i \leq f_i - r_{i-1}^{\alpha_4} \qquad i = 2,...,12 \qquad (2.34)$$

y también,

$$b_{12} - b_1 \leq f_1 - r_{12}^{\alpha_4} \qquad (2.35)$$

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

$$a_o c - b_1 \leq f_1 \qquad (2.36)$$

En resumen:

$$c - b_i \geq v_i + r_i^{\alpha_1} \qquad i = 1,\ldots,12$$

$$a_m c - b_i \leq r_i^{1-\alpha_2} \qquad i = 1,\ldots,12$$

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - r_{i-1}^{1-\alpha_3} \qquad i = 2,\ldots,12$$

$$b_{12} - b_1 \geq q_1 - r_{12}^{1-\alpha_3}$$

$$a_o c - b_1 \geq q_1$$

$$b_{i-1} - b_i \leq f_i - r_{i-1}^{\alpha_4} \qquad i = 2,\ldots,12$$

$$b_{12} - b_1 \leq f_1 - r_{12}^{\alpha_4}$$

$$a_o c - b_1 \leq f_1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Otra gran ventaja del planteamiento estocástico es la posibilidad de cambiar los niveles de confiabilidad.

Esta ventaja se hace más importante cuando se utiliza, para la solución del modelo, un programa como el LPS/360 de la IBM, que permite obtener rápidamente soluciones en secuencia para valores sucesivos de los límites superiores o inferiores de las restricciones. El proyectista puede resolver el modelo para varios niveles de confiabilidad, y, después de analizar los resultados de acuerdo al riesgo que desee tomar, decidir qué nivel escoger.

Finalmente, el modelo estocástico permite un refinamiento, ausente en el modelo determinístico, que es el establecimiento de un segundo nivel de confiabilidad. Como ejemplo, sea una empresa de abastecimiento de agua que deba suplir a una ciudad una demanda de

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

$q_i = 2 \times 10^6 m^3$. Utilizando la formulación estocástica, se puede dar más importancia al abastecimiento de ciertas áreas vitales de la ciudad utilizando un segundo nivel de confiabilidad. El sistema podría diseñarse con $\alpha_3 = 0,90$ para toda la ciudad mientras que se utilizaría un nivel $\alpha_3' = 0,98$ para áreas de la ciudad tales como zonas industriales y hospitales, cuya demanda podría ser, por ejemplo, $q_i' = 0,5 \times 10^6 m^3$.

Resumen

Se ha presentado el modelo de programación lineal desarrollado por Revelle et al (1969) con los enfoques determinístico y estocástico. A continuación se reproduce la formulación matemática de tales modelos, que utilizan la escala de tiempo mensual.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Modelo Determinístico

Función Objetiva:

$$\text{Min } c$$

Restricciones:

$$s_t = b_i + r_t$$

$$x_t = b_{i-1} - b_i + r_{t-1}$$

$$c - b_i \geq v_i + \text{máx } r\,[i + 12(K-1)]$$

$$a_m c - b_i \leq \text{mín } r[i + 12(k-1).]$$

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

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - \text{mín } r\,[i-1 + 12\,(k-1)]$$

$$b_{12} - b_1 \geq q_1 - \text{mín } r\,[12 + 12(k-1)]$$

$$a_o c - b_1 \geq q_1$$

$$b_{i-1} - b_i \leq f_i - \text{máx } r\,[i-1 + 12(k-1)]$$

$$b_{12} - b_1 \leq f_i - \text{máx } r\,[12 + 12(k-1)]$$

$$a_o c - b_1 \leq f_1$$

Modelo Estocástico

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Función Objetiva:

$$\text{Min } c$$

Restricciones:

$$s_t = b_i + r_t$$

$$x_t = b_{i-1} - b_i + r_{t-1}$$

$$c - b_i \geq v_i + r_i^{\alpha_1}$$

$$a_m c - b_i \leq r_i^{1-\alpha_2}$$

$$b_{i-1} - b_i \geq q_i - r_{i-1}^{1-\alpha_3}$$

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

$$b_{12}-b_1 \geq q_1 - r_{12}^{1-\alpha_3}$$

$$a_o c-b_1 \geq q_1$$

$$b_{i-1}-b_i \leq f_i - r_{i-1}^{\alpha_4}$$

$$b_{12}-b_1 \leq f_1 - r_{12}^{\alpha_4}$$

$$a_o c-b_1 \leq f_1$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

CAPITULO III

DESCRIPCION DEL MODELO ESTOCASTICO DE PROGRAMACION SEPARABLE

Introducción

El modelo presentado por Eisel (1972) utiliza la escala de tiempo anual. El objetivo es determinar la capacidad de un embalse para irrigación y la cantidad óptima de agua a ser cedida anualmente para riego, con el fin de maximizar el beneficio neto del Sistema.

Así como en los modelos presentados en el Capítulo II, es también utilizada una regla de decisión lineal. Esta regla, que ha sido introducida por Bryant (1961), toma en cuenta un mayor número de variables que la regla de decisión utilizada por Revelle et al (1969), en la cual los volúmenes necesarios de agua para consumo en cada mes, q_i, son previamente conocidos. En el modelo de Eisel (1972) el volumen de agua para consumo a ser cedido anualmente por el embalse, T, es una variable de decisión. Este volumen será determinado de manera que se obtenga el mayor beneficio neto posible, o sea, será el volumen óptimo a ser entregado anualmente para consumo.

Esta consideración, así como otras que se van a discutir adelante, hacen este modelo más complejo que el de Revelle et al (1969). Debido a ciertas expresiones no lineales que surgen en su desarrollo, la solución del modelo sólo es posible mediante el empleo de algunas aproximaciones y artificios de cálculo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Terminología Utilizada

En la relación que se sigue constan todas las variables que aparecen en el desarrollo del modelo.

El subíndice i, identifica las variables que asumen distintos valores a cada año de la vida útil del Sistema,

BEN = valor actual del beneficio neto resultante de la entrega anual de una unidad de volumen para consumo.

B = valor actual del beneficio bruto resultante de la entrega anual de una unidad de volumen para consumo.

T = volumen óptimo a ser cedido anualmente para riego, variable de decisión.

C = valor actual de la suma de los costos, por unidad de volumen, de construcción, operación y mantenimiento de las obras del Sistema.

K = capacidad del embalse, variable de decisión

a = parámetro de decisión,

$$0 \leqslant a \leqslant 1$$

q_i = aporte de volumen al embalse durante el año i, variable aleatoria.

s_i = almacenamiento en el embalse al final del año i, variable aleatoria.

y_i = volumen total de agua a ser cedido por el embalse durante el año i, variable aleatoria y de decisión.

α_T , α_S ; α_C = probabilidades fijadas, de que se cumplan las restricciones del modelo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

$F^{-1}(\alpha_T)$, $F^{-1}(\alpha_S)$, $F^{-1}(\alpha_C)$ = percentiles de una distribución normal tipificada, correspondiente a las probabilidades α_T, α_S y α_C

E = indicador del valor esperado de una distribución probabilísticas.

V = indicador de la varianza de una distribución probabilística.

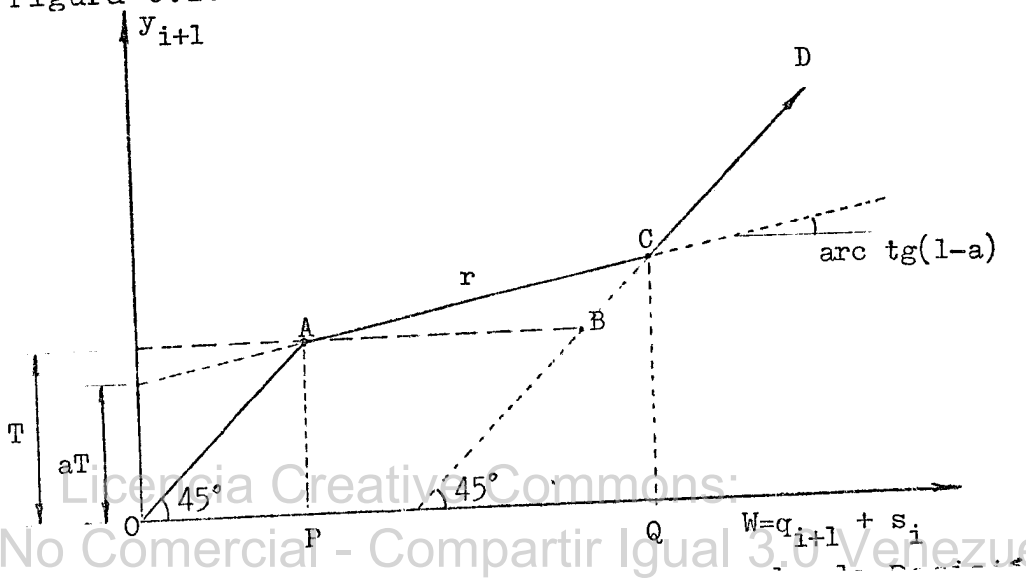
Regla de Decisión

La regla de decisión en este modelo establece que la cantidad total de agua a ser cedida por el embalse en el año i+1 es función del parámetro de decisión, a, del aporte q_{i+1}, del volumen almacenado al final del año anterior, s_i y del volumen óptimo T a ser cedido anualmente para riego,

$$y_{i+1} = (1-a)(q_{i+1} + s_i) + aT$$

donde, $0 < a < 1$

Esta regla puede ser interpretada gráficamente conforme ilustra la Figura 3.1.



WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La definición de una variable W, tal que,

$$W = q_{i+1} + s_i$$

permite escribir la regla de decisión de la manera siguiente,

$$y_{i+1} = (1-a)W + a\,T$$

Esta es la ecuación de la recta r de la Figura 3.1. El coeficiente angular de la recta r es función del parámetro de decisión, a, que es constante a lo largo de la vida útil del proyecto. La inclinación de la recta r será determinada de manera que se maximize la función objetiva y se cumplan las restricciones del modelo.

En términos de operación de embalses, la variable W traduce la cantidad de agua de que se dispone en el año i+1. O sea, en el año i+1 se dispone del almacenamiento, s_i, que ha quedado al final del año anterior y del aporte q_{i+1}. ; la variable y_{i+1} representa la cantidad de agua que se entrega en el año i+1.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En la Figura 3.1, los segmentos de recta $\overline{OA}$, $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ y la semi-recta $\overline{CD}$ representan la conocida regla de operación normal. Esta regla establece que mientras no se pueda entregar una demanda de agua, T, se entrega la cantidad de que se dispone. Esta es la razón del coeficiente angular del segmento $\overline{OA}$ ser igual a la unidad. Cuando el agua en el embalse llega al nivel correspondiente al punto A, donde es posible atender a la demanda T, y al mismo tiempo llenar el embalse, se entrega exactamente una cantidad igual a la demanda. A partir del momento en que el embalse se llena, en el punto B, hay que entregar la demanda T y todo el exceso de agua. Esto explica la inclinación de 45° del segmento $\overline{BC}$ y de la semi-recta $\overline{CD}$.

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

De acuerdo a la regla de operación, si el parámetro de decisión, a, es igual a cero, el coeficiente angular de la recta r es unitario. En este caso, la recta r coincide con el segmento $\overline{OA}$, lo que es indeseable, porque se entrega siempre lo que se dispone, mismo en la época de lluvia, cuando se debe llenar el embalse.

Si el valor del parámetro a, está comprendido entre 0 y 1, la recta r tiene una inclinación entre 0°y 45º En este caso se opera en el segmento $\overline{AC}$, o sea, se cumple con la demanda T para todos los puntos situados a la derecha del punto A.

Si el parámetro de decisión,a, es igual a la unidad, el coeficiente angular de la recta r es cero y ésta coincide con el segmento $\overline{AB}$. En este caso siempre se garantizaría la demanda T, pero el embalse tendría una capacidad infinita. Girando la recta r en torno del punto A, hay una posición óptima que permitirá la obtención del máximo beneficio del Sistema. Como se observará adelante, la recta r en su posición óptima, contiene puntos que no convienen a la operación del embalse. Se debe diseñar el Sistema de manera que la probabilidad de la ocurrencia de esos puntos indeseables sea pequeña.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Función Objetiva

La función objetiva es definida por,

$$BEN = Max\ [BT - CK]$$

El producto BT representa el valor actualizado del beneficio bruto del proyecto, mientras que el producto CK representa el valor actualizado del costo total del proyecto, incluyéndose los costos de operación y mantenimiento.

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

Restricciones

El diseño y la operación del Sistema están sujetos a tres restricciones. Estas fijan determinados niveles de confiabilidad en cuanto a la obtención del volumen óptimo, T, a la seguridad del embalse y a la manutención de la continuidad entre el almacenamiento y los flujos afluente y efluente del embalse. A continuación y en este mismo orden se discuten estas restricciones.

Obtención del Volumen Optimo T

El sistema de riego tiene que ser abastecido con un volumen, T, para un número grande de años durante la vida útil del proyecto. Este número grande de veces corresponde a una determinada probabilidad α_T. En otros términos, en 100 α_T% de los años se espera que el volumen T sea disponible para irrigar el Sistema. Esta restricción se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$P\left[y_{i+1} > T \right] > \alpha_T$$

Sustituyendo y_{i+1} por su equivalente, de la regla de decisión, se obtiene,

$$P\left[(1-a)(q_{i+1} + s_i) + a\,T > T \right] > \alpha_T$$

De acuerdo a la Figura 3.1, y_{i+1} será mayor que T para todos los puntos de la recta r situados a la derecha del punto A. En otros términos esto se verifica para todos los puntos del eje W, situados a la derecha del punto P, o sea, para todo

$$W > \overline{OP} \tag{3.1}$$

Como la inclinación del segmento $\overline{OA}$ es de 45°, el segmento

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

$\overline{OP}$ es igual a T, y la expresión (3.1) se escribe,

$$W \geq T$$

o sea,

$$q_{i+1} + s_i \geq T$$

Por lo tanto, también se puede escribir,

$$P\left[y_{i+1} \geq T\right] = P\left[q_{i+1} + s_i \geq T\right]$$

Luego, la restricción en cuanto a la entrega del volumen T se queda,

$$P\left[q_{i+1} + s_i \geq T\right] \geq \alpha_T \qquad (3.2)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Esta expresión estipula que en 100 α_T% de los años, la suma de la cantidad de agua almacenada al final de un determinado año, con el volumen de agua aportado en el año siguiente, no se quede dentro del rango definido por el segmento de recta $\overline{OP}$. Así como en el modelo estocástico presentado en el Capítulo II, es necesario transformar la expresión (3.2) en una expresión algebraica.

En el modelo estocástico de Revelle et al (1969) se asumía que sólo los aportes al embalse en cada período de operación, eran variables aleatorias. Eisel (1970; 1972) considera no sólo los aportes sino también los almacenamientos s_i como variables aleatorias y critica esa omisión en el modelo de Revelle et al (1969). Por lo tanto, el término $(q_{i+1} + s_i)$ en la expresión (3.2), es la suma de dos variables aleatorias que no tienen la misma distribución probabilística.

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

El Teorema del Límite Central garantiza que la suma de un número grande de variables aleatorias, se distribuye aproximadamente según la distribución normal, independientemente de los tipos de distribución de las variables aleatorias individuales. De este modo se puede tratar la suma $(q_{i+1} + s_i)$ como normalmente distribuida.

Luego,es posible transformar la expresión (3.2) en una restricción subordinada a los percentiles de una distribución normal. Esta transformación se hace con base en el mismo razonamiento expuesto en la presentación del modelo estocástico de Revelle et al (1969).

Sean $E(q_{i+1} + s_i)$ y $V(q_{i+1} + s_i)$, la media y la varianza de la nueva distribución normal, respectivamente.

Con base a lo expuesto en el Capítulo II, se puede transformar la expresión (3.2) en,

$$P\left\{\frac{q_{i+1} + s_i - E(q_{i+1} + s_i)}{[V(q_{i+1} + s_i)]^{1/2}} \geq \frac{T - E(q_{i+1} + s_i)}{[V(q_{i+1} + s_i)]^{1/2}}\right\} \geq \alpha_T \qquad (3.3)$$

Para que la resticción (3.3) se cumpla, es necesario que,

$$T - E(q_{i+1} + s_i) \leq F^{-1}(1-\alpha_T)\,[V(q_{i+1} + s_i)]^{1/2} \qquad (3.4)$$

El desarrollo de la expresión (3.4) es posible mediante la estimación de los momentos de la distribución, o sea, con los valores de $E(q_{i+1} + s_i)$ y $V(q_{i+1} + s_i)$. Estas estimaciones constituyen un problema de difícil solución debido a la necesidad de conocer la distribución de los s_i, sin el conocimiento de a, T

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

y de la capacidad K del embalse.

Bryant (1961) desarrolló una teoría para estimar los momentos de la distribución de los almacenamientos s_i, para el diseño de embalses. Su estudio, ha sido adaptado por Eisel (1970), para la estimación de los momentos de la distribución de los $(q_{i+1}+s$

$$E(q_{i+1} + s_i) = \frac{E(q) - a\,T}{1-a} \qquad (3.5$$

$$V(q_{i+1} + s_i) = \frac{V(q)}{1-a^2} \qquad (3.6$$

Estas estimaciones se basan en la asunción de la independencia entre q_{i+1} y s_i. En simulaciones hechas por Eisel (1972) para probar el modelo, se ha verificado el buen funcionamiento del mismo, para registros de bajos coeficientes de autocorrelación. En tales casos la capacidad del embalse, ha resultado superior a un 70% del gasto anual medio del río en estudio.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Sustituyendo las estimaciones dadas por las ecuaciones (3.5) y (3.6), en la restricción (3.4), se tiene,

$$T - \left[\frac{E(q) - a\,T}{1-a}\right] \leq \frac{F^{-1}(1-\alpha_T)\,[V(q)]^{1/2}}{(1-a^2)^{1/2}}$$

o sea,

$$T(1-a) - E(q) + a\,T \leq \frac{1-a}{(1-a^2)^{1/2}} F^{-1}(1-\alpha_T)\,[V(q)]^{1/2}$$

luego,

$$T - E(q) \leq \left(\frac{1-a}{1+a}\right)^{1/2} F^{-1}(1-\alpha_T)\,[V(q)]^{1/2} \qquad (3.7)$$

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

Todos los programas de computación existentes para la solución analítica de los problemas de programación lineal, utilizan el algoritmo conocido como Método Simplex; este es ampliamente ilustrado por Hillier y Liebermann (1967). El Método Simplex sólo detecta con seguridad los máximos o mínimos de funciones convexas. En el caso de funciones cóncavas existe el riesgo de ser detectado un máximo o un mínimo local.

En la restricción (3.7), el término, $(\frac{1-a}{1+a})^{1_2}$ presenta partes cóncavas y partes convexas como se ilustra en la Fig. 3.2. Young (1966; 1967), llegó a la conclusión de que el parámetro de decisión óptimo, a, siempre se aproxima a 1,0. Eisel (1970), basándose en estudios de simulación, observó que para valores de a mayores que 0,9, la teoría de Bryant (1961), no permite buenas estimaciones de los momentos de la distribución de la suma $(q_{i+1}+s_i)$. En base a estas consideraciones, Eisel (1972) linealizó la curva de la Figura 3.2, limitando el parámetro de decisión, a, a valores comprendidos entre 0,6 y 0,9. De esta manera la recta ilustrada en la Figura 3.2. sustituye aproximadamente a la curva original, eliminando las partes cóncavas.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La ecuación de la recta indicada en la Figura 3.2 se obtiene como,

$$(\frac{1-a}{1+a})^{1_2} = 1{,}05 - 0{,}90\ a$$

sustituyendo este término en la restricción (3.7), resulta,

$$T - E(q) < (1{,}05 - 0{,}90\ a)\ F^{-1}\ (1-\alpha)\ |V(q)|^{1_2}$$

luego,

$$T + 0{,}90F^{-1}(1-\alpha)\ |V(q)|^{1_2} a < E(q)+1{,}05F^{-1}(1-\alpha)|V(q)|^{1_2} \qquad (3.8)$$

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

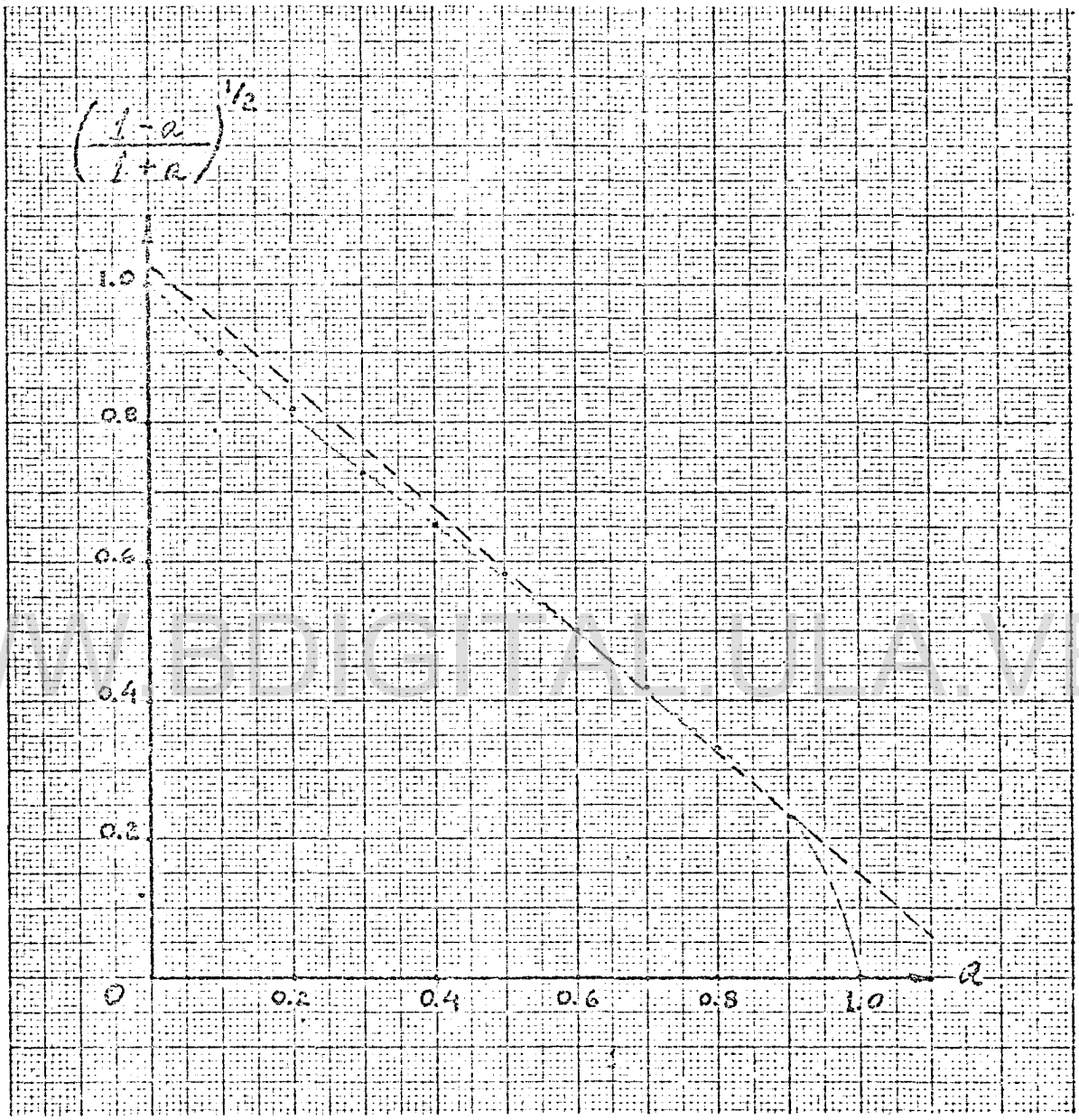


Figura 3.2. Representación Gráfica de la Función $(\frac{1-a}{1+a})^{1/2}$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

La programación lineal es aplicable a la inecuación (3.8), que es la expresión definitiva de la restricción en estudio.

Según Eisel (1972), el límite superior de 0,90, asignado al parámetro a, puede resultar en una solución subóptima. A pesar de eso, el autor argumenta que la política de operación resultante, es más general que la política de operación de los modelos de Revelle et al (1969).

Seguridad del Embalse

Esta restricción establece que el almacenamiento en el embalse, año tras año debe ser inferior o igual a la capacidad del embalse, debiendo cualquier exceso ser descargado. Se puede formular matemáticamente esta restricción como:

$$P\left[s_{i+1} \leq K\right] \geq \alpha_s$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

o sea,

$$P[q_{i+1} + s_i - y_{i+1} \leq K\ ] \geq \alpha_s$$

Sustituyendo y_{i+1} por su equivalente, de la regla de decisión,

$$P\ \{q_{i+1} + s_i - \left[(1-a)(q_{i+1} + s_i) + a\ T\ \right] \leq K\ \} \geq \alpha_s$$

Desarrollando esta expresión, se tiene,

$$P\ \left[a(q_{i+1} + s_i) - a\ T \leq K\right] \geq \alpha_s$$

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

o,

$$P[q_{i+1} + s_i \leq \frac{a\,T+K}{a}] \geq \alpha_s \qquad (3.9)$$

Gráficamente, de acuerdo a la Figura 3.1, esta restricción establece que sólo en 100 α_s% de los años, se espera la ocurrencia de puntos a la derecha del punto Q, en el eje W.

La expresión (3.9) puede ser reducida a su formulación determinística equivalente, puesto que se puede escribir como,

$$P\{\frac{q_{i+1} + s_i - E(q_{i+1} + s_i)}{[V(q_{i+1} + s_i)]^{1/2}} \leq \frac{a\,T + K - a\,E(q_{i+1} + s_i)}{a\,[V(q_{i+1} + s_i)]^{1/2}}\} \geq \alpha$$

(3.10)

Para que se cumpla la restricción (3.10), es necesario que

$$a\,T + K - a\,E(q_{i+1} + s_i) \geq a\,[V(q_{i+1} + s_i)]^{1/2}\,F^{-1}(\alpha_s).$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Sustituyendo los momentos de la distribución de la suma $(q_{i+1} + s_i)$ por sus estimaciones, dadas por las ecuaciones (3.5) y (3.6), se tiene,

$$a\,T + K - a\left[\frac{E(q)-aT}{1-a}\right] \geq a\left[\frac{V(q)}{1-a^2}\right]^{1/2} F^{-1}\,(\alpha_s)$$

Esta expresión puede ser desarrollada como sigue,

$$a\,T + K + \frac{a^2T-aE(q)}{1-a} \geq a\left[\frac{V(q)}{1-a^2}\right]^{1/2} F^{-1}\,(\alpha_s)$$

$$a\,T + K(1-a)-aE(q) \geq a(1-a)\left[\frac{V(q)}{1-a^2}\right]^{1/2} F^{-1}\,(\alpha_s)$$

$$T + K\left[\frac{(1-a)}{a}\right] - E(q) \geq \left[\frac{1-a}{1+a}\right]^{1/2} [V(q)]^{1/2}\, F^{-1}(\alpha_s) \qquad (3.11)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La expresión (3.11) no es lineal ni separable y, como en el caso de la restricción (3.7), es necesario hacer la simplificación,

$$\left(\frac{1-a}{1+a}\right)^{1/2} = 1{,}05-0{,}90a$$

Además, una función J, tal que,

$$J = K\left[\frac{1-a}{a}\right], \qquad (3.12)$$

define una curva que por una parte es convexa y por otra es cóncava. Al graficar $\frac{1-a}{a}$ versus a se obtiene la curva presentada en la Figura 3.3, la cual puede ser aproximada a una recta para a

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

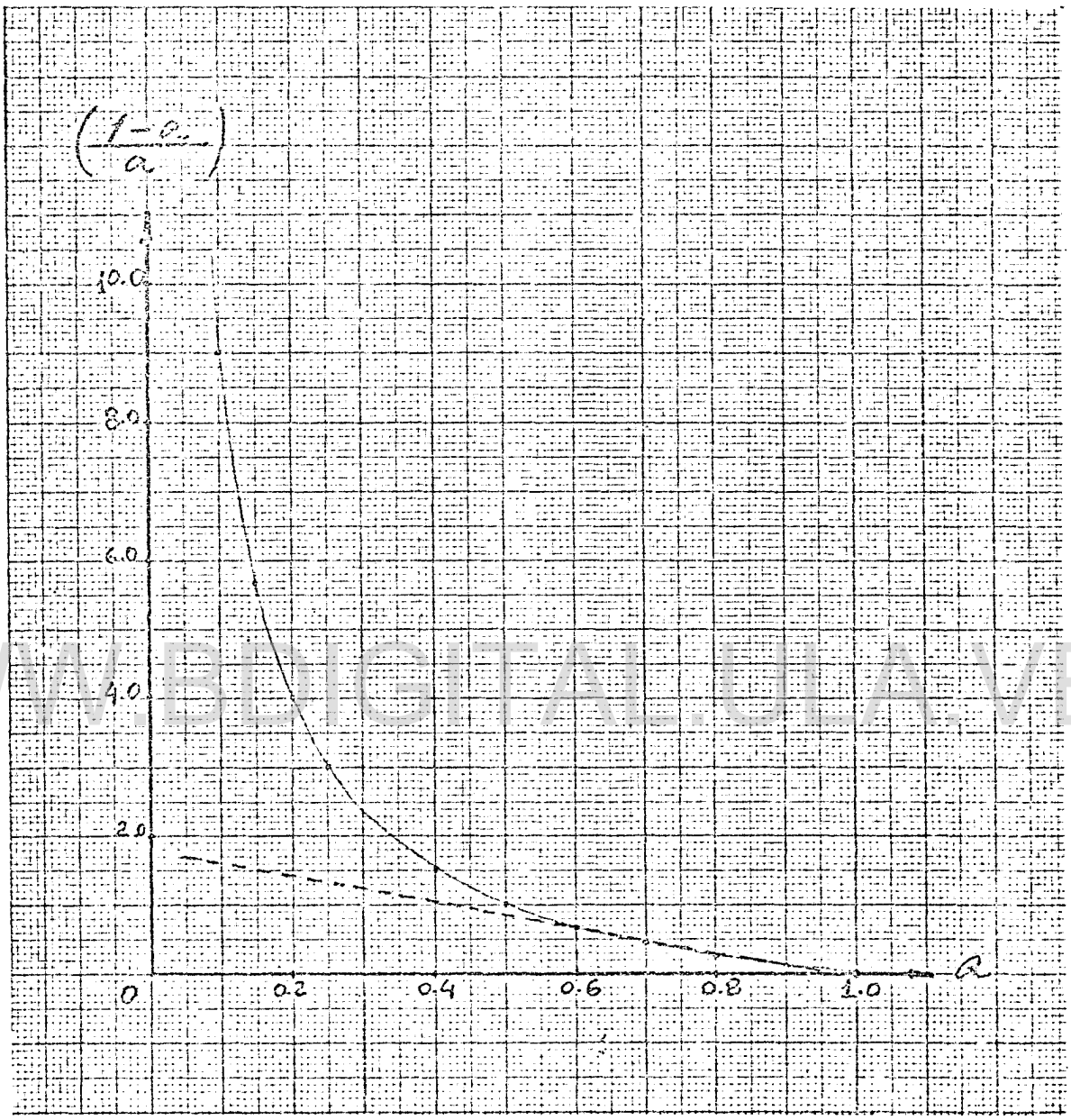


Figura 3.3. Representación Gráfica de la Función $(\frac{1-a}{a})$

WWW.BIBDIGITAL.UDLA.VE

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

comprendida entre 0.6 y 0.9. La ecuación de esta recta es,

$$\left(\frac{1-a}{a}\right) = -1{,}9a + 1{,}8$$

Estas simplificaciones, aplicadas a la expresión (3.11) permiten escribir,

$$T + K\,(-1{,}9a+1{,}8)-E(q) \geq (1{,}05-0{,}90a)\,[V(q)]^{1/2}\,F^{-1}(\alpha_s)$$

luego,

$$T-1{,}9\,aK+1{,}8\,K-E(q) \geq 1{,}05[V(q)]^{1/2}F^{-1}(\alpha_s)-0{,}90\,a[V(q)]^{1/2}F^{-1}(\alpha_s)$$

o,

$$T-1{,}9aK+1{,}8K+0{,}90a\,[V(q)]^{1/2}F^{-1}(\alpha_s)\geq E(q)+1{,}05\,[V(q)]^{1/2}F^{-1}(\alpha_s) \qquad (3.13)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La restricción sigue no lineal y no separable .

Al término (-1,9aK) es posible aplicar un artificio ilustrado por Hadley (1964), definiendo dos funciones, W_1 y W_2, tales que,

$$W_1 = \frac{1}{2}\,(a+K)$$

$$W_2 = \frac{1}{2}\,(-a+K)$$

Con base en estas definiciones, la expresión (3.13) también se escribe,

$$T+1{,}8K-1{,}9W_1^2+1{,}9W_2^2+0{,}9a[V(q)]^{1/2}F^{-1}(\alpha_s)\geq E(q)+1{,}05F^{-1}(\alpha_s)[V(q)]^{1/2} \qquad (3.14)$$

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

donde,

$$0,6 < a < 0,9$$

La programación separable es aplicable a la inecuación (3.14), si se linealizan las funciones, W_1^2 W_2^2, mediante la utilización del Método ilustrado por Hadley (1964).

Continuidad

Esta restricción establece que para un número grande de años la condición de continuidad en el embalse tiene que ser obtenida por,

$$P\left[y_{i+1} < q_{i+1} + s_i\right] > \alpha_c$$

Sustituyendo y_{i+1} por su equivalente, de la regla de decisión, se tiene,

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$P\left[(1-a)(q_{i+1} + s_i) + aT < q_{i+1} + s_i\right] > \alpha_c$$

Esta expresión se reduce a,

$$P\left[q_{i+1} + s_i > T\right] > \alpha_c$$

Esta restricción tiene la misma forma que la inecuación (3.2 la cual es una expresión de la primera restricción del modelo, r lativa a la entrega del volumen óptimo T. Por lo tanto la restr ción de continuidad puede ser omitida y el modelo resulta con la restricciones relativas al volumen T y a la seguridad del embals

El modelo de Eisel(1972) es un problema convexo de programa ción no lineal,su solución se obtiene mediante el uso del Método Delta, que también es el algoritmo de linealización de funciones

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

adoptado por la IBM (1968) en el programa MPS/360.

Resumen

Se ha presentado el modelo estocástico de programación separable desarrollado por Eisel (1972). En lo que sigue, se presenta un resumen de las expresiones matemáticas del modelo, que utiliza la escala de tiempo anual.

Función Objetiva: $BEN = Max[BT-CK]$

Restricciones:

$$T+0,90\ F^{-1}(1-\alpha_T)[V(q)]^{1/2}a \leq E(q) + 1,05\ F^{-1}(1-\alpha_T)\ [V(q)]^{1/2}$$

$$T+1,8K-1,9W_1^2 + 1,9W_2^2 + 0,90\ a[V(q)]^{1/2}F^{-1}(\alpha_S) \geq E(q)+1,05\ F^{-1}(\alpha_S)\ [V(q)]^{1/2}$$

$$W_1 = \frac{1}{2}(-a + K)$$

$$W_2 = \frac{1}{2}(a + K)$$

$$0,6 \leq a \leq 0,9$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

CAPITULO IV

OBTENCION DE LOS DATOS Y ESPECIFICACIONES PARA LA ADAPTACION DE LOS MODELOS AL SISTEMA MASPARRO

Datos de Escorrentía

Los datos mensuales y anuales de escorrentía del río Maspa - rro fueron compilados de los mensuarios y anuarios del Distrito Hidrológico 2, publicados por el MOP. En el momento de la compi lación se disponía de 22 años de registros completos, desde el año 1952 al año 1973.

En las tablas 4.1, 4.2, y 4.3 son presentados respectivamen te los valores mensuales de los gastos medios, volúmenes escurri dos y gastos máximos instantáneos observados en el período dis- ponible. La Tabla 4.4 presenta los datos anuales de volúmenes escurridos y gastos máximos instantáneos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Ajuste a una Distribución Log-Normal

Se han ajustado los datos de volúmenes escurridos mensuales a una distribución log-normal para la obtención de los percenti- les correspondientes a distintas probabilidades de no excedencia El procedimiento consiste en el ajuste de los logarítmos de los datos a una distribución normal. Para eso, se ha utilizado un pro grama de computación que utiliza los subprogramas PNORM, FNORM y VNORM, ilustrados por Brunet-Moret (1969). La subrutina PNORM cal cula los parámetros de escala y de posición de la distribución. La función FNORM calcula la probabilidad teórica, P_T , de que un determinado elemento Q_M, no sea sobrepasado por cualquier otro e- lemento,Q de la distribución,

$$P_T = P_1 \ (Q < Q_M)$$

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

TABLA 4.1

RIO MASPARRO EN PUENTE MASPARRO

GASTOS MEDIOS MENSUALES EN $M^3/SEG.$

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1952	9,17	2,91	2,16	18,60	32,50	43,50	48,50	32,00	21,90	32,00	17,80	9,14
1953	7,70	8,72	5,25	17,00	72,60	34,90	36,80	41,70	51,10	31,00	27,20	8,45
1954	3,41	5,27	3,83	43,70	56,70	56,80	44,60	32,80	48,40	63,60	24,80	14,70
1955	8,45	3,97	7,81	26,20	25,60	51,00	62,10	30,70	44,30	43,40	36,10	8,39
1956	13,50	17,00	13,10	26,60	60,70	31,50	33,00	44,40	40,80	30,90	29,30	9,34
1957	3,61	8,55	3,82	14,20	45,30	49,30	67,90	41,60	32,50	31,00	16,70	13,40
1958	10,30	4,27	7,63	18,70	47,40	54,20	50,40	59,90	29,90	32,30	15,90	9,11
1959	3,84	2,55	8,03	30,10	59,40	75,80	42,00	36,10	57,20	42,90	22,10	20,90
1960	10,50	4,66	3,19	22,80	43,80	74,00	86,50	59,90	33,60	26,60	13,50	6,38
1961	3,66	2,51	10,90	15,60	18,70	51,70	39,20	41,10	37,90	45,00	40,90	11,70
1962	6,98	4,13	4,96	21,70	22,30	56,00	49,80	48,20	54,00	25,80	14,50	4,59
1963	5,65	2,65	2,88	14,40	80,20	67,20	59,60	43,80	49,40	34,70	30,60	9,38
1964	3,16	2,08	2,24	22,20	39,30	43,00	66,90	60,40	32,00	19,50	16,40	16,40
1965	15,60	10,60	4,37	7,08*	44,80	80,10	43,40	34,20	47,10	37,70	42,90	12,40
1966	15,90	4,33	2,17	31,50	34,80	63,90	51,60	45,50	50,30	26,90	39,50	13,70
1967	6,45	4,43	2,34	39,90	36,90	53,60	40,80	43,80	41,30	37,30	20,40	20,80
1968	4,77	2,48	2,50	26,04	47,93	62,12	70,98	49,46	39,25	50,86	22,13	7,53
1969	3,82	3,46	6,14	41,91	47,10	52,28	35,09	51,15	34,60	64,72	47,24	14,00
1970	6,41	4,95	4,39	18,80	22,64	57,23	38,80	67,09	38,47	37,99	11,54	13,50
1971	10,93	10,93	8,00	10,71	33,98	22,27	29,69	42,81	41,81	35,83	22,65	11,38
1972	43,90	26,61	42,56	84,58	67,51	40,03	52,25	48,72	27,64	29,14	17,56	24,06
1973	6,47	3,51	10,77	18,94	23,14	25,59	41,94	37,05	42,87	44,85	26,70	9,87

* ESTIMADO POR CORRELACION

WWW.BDIGITAL.UTA.VE

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

RIO MASPARRO EN PUENTE MASPARRO

VOLUMENES ESCURRIDOS MENSUALES EN $10^6 m^3$

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT	NOV.	DIC.
1952	24,560	7,280	5,800	48,110	87,110	112,740	129,810	85,750	56,880	85,700	46,080	24,480
1953	20,020	21,110	14,070	44,140	194,480	90,430	98,680	111,800	132,490	83,040	70,490	17,280
1954	9,137	12,750	10,270	113,364	151,857	147,347	119,344	87,852	125,556	170,312	64,204	39,332
1955	22,639	9,605	20,910	67,954	68,524	132,192	166,406	82,132	114,826	116,122	93,571	24,080
1956	36,400	42,595	35,191	69,060	162,518	81,657	88,474	118,973	105,667	82,849	75,980	25,013
1957	9,677	20,676	10,238	36,711	122,774	127,699	181,958	111,283	84,335	82,953	43,269	35,752
1958	27,674	10,325	20,442	48,557	127,008	140,486	134,957	160,531	77,570	86,400	41,100	21,712
1959	10,290	6,169	21,496	77,985	159,132	196,543	112,432	96,638	148,297	114,947	57,387	55,991
1960	28,125	11,676	8,538	53,196	117,297	191,678	231,777	160,557	87,204	71,133	34,914	23,733
1961	9,807	6,083	29,061	40,376	50,048	138,372	102,361	110,181	98,219	120,434	106,019	31,453
1962	18,713	10,000	13,292	56,296	59,837	145,051	133,358	129,010	139,983	69,154	37,495	12,306
1963	15,159	6,415	7,714	37,320	214,840	174,206	159,684	117,237	128,132	92,882	79,377	25,136
1964	8,464	5,182	6,001	57,545	105,310	111,465	179,081	161,711	82,903	52,532	42,382	43,905
1965	41,681	25,662	11,715	18,351[1]	120,000	207,498	116,183	91,656	122,075	101,043	111,247	33,166
1966	42,572	10,480	5,819	81,740	93,175	165,643	138,109	121,853	130,359	72,089	102,438	49,973
1967	17,279	10,740	6,281	103,423	96,254	138,993	109,611	117,238	107,080	99,995	52,975	55,590
1968	12,788	8,734	6,707	67,496	128,364	161,006	190,123	132,486	101,745	136,218	57,357	20,179
1969	10,243	8,364	16,439	108,618	126,144	135,467	93,995	137,004	89,683	173,353	122,446	38,038
1970	17,172	11,986	11,763	48,730	60,645	148,343	103,921	179,692	99,707	101,749	29,985	53,195
1971	29,285	26,440	21,426	27,752	91,006	57,723	79,522	114,116	108,367	95,955	58,711	30,429
1972	117,596	66,670	113,990	219,220	180,810	103,750	139,940	130,500	71,640	78,050	45,520	64,450
1973	17,330	8,480	28,830	49,090	61,970	86,330	112,330	99,220	111,120	120,130	69,190	23,760

[1] ESTIMADO POR CORRELACION

WWW.BDIGITAL.UA.VE
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)
Licencia Creative Commons.

TABLA 4.3

RIO MASPARRO EN PUENTE MASPARRO

GASTOS MAXIMOS INSTANTANEOS EN $m^3/seg.$

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
1952	115,00	3,82	26,40	75,80	640,00	315,00	395,00	155,00	90,00	2420,00	61,00	39,80
1953	81,60	62,20	75,10	81,60	1020,00	225,00	580,00	182,00	3000,00	220,00	195,00	10,00
1954	10,00	55,90	13,80	780,00	2300,00	498,00	297,00	319,00	455,00	471,00	247,00	240,00
1955	119,00	16,80	80,70	210,00	510,00	300,00	455,00	305,00	555,00	425,00	760,00	90,80
1956	264,00	305,00	290,00	295,00	600,00	585,00	167,00	750,00	1715,00	435,00	408,00	43,60
1957	5,42	85,10	15,90	114,00	400,00	375,00	2300,00	520,00	205,00	360,00	137,00	172,00
1958	110,00	15,00	34,70	147,00	550,00	760,00	2240,00	1230,00	140,00	350,00	95,70	30,50
1959	4,90	2,90	59,30	311,00	1475,00	800,00	161,00	575,00	566,00	524,00	253,00	387,00
1960	63,90	16,00	31,90	416,00	293,00	727,00	2500,00	613,00	312,00	1450,00	46,30	38,90
1961	4,60	2,90	497,00	85,80	315,00	381,00	239,00	450,00	188,00	764,00	390,00	42,20
1962	40,40	12,70	15,90	255,00	205,00	640,00	405,00	381,00	414,00	363,00	159,00	18,70
1963	126,00	3,08	29,30	171,00	1000,00	533,00	715,00	640,00	413,00	457,00	394,00	31,50
1964	5,59	4,31	44,20	335,00	498,00	311,00	690,00	424,00	282,00	179,00	197,00	515,00
1965	139,00	219,00	10,10	139,00[1]	3220,00	621,00	240,00	116,00	309,00	172,00	450,00	155,00
1966	112,00	5,45	2,50	145,00	137,00	227,00	553,00	285,00	343,00	358,00	82,50	145,00
1967	31,70	14,10	3,48	1240,00	257,00	565,00	272,00	522,00	384,00	294,00	251,00	166,00
1968	29,20	4,28	42,50	228,00	380,00	446,00	615,00	332,00	224,00	480,00	76,90	48,60
1969	29,70	34,70	159,00	348,00	1218,00	540,00	124,00	496,00	475,00	795,00	1103,00	190,00
1970	33,80	41,95	25,25	296,00	550,50	506,00	340,10	710,00	267,00	458,00	41,40	264,00
1971	56,00	118,40	23,48	187,00	301,00	75,22	231,00	482,00	577,50	276,00	222,20	71,00
1972	370,00	650,00	640,00	1095,00	610,00	462,00	279,00	620,00	394,00	346,70	130,35	362,00
1973	20,47	15,71	446,00	330,20	374,00	97,66	330,20	942,00	93,15	872,00	98,86	18,21

[1] ESTIMADO POR CORRELACION

WWW.BDIGITAL.UCLA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TABLA 4.4

RIO MASPARRO EN PUENTE MASPARRO

VOLUMENES ESCURRIDOS ANUALES (VE) EN $10^6 m^3$

GASTOS MAXIMOS INSTANTANEOS (GM) EN $m^3/seg.$

AÑO	VE	GM
1952	714,300	2420,00
1953	898,630	3000,00
1954	1051,326	2300,00
1955	918,961	760,00
1956	924,377	1715,00
1957	867,325	2300,00
1958	896,762	2240,00
1959	1057,307	1475,00
1960	1019,828	2500,00
1961	842,414	764,00
1962	824,495	640,00
1963	1058,102	1000,00
1964	856,481	690,00
1965	1000,280	3220,00
1966	1014,250	553,00
1967	915,459	1240,00
1968	1020,703	615,00
1969	1059,791	1218,00
1970	866,808	710,00
1971	740,723	577,50
1972	1332,130	1095,00
1973	767,780	942,00

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

VNORM es la función inversa de FNORM. Permite calcular Q_M, dada la probabilidad P_T. La subrutina ORDECR, ordena los datos en forma decreciente y el programa principal calcula entonces las probabilidades empíricas, P_E, de que cada elemento Q_M no sea sobrepasado,

$$P_E = P_2 \ (Q < Q_M)$$

Las probabilidades empíricas son calculadas por la fórmula de Weibull, discutida en el Capítulo II.

El programa principal también calcula los valores absolutos de las diferencias entre P_T y P_E. En seguida, busca el mayor de esos valores absolutos, para la prueba de bondad del ajuste por el Método de Smirnov-Kolmogorov. En este método se compara el mayor valor absoluto encontrado, con un estadístico, conocido como estadístico de Smirnov-Kolmogorov. Los valores de ese estadístico como funciones delnúmero de elementos de la muestra y para distintos niveles de significación, son listados por Yevjevich (1972). Si el mayor valor absoluto encontrado es menor que el estadístico de Smirnov-Kolmogorov, se acepta el ajuste al nivel de significación adoptado. Todas las series ajustadas han pasado la prueba al nivel de significación del 5%.

En el apéndice A de este trabajo, además del listado del programa, se ha incluido , a título de ilustración la hoja de resultados correspondiente al mes de enero. Como se puede observar en la parte superior de la hoja de resultados, aparecen los datos observados, las probabilidades empíricas y teóricas de no excedencia y los valores abasolutos de las diferencias entre esas probabilidades. en la parte central aparece el mayor valor absoluto de las diferencias entre las probabilidades empírica y teórica, también son impresos la media y la desviación típica de los datos; en la parte inferior aparecen los percentiles correspondientes a las probabilidades de 5 a 95%, con incrementos de 5

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

Para el mes de enero el volumen escurrido correspondiente a la probabilidad de 90% es de,

$$r_1^{.90} = 44,647 \times 10^6 \ m^3$$

mientras que a la probabilidad de 10% corresponde el percentil,

$$r_1^{.10} = 8,724 \times 10^6 \ m^3$$

Demanda de Riego

Flores (1974), en su trabajo utilizó los siguientes datos de demanda neta de riego, en m^3/Ha:

DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	ANUAL
129	1.325	1.411	1.844	130	4.839

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Esos datos,son resultados de un estudio hecho por el MOP (1971), con base en las informaciones disponibles de siete estaciones climatológicas existentes en la región en estudio.

Flores (1974), considerando la situación topográfica de la zona, de características planas, con pendiente entre el 1 y el 2% y también el riego por surcos en suelos de textura media, adoptó una eficiencia de aplicación de 0,65, según la proposición de Grassi (1968). Utilizó una eficiencia de conducción de 0,925, llegando a una eficiencia total de riego de 0,60.

La eficiencia total de riego es dada por,

$$eft = efr \times efc$$

donde,

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

eft = eficiencia total de riego
efr = eficiencia de aplicación del agua
efc = eficiencia de conducción

luego,

$$eft = 0,65 \times 0,925 = 0,60$$

La demanda bruta de riego se obtiene como el resultado de la división de la demanda neta por la eficiencia de riego. Util zando este procedimiento para los datos de demanda neta de rieg se llega a los siguientes resultados para la demanda mensual br ta de riego en m^3/Ha:

DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	ANUAL
215	2.208	2.352	3.073	217	8.065

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Derechos de Agua.

Considerando la extensión del sistema de riego Guanare-Masparro, tiene sentido preverse una adecuada cantidad de agua disponible en los embalses del sistema, para dilución del gasto de retorno en los cauces, que fatalmente se tornarán conductos de aguas de elevada salinidad. El flujo de retorno de sistemas de riego tiene alto contenido de sales, pesticidas y fertilizantes.

Según la ilustración dada por McCarty (1974) es posible, mediante un balance de salinidad, estimar el gasto efluente de un sistema de riego como función del gasto de aplicación, conocidas las concentraciones del agua de aplicación y del flujo efluente.

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

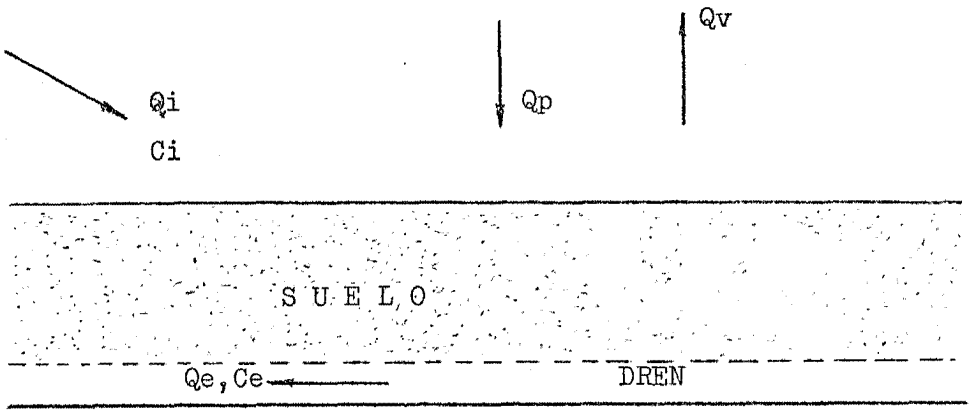


Figura 4.1. Perfil del Suelo Ilustrando el Caudal de Retorno.

En la Figura 4.1, el agua que entra en el suelo proviene del agua de regadión (Qi) y de la precipitación (Qp). El agua que sale del sistema se constituye el flujo de retorno (Qe) y de la evapotranspiración (Qv). La concentración del flujo de aplicación es Ci y del flujo de retorno es Ce, mientras que Qp y Qv son totalmente libres de salinidad. Escribiendo una ecuación de balance de salinidad se obtiene,

$$Qe \times Ce = Qi \times Ci \qquad (4.1)$$

y

$$Qe = Qi \times \frac{Ci}{Ce} \qquad (4.2)$$

En el estudio hecho por el MOP (1973) sobre el río Masparro en el sitio de presa,con base en eun análisis físico-químico hecho a fines de 1972,se ha considerado el agua analizada como apta pra el riego y para el consumo humano.La cantidad total de sólidos disueltc

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

encontrada ha sido de 208 ppm, concentración muy por debajo de los límites máximos permitidos por las normas existentes. El "United States Public Health Service" ha fijado un límite de 500 ppm para el agua potable. Según el "California State Water Resources Board", la concentración máxima, admitida como agua de última clase para riego, perjudicial a insatisfactoria e indeseable en la mayoría de los casos, es de 2.100 ppm. McCarty (1974), considera que el crecimiento de las plantas no se puede desarrollar en concentraciones superiores a 2.100 ppm. En base a estas normas es posible cuantificar el flujo a ser cedido por el embalse Masparro para la dilución de las aguas de retorno.

En la Figura 4.2 se muestra una representación esquemática de los aspectos de calidad de agua del Sistema Masparro.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

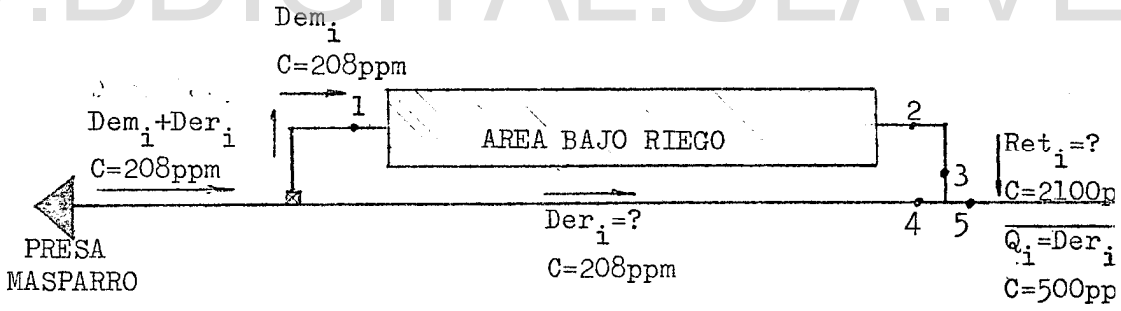


Figura 4.2.- Esquema del Sistema Masparro Utilizado en la Determinación de los Derechos de Agua.

Los términos de la Figura 4.2 tienen el siguiente significado:

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

Dem_i = demanda bruta de riego en el mes i, con concentración de 208 ppm

Ret_i = flujo de retorno en el mes i, con concentración de 2.100 ppm.

Der_i = derechos de agua en el mes i, flujo con concentración de 208 ppm a ser cedido por el embalse para dilución del flujo de retorno, hasta la concentración de 500 ppm.

Qi = flujo final diluído en el mes i, con concentración de 500 ppm.

Escribiendo los balances de masa entre los puntos 1 y 2 por una parte y 3,4 y 5 por otra parte, se obtiene,

$$Dem_i \times 208 = Ret_i \times 2.100 \qquad (4.3)$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

$$Ret_i \times 2.100 + Der_i \times 208 = Qi \times 500 \qquad (4.4)$$

Por continuidad se tiene,

$$Ret_i + Der_i = Qi \qquad (4.5)$$

De la ecuación (4.3) resulta,

$$Ret_i = \frac{208}{2.100} Dem_i = 0,10\ Dem_i \qquad (4.6)$$

Reemplazando Qi, de la ecuación (4.5) en la ecuación (4.4), se tiene,

$$Ret_i \times 2.100 + Der_i \times 208 = 500\ (\ Ret_i + Der_i\ )$$

$$292\ Der_i = 1.600\ Ret_i$$

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

luego,

$$Der_i = 5,48\ Ret_i \qquad (4.$$

Reemplazando Ret_i, de la ecuación (4.6), en la ecuación (4.7) se obtiene finalmente,

$$Der_i = 5,48 \times 0,10\ Dem_i$$

$$Der_i = 0,55\ Dem_i \qquad (4.$$

Esto significa que el embalse deberá ceder mensualmente u cantidad de agua equivalente a un 55% de la demanda de riego e el mes considerado.

Se ha fijado una concentración tan elevada para el flujo final Qi, correspondiente al límite máximo para el agua potable fijado por el"United States Public Health Service", debido a qu a poca distancia aguas abajo de la presa Masparro, desagua el r La Yuca. Este río contribuirá para la mayor dilución del flujo nal, no sobrecargando los compromisos del futuro embalse.

A partir de los datos de demanda bruta de riego ya calcula dos y de la ecuación (4.8), se obtienen los derechos de agua pa ra los meses de riego en m^3/Ha:

DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL
118	1.214	1.294	1.690	119

Conviene, durante los meses de lluvia, en que el embalse se estará llenando, considerar una determinada cantidad de agua a ser cedida por el embalse para preservación de la vida acuática y del medio ambiente. Por lo tanto se puede mantener en esos me ses, el flujo de agua correspondiente al menor valor encontrado para dilución en los meses de riego.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Volumen Muerto del Embalse

Se debe considerar en el dimensionamiento del embalse, un volumen muerto, para que la deposición de sedimentos acarreados por el río a lo largo de la vida útil de la obra, no ocupe el volumen útil de la misma.

Según el MOP (1965), la producción anual de sedimentos en el río Masparro, es de 1.093 metros cúbicos por kilómetro cuadrado de cuenca. La cuenca del río Masparro presenta una superficie drenada de 495 kilómetros cuadrados, por lo tanto, el aporte anual de sedimentos es de,

$$1.093\ m^3/Km^2 \times 495\ Km^2 = 0{,}54 \times 10^6\ m^3$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Luego, para n años de vida útil, deberá ser previsto para el embalse un volumen muerto, s_{min}, de,

$$s_{min} = n\ 0{,}54 \times 10^6\ m^3 \qquad (4.9)$$

En el cálculo del volumen muerto se supuso una eficiencia de deposición del 100%.

Control de Avenidas

Volúmenes de Almacenamiento Necesarios

Estos volúmenes, correspondientes al borde libre a ser mantenido en el embalse, han sido obtenidos para cada mes del año y a nivel anual, mediante el tránsito por el embalse de la avenida de diseño. La determinación de un volumen de almacenamiento para cada mes del año y de un volumen anual general, se debe a

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

las distintas esclas de tiempo utilizadas en los modelos a ser adaptados al Sistema Masparro. Los pasos seguidos en la obtenci de estos volúmenes se ilustran en el esquema representado en la Figura 4.3. La nomenclatura referente a la Figura 4.3 es presen da en la Tabla 4.5.

En resumen, el procedimiento se ha basado en un análisis d frecuencia mediante el ajuste de las series de caudales máximos mensuales y anuales, a una distribución Gumbel, determinando lo gastos correspondientes a 500 años de tiempo de retorno. Con lo gastos de diseño así obtenidos, y con el hidrograma unitario de río Masparro, se han obtenido las avenidas de diseño correspon dientes, que han sido transitadas por el embalse para la determ nación de los volúmenes de almacenamiento necesarios para contr larlas.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

De acuerdo a la secuencia lógica de la Figura 4.3, se va a describir en el mismo orden, los procedimientos y criterios adop tados para la obtención de los prerequerimientos y entradas a los programas de computación utilizados. Los listados de esos programas constan del Apéndice A de este trabajo.

Prerequerimientos

1.- Datos Diarios de Escorrentía en el Período Seco del Año.

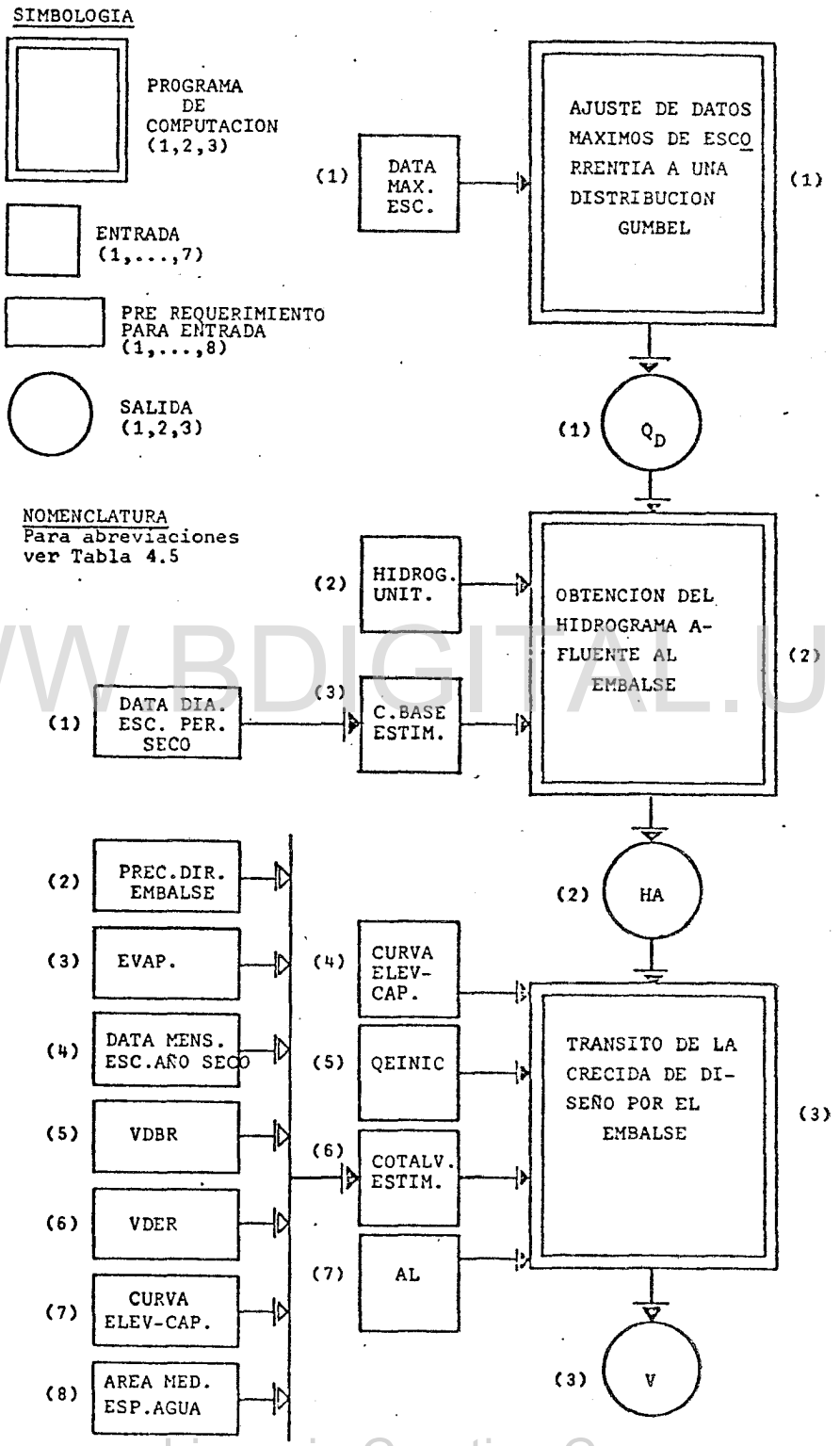
Esos datos, necesarios para la estimación del caudal base del río, han sido obtenidos de los registros del Distrito Hidro lógico 2, publicados por el MOP en el período 1963-1974.

2.- Precipitación Directa Sobre el Embalse.

El MOP (1973) considera la información pluviométrica de la estación La Marqueseña como representativa para las precipitaci

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

Figura 4.3. Esquema para la Obtención de los Volúmenes V de Almacenamiento para el Control de Crecidas



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

TABLA 4.5

NOMENCLATURA UTILIZADA EN LA FIGURA 4.3

PREREQUERIMIENTOS

(1) DATA DIA ESC. PER. SECO. datos diarios de escorrentía en e período seco del año

(2) PREC. DIR. EMBALSE. precipitación directa sobre el embalse

(3) EVAP. datos mensuales de evaporación

(4) DATA MENS. ESC. AÑO SECO. datos mensuales de escorrentía e el año más seco de registro

(5) VDBR. volúmenes mensuales de demanda bruta de riego

(6) VDER. volúmenes mensuales de derechos de agua

(7) CURVA ELEV. CAP. curva elevación-capacidad

(8) AREA MED. ESP. AG. área media del espejo de agua en el embalse.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENTRADAS

(1) DATA MAX ESC. datos máximos de escorrentía

(2) HIDROGR. UNIT. hidrograma unitario

(3) C. BASE ESTIM. caudal base estimado

(4) CURVA ELEV-CAP. curva elevación-capacidad

(5) QEINIC. gasto efluente inicial por el aliviadero

(6) COTALV. ESTIM. cota estimada de la cresta del aliviadero

(7) AL. anchura del aliviadero.

SALIDAS

(1) Q_D = gasto del diseño

(2) HA = hidrograma afluente al embalse correspondiente a la cre cida del diseño

(3) V = volúmen de almacenamiento necesario para el control de la crecida de diseño

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

nes sobre el futuro embalse. Las medias de las precipitaciones mensuales en el período 1957-1972 aparecen en la Tabla 4.6.

3.- Datos Mensuales de Evaporación.

También la información evaporimétrica de la estación la Marqueseña ha sido considerada por el MOP (1973) como representativa de las pérdidas por evaporación en el futuro embalse. En el referido trabajo, se ha adoptado un coeficiente de tina de 0,80. Se ha compilado las medias mensuales en el período 1957-1972, ya multiplicadas por el coeficiente 0,8 y que aparecen en la Tabla 4.6.

4.- Datos Mensuales de Escorrentía en el Año más Seco.

El período más seco registrado como se puede observar en la Tabla 4.4, corresponde al año 1952, con un volumen escurrido de 714,300 x $10^6 m^3$. Se ha utilizado los datos mensuales de ese año, los cuales aparecen en la Tabla 4.3.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

5.- Volúmenes Mensuales de Demanda Bruta de Riego.

El área máxima regable por el embalse Masparro, según Flores (1974), es de 25.000 Ha. A partir de este valor y de los datos de demanda bruta de riego en m^3/Ha, se obtienen los requerimientos mensuales en $10^6 m^3$,

DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	ANUAL
5,38	55,20	58,80	76,83	5,43	201,64

6.- Volúmenes Mensuales de Derechos de Agua.

Para las 25.000 Ha. en base a los valores mensuales de derechos de agua en m^3/Ha, se obtienen los volúmenes mensuales necesarios para dilución, preservación de la vida acuática y del me-

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

TABLA 4.6

ESTACION CLIMATOLOGICA LA MARQUESEÑA

PRECIPITACIONES MENSUALES MEDIAS (PREC) EN mm.

EVAPORACION SOBRE **EL FUTURO** EMBALSE (EVAP) EN mm

COEFICIENTE DE TINA = 0,80

PERIODO: 1957-1972

MES	PREC.	EVAP.
ENERO	20,17	157,20
FEBRERO	15,45	172,91
MARZO	22,47	197,01
ABRIL	135,46	147,58
MAYO	224,56	127,92
JUNIO	246,32	107,95
JULIO	246,19	106,84
AGOSTO	207,97	114,21
SEPTIEMBRE	179,73	127,50
OCTUBRE	155,26	123,38
NOVIEMBRE	94,14	122,84
DICIEMBRE	33,72	129,39
ANUAL	1581,65	1634,72

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

dio ambiente, en $10^6 m^3$,

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO A DICIEMBRE
29,96	31,92	41,70	2,95	2,92

7.- Curva Elevación-Capacidad.

Se ha utilizado las curvas elevación - capacidad y elevación-área del espejo de agua del embalse Masparro publicadas por CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971). Estas curvas son reproducidas en la Figura 4.4.

8.- Area Media del Espejo de Agua en el Embalse.

Este dato es necesario para la transformación de las unidades de los datos de precipitación y evaporación sobre el embalse en unidades de volumen. Se obtiene promediando el área correspondiente al volumen muerto y el área correspondiente al nivel normal de operación.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En la mayoría de los modelos a ser desarrollados adelante, la presa será dimensionada para 20 y 22 años de vida útil. Tomando el mayor período de vida útil y de acuerdo a la ecuación (4.9), el volumen muerto a considerar es de,

$$22 \times 0{,}54 \times 10^6 = 11{,}90 \times 10^6 m^3$$

En la Figura 4.4. se observa que a éste volumen de almacenamiento corresponde la elevación 195m y una superficie de $1 \times 10^6 m^2$.

Para el nivel normal de operación se ha adoptado la capacidad del embalse estimada por CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971) para

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

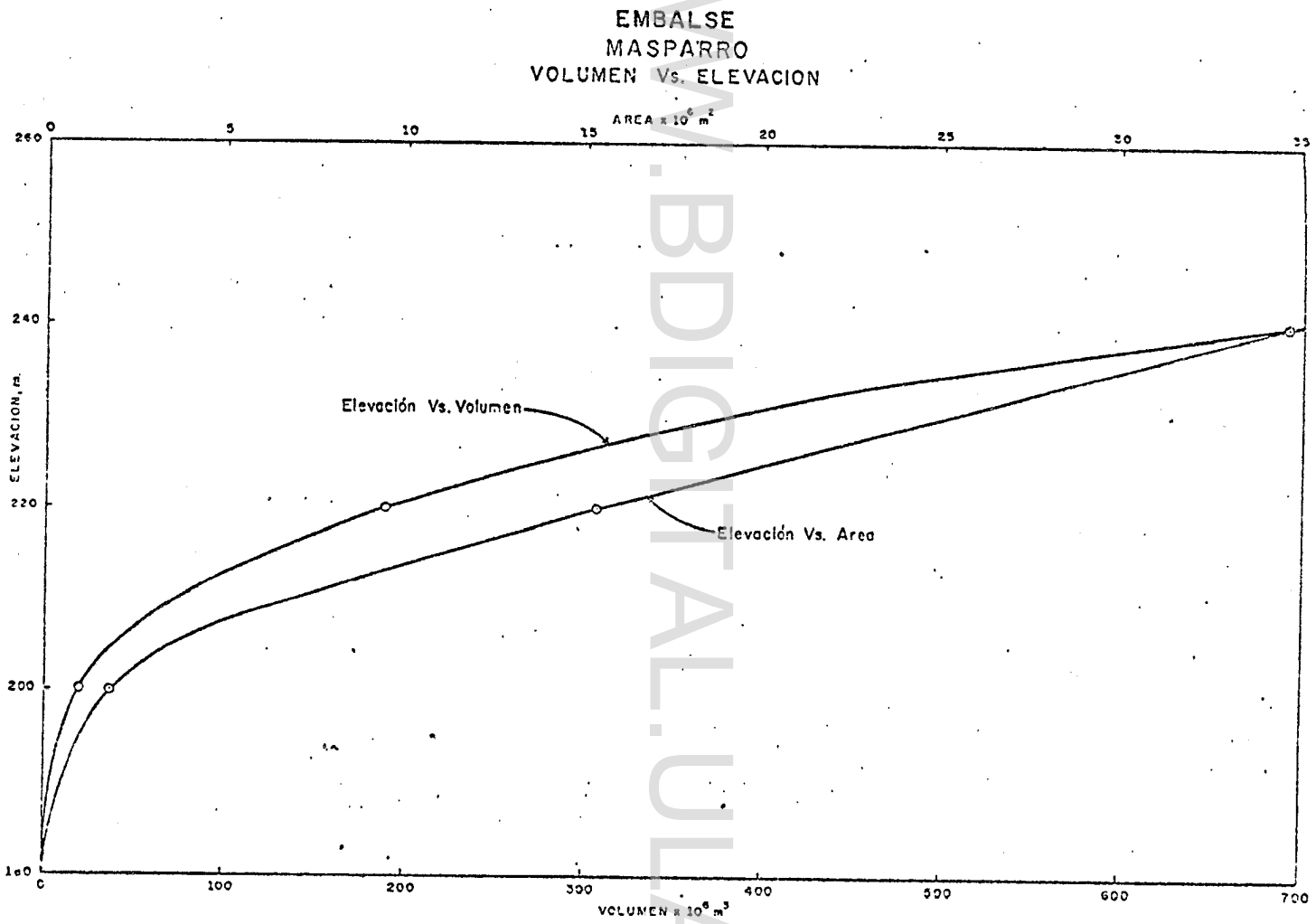


Figura 4.4. Curvas de Elevación-Capacidad y Elevación-Area del Espejo de Agua. Tomado de CIDIAT-ULA y CORPOANDES (1971).

WWW.BDIGITAL.ULA.VE
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

fines de riego, en $100 \times 10^6 m^3$. Este volumen, según la Figura 4.4 corresponde a la elevación 212m y a una superficie de $9,4 \times 10^6 m^2$. Por lo tanto el área media del espejo de agua a considerar es de,

$$\left(\frac{1+9,4}{2} \right) \times 10^6 = 5,2 \times 10^6 m^2$$

Entradas

1.- Datos Máximos de Escorrentía.

Se han utilizado las 12 series históricas mensuales de la Tabla 4.3 y la serie histórica anual de la Tabla 4.4. A las distribuciones empíricas de probabilidad de estas series se ha ajustado una distribución de Gumbel para obtención de los 12 gastos mensuales ó del gasto anual de diseño, de acuerdo a las escalas de tiempo del modelo a ser utilizado.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

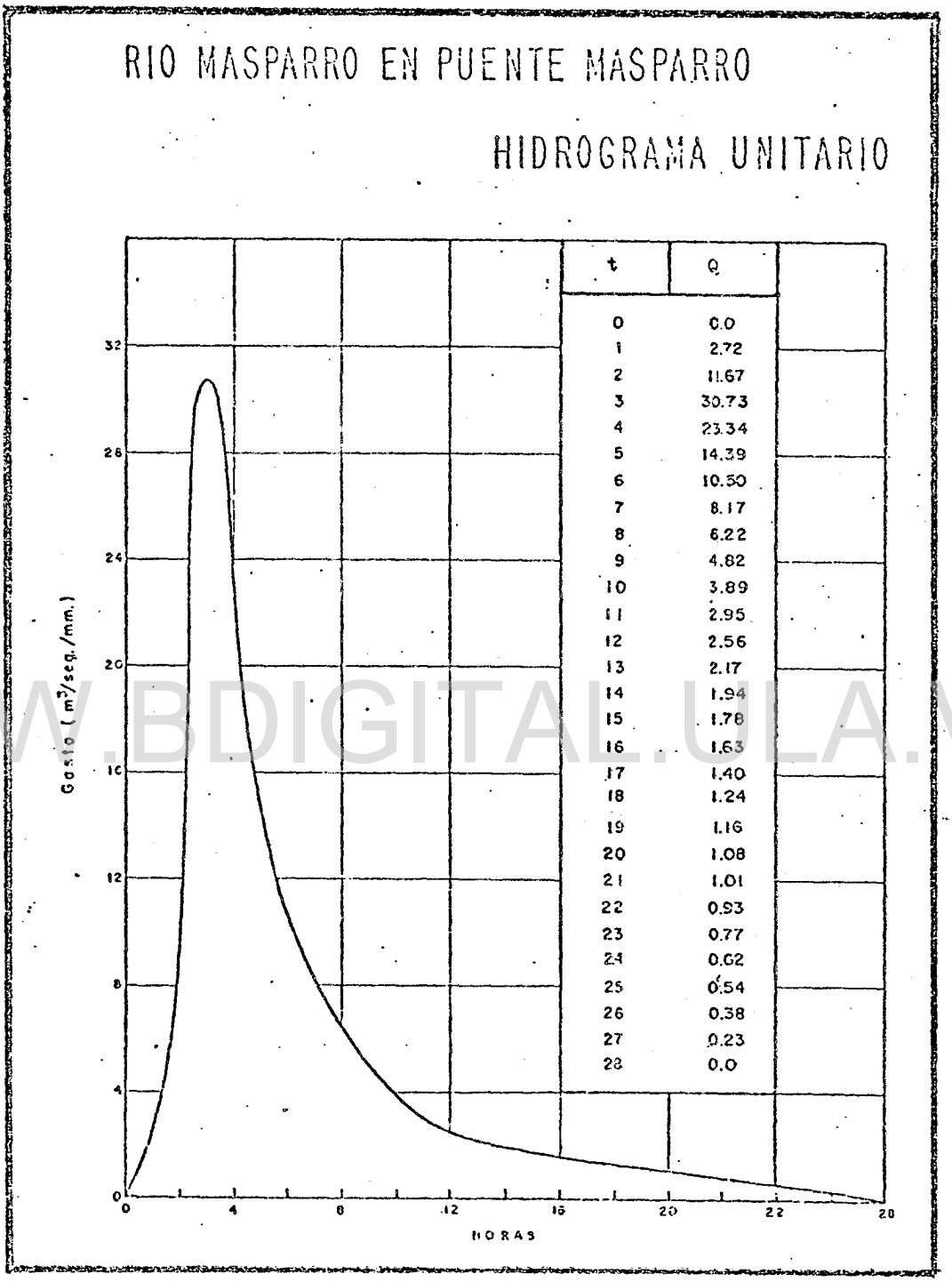
2.- Hidrograma Unitario.

El hidrograma unitario del río Masparro en Puente Masparro aparece en la Figura 4.5. Este hidrograma fue sacado del estudio hidrológico del río Masparro, realizado por el MOP (1973). Tiene un tiempo pico de tres horas, correspondiente a 30,73 m^3/seg/mm y un tiempo base de 28 horas.

3.- Caudal Base Estimado.

Uno de los métodos más empleados para la estimación del caudal base un río, según Linsley et al (1958), consiste en desarrollar una curva de descenso, compuesta de curvas de descenso de tormentas individuales. La curva de descenso de una tormenta es la rama descente del hidrograma observado, después de ocurrido el pico del mismo.

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



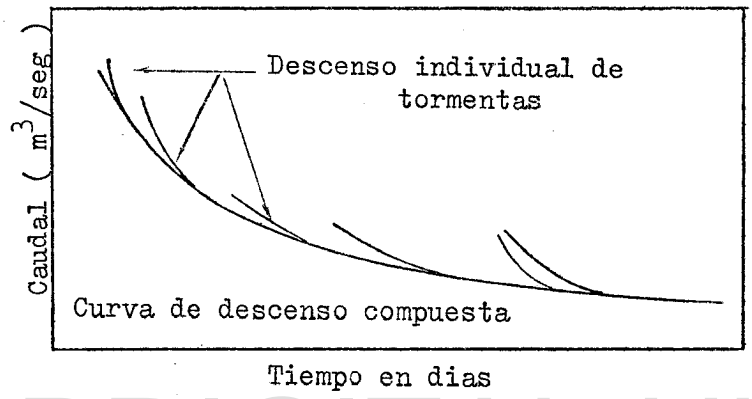
t	Q
0	0.0
1	2.72
2	11.67
3	30.73
4	23.34
5	14.39
6	10.50
7	8.17
8	6.22
9	4.82
10	3.89
11	2.95
12	2.56
13	2.17
14	1.94
15	1.78
16	1.63
17	1.40
18	1.24
19	1.16
20	1.08
21	1.01
22	0.93
23	0.77
24	0.62
25	0.54
26	0.38
27	0.23
28	0.0

Figura 4.5. Hidrograma Unitario del Río Masparro.
Tomado del MOP (1973)

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

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

El método consiste en plotear los gastos diarios observados después del pico de la crecida, contra el tiempo en días. Repi - tiendo este procedimiento para varias tormentas, es posible trazar una curva envolvente a las distintas curvas de descenso, con forme se ilustra en la Figura 4.6.



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Figura 4.6. Curva de Descenso Compuesta

Cuando la curva compuesta se torna asintótica con respecto a la dirección horizontal, se obtiene el caudal base. El procedimiento es muy laborioso y requiere un número apreciable de datos diarios de escorrentía.

El caudal base también es conocido como corriente de agua subterránea ó caudal de estación seca por ser el principal responsable de la mantención del flujo del río en los meses secos.

En el procedimiento utilizado, se ha considerado los meses de enero y febrero como representativos del período más seco del año. Con los datos diarios del río Masparro en el período 1962 - 1974, se ha tomado, para cada año, el menor gasto observado en el período seco considerado. Esos valores expresados en m^3/seg.

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

son,

1962 - 3,30	1969 - 2,05
1963 - 2,23	1970 - 2,58
1964 - 1,74	1971 - 4,25
1965 - 3,47	1972 - 6,00
1966 - 2,86	1973 - 2,45
1967 - 2,70	1974 - 2,45
1968 - 1,80	

El promedio de esos gastos es de 2,91 m^3/seg., que es el gasto base adoptado, y el cual será sumado a los hidrogramas derivados del hidrograma unitario.

4.- Curva Elevación-Capacidad.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La curva elevación-capacidad además de constituir un requisito indispensable para la estimación de la cota de la cresta del aliviadero, también es un dato necesario para el programa de tránsito de avenidas por embalses.

La curva es definida en el programa, por 30 puntos con la siguientes coordenadas,

ELEVACION (m)	CAPACIDAD ($10^6 m^3$)	ELEVACION (m)	CAPACIDAD ($10^6 m^3$)
182	0	212	90
184	1	214	110
186	2	216	130
188	4	218	157
190	5	220	190
192	7	222	217
194	10	224	250

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