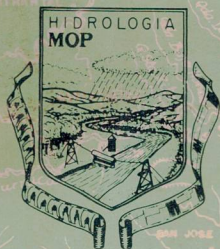


REPUBLICA DE VENEZUELA
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION DE OBRAS HIDRAULICAS



DIVISION DE HIDROLOGIA

MODELO ESTOCASTICO PARA LA GENERACION DE PICOS
DE CRECIENTES

ING° ALFREDO FLORES ESPINA

Ministerio de Obras Públicas

Venezuela

1. PROCESOS HIDROLOGICOS

Un proceso puede ser definido como un fenómeno, el cual cambia continuamente especialmente con respecto al tiempo. El fenómeno del ciclo hidrológico cambia con el tiempo, por lo tanto puede ser llamado como el proceso hidrológico. Los datos hidrológicos sirven como valores de entrada para el diseño de sistemas de recursos hidráulicos. El proceso natural del ciclo hidrológico, el cual produce los datos hidrológicos, son verdaderamente "estocásticos" en el sentido de que el fenómeno hidrológico cambia con el tiempo de acuerdo a una ley de probabilidad, así como de la relación secuencial entre sus ocurrencias.

Esencialmente todos los procesos hidrológicos se desarrollan en el tiempo siguiendo leyes probabilísticas, de aquí que deben ser tratados como procesos estocásticos. Tradicionalmente han sido utilizados procedimientos determinísticos o probabilísticos para tratar el fenómeno hidrológico de manera de simplificar el análisis, no tomándose en cuenta la secuencia de ocurrencia de los eventos, asumiéndose que la ocurrencia sigue una ley de probabilidad definida en la cual las variables son consideradas puramente aleatorias. De aquí que solamente conclusiones aproximadas pueden ser obtenidas considerando los fenómenos hidrológicos como determinísticos. El proceso estocástico que realmente es más preciso, ha sido introducido en el campo de la hidrología y planificación de recursos hidráulicos en la última década. Se ha aplicado en el análisis de registros hidrológicos, generación de datos hidrológicos, estudio del problema del almacenamiento, análisis de sistemas de cuencas, estudios de morfología de ríos, análisis de desarrollo de recursos de agua, entre otros. En este trabajo nos hemos avocado a los procesos estocásticos aplicados a la hidrología en la generación de datos hidrológicos y el problema del almacenamiento.

2. PROCESOS ESTOCASTICOS

Un proceso estocástico es definido como una colección de variables aleatorias

$$X(t) = \{ X_t, t \in T \} \quad (2.1)$$

el cual es una función del tiempo y donde la variable X_t corre a lo largo del tiempo t dentro de un rango T . A T también se le llama el índice del proceso y si solo toma valores discretos, por ejemplo $T = (0, 1, 2, \dots)$, el proceso estocástico es llamado un proceso de parámetros discretos. En cambio si T toma valores continuos como es $T = (t: -\infty < t < \infty)$, el proceso estocástico es llamado un proceso de parámetros continuos.

El valor el cual toma $X(t)$ es llamado el estado del proceso. El conjunto de valores en el cual todos los valores de $X(t)$ están situados, es llamado el espacio del estado. Dependiendo de si el espacio del estado es discreto o continuo, el proceso estocástico puede ser clasificado como un proceso de estado discreto ó un proceso de estado continuo.

Los procesos estocásticos pueden ser clasificados de acuerdo a la relación de dependencia entre las variables aleatorias $X(t)$. Estas relaciones están especificadas para una función de unión distribuida dada. Entre los tipos clásicos de procesos estocásticos que se caracterizan por diferentes relaciones de dependencia podemos citar:

- a-) Procesos con incrementos independientes
- b-) Martingales
- c-) Procesos Markovianos
- d-) Procesos Estacionarios

Para este trabajo, hemos seleccionado los procesos Markovianos, basándonos en la experiencia de varios autores que han trabajado en el campo de la hidrología, especialmente Myron Fiering (1967), quien demuestra las ventajas que tiene la generación sintética de registros hidrológicos, el cual el llama "hidrología operacional", sobre otros métodos aplicados en el problema del almacenamiento óptimo de embalses, tales como son el método de la curva de doble masa propuesta por Rippl, los métodos analíticos y empíricos propuesto por Hurst, Hazen, Sudler, Feller y otros distinguidos especialistas de la materia.

3. TECNICAS MATEMATICAS

3.1 Propiedad Markoviana

La propiedad Markoviana establece que la probabilidad de que un sistema estará en un estado dado a un tiempo dado t_1 , puede ser deducido del conocimiento de ese estado en un tiempo anterior t_0 y no depende de la historia del sistema antes del tiempo t_0 .

Matemáticamente, un proceso estocástico de parámetro discreto $\{X_n, n=0, 1, 2, \dots\}$ ó un proceso estocástico de parámetros continuos $\{X_t, t \geq 0\}$ se dice que es un proceso Markoviano si para cualquier conjunto de puntos de tiempo $t_1, t_2, \dots, t_n$ en el índice del proceso, la distribución condicional de X_{t_n} para valores dados de $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_{n-1}}$, depende solamente de $X_{t_{n-1}}$, es decir, para cualquier número real $x_1, x_2, \dots, x_n$.

$$P = \left\{ X_{t_n} \leq x_n \mid X_{t_1} = x_1, \dots, X_{t_{n-1}} = x_{n-1} \right\} = P \left\{ X_{t_n} \leq x_n \mid X_{t_{n-1}} = x_{n-1} \right\} \quad (3.1)$$

De la anterior ecuación se puede interpretar intuitivamente de que el estado futuro de un proceso depende solamente de su estado presente y es independiente de los estados pasados. Un proceso Markoviano de parámetro discreto, es llamada comunmente como la cadena de Markov.

3.2 La Relación Recursiva Básica

Los caudales observados en una estación registradora representan una muestra de una serie en el tiempo, y es nuestro principal objetivo la generación de una secuencia de números que sean "estadísticamente indistinguible" del tiempo de observación de la serie ó registro. "Estadísticamente Indistinguible" implica que sea "indistinguible dentro de un muestreo de errores anticipadamente"; estos errores varían inversamente con el incremento de la longitud del registro, directamente con el coeficiente de variación del muestreo y la estadística de las secuencias generadas, reflejan esa variación.

Una serie en el tiempo puede ser representada por varias funciones analíticas dependiendo su utilidad según la clase de la serie en particular. Estas funciones son de la forma:

$$Q_t = f(t) + \mu_t \quad (3.2)$$

Q_t Valor de una serie en el tiempo, para el tiempo t .

$f(t)$ Es el componente determinístico

μ_t Es el componente aleatorio

3.3 Modelo Markoviano - Normal

La variación del flujo estacional puede ser tratado por el modelo recursivo, para lo cual se requiere un doble subíndice. Uno de los subíndices corre a través de todos los valores generados y el otro corre cíclicamente a través de todas las estaciones o períodos en el ciclo anual.

El modelo Markoviano - Normal para la generación de valores mensuales según M. Fiering es:

$$Q(i,j) = \mu_j + \rho_j \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} (Q(i-1,j-1) - \mu_{j-1}) + \eta_i \sigma_j (1 - \rho_j^2)^{1/2} \quad (3.3)$$

- i índice secuencial
 j índice mensual
 Q flujo ó caudal mensual
 μ caudal medio
 ρ coeficiente de correlación entre los meses j y $j-1$
 N número al azar normalmente distribuido

Tomando las espectaciones en la ecuación (3.3) encontramos:

$$E(Q_{i,j}) = \mu_j$$

$$Var(Q_{i,j}) = \sigma_j^2$$

$$E(Q_{i,j} \cdot Q_{i-1,j-1}) = \mu_j \cdot \mu_{j-1} + \rho_j \sigma_j \sigma_{j-1}$$

De aquí que los dos primeros momentos y la covarianza estan preservadas por el modelo recursivo. El modelo de M. Fiering está basado en la asunción de que la distribución de los valores mensuales es normal. Esta asunción fué hecha despues de analizar la distribución probabilística de los valores históricos y de las transformaciones logarítmicas cuadráticas de los valores mensuales.

Este modelo fué posteriormente extendido por Harms y Campbell (1967). Ellos encontraron que la transformación logarítmica ajustaba mejor que la distribuida normalmente.

3.4 Modelo Markoviano - Log - Normal

El modelo Markoviano - Log-Normal, es ampliamente usado en aplicaciones prácticas. Mucho de los casos de escurrimientos donde el coeficiente de variación es mayor de 0,5, puede ser perfectamente modelado por un generador log-normal. Estos modelos elimina el problema de generar valores negativos, especialmente cuando el coeficiente de variación incrementa.

3.4.1 Método Aproximado

Una práctica común para distribución log-normal de los valores anuales, es tomar los logaritmos naturales de los valores individuales. La media, la varianza y el coeficiente de correlación de esas variables transformados son usados como parámetros en un equivalente generador Markoviano-Normal. Después de la obtención de los valores, y utilizando la exponencial se encuentran los valores anuales que han sido generados. Para valores mensuales el método es exactamente el mismo, excepto que es usado un modelo de generación para múltiples períodos. Las entradas del modelo son determinadas de los logaritmos de los valores observados. Sea X el valor observado que satisface a dos parámetros de la distribución log-normal. Si $Y = \log_e X$ es normalmente distribuido, la ecuación básica de un modelo Markoviano para múltiples períodos.

$$Y_{i,j} = \mu_j + \rho_j \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} \{ Y_{i-1,j-1} - \mu_{j-1} \} + \epsilon_j \sigma_j (1 - \rho_j^2)^{1/2} \quad (3.4)$$

i índice secuencial (representa los años)

j índice mensual

μ, σ, ρ son la media, la desviación típica y el coeficiente de correlación para los valores mensuales, provenientes de los datos observados.

ϵ es un número al azar distribuido normalmente con media = 0 y varianza = 1.

Después de la generación y utilizando la exponencial tenemos que $X = e^Y$, para una secuencia de valores generados en el período de tiempo considerado.

3.4.2 Método de Ajuste Matemático

Es razonable pensar que un procedimiento de generación de caudales, debe preservar las propiedades de los valores observados más que preservar las propiedades de los valores transformados. Matalas (1967) dió una clara explicación sobre un método de ajuste matemático para la generación log-normal de secuencias anuales, para datos que se ajustan a los tres parámetros de la distribución log-normal. Para la mayoría de los casos prácticos es suficiente con utilizar los parámetros para el caso de dos parámetros siendo las ecuaciones para los dos primeros momentos ajustados matemáticamente:

$$\mu_x = \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right) \quad (3.5)$$

$$\sigma_x^2 = \exp(2\sigma_y^2 + 2\mu_y) - \exp(2\sigma_y^2 + 2\mu_y) \quad (3.6)$$

$$\rho_x = [\exp(\sigma_y^2 \cdot \rho_y) - 1] / [\exp(\sigma_y^2) - 1] \quad (3.7)$$

Donde μ_x, σ_x, ρ_x son la media, la varianza y el coeficiente de correlación para la distribución log-normal para los valores observados (muestra) y μ_y, σ_y, ρ_y son los mismos valores respectivamente para la distribución log-normal.

El método para valores mensuales, es una extensión del propuesto por Matalas para valores anuales. Burges (1970) definió los parámetros para valores mensuales μ_j, σ_j, ρ_j (no son parámetros de la población) como:

$$\bar{X}_j = \exp \left(\mu_j + \frac{\sigma_j^2}{2} \right) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{X_j}^2 = \exp (2\sigma_j^2 + 2\mu_j) - \exp (\sigma_j^2 + 2\mu_j) \quad (3.9)$$

$$R_{0j} = \frac{\exp (\sigma_{j-1}^2 + \sigma_j^2 + \mu_j) - 1}{[\exp (\sigma_{j-1}^2) - 1]^{1/2} [\exp (\sigma_j^2) - 1]^{1/2}} \quad (3.10)$$

$\bar{X}_j, \sigma_{X_j}, R_{0j}$; son la media, varianza y coeficiente de correlación para el mes j (R_{0j} es la correlación entre el mes j con el mes $j-1$). La generación se lleva a cabo a través de la ecuación (3.4). Burges en sus conclusiones y recomendaciones para el uso de generadores log-normal dice que se deben usar métodos que preserven los momentos y correlaciones de los datos observados ya que los procedimientos aproximados dan diferencias significantes en los resultados.

4. RELACIONES HIDROLOGICAS PARA EL ESTUDIO DE LOS PICOS DE CRECIENTES.

Según el régimen de un río, se ha encontrado la existencia de diversas relaciones entre los caudales medios (diarios, mensuales ó anuales) y los picos máximos (diarios, mensuales ó anuales). Es evidente que según el grado de variabilidad del régimen estas relaciones tendran mayor ó menor correlación especialmente para el caso de ríos efímeros o intermitentes. Para este estudio nos hemos basado en la relación de caudales medios mensuales y picos máximos mensuales, ya que la generación de valores es la de los gastos medios mensuales, lo cual permite combinar ambas partes para generar picos de crecientes máximos mensuales y por ende el pico máximo anual.

5. DESARROLLO DEL MODELO

Basándonos en lo explicado en los puntos 3 y 4 se procedió a la elaboración de un modelo para la generación de picos de crecientes. Las fases que componen el modelo son las siguientes:

- a-) Utilizando el modelo Markoviano log-normal para valores mensuales, se procede a generar estocásticamente los caudales medios mensuales para el período de observación. Siendo el componente aleatorio uno de los factores principales de la generación, el procedimiento es repetido un número de veces, digamos 1000, para una definición más precisa de la distribución estadística de los valores mensuales y aprovechando las facilidades que nos brindan las modernas computadoras digitales en cuanto a velocidad de memoria y entrada-salida de datos.
- b-) Una vez comprobada la existencia de una buena correlación, se procede a la generación de los valores mensuales para el período de tiempo seleccionado (50 años, 100 años, ...etc.) esto se repite un número γ de veces según lo ya explicado en la fase a.
- c-) Se hace un análisis de la distribución estadística de cada mes del año, para el número γ de veces que se ha generado. Encontrándose, la media la desviación típica y el valor más común (moda).
- d-) Se selecciona el valor máximo para el año, del caudal medio mensual y a partir de las relaciones de caudales medios mensuales y picos máximos mensuales se obtienen los picos máximos anuales. Esto genera una serie de picos máximos anuales para el período seleccionado. (Para este trabajo se han obtenido dos series de picos máximos anuales: (1) utilizando los valores medios obtenidos en el punto c y (2) a partir de los valores más comunes (moda) en-

contrados en el punto c.)

- e-) Ordena los picos de mayor a menor y le asigna un período de retorno a partir de la ecuación.

$$TR = \frac{n+1}{m} \quad (5.1)$$

TR Tiempo de retorno

n Número de eventos

m Orden del evento

El modelo cuenta con varias opciones permitiendo obtener los caudales mensuales según la media y la moda de la distribución probabilística con ó sin los picos máximos anuales. El modelo contiene un subprograma que plotea la distribución probabilística y las relaciones hidrológicas si se requiere.

6. ORGANIZACION DEL PROGRAMA

El programa está compuesto de un programa principal y de seis subrutinas, cuyas funciones se describen a continuación:

a) Programa Principal

El programa principal consta de seis partes principales:

- 1) Se leen los datos de control para las distintas opciones así como los datos mensuales observados.
- 2) Transforma los datos observados en los logaritmos de los datos y calcula los parámetros estadísticos: media, desviación típica y coeficiente de correlación.
- 3) Ajusta los parámetros estadísticos para la distribución log-normal según lo explicado en el punto 3.4.2 resolviendo para μ_j ,

σ_j y ρ_j

- 4) Genera estocásticamente los valores mensuales para el período seleccionado y según el número N de veces que se desee.
 - 5) Si se requiere, calcula los picos máximos anuales para el período seleccionado con los valores medio y con la moda obtenidos del análisis estadístico de frecuencia para los valores mensuales.
 - 6) Imprime resultados
- b) Subrutina Randu
- Se encarga de generar números aleatorios, que van a ser utilizados en la generación estocástica.
- c) Subrutina Gauss
- Distribuye los números aleatorios según la ley probabilística de distribución normal.
- d) Subrutina Ormme
- Ordena de mayor a menor, las series de valores que le sean asignados.
- e) Subrutina Proba
- Asigna el período de retorno a los eventos máximos a través de la ecuación
- f) Subrutina Distri
- Hace un análisis estadístico de la distribución frecuencial de los valores mensuales, según el número N de veces que se ha generado un determinado valor mensual. Utilizando la subrutina Ormme se halla el rango por diferencia entre el valor mayor y el menor, dividiéndose en 25 partes, determinando luego que cantidad de valores hay en cada parte. Finalmente calcula la media, la moda y la desviación típica. Si se requiere y utilizando la

subrutina plotea, se obtienen los histogramas de la distribución frecuencial.

g) Subrutina Plotea

Se encarga de plotear las relaciones hidrológicas y los histogramas de la distribución frecuencial de los valores mensuales.

7. VERIFICACION DEL MODELO

Para la verificación del modelo se seleccionó la cuenca del río Tirgua en Paso Viboral (futuro sitio de presa), la cual drena parte de las aguas provenientes de las regiones occidentales del Estado Carabobo, nor-occidental del Estado Cojedes y Sur del Estado Yaracuy en Venezuela (Ver MAPA N° 1). El área de captación es de aproximadamente de 1.563 Km² con una longitud de su cauce principal de unos 105 Kms. El caudal medio para un período de observación de 29 años es de 15 m³/s y el pico de creciente máximo registrado es de 886 m³/s. El criterio seguido para la selección de esta cuenca ha sido la longitud de su período de registro, basándonos en la primera conclusión del trabajo de Burges (1971) que dice "La estimación de los parámetros para modelos de generación, no son confiables, debido a los registros cortos que son los que están usualmente disponibles. El uso de períodos cortos de registros ej: 10 a 20 años, para la determinación de los parámetros para la generación, puede conducir a resultados erróneos en estudios de embalses" por lo cual recomienda "usar el registro de observación más largo posible cuando se esté modelando caudales de ríos". También ha sido tomado en cuenta para la selección, la calidad de las observaciones así como la variabilidad de su régimen.

En la comprobación del modelo se ha seleccionado un período de 50 años para la generación estocástica de caudales mensuales, que es la vida útil escogida para el embalse. Cada período de 50 años fué generado 1000 veces, siguiendo

el criterio de la tercera y cuarta conclusión del trabajo de Burges quién sugiere que para valores anuales deben usarse como mínimo 1000 corridos mientras que para los mensuales el número de corridos puede ser menor según el grado de variabilidad del régimen, a mayor grado de variabilidad se acercará más el criterio para valores anuales.

8. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de la serie de picos máximos anuales registrados, se ha procedido a aplicarles los métodos estadísticos de GUMBEL y LOG-PEARSON TIPO III, los cuales son los más comúnmente utilizados en la obtención de picos máximos de crecientes a esperarse para períodos de retorno determinados. En el GRAFICO-1 se muestra en un papel de probabilidades extremas y a partir de la ecuación (5.1) usada para el cálculo de períodos de retorno, el grado de correlación existente entre las series de valores registrados y simulados. El GRAFICO-2 señala en un papel de probabilidades extremas, la relación que existe entre los períodos de retorno calculados para la serie de valores observados, según la ecuación (5.1) y los obtenidos por los métodos de GUMBEL y LOG-PEARSON TIPO III. A continuación en forma de TABLA, se presenta un resumen de los resultados:

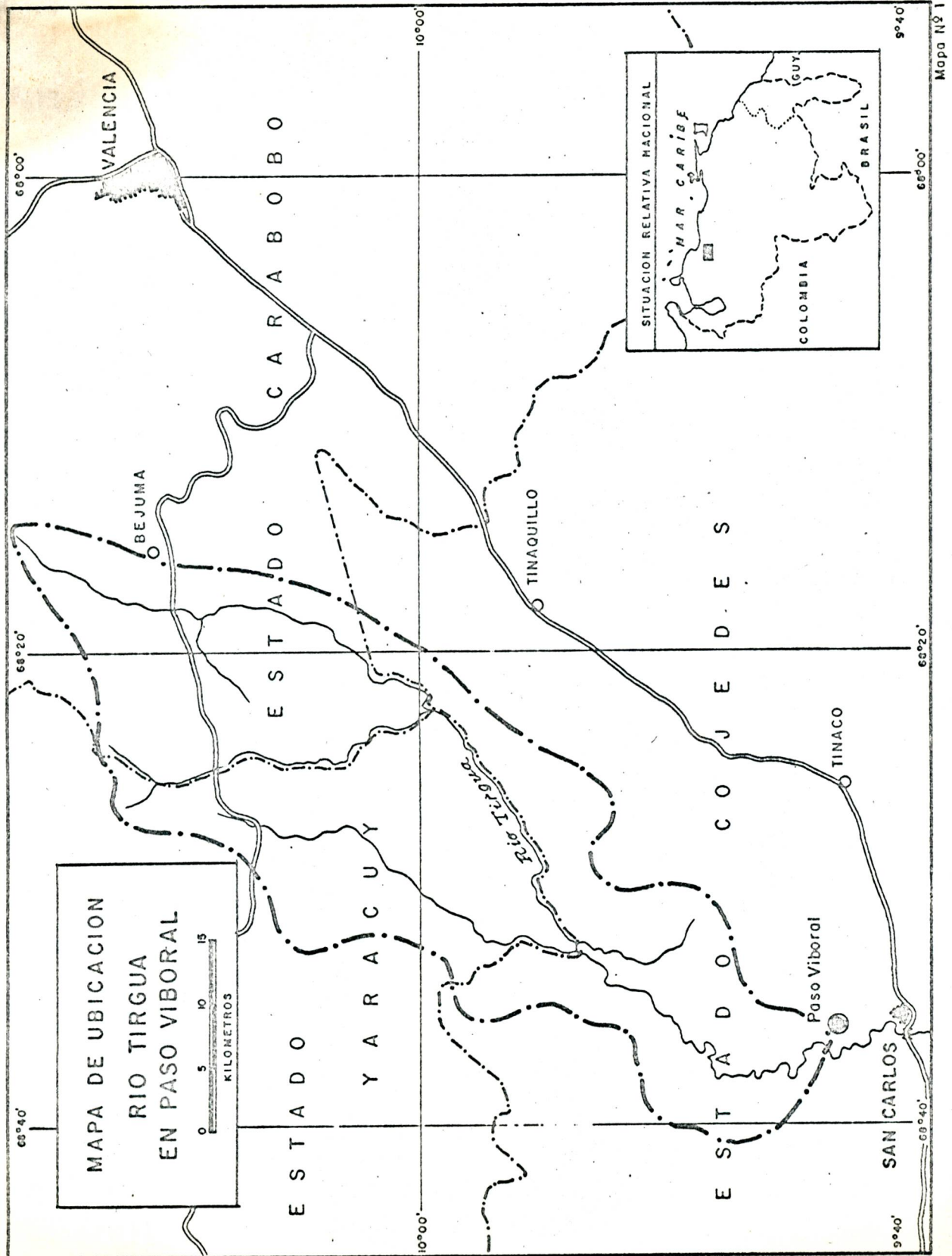
TABLA

Período de Retorno (Años)	Observado (m ³ /s)	Simulado (m ³ /s)	Gumbel (m ³ /s)	Log-Pearson Tipo III (m ³ /s)
29	886	886	1040	1041
25	860	858	984	960
15	852	835	878	846
10	838	820	776	724

Al final del informe se incluyen las salidas por la impresora, de los resultados del modelo.

9. CONCLUSIONES

El modelo de extrapolación estocástica para la generación de picos de crecientes, se ajusta con bastante exactitud a los valores registrados. El método propuesto permite con un alto grado de confiabilidad, simular picos de crecientes máximas anuales para períodos de tiempo mayores que el observado, lo cual redundará en una mayor exactitud y seguridad en el diseño de las obras hidráulicas. Siendo uno de los factores más importantes, las relaciones hidrológicas entre los picos máximos y los caudales medios mensuales, el modelo permite la flexibilidad de ser modificado en ese aspecto, según el grado de variabilidad del río y el grado de correlaciones de las variables hidrológicas.



H.O.P. HYDROLOGIA

RIO TIRGUA EN SITIO DE PRESA

GENERACION ESTOCASTICA DE 100 ANOS DE ESCURRIMIENTOS Y PICOS (M³/S)

DETERMINACION ESTADISTICA DE NIVELES-CAUDALES

PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CALCULO

PERIODO DE REGISTROS 1942 - 1970

MEDIA ESP. UTICENDRE

1.08

DESV. ESP. UTICENDRE

0.14

VALORES MEDIOS

0.92 0.82 0.71 0.70 1.01 1.19 1.29 1.39 1.32 1.25 1.09

DESVIACION TIPICA

0.13 0.14 0.13 0.10 0.21 0.16 0.24 0.13 0.12 0.13 0.13

COEFICIENTES DE CORRELACION

0.09 0.93 0.93 0.66 0.43 0.74 0.87 0.57 0.54 0.50 0.89

SUMA DE CUADRADOS DEL MES

24.88 19.93 15.27 18.61 30.78 42.03 50.29 56.65 53.43 51.11 45.72 34.72

SUMA PROD. MESTRALES(1-17)

29.09 22.25 17.44 16.61 23.31 35.63 45.32 52.76 54.80 51.50 48.22 39.79

VALORES CALCULADOS

PERIODO DE CALCULO 1942 - 2041

HIDROLOGIA

RTO VIREUM EN SITIO DE PRESA
GENERACION ESTADISTICA DE 100 AÑOS DE ESCURRIMIENTOS Y PICOS (M3/S)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1942	7.64	9.77	5.35	8.28	14.76	26.38	39.53	39.00	36.64	37.38	26.91	23.69
1943	11.72	7.08	5.68	4.52	7.27	16.47	18.88	21.99	33.35	23.95	22.22	14.78
1944	10.22	8.64	6.34	8.59	6.24	20.66	51.57	29.67	24.57	16.41	13.19	9.54
1945	6.19	5.29	4.33	4.07	15.61	21.31	9.63	20.99	24.39	15.58	15.10	10.66
1946	7.98	6.26	6.08	11.78	12.12	18.60	15.23	20.79	30.80	21.62	21.12	14.57
1947	8.93	7.29	5.65	6.55	16.04	24.06	39.02	36.56	17.40	21.70	18.40	11.63
1948	9.31	6.73	5.62	8.05	8.29	10.22	17.15	20.94	22.28	17.59	17.59	12.74
1949	7.26	5.58	4.10	4.81	11.56	23.55	40.49	36.74	22.66	16.99	14.02	11.19
1950	7.58	5.42	5.00	2.81	6.03	13.89	15.33	23.27	30.09	26.03	38.67	16.53
1951	10.09	7.98	7.13	7.73	10.14	13.27	15.78	10.32	14.81	14.01	10.92	9.02
1952	6.08	5.14	3.97	4.10	8.78	21.09	12.29	13.83	13.83	18.91	13.19	10.82
1953	7.05	5.75	4.49	4.76	13.14	13.34	17.75	34.63	13.23	13.95	14.51	8.61
1954	6.43	5.69	5.48	6.00	11.97	17.23	15.13	23.66	20.69	13.88	10.48	8.26
1955	5.74	4.72	3.45	4.31	10.65	11.58	18.17	32.04	19.21	24.59	24.81	14.52
1956	8.61	8.21	5.62	8.49	9.64	13.91	10.48	22.00	18.32	23.52	20.79	13.56
1957	7.70	6.85	5.30	6.51	19.10	23.62	49.11	28.06	18.81	30.40	17.74	14.80
1958	8.43	7.02	6.09	12.79	17.59	21.98	14.89	19.66	11.32	9.89	12.91	9.29
1959	6.87	5.65	4.22	5.58	9.81	10.25	12.40	24.63	16.06	20.00	18.33	12.11
1960	9.33	8.01	5.80	4.38	12.92	17.06	24.47	39.71	27.46	31.60	30.77	18.53
1961	12.84	9.54	7.96	6.14	12.70	11.72	11.72	16.38	13.12	11.65	15.92	11.59
1962	7.51	6.12	5.03	7.13	12.86	25.79	32.59	27.27	27.27	18.94	16.49	9.79
1963	6.17	5.11	4.43	7.09	7.34	10.42	20.69	20.02	15.77	13.01	11.92	8.50
1964	7.42	5.90	4.99	4.96	10.76	11.56	10.82	17.50	13.99	21.59	22.24	11.77
1965	8.74	7.17	5.15	5.40	8.95	10.90	8.01	19.33	18.17	16.20	16.20	11.31
1966	7.51	6.92	5.63	7.77	17.69	16.50	12.87	19.65	20.19	21.44	16.94	9.99
1967	6.15	5.69	4.47	6.58	6.77	11.16	19.48	20.61	18.19	20.16	12.66	7.93
1968	6.82	5.94	4.07	7.26	12.39	21.98	12.32	29.37	28.98	16.74	17.31	12.69
1969	8.95	7.44	5.10	8.78	11.24	23.70	18.71	27.02	21.96	10.54	13.07	9.85
1970	7.03	5.03	4.50	5.91	10.20	16.29	29.53	35.21	23.10	14.87	11.02	8.92
1971	7.88	6.90	5.51	6.72	6.34	13.42	20.40	27.07	18.83	17.79	21.64	12.31
1972	11.00	9.24	7.78	9.21	22.41	19.97	20.69	24.81	17.10	17.51	15.68	11.79
1973	11.39	8.46	6.74	8.35	9.19	14.01	25.86	39.57	15.88	23.84	23.44	14.71
1974	7.75	5.21	4.40	4.66	14.78	23.70	81.59	51.38	26.93	22.84	27.14	18.30
1975	12.63	9.59	6.46	5.75	6.66	13.77	12.47	13.98	17.67	20.01	17.50	11.27
1976	8.48	7.56	5.45	7.25	5.39	7.26	15.22	23.90	11.68	17.35	17.44	12.48
1977	9.57	7.54	5.88	7.77	8.55	16.41	10.45	26.94	23.03	20.60	10.93	6.30
1978	7.19	6.01	5.59	5.57	6.15	10.54	10.14	15.62	18.43	18.77	18.22	13.88
1979	9.47	8.60	7.11	6.19	20.06	24.61	36.36	52.77	23.71	13.86	14.28	10.76
1980	9.44	7.45	4.89	6.37	6.49	11.99	4.50	17.42	21.71	19.14	11.39	7.90
1981	7.61	6.72	5.41	7.16	12.25	25.49	41.13	18.46	16.84	16.07	18.32	12.70
1982	8.92	4.77	3.62	3.30	9.27	14.30	8.00	20.16	18.49	15.11	17.16	13.10
1983	7.43	6.03	5.09	6.05	9.54	17.14	33.70	44.58	30.64	25.62	24.30	12.18
1984	6.22	4.66	3.86	5.54	8.74	13.35	11.65	40.58	20.54	29.87	18.14	10.50
1985	6.38	4.16	3.71	5.94	9.46	20.70	13.38	33.41	19.15	11.15	11.43	5.92
1986	4.86	4.39	4.25	4.53	11.19	13.65	12.00	25.12	21.77	25.22	26.21	19.50
1987	11.75	10.26	7.75	8.14	24.66	25.70	28.96	18.18	15.97	20.62	12.48	9.95
1988	9.12	6.81	5.71	6.23	5.53	15.21	29.90	25.91	28.90	22.64	21.55	16.24
1989	9.18	7.10	5.06	5.20	13.64	16.62	9.41	15.01	20.06	14.95	12.74	10.17
1990	7.54	6.35	4.34	8.00	10.40	17.80	6.58	16.57	11.39	14.78	14.36	11.21
1991	7.53	7.66	5.71	4.95	5.40	14.78	25.29	26.17	21.49	37.07	27.55	15.85

RESULTADOS PROBABILISTICOS

NO.	VALOR	PR.	PROBAB.
1	963.3	58.00	0.01724
2	886.0	29.00	0.03448
3	857.0	19.33	0.05172
4	835.0	14.50	0.06897
5	810.0	11.60	0.08621
6	820.0	8.67	0.10345
7	639.0	8.29	0.12069
8	629.0	7.25	0.13793
9	590.2	6.44	0.15517
10	556.8	5.80	0.17241
11	554.0	5.27	0.18966
12	555.0	4.83	0.20690
13	509.0	4.46	0.22414
14	506.9	4.14	0.24138
15	497.0	3.87	0.25862
16	472.2	3.63	0.27586
17	463.7	3.41	0.29310
18	459.4	3.22	0.31034
19	452.4	3.05	0.32759
20	445.3	2.90	0.34483
21	438.2	2.76	0.36207
22	432.0	2.64	0.37931
23	430.0	2.52	0.39655
24	407.0	2.42	0.41379
25	395.8	2.32	0.43103
26	385.1	2.23	0.44828
27	379.9	2.15	0.46552
28	371.0	2.07	0.48276
29	360.5	2.00	0.50000
30	350.0	1.93	0.51724
31	354.0	1.87	0.53448
32	347.3	1.81	0.55172
33	339.2	1.76	0.56897
34	322.7	1.71	0.58621
35	319.0	1.66	0.60345
36	305.0	1.61	0.62069
37	304.0	1.57	0.63793
38	301.9	1.53	0.65517
39	298.8	1.49	0.67241
40	295.4	1.45	0.68966
41	280.0	1.41	0.70690
42	278.9	1.38	0.72414
43	278.1	1.35	0.74138
44	273.1	1.32	0.75862
45	248.0	1.29	0.77586
46	232.9	1.26	0.79310
47	230.0	1.23	0.81035
48	190.0	1.21	0.82759
49	190.0	1.18	0.84483
50	185.0	1.16	0.86207

TACOM

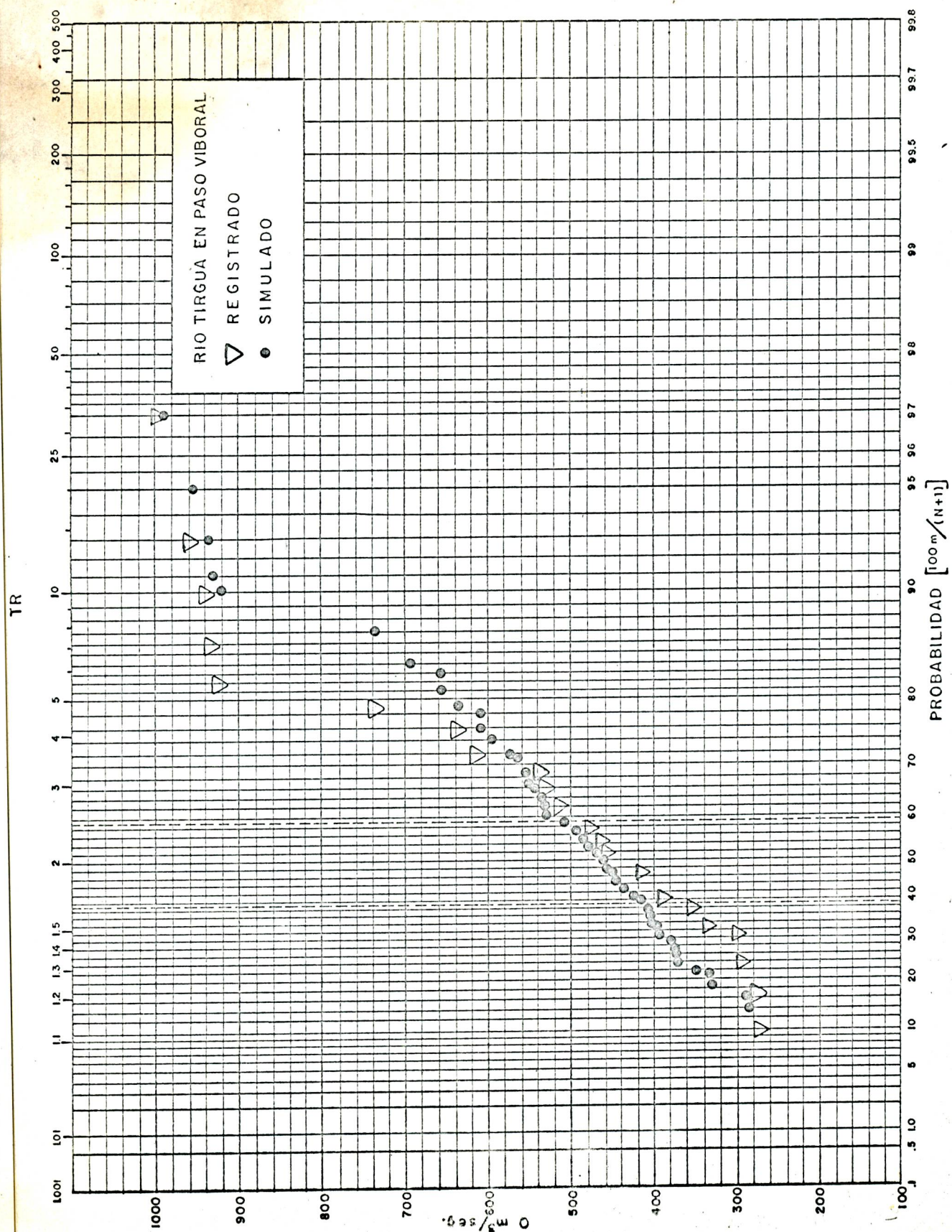
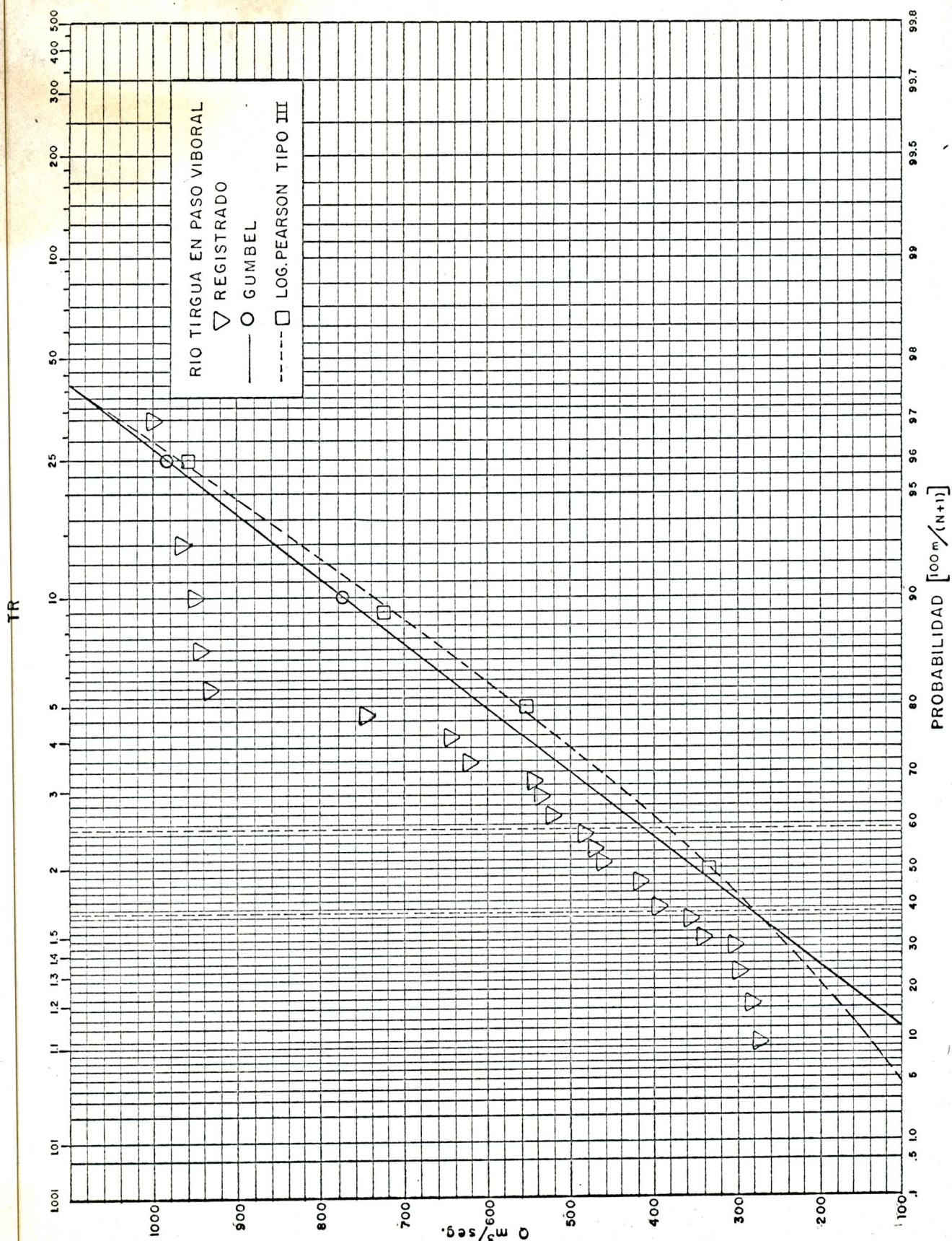


GRAFICO 1



BIBLIOGRAFIA

Burges S. J. (1970): Use of Stochastic Hydrology to Determine Storage Requirements for Reservoir - A Critical Analysis. Stanford University Report EEP-34.

Chow V.T. y Meredith D. (1969): Water Resources Systems Analysis - University of Illinois. Project A-029 - III y B-038 - III.

Fiering M. (1967): Streamflow Synthesis. Harvard University Press.

Gumbel E. (1958): Statistics of Extremes. Columbia University Press.

Hufschmidt M. y Fiering M. (1966): Simulation Techniques for Design of Water-Resource Systems. Harvard University Press.

Linsley R. Kohler M. y Paulhus J. (1958): Hydrology for Engineers - Mc.Graw Hill.

Water Resources Council (1967): A Uniform Technique for Determining Flood Flow Sequences Bulletin N° 15.

TITULO: CRECIENTE MILENARIA DEL RIO ONIA EN SITIO DE PRESA

AUTORES: ING. ALFREDO FLORES E HIDRº HAYDEE DE AVELLAN

FECHA: JUNIO 1971

EXTRACTO: Se ha utilizado el modelo estocástico de Myron Fiering y Harold Thomas, modificado posteriormente por Harms y Campbell (1967). Se generaron 1000 años de gastos medios mensuales, que al combinarlo con la relación Gasto Medio Mensual-Pico, se encontraron 1000 años de Picos Máximos Anuales, que luego fueron ordenados de mayor a menor, seleccionándose el mayor como el pico a esperarse para una frecuencia de 1000 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

1 OBJETO

Para el diseño de la presa sobre el río Onia en la Zona Sur del Lago, se requiere como complemento de la información hidrológica ya suministrada, la creciente a esperarse con una frecuencia de mil años que es el objetivo de este informe, el cual ha sido elaborado por el Ing° Alfredo Flores Espina (Asesor de la División de Hidrología), con la colaboración de la Hidr° Haydee de Avellán y el Asistente de Hidrología III Luis Patiño.

2 INFORMACION DISPONIBLE

"Estudio Hidrológico Zona Sur del Lago de Maracaibo (Primera Parte)
Ing° Alfredo Flores Espina e Hidr° Haydeé de Avellán - Febrero de 1971".

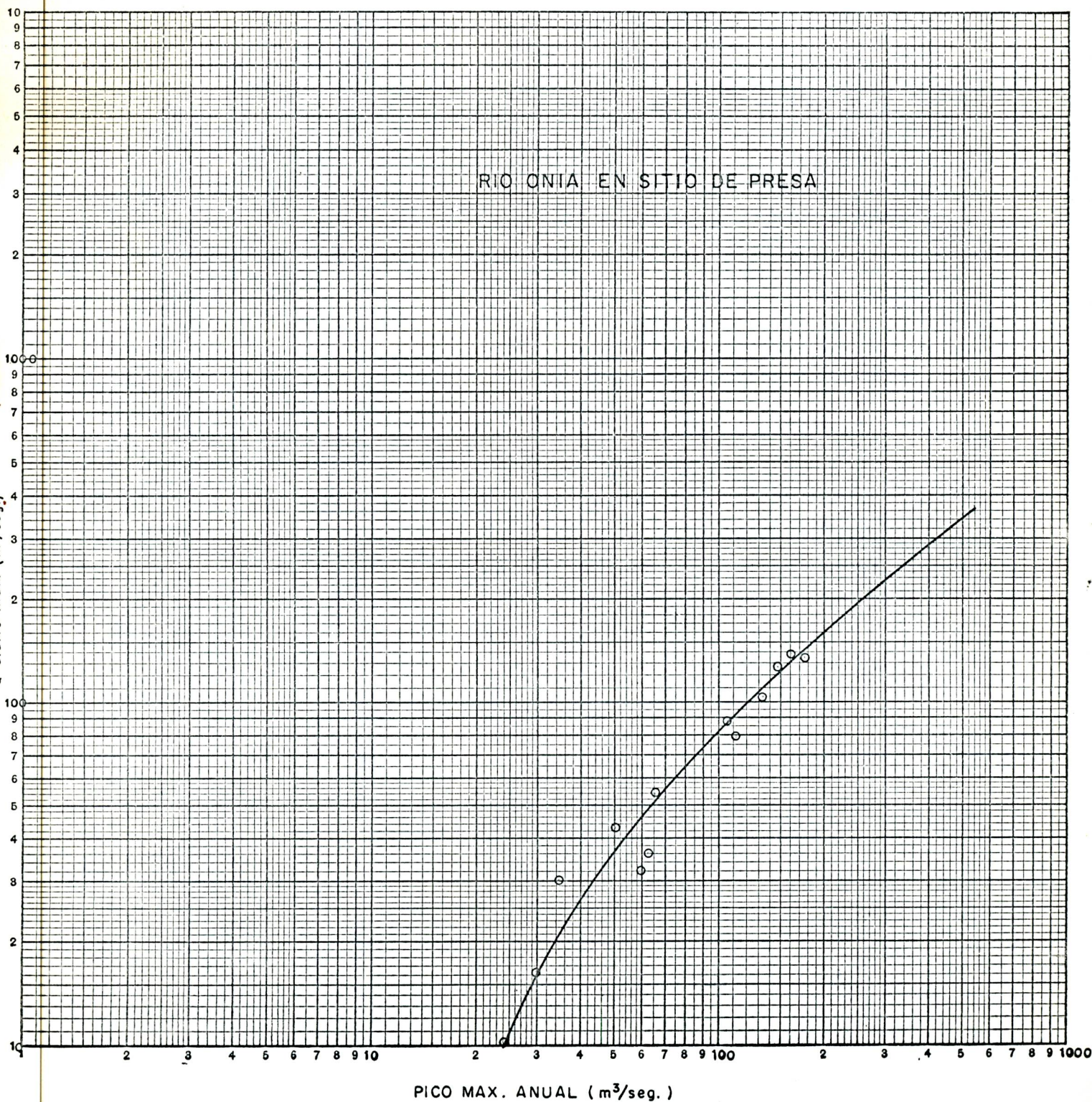
3 METODOLOGIA

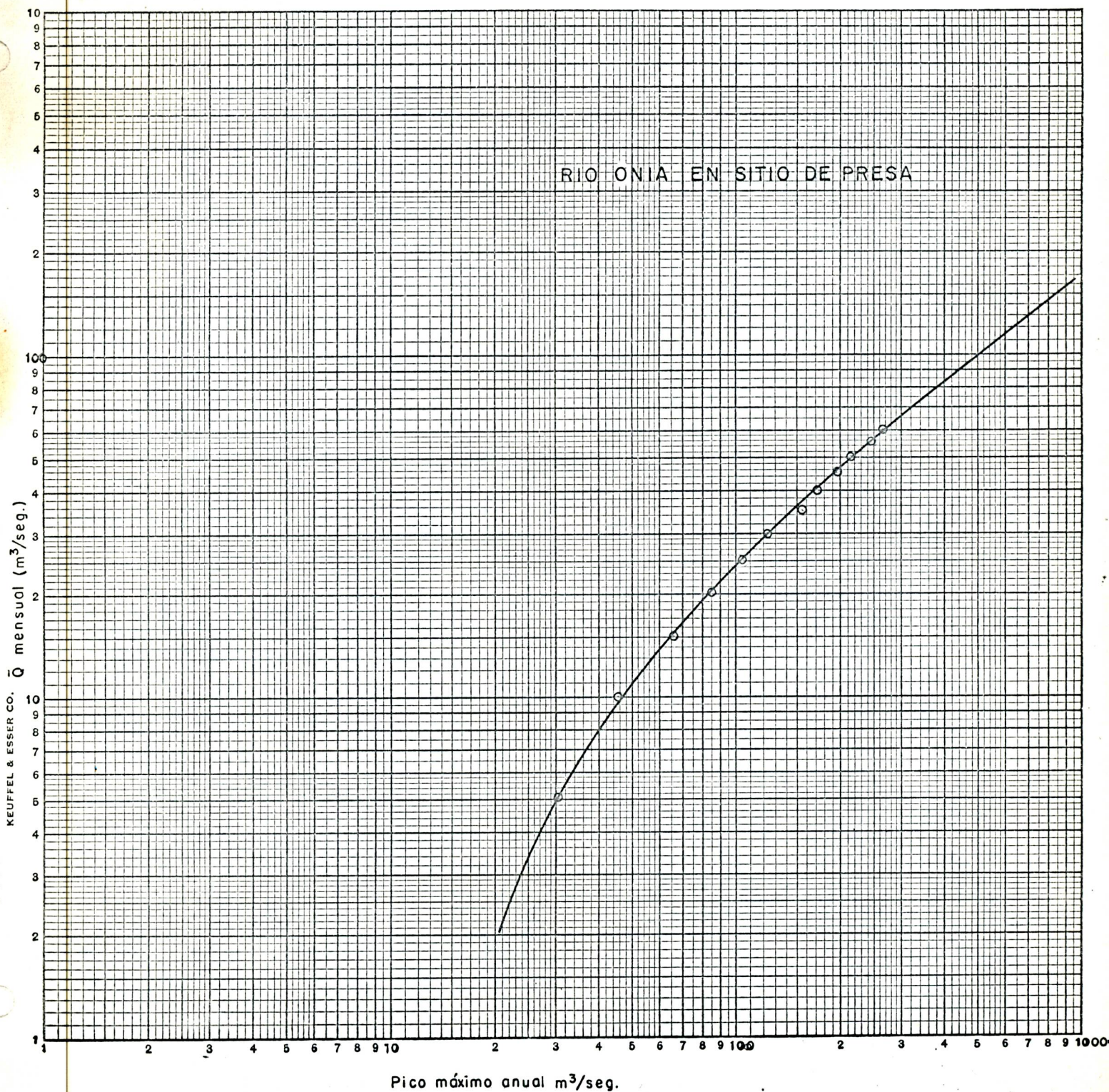
Dos fases se consideraron para la obtención de la creciente milenaria.

3.1 EXTRAPOLACION ESTOCASTICA DE GASTOS MEDIOS MENSUALES

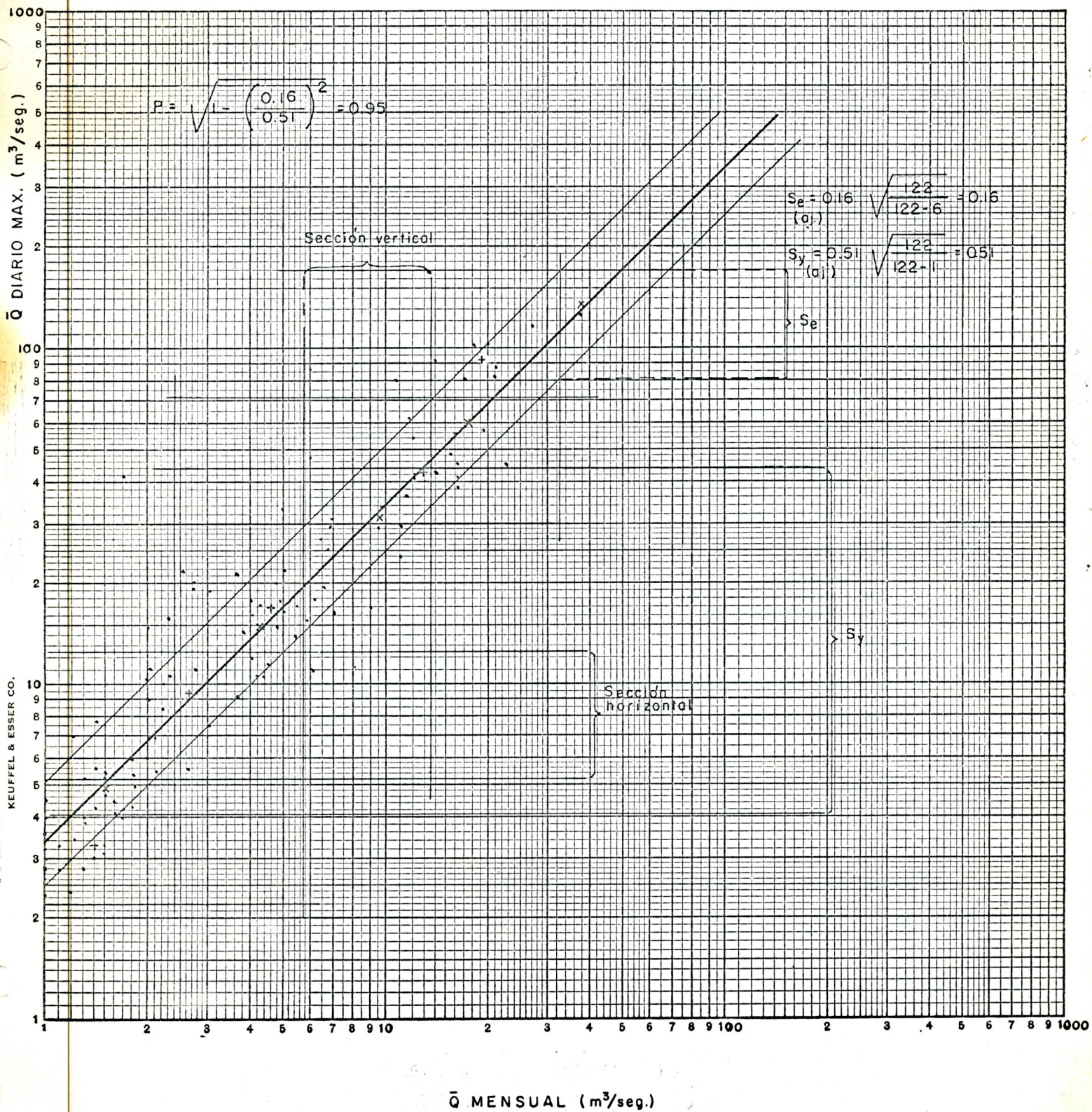
Para la extrapolación de gastos medios mensuales se aplicó la técnica de generación de una sola variable, la cual está basada en los registros observados en una sola estación.

Harold Thomas y Myron Fiering en su trabajo "Mathematical Synthesis of Streamflow Sequences for the Analysis of River Basin Simulation" formularon un modelo estocástico aplicado a registros mensuales:





RIO ONIA EN SITIO DE PRESA - Correlación gráfica



vés de la curva del Anexo N°3, el pico máximo correspondiente a ese año. Finalmente ordenara los picos de mayor a menor y calculara el tiempo de retorno a partir de la expresión:

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

T_r = Tiempo de retorno

n = Número de eventos

m = Orden de evento

4 HIDROGRAMA UNITARIO E HIDROGRAMA TOTAL

Se siguió el mismo procedimiento de los puntos 7.2 y 7.3 respectivamente del informe "Estudio Hidrológico Zona Sur del Lago de Maracaibo - (Primera Etapa)".

5 RESULTADOS

- a) Resultados obtenidos de la computadora, para la generación de gastos medios mensuales y picos máximos anuales.
- b) Hidrograma de la creciente milenaria.

$$\text{Pico} = 572 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$\text{Volumen} = 205 (10^6 \times \text{m}^3)$$

$R_j + 1$ = Coeficiente de correlación

$\overline{Q_j}$ y $\overline{Q_{j+1}}$ = Valores medios de los meses j y $j + 1$ respectivamente.

Los logaritmos son en base 10. Estas expresiones fueron pasadas a un programa para computadoras digitales.

3.2 GENERACION DE PICOS MAXIMOS ANUALES

Se ideó una correlación entre el gasto medio mensual y el pico instantáneo máximo mensual, para lo cual se intentó primeramente una correlación directa entre estas dos variables, obteniéndose una relación poco confiable. Posteriormente se utilizó el artificio de relacionar el gasto medio mensual con el gasto medio diario máximo mensual, aplicándose el método de "correlación gráfica" elaborado por James K. Searey, encontrándose un coeficiente de correlación de 0,95 según se muestra en el (Anexo N° 1). Luego se relacionó el gasto medio diario máximo mensual con el pico máximo anual (Anexo N° 2). Finalmente se unieron estas dos curvas transformándolas en una sola, que nos relaciona el gasto medio mensual con el pico máximo anual (Anexo N° 3).

A partir de esta nueva información, se implementó el programa para computadora, de tal manera que seleccionara el gasto medio mensual máximo en el año, generado estocásticamente y de ahí a tra-

$$X_{i+1} = u (X_i - u) + t_i \sigma (1 - \rho^2)^{1/2}$$

X_i = Valor estimado de la variable X al tiempo i

X_{i+1} = Valor estimado de la variable X al tiempo i + 1

u = Valor medio

σ = Desviación típica

ρ = Coeficiente de correlación

t_i = Número aleatorio normalmente distribuido

Este modelo fué extendido posteriormente por Harms y Campbell (1967). Ellos encontraron que la transformación logarítmica se ajustaba mejor que la distribución normal, llegando a la formulación del siguiente algoritmo para la estimación del gasto inicial y de los gastos mensuales sucesivos, respectivamente:

$$\log Q_{i, j+1} = \log Q_{i, j} + 1 + E_{i, j} \sigma_j$$

$$\log Q_{i, j+1} = \log Q_{i, j} + 1 + b_{i, j+1} (\log Q_{i, j} - \log Q_{i, j-1}) + E_{i, j+1} \sigma_{j+1} (1 - R^2_{j+1})^{1/2}$$

$Q_{i, j}$ = Gasto inicial del mes j y del año i

$Q_{i, j+1}$ = Gasto mensual del mes j + 1 y del año i

$b_{i, j+1}$ = Coeficiente de regresión

TITULO: ESTUDIO HIDROLOGICO DEL RIO TOCUYO PARA LA PRESA DE ATARIGUA

AUTORES: Ingenieros Alfredo Flores E. y Ramón J. Guilarte

FECHA: Junio 1971

EXTRACTO: Se han generado 20 años de escurrimiento a partir de datos de lluvia y evaporación, utilizando el programa de simulación hidrológica (H.S.P.); se suministra para la Presa de Atarigua:

- a. Aportes
- b. Pérdidas o Ganancias
- c. Curva de Frecuencia de Crecientes
- d. Hidrogramas
- e. Creciente Milenaria

Para completar un período de 100 años de escurrimientos se han extrapolado los datos mensuales estocásticamente, según el modelo propuesto por Myron Fiering y Harold Thomas y modificado por Harms y Campbell (1967).