

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LAS FRECUENCIAS DE CRECIENTES MAXIMAS EN LOS RIOS DEL NORTE DE VENEZUELA

Por el Dr.
VICTOR SARDI S.

RESUMEN

Los métodos estadísticos conducen a resultados tanto más ciertos cuanto mayores sean las series de datos considerados. En el estudio estadístico de las crecientes máximas de los cursos de agua naturales, para poder predecir la probabilidad de no ocurrencia de eventos mayores, se tropieza con la dificultad de que no se poseen en general suficiente número de años de observación; pero, si los registros correspondientes a varios ríos de una región dan resultados bastante homogéneos, se pueden agrupar todos los datos respectivos conduciendo a una serie más nutrida, que si bien no permite alargar la serie en más años que los de registro, como es el caso del método llamado de la estación año que se aplica en el análisis de la precipitación pluvial, en cambio es muy conveniente para minimizar las dispersiones y obtener resultados con mayor seguridad estadística que los que se obtendrían del análisis de una corta serie de datos.

Las bases de este método han sido desarrolladas por el Geological Survey de los Estados Unidos de América así como el criterio para juzgar de la homogeneidad de los datos.

En esta contribución se presenta un cierto parámetro de homogenización que permite obtener una fórmula o sistema general aplicable a ríos del Norte de Venezuela, para lo cual se analizaron 43 ríos que poseen 10 o más años de datos y sirve para determinar el gasto máximo para una frecuencia dada, en función del gasto máximo medio anual.

En el trabajo se ha usado la distribución de Gumbel para valores extremos y la prueba de homogeneidad da resultados altamente

satisfactorios con un sólo caso que se sale de la banda de variación de dos veces la desviación standard y apenas 4 casos fuera de la banda de variación de una vez la desviación standard en los 43 casos analizados.

Con el método expuesto no se pretende sustituir sistemas más adecuados pero es muy simple, fácil de aplicar y conduce a resultados útiles en la gran mayoría de los casos para ser considerados directamente o como patrón de comparación y control de los métodos más elaborados como serían los hidrometeorológicos.

1) *Introducción:*

Si se dispusiera de una larga serie de registros de gastos máximos periódicos de algún río, se podría con bastante seguridad, determinar las magnitudes de las crecientes para diferentes frecuencias, compatibles con la duración de la serie, mediante métodos estadísticos y lograr estimaciones para tiempos de retorno útiles en las aplicaciones prácticas.

Así por ejemplo: con una serie de 110 años de registro se puede determinar, dentro de un 10% de error, una creciente para 50 años de recurrencia con un 95% de seguridad estadística de no ocurrencia de una creciente mayor, o con este mismo porcentaje, y un período de registro de 48 años, se puede determinar una creciente de 100 años de recurrencia dentro de un 25% de error. ¹

Desafortunadamente los períodos de registro de crecientes que se poseen son relativamente cortos y sobre todo en Venezuela en donde hace apenas pocos lustros que se comenzó a determinar de modo sistemático los niveles y aforos de algunos ríos principales. Registros individuales entre 10 y 20 años de duración permiten una buena estimación de la denominada "creciente máxima media anual" o sea la media aritmética de las crecientes máximas anuales de largo registro y cuyo valor, según la teoría de los valores extremos de Gumbel, tiende al que corresponde a un tiempo de retorno de 2,33 años. También con estos registros pueden determinarse valores apropiados o sea suficientemente aproximados de las crecientes de 10 años de frecuencia pero resulta aventurado extrapolar las curvas individuales para obtener crecientes de 50, 100 o más años de retorno.

Para superar esta dificultad el U. S. Geological Survey recomienda la técnica desarrollada por Tate Dalrymple publicada

en el folleto N° 1543-A "Flood-Frequency Analyses" y se basa principalmente en que si se analizan los datos de varios ríos de una región, de semejantes características, puede obtenerse una serie más nutrida considerando todos los datos en conjunto, lo que lleva a la determinación de valores regionales más representativos que los obtenidos del análisis de únicamente los datos referentes a un solo río. Se comprende que solamente podrá utilizarse los datos que presentan una cierta homogeneidad, es decir que las diferencias entre valores correlativos de los ríos elegidos pueda atribuirse razonablemente a la casualidad de manera a que signifiquen diferentes aspectos de una misma cosa. Esta limitación, cuando se trata de una amplia región, obliga a rechazar un alto porcentaje de los ríos de la misma, haciendo, por lo tanto, nugatorio el procedimiento en esos casos o llevando a conclusiones que por esa razón carece de la generalidad necesaria.

Para juzgar de la homogeneidad de los datos y "verificar si los valores analizados son aceptables dentro de un razonable rango de seguridad estadística" (6) en el citado folleto de la U. S. Geological Survey (1) se aconseja efectuar el "Test" de homogeneidad que más adelante se describe.

En la presente contribución se trata de determinar un factor de homogeneidad característico para los ríos del Norte de Venezuela que permita agrupar todos los datos y lograr una curva general promedia con la cual se puedan calcular las relaciones entre los gastos picos para diferentes frecuencias y el valor de la creciente máxima media anual o sea aquella que tiene un tiempo de recurrencia de 2,33 años.

El factor de homogeneidad se expresa en función del área de las hoyas, fácilmente determinable, y la creciente máxima media anual puede calcularse con bastante certidumbre si se poseen aunque sean pocos años de registro o bien por correlación con hoyas vecinas de características morfológicas e hidrológicas semejantes.

2) *La Ley de Gumbel.*

El análisis de los gastos máximos anuales de un río se refiere a los valores extremos de una serie y su distribución es diferente a la normal. FRECHET en 1927 y en 1928 FISHER y TIPPET (8) inde-

pendientemente estudiaron la distribución de los valores extremos, y GUMBEL en 1941 (9) basándose en el trabajo de estos últimos supone que si (3,10) “ X_1, X_2, X_n son valores extremos observados en n muestras de igual tamaño N y si X es ilimitada” cuando tanto n como N tienden al infinito la probabilidad acumulada P de que cualquiera de los n valores extremos sea menor que X tiende hacia la expresión.

$$P = e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

la que también se acostumbra expresar en la forma

$$y = -\log_e \left[-\log_e \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

e = base de los logaritmos Neperianos

y = variable reducida de Gumbel

$T = \frac{1}{1 - P}$ = período o tiempo de retorno o de rurrencia

P = probabilidad de no ocurrencia

La variable reducida es una cantidad sin dimensión que corresponde a la expresión lineal

$$y = a (X - X_f) \quad (3)$$

en la cual X_f es la moda, a el parámetro de dispersión y X los valores extremos de la variable.

Cuando la serie de los valores extremos contempla un número infinito de ellos se puede deducir analíticamente la moda X_f y el parámetro de dispersión a , obteniéndose mediante el método de los momentos las siguientes expresiones:

$$a = \frac{\pi}{\sqrt{6} \sigma} = \frac{1,28\ 255}{\sigma} \quad (4)$$

$$X_f = \bar{X} - \frac{\gamma \sqrt{6}}{\pi} \sigma \quad (5')$$

en los cuales

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{desviación standard} \\ \bar{X} &= \text{valor medio de la serie} \\ \gamma &= \text{contante de Euler} = 0,57721 \end{aligned}$$

llevando este último valor a la ecuación (5') se tiene

$$X_f = \bar{X} - 0,45005 \sigma \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) no son estrictamente aplicables a series limitadas (11), como normalmente son los registros fluviométricos que cubren escaso número de años. Para determinar los parámetros de la ecuación (3) se han usado diferentes sistemas, uno muy conocido es debido el mismo Gumbel, el cual basándose en el análisis por mínimos cuadrados, propone para la determinación de X_f y a el empleo de las siguientes expresiones:

$$X_f = \bar{X} - \frac{\bar{y}_n}{\sigma_n} \sigma \quad (6)$$

$$a = \frac{\sigma_n}{\sigma} \quad (7)$$

En las cuales las cantidades teóricas \bar{y}_n y σ son funciones solamente del número n de las muestras y pueden ser obtenidas de las tablas confeccionadas por Gumbel.

En 1943 Powell (12) presentó el papel que se ha denominado papel de probabilidad extrema o papel de probabilidad Gumbel Powell (8) en el cual las ordenadas representan las X en escala natural y las abcisas la variable reducida y , la que se puede graduar en función de la probabilidad de no ocurrencia P o del período de retorno T mediante el uso de la ecuación. (2)

La Tabla I da los valores de y en función de los tiempos de retorno T o de las probabilidades P .

T A B L A I

T	$P = 1 - \frac{1}{T}$	y
1,01	0,0099	— 1,53
1,05	0,048	— 1,10
1,25	0,200	— 0,48
1,528	0,368	0,00
1,67	0,401	0,09
2,00	0,500	0,37
2,33	0,571	0,58
2,50	0,600	0,67
3,33	0,700	1,03
4,00	0,750	1,25
5,00	0,800	1,50
10,00	0,900	2,25
20,00	0,950	2,97
25,00	0,960	3,20
50,00	0,980	3,90
100,00	0,990	4,60
200,00	0,995	5,30
403,00	0,9975	6,00
500,00	0,9980	6,21
1000,00	0,9990	6,91

La Tabla II resume los valores de \bar{y}_n y σ para algunos valores del período de registro n .

Es evidente que al incrementarse hacia el infinito el número de años de registro, X_t y a tienden a definirse por las expresiones (5) y (4).

T A B L A II

n	\bar{y}_n	σ_n
8	0,48	0,90
9	0,49	0,93
10	0,50	0,95
13	0,51	1,00
15	0,51	1,02
20	0,52	1,06
30	0,54	1,11
40	0,54	1,14
50	0,55	1,16
60	0,55	1,17
70	0,55	1,19
100	0,56	1,21
150	0,56	1,23
200	0,57	1,24
∞	0,57	1,28

En el papel de la probabilidad GUMBEL-POWELL la ecuación (3) representa líneas rectas siempre que sean constantes los parámetros X_r y a ; así pues el método de GUMBEL con la aplicación de las expresiones (6) y (7) conduce al trazado de rectas en el citado papel de probabilidad extrema.

La variable X puede representar las lluvias máximas dentro de un período hidrológico, o los gastos máximos anuales, o relaciones entre gastos máximos y un gasto típico (como sería la creciente máxima anual) o funciones conocidas de estas variables, etc.

Para llevar al papel de probabilidad extrema los puntos que representen, por ejemplo, los gastos máximos anuales se necesita determinar el período de retorno T correspondiente a cada uno, para lo cual se han dado diferentes procedimientos y fórmulas, los cuales no entraremos a señalar aquí y solamente nos referiremos a la fórmula usada por el U. S. Geological Survey que es simple de calcular y ha sido adoptada por GUMBEL en 1945 ("Simplified plotting of statistical observations"; Am. Geophys. Unión Trans. v. 26 pp 69-82) CHOW, VELZ y otros autores.

La fórmula usada por el U. S. Geological Survey es:

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (8)$$

en la cual

- T = intervalo de recurrencia o período de retorno en años.
- n = número de los años de registro.
- m = orden de magnitud del evento, dándole al mayor el orden 1.

Si la serie de gastos máximos anuales sigue la distribución de GUMBEL, sus puntos representativos se deberán alinear según una recta al ser dibujados en el papel de probabilidad GUMBEL-POWELL y así sucede con poca dispersión en muchos casos y en ellos es justificada la determinación de los parámetros de la ecuación (3) por el método de GUMBEL; pero en otros casos la secuencia de los puntos dibujados indica más bien una línea curva o una compuesta de rectas y curvas que puede ser trazada con bastante propiedad a sentimiento y que representa mejor el fenómeno que no la recta promedia trazada por cualquier método. Esta es una de las razones por la cual actualmente se prefiere la determinación visual y trazado a mano libre de las curvas promedias, más bien que el uso de procedimientos matemáticos los que, en ciertos casos, pueden conducir a resultados absurdos. Un ejemplo de ello sería, como dice DALRYMPLE (1), en un río con corto período de registro que contuviera una gran creciente, este evento extraordinario aislado tenderá a desplazar la recta promedia apartándola así de la secuencia de los otros puntos; en tal caso las curvas trazadas a sentimiento por diferentes personas pueden no concordar entre sí pero cada una de ellas representará mejor el fenómeno que una línea deducida por procedimientos matemáticos. "El método matemático no es mejor por el hecho de conducir a respuestas uniformes si las respuestas son uniformemente falsas".

El U. S. Geological Survey usa dos tipos de papel GUMBEL-POWELL ambos con las abcisas dibujadas en función de la variable reducida expresada en tiempos de recurrencia (según la expresión (2)) la forma Standard Survey N° 9-179a con ordenadas naturales para llevar los valores de los gastos extremos y la forma N° 9-179b con ordenadas dibujadas en escala logarítmica,

este papel tiene la ventaja en algunos casos de que los datos tienden a alinearse en él según una recta la que es más fácil de trazar que la curva que resultaría en el papel con ordenadas naturales.

3) *Curvas individuales de frecuencia para algunos ríos del Norte de Venezuela.*

La publicación del Ministerio de Obras Públicas de Venezuela, (13) Dirección de Obras Hidráulicas, intitulada "Resumen de Datos Hidrométricos 1940-1962" contiene observaciones de 91 ríos de Venezuela de los cuales 43 tienen diez o más años de observaciones y son por lo tanto los que hemos escogido para el presente estudio.

Esa publicación se complementa con otra anterior denominada "Registro Fluviométrico 1940-1954" (14) la cual contiene entre otros datos de interés las planialtimetrías de las respectivas hoyas.

En la Tabla III aparecen los 43 ríos seleccionados de los cuales los 32 primeros poseen estaciones registradas de nivel; esta Tabla además del nombre de los ríos contiene otros datos como son: el área ω de las respectivas hoyas en Km², el gasto de frecuencia 2,33 años ($Q'_{2,33}$); el gasto de frecuencia 10 años (Q'_{10}) (Estos dos últimos valores tomados de los gráficos 1 al

22); la relación $\alpha'_{10} = \frac{Q'_{10}}{Q'_{2,33}}$, el Estado de Venezuela

en donde está la hoya de los ríos y el nombre de la estación de aforo.

Para cada uno de los ríos escogidos se preparó una lista en orden de valores descendentes de los gastos máximos anuales asignando a cada uno su supuesto período de retorno mediante la aplicación de la fórmula (8); luego, en papel de probabilidad GUMBEL-POWELL, se dibujaron los puntos respectivos de las crecientes en función de los tiempos de retorno, trazando después entre estos puntos la curva media representativa, lo que se hizo en algunos casos a sentimiento y en otros utilizando el método analítico de GUMBEL, para lo cual se aprovechó de los valores calculados en la tesis para optar al título de Hidrometeorologista de la Universidad Central de Venezuela intitulada "Curvas Envolventes de Crecientes Máximas en Venezuela" por Paul Blejman, Francisco González y Ricardo Ponte. (15)

T A B L A III

Nº	Río	Km ²	Q' _{2,33} m ³ /s	Q' ₁₀ m ³ /s	α' ₁₀ = $\frac{Q'_{10}}{Q'_{2,33}}$		Estado	Estación
					Q' _{2,33}	Q' ₁₀		
1	Acarigua	970	880	1590	1,81		Portuguesa	Pte. Acarigua
2	Aragua-El Recreo	198	46	110	2,40		Aragua	Hda. El Recreo
3	Aragua-Chorrera	1881	63	91	1,45		Anzoátegui	La Chorrera
4	Boconó	1580	1209	1775	1,47		Barinas- Portuguesa	Peña Larga
5	Bucares	910	31	75	2,42		Lara	Piedras Negras
6	Cojedes	4325	360	1010	2,81		Cojedes	Pte. S. Raf. Onoto
7	Grande	719	247	415	1,68		Miranda	Carpintero
8	Guacara	75	15	34	2,27		Carabobo	Las Vegas
9	Guache	300	424	817	1,93		Portuguesa	Pte. Viejo
10	Guárico-La Puerta	625	196	454	2,32		Aragua	La Puerta
11	Guárico-Boca Cagua	2040	333	637	1,91		Aragua	Boca de Cagua
12	Guataparo	39	20	28	1,40		Carabobo	Compañía - Inglesa
13	Las Minas	85	51	153	3,00		Aragua	Barrancón
14	Los Guayos	114	23	57	2,48		Carabobo	Pte. Los Guayos
15	Manzanares	830	283	436	1,54		Sucre	Guaripa
16	Masparro	495	2050	3340	1,63		Barinas	Pte. Masparro
17	Motatán	4200	400	665	1,66		Trujillo	Agua Viva
18	Pagüey	810	1100	1760	1,60		Barinas	El Paso
19	Palmas	1572	165	335	2,03		Zulia	Las Múcuras
20	Pao	2730	405	750	1,85		Cojedes	Paso La Balsa
21	Querecual	196	224	560	2,50		Anzoátegui	Querecual

Continuación Tabla III

Nº	Río	Km ²	Q' _{2,33} m ³ /s	Q' ₁₀ m ³ /s	Q' ₁₀ = $\frac{Q'_{10}}{Q'_{2,33}}$		Estado	Estación
					α' ₁₀	Q' _{2,33}		
22	Sarare-Sarare	220	112	217	1,94		Lara	Sarare
23	Tinaco	625	360	780	2,17		Cojedes	Pte. Tinaco
24	Tirgua	1490	390	780	2,00		Cojedes	Paso Viboral
25	Tocorón	114	69	162	2,35		Aragua	Parcela Chavero
26	Tocuyo	3590	660	1500	2,27		Lara	Pte. Torres
27	Tucutunemo	99	31	90	2,90		Aragua	Tucutunemito
28	Turnero	192	72	169	2,35		Aragua	Turnero
29	Tuy Tazón	1180	162	294	1,81		Miranda	Hda. Tazón
30	Tuy Vigía	3620	255	482	1,89		Miranda	El Vigía
31	Yaracuy-Cumaripa	266	150	327	2,18		Yaracuy	Pt. Cumaripa
32	Yaracuy-Peñón	1206	128	198	1,55		Yaracuy	Pte. El Peñón
33	Capaya	162	49	92	1,88		Miranda	El Peñón
34	Guárico-El Sombrero	4110	230	470	2,04		Guárico	El Sombrero
35	La Yuca	265	610	1100	1,81		Barinas	Pte. La Yuca
36	Morere	3420	120	185	1,54		Lara	Pte. Bolívar
37	Morón	120	60	130	2,17		Carabobo	Morón
38	Neverí	1092	245	395	1,62		Anzoátegui	Pte. Carret. Negra
39	Sarare - Aguas Blancas	585	80	270	3,38		Portuguesa	Agua Blanca
40	Turbio	1710	95	155	1,64		Lara	Pte. Tononó
41	Tuy Hda. Barrios	210	65	140	2,16		Aragua	Hda. Barrios
42	Urama	430	220	515	2,34		Carabobo	Pte. Urama
43	Uribante	3950	2550	5200	2,04		Táchira	Pte. Colgante

Estas curvas que aparecen en los Gráficos 1 a 22 que acompañan el presente trabajo son las "curvas individuales de frecuencia de gastos máximos anuales" de los ríos analizados llamadas también por el profesor Gandolfo (6 7) "curvas preliminares de frecuencia de gastos máximos para cada estación considerada" y en ellas sólo se han representado los puntos correspondientes a tiempos de retorno mayores a 1,5 años, juzgándose innecesario dibujar los puntos representativos de frecuencias mayores.

Mediante estas curvas se determinan los gastos (Q' o Q'_T) correspondientes a los diversos tiempos de recurrencia T y que se obtienen del análisis de los datos individuales de cada estación. Estos valores debidos a series particulares son menos representativos que los valores Q o Q_T que se obtienen del análisis del conjunto de los datos de todos los ríos según los métodos objeto de la presente contribución.

Entre todas las variables que intervienen en la producción de los gastos máximos de los ríos se presiente que para una misma estación en un río dado hay muchas que son constantes o cuasiconstantes, estos valores pueden eliminarse o minimizarse si para cada estación se considera la relación entre los gastos máximos para diversas frecuencias y uno de ellos tomado como base. Se acostumbra tomar como gasto base aquel que corresponde a la frecuencia de 2,33 años que, como se dijo, equivale a la creciente máxima media anual.

En la publicación, ya mencionada, del Geological Survey para la preparación de las curvas regionales de frecuencia se procura ajustar todos los datos a un solo período común que por lo regular se adopta el más largo, calculando por correlación los valores faltantes. "Estas correlaciones no deben ser perfectamente ajustadas, pues sólo se trata de homogeneizar las distintas series y los valores obtenidos del relacionamiento no tienen excesivo peso en el posterior tratamiento estadístico". (16)

En nuestro caso, dado el gran número de ríos analizados que corresponden a hoyas repartidas en un gran territorio y por lo tanto los gastos líquidos responden a eventos meteorológicos independientes resulta artificioso establecer correlaciones para llenar los datos y aumentar de este modo los períodos de registro menores. Además, correlaciones parciales entre hoyas relativa-

mente próximas demostraron que los valores obtenidos poco diferían de los determinados con base a los períodos propios de observación, por lo cual se prefirió no tratar de unificar de aquella manera tales períodos.

4) *Gastos máximos en función del tiempo de retorno.*

Los gastos máximos anuales Q , en una estación de un río se suponen que son una función de la probabilidad P de no ocurrencia de valores mayores, del gasto máximo medio anual $Q_{2,33}$ y de un factor de homogenización α .

$$Q = \varphi (Q_{2,33}, P, \alpha) \quad (9)$$

También se supone aplicable la Ley de Gumbel de valores extremos expresada en las ecuaciones (1) a (3) y en esta última se hace

$$X = \frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} \quad (10)$$

Una vez que se han determinado para cada estación, como se indica en (5), los valores de α , se dibujan en papel de probabilidad GUMBEL-POWELL los valores de X en función de los tiempos de retorno T y se trata la curva promedio representativa con la cual puede establecerse la relación:

$$\frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} = \psi (T) \quad (11)$$

que permitirá conocer para cada período de retorno T el correspondiente gasto máximo Q_T . (Gráficos 25 y 26).

Es necesario verificar la homogeneidad de los datos lo que se hace mediante el "Test" de homogeneidad que se describe en 6.

5) *Factor de homogenización*

Para determinar el factor de homogenización α se hacen las siguientes hipótesis:

- 1ª) Que es un valor constante para cada estación de un río.
- 2ª) Que su valor, en el caso de homogeneidad perfecta, tiende a la relación entre la creciente de 10 años de frecuencia y la creciente máxima media anual.
- 3ª) Que es función de las características propias de las cuencas respectivas.

Con respecto a este último punto se supuso en un principio que entre todas las variables que intervienen en la formación de los gastos picos podían considerarse como principales y gobernantes para determinar el valor de α de cada estación, las siguientes: área de la hoya, pendiente media del curso principal, valor de la creciente máxima media anual y la humedad de la cuenca representada por la precipitación media anual efectiva. Se hizo el análisis dimensional de estas variables por el método de Buckingham lo que condujo a la determinación de diferentes cantidades adimensionales que se combinaron en diversas formas, no lográndose resultados congruentes y tendencias definidas con poca dispersión, para poder establecer buenas correlaciones entre los números deducidos de los datos que proporcionan los ríos que se analizan.

Sólo pudo deducirse que con excepción del área de la hoya no eran significantes las otras variables consideradas, así pues se preparó un gráfico, en papel logarítmico, representativo de los

valores de $\frac{Q'_{10}}{Q'_{2,33}} = \alpha$ en función del área de las respectivas

hoyas expresadas en Km². Estos valores aparecen en el gráfico 23 y puede notarse la tendencia a disminuir los valores de α cuando crecen las superficies ω . La curva promedia determinada por el método de los mínimos cuadrados tienen por ecuación:

$$\alpha = 2,85 \omega^{-0,055} \quad (12)$$

También en el gráfico 23, se presenta mediante barras verticales el ámbito de variación de los valores de α' dentro de los límites de más o menos una desviación standard (σ) de la variable reducida (y) lo que permite trazar una curva (recta en pa-

pel logarítmico) de ajuste gráfico más conveniente que la curva a que se refiere la ecuación 12, teniendo cuidado de que la citada recta pase dentro del mayor número de barras.

Esta curva tiene la siguiente expresión:

$$\alpha = 2,60 \omega^{-0,055} \quad (13)$$

El ámbito de variación de los valores de α' se calcula así:

La desviación standard σ de la variable reducida (y) de la distribución de Gumbel (1) es

$$\sigma = \frac{e^y}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{T-1}} \quad (14)$$

Como se está calculando con Q_{10} se toma $T = 10$ resultando (Tabla I) $y = 2,25$; $e^y = 9,49$

$$\sigma = \frac{9,49}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{10-1}} = \frac{3,164}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Para cada período de registro n se puede calcular según la 15 el valor de σ y determinar a

$$y' = y \pm \sigma \quad (16)$$

T A B L A IV

	$\alpha = 2,60 \omega^{-0,055}$	$Q'_{2,33}$	Q_{10}	T	n
1 Acarigua	1,78	882	1570	9,5	11
2 Aragua-Recreo	1,94	46	89	5,8	19
3 Aragua-Chorrera	1,72	63	108	17,8	12
4 Boconó	1,74	1209	2104	28,0	10
5 Bucares	1,79	31	56	5,2	15
6 Cojedes	1,64	360	590	3,7	15

Continuación Tabla IV

	$\alpha = 2,60$	$\omega^{-0,055} Q'_{2,33}$	Q_{10}	T	n
7 Grande	1,81	247	447	12,0	11
8 Guacara	2,05	15	31	8,0	13
9 Guache	1,90	424	806	10,0	12
10 Guárico-La Puerta	1,83	196	359	6,0	22
11 Guárico					
Boca de Cagua	1,71	333	569	7,0	10
12 Guataparo	2,13	20	42.6	170,0	11
13 Minas	2,06	51	105	4,8	17
14 Los Guayos	2,00	23	46	6,0	11
15 Manzanares	1,80	283	509	15,0	13
16 Masparro	1,85	2050	3792	17,5	11
17 Motatán	1,64	400	656	9,5	21
18 Pagüey	1,80	1100	1980	17,0	12
19 Palmar	1,73	165	285	6,0	18
20 Pao	1,68	405	680	7,3	11
21 Querecual	1,95	224	437	5,5	14
22 Sarare-Sarare	1,94	112	217	10,0	12
23 Tinaco	1,83	360	659	6,5	11
24 Tirgua	1,74	390	678	6,7	19
25 Tocarón	2,00	69	138	6,5	10
26 Tocuyo	1,66	660	1096	4,7	12
27 Tucutunemo	2,02	31	63	5,0	14
28 Turmero	1,95	72	140	6,2	18
29 Tuy Tazón	1,76	162	285	9,5	21
30 Tuy Vigía	1,66	255	423	6,6	15
31 Yaracuy-Cumaripa	1,91	150	287	7,0	11
32 Yaracuy-Peñón	1,76	128	225	19	17
33 Capaya	1,96	49	96	11,5	10
34 Guárico-El Sombrero	1,65	230	380	5,5	10
35 La Yuca	1,91	610	1165	12,5	10
36 Morere	1,66	120	199	13,5	15
37 Morón	2,00	60	120	7,5	17
38 Neverí	1,77	245	434	15,0	14
39 Sarare Ag. Blanca	1,83	80	146	4,6	18
40 Turbio	1,72	95	163	13,0	11
41 Tuy Barrios	1,94	65	126	7,5	21
42 Urama	1,86	220	409	7,2	18
43 Uribante	1,65	2550	4208	5,7	12

o sea, en nuestro caso para $T = 10$

$$y' = 2,25 \pm \sigma \quad (17)$$

a los valores de y' corresponden los respectivos de T , determinables según la ecuación (2). Una vez conocidos estos tiempos se obtienen los gastos correspondientes de las curvas individuales de frecuencia de gastos máximos anuales (Gráficos 1 a 22). Dividiendo estos gastos por los respectivos $Q_{2,33}$ se obtienen los valores límites de α' que determinan los extremos de las barras del Gráfico 23.

6) "Test" de homogeneidad.

Ya conocidos los factores de homogeneidad para los diferentes ríos que se estudian por aplicación de la ecuación (13), cuyos valores se dan en la Tabla IV y antes de proceder al trazado de la curva de la ecuación (11), es necesario comprobar si los datos que se analizan son suficientemente homogéneos para poder considerarlos como observaciones de una misma estación, como ya se dijo, para lo cual seguiremos el proceso que se adopta en el citada folleto N° 1543-A del Geological Survey (1); en dicha publicación se supone que para el caso existe homogeneidad si los valores caen dentro de la franja definida por la expresión

$$y'' = y \pm 2 \sigma \quad (18)$$

cuyos límites se dan gráficamente en el papel de probabilidad extrema de Gumbel mediante dos curvas simétricas con relación al tiempo de recurrencia $T = 10$ años, para esta condición la ecuación anterior se convierte en

$$y'' = 2,25 \pm 2 \sigma \quad (19)$$

En la Tabla V se consignan los valores extremos de y'' que definen las curvas límites de la franja de seguridad en función del tiempo de recurrencia y que sirven para su trazado.

T A B L A V

n (años)	2σ	$y - 2 \sigma$	T	$y + 2 \sigma$	T
5	2,84	-0,59	1,20	+5,09	160,0
10	2,00	+0,25	1,85	+4,25	70,0
20	1,42	+0,83	2,80	+3,67	40,0
50	0,90	+1,35	4,40	+3,15	24,0
100	0,63	+1,62	5,60	+2,88	18,0
200	0,45	+1,80	6,50	+2,70	15,5

En el Gráfico 24 aparecen trazadas estas curvas límites de la banda de seguridad y también la correspondiente a la ecuación 17 para un rango de sólo $\pm \sigma$.

En la Tabla IV se calculan los tiempos de recurrencia según las curvas individuales de frecuencia (Gráficos 1 a 22) para los gastos de 10 años de frecuencia según la ecuación 20.

$$Q_{10} = \alpha Q_{2,33} \quad (20)$$

Que se deduce de la 2ª hipótesis del número 5.

Estos tiempos se llevan función del tiempo de registro n al Gráfico 24 y es condición de buena homogeneidad que queden dentro de la franja de seguridad $2,25 \pm 2 \sigma$ (ecuación (19)) trazada según se dijo anteriormente.

Como puede observarse en dicho Gráfico 24, la homogeneidad es casi perfecta pues solamente un punto (el correspondiente a la estación N° 12) sale fuera de la banda de seguridad y la gran mayoría de los otros puntos caen dentro de la franja más reducida con rango de solamente más o menos una desviación standard, lo cual supera a las condiciones aceptables según el ya varias veces citado trabajo de Darlrymplé (1).

7) Curva general de frecuencia.

Comprobada la homogeneidad según se dijo en 6) se procede a la determinación de la curva general de frecuencia de la relación

$$\frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} \text{ para el Norte de Venezuela.}$$

Trazando los puntos correspondientes a los diferentes valo-

res de $\frac{Q'}{\alpha Q'_{2,33}}$ de los períodos de retorno se observa que se ali-

nean siguiendo el sentido de una recta si el dibujo se hace en papel de Gumbel (Gráfico 25). Dicho papel tiene sus ordenadas graduadas según la escala logarítmica y las abscisas según la variable reducida de Gumbel llevada en escala natural.

La recta que permite calcular los valores de $\frac{Q}{\alpha Q_{2,33}}$ en fun-

ción del tiempo de retorno, trazada en el Gráfico 25, es representativa del promedio de los valores que sirvieron para dibujar la serie de puntos que aparecen en el Gráfico.

Esta recta se trazó con el criterio de que debía pasar por la ordenada 1 para el tiempo de retorno de 10 años conforme a la hipótesis 2ª del numeral 5); y por la ordenada 0,50 para el período de retorno de 2,33 años, valor que equivale en números redondos al promedio de los valores

$$\frac{1}{\alpha'} \text{ analizados.}$$

El Gráfico 26 es equivalente al Gráfico 25 pero los valores se han dibujado en papel de probabilidad Gumbel-Powell.

8) *Ecuación de la curva general de frecuencia.*

$$\log \frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} = cy + d \quad (21)$$

los valores de c y de d se determinan con las siguientes condiciones:

$$\text{para } \frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} = 1 \quad T = 10 \text{ años } y = 2,25$$

$$\text{para } \frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} = 0,50 \quad T = 2,33 \text{ años } y = 0,58$$

obteniéndose

$$\log \frac{Q}{\alpha Q_{2,33}} = 0,1808 y - 0,407 \quad (22)$$

Según esta ecuación en la Tabla VI se calculan los correspon-

dientes valores de $\frac{Q}{\alpha Q_{2,33}}$ para diversas frecuencias.

T A B L A VI

T	y	0,1808 y	$\log \frac{Q}{\alpha Q_{2,33}}$	$\frac{Q}{\alpha Q_{2,33}}$
1,25	—0,48	—0,0868	1,5062	0,32
2,33	0,58	0,1048	1,6978	0,50
5	1,50	0,2712	1,8642	0,73
10	2,25	0,4068	0	1,00
25	3,20	0,5786	0,1717	1,48
50	3,90	0,7051	0,2981	1,99
100	4,60	0,8317	0,4247	2,66
200	5,30	0,9582	0,5512	3,56
1000	6,91	1,2493	0,8423	6,96

9) Aplicación.

Se desean conocer los gastos máximos de creciente para diversas frecuencias en un cierto lugar de un río.

- 1º) Se determina el área de la hoya del río hasta el lugar en que se quieren determinar las crecientes.
- 2º) Mediante la fórmula (13) se calcula el coeficiente de homogeneidad.
- 3º) Se determina o estima el valor $Q_{2,33}$ para lo cual si se poseen datos de cinco o más años de crecientes máximas anuales se efectúa un análisis estadístico de frecuencia de valores extremos con ayuda de papel de probabilidad Gumbel-Powell. En caso contrario se estima el valor de la creciete máxima media anual por correlación con datos conocidos de otros ríos vecinos y de características similares.
- 4º) Con aplicación de la curva general de frecuencia se determinan los gastos máximos para diversos períodos de retorno.

Ejemplo: sea el Río Tuy en Tazón.

- 1) El área de la hoya es: $\omega = 1180 \text{ km}^2$
- 2) Coeficiente de homogeneidad: $= 2,60 \omega^{-0,055} = 1,76$
- 3) Valor de la creciete media anual
Según el análisis estadístico de Gumbel para 21 años de registro (ver Gráfico 15)

$$Q_{2,33} = 162 \text{ m}^3/\text{s}.$$

- 4) El gasto máximo para diversas frecuencias será:

$$\begin{aligned} Q_5 &= 1,76 \times 162 \times 0,73 = 208 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q_{10} &= 1,76 \times 162 \times 1 = 285 \text{ ''} \\ Q_{50} &= 1,76 \times 162 \times 1,99 = 567 \text{ ''} \\ Q_{100} &= 1,76 \times 162 \times 2,66 = 758 \text{ ''} \end{aligned}$$

10) Alcances y límites de aplicación del procedimiento.

Con el procedimiento aquí descrito no se pretende sustituir los métodos más adecuados, por ejemplo los de tipo hidrometeorológico y sólo se ha querido dar una forma más simple de investigación que es útil en ciertos casos.

Otra aplicación sería comprobar el orden de magnitud de las cifras a que se llegue con cálculos más elaborados y precisos,

pero nunca es aconsejable usar el procedimiento aisladamente para determinar valores de crecidas a ser usadas en el proyecto de aliviaderos de presas o de otras obras de cuyo fracaso dependería la pérdida de vidas o de cuantiosas inversiones.

Hay que tener en cuenta que los valores que suministra el procedimiento para tiempos de recurrencia mayores a los 25 años son resultado de una extrapolación y no se debe utilizar para períodos de retorno mayores a los 50 años y a lo sumo 100 años; por lo tanto las cifras correspondientes a períodos de retorno de 200 y 100 años que se dan en la Tabla VI sólo se consignan allí a título informativo.

No es aplicable el método con los coeficientes α aquí deducidos a torrentes o a ríos con superficie de cuencas imbríferas inferiores a los 30 km² o superiores a 5000 km².

11) *Crecientes máximas previsibles para algunos ríos de Venezuela.*

En la Tabla VII se consignan los valores de los picos de crecientes para los ríos que aparecen en la Tabla III correspondientes a los tiempos de retorno de 2,33, 10, 25, 50 y 100 años de frecuencia.

Caracas, enero de 1967.

N O T A C I O N

P,	Probabilidad de no ocurrencia
X,	Valores extremos
n,	Número de las muestras (número de años de registro)
N,	Tamaño de las muestras
e,	Base de los logaritmos Neperianos
y,	Variable reducida de Gumbel
T,	Tiempo de retorno
X _f ,	Moda
a,	Parámetro de dispersión
σ ,	Desviación estandard
\bar{X} ,	Valor medio de la serie
γ ,	Constante de Euler
\bar{Y}_n, σ_n ,	Valores tabulados por Gumbel que son funciones de n

m,	Orden de magnitud de un evento dándole al mayor el orden 1
ω ,	Area de las hoyas
$Q'_{2,33}$,	Gasto máximo de frecuencia 2,33 años tomado de la curva individual de frecuencia
Q'_{10}	Gasto máximo de frecuencia 10 años tomado de la curva individual de frecuencia

$$\alpha'_{10} = \frac{Q'_{10}}{Q'_{2,33}}$$

α ,	Parámetro de homogenidad
Q'_T ,	Gasto máximo de frecuencia T años tomado de la curva individual de frecuencia
T,	Tiempo de retorno en años
Q,	Gasto máximo anual en m ³ /s
Q_T ,	(Q_{10} , Q_{25} , Q_{100}) gasto máximo más probable para un cierto tiempo de retorno T
$Q_{2,33}$,	Gasto máximo de frecuencia 2,33 años o gasto máximo medio anual
φ ,	Función
ψ ,	Función
y' ,	Valores extremos de y para una variación de $\pm \sigma$
y'' ,	Valores extremos de y para una variación de $\pm 2 \sigma$
c,	Parámetro de la curva general de frecuencia
d,	Parámetro de la curva general de frecuencia

BIBLIOGRAFIA

- 1) Flood-Frequency Analyses - Manual of Hydology: Part 3 by Tate Dalrymple. Geological Survey Water-Supply Paper 1543-A. United States Government Printing Office, Washington 1960.
- 2) GUMBEL, E. Y. - Floods estimated by probability method. Eng. News - Rec. v. 134 N° 24 pp 833-837.
- 3) LINSLEY, KOKLER and PAULHUS "Hidrology for Engineers" Mc Graw-Hill Book Co. Inc. New York 1958.
- 4) GUMBEL E. L. - "Méthodes graphiques pour l' analyse des debits de crue". La Houille Blanche N° 5 Grenoble Nevenbre 1956.
- 5) BERNIER, JACQUES - "Sur l'aplication des diverses lois limites des valeurs extremes au probleme des debits de crue". La Houille Blanche N° 5 Grenoble Nevenbre 1956.
- 6) GANDOLFO, JOSE S. - "Promoción de la Cuenca del Río Tuy Soluciones Hidráulico-Fluviales para el Tramo Inferior". Informe para el M.O.P. Buenos Aires Diciembre de 1964.

- 7) SIMCA C. A. (Martínez de la Plaza, Celestino y Sardi Socorro, Víctor). "Análisis Hidráulico-Fluvial de los Ríos Aricuaisá, Lora y Catatumbo en los sitios de Puente — Carretera Machiques — La Fría". Informe para el M.O.P. - Caracas Junio de 1965.
- 8) Ven Te Chow - "Handbook of applied Hydrology". Mc Graw-Hill Book Co. New York 1964.
- 9) GUMBEL E. J. "The return of flood flows" Ann Math. Statis. Vol. XII N° 2 pp 163 - 190 junio 1941.
- 10) GUMBEL E. J. "Statistical Theory of Extreme Values and some Practical applications" Natl. Bur, Standard (U.S.) appl. Math. Ser. 33 febrero 1954.
- 11) SIMCA C. A. (Martínez de la Plaza, Celestino y Sardi Socorro, Víctor) "Río Guárico en Embalse Camatagua" Informe Hidrológico para el M.O.P. Caracas.
- 12) R. W. POWELL, "A Simple Method of Estimating Flood Frequency" Civil Eng. Vol. 13 pp 105-107, 185 y 438 - 1943.
- 13) Ministerio de Obras Públicas de Venezuela - Dirección de Obras Hidráulicas - División de Hidrometeorología. "Resumen de datos hidrométricos 1940 - 1962" Caracas julio 1963. Tipo Lit. Cartografía Nacional.
- 14) Ministerio de Obras Públicas de Venezuela - Dirección de Obras Hidráulicas - División de Hidrología - "Registro Fluviométrico 1940 - 1954" - Caracas 1956. Imprenta Nacional.
- 15) BLEJMAN, PAUL T. - GONZALEZ D. FRANCISCO - PONTE R. RICARDO R. "Curvas Envolventes de Crecientes Máximas en Venezuela". Trabajo especial de grado para optar al título de Hidrometeorologista Universidad Central de Venezuela - Caracas 1965. Profesor guía: Ingeniero Arnoldo José Gabaldón.

T A B L A VII

Nº	Río	ω	α	$Q'_{2,33}$	$Q_{2,33}$	Q_{10}	$Q_{2,5}$	Q_{50}	Q_{100}
1	Acarigua	970	1,78	832	785	1570	2324	3124	4176
2	Aragua-Recreo	198	1,94	46	45	89	132	177	237
3	Aragua-Chorrera	1881	1,72	63	54	108	160	215	287
4	Boccnó	1580	1,74	1209	1052	2104	3114	4187	5596
5	Bucares	910	1,79	31	28	56	83	111	149
6	Cojedes	4325	1,64	360	295	590	874	1175	1570
7	Grande	719	1,81	247	224	447	662	890	1189
8	Guacara	75	2,05	15	15	31	46	61	82
9	Guache	300	1,90	424	403	806	1192	1603	2142
10	Guárico - La Puerta	625	1,83	196	179	359	531	714	954
35	Guárico Boca de Cagua	2040	1,71	333	285	569	843	1133	1515
12	Guataparo	39	2,13	20	21	43	63	85	113
13	Minas	85	2,06	51	52	105	156	209	280
14	Los Guayos	114	2,00	23	23	46	68	92	122
15	Manzanares	830	1,80	283	255	509	754	1014	1355
16	Masparro	495	1,85	1050	1896	3792	5613	7547	10088
17	Motatán	4200	1,64	400	328	656	971	1305	1745
18	Pagüey	810	1,80	1100	990	1980	2930	3940	5266
19	Palmar	1572	1,73	165	143	285	422	568	759
20	Pao	2730	1,68	405	340	680	1007	1354	1810
21	Querecual	196	1,95	224	218	437	646	869	1162
22	Sarare - Sarare	220	1,94	112	109	217	321	432	578

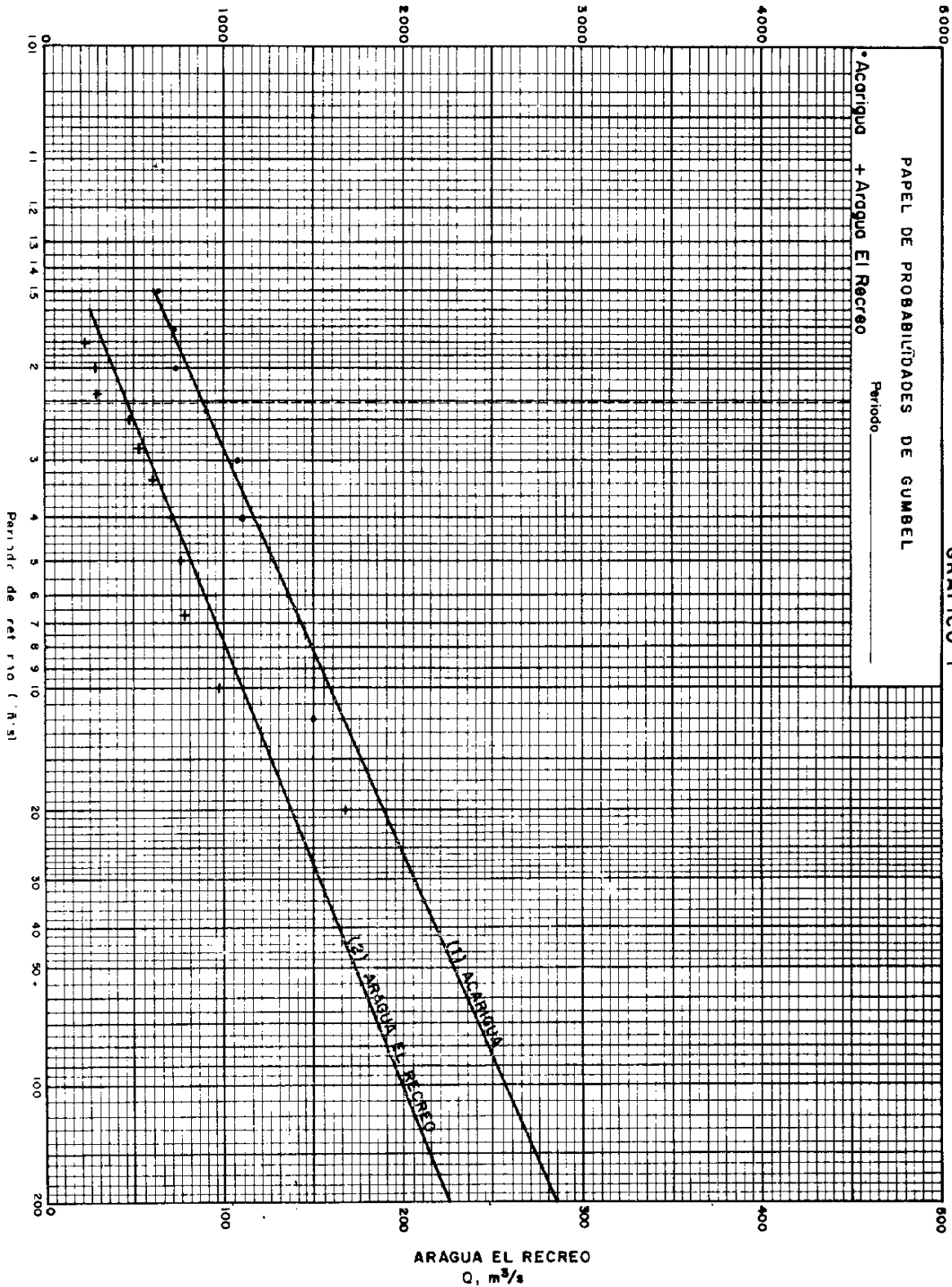
Continuación de la Tabla VII

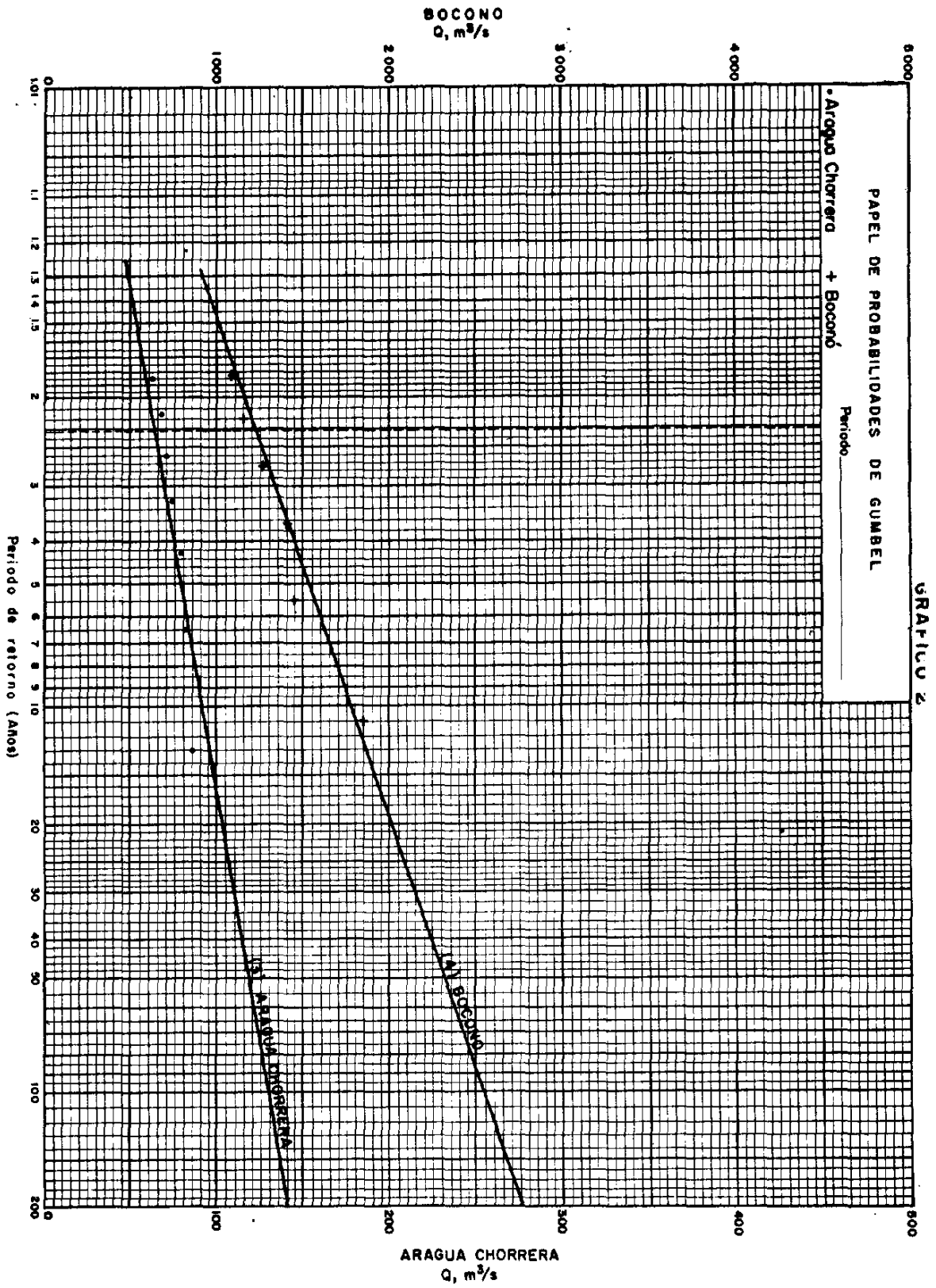
Nº	Río	ω	α	$Q_{2,33}$	$Q_{2,33}$	Q_{10}	Q_{25}	Q_{50}	Q_{100}
23	Tinaco	625	1,83	360	329	659	975	1311	1752
24	Tirgua	1490	1,74	390	339	679	1004	1350	1805
25	Tocorón	114	2,00	69	69	138	204	275	367
26	Tocuyo	3590	1,66	660	548	1096	1621	2180	2914
27	Tucutunemo	99	2,02	31	31	63	93	125	167
28	Turmero	192	1,95	72	70	140	208	279	373
29	Tuy-Tazón	1180	1,76	162	143	285	422	567	758
30	Tuy-Vigía	3620	1,66	255	212	423	626	842	1126
31	Yaracuy - Cumaripa	266	1,91	150	143	287	424	570	762
32	Yaracuy - Peñón	1206	1,76	128	112	225	333	448	599
33	Capaya	162	1,96	49	48	96	142	191	255
34	Guárico-El Sombrero	4110	1,65	230	190	380	562	755	1009
35	La Yuca	265	1,91	610	583	1165	1724	2319	3099
36	Morere	3420	1,66	120	100	199	295	396	530
37	Morón	120	2,00	60	60	120	178	239	319
38	Neverí	1092	1,77	245	217	434	642	863	1154
39	Sarare								
	Agua Blanca	585	1,83	80	73	146	217	291	389
40	Turbio	1710	1,72	95	82	163	242	325	435
41	Tuy								
	Hda. Barrios	210	1,94	65	63	126	187	251	335
42	Urama	430	1,86	220	205	409	606	814	1088
43	Uribante	3950	1,65	2550	2104	4208	6227	8373	11192

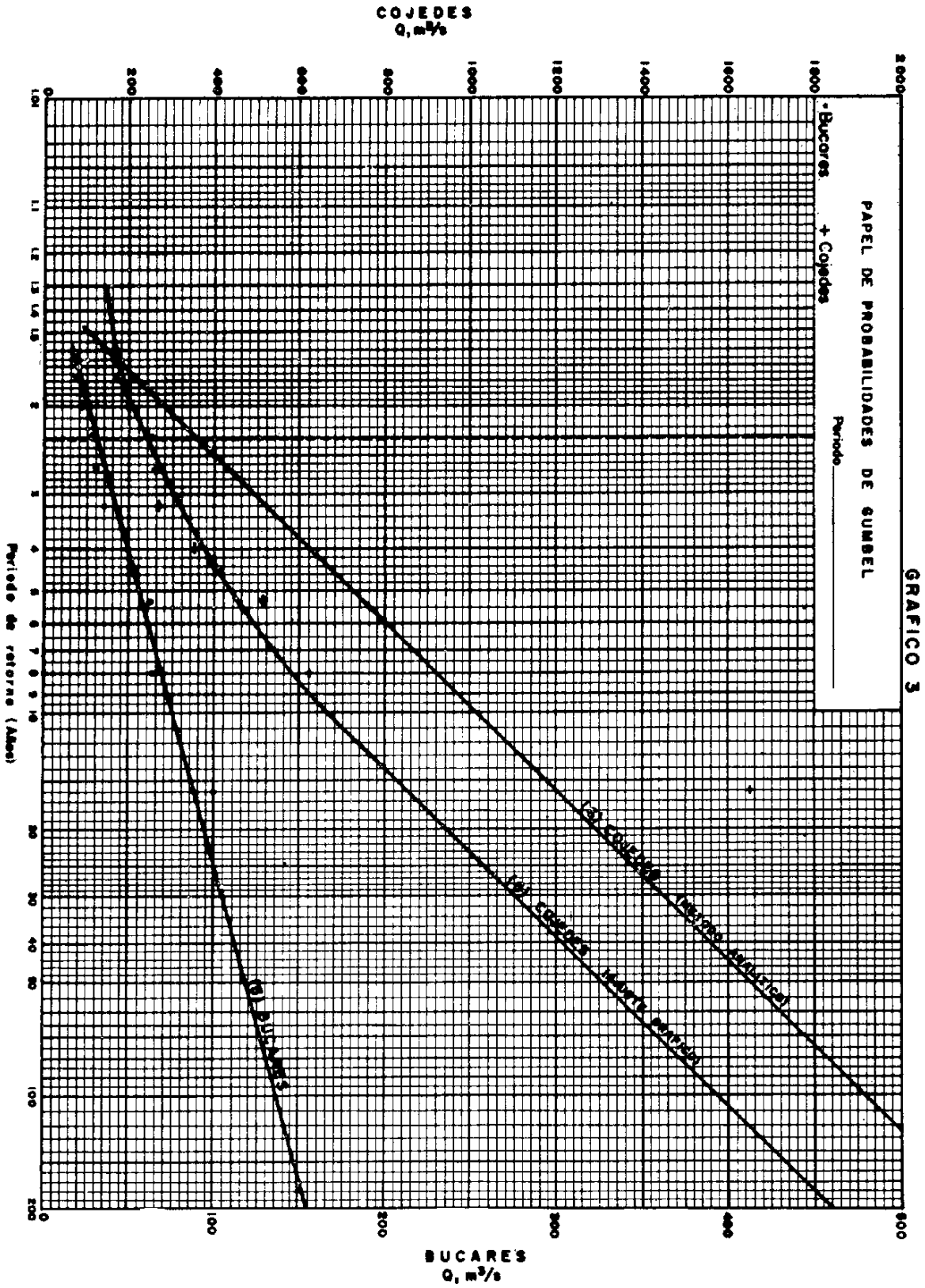
54

CG

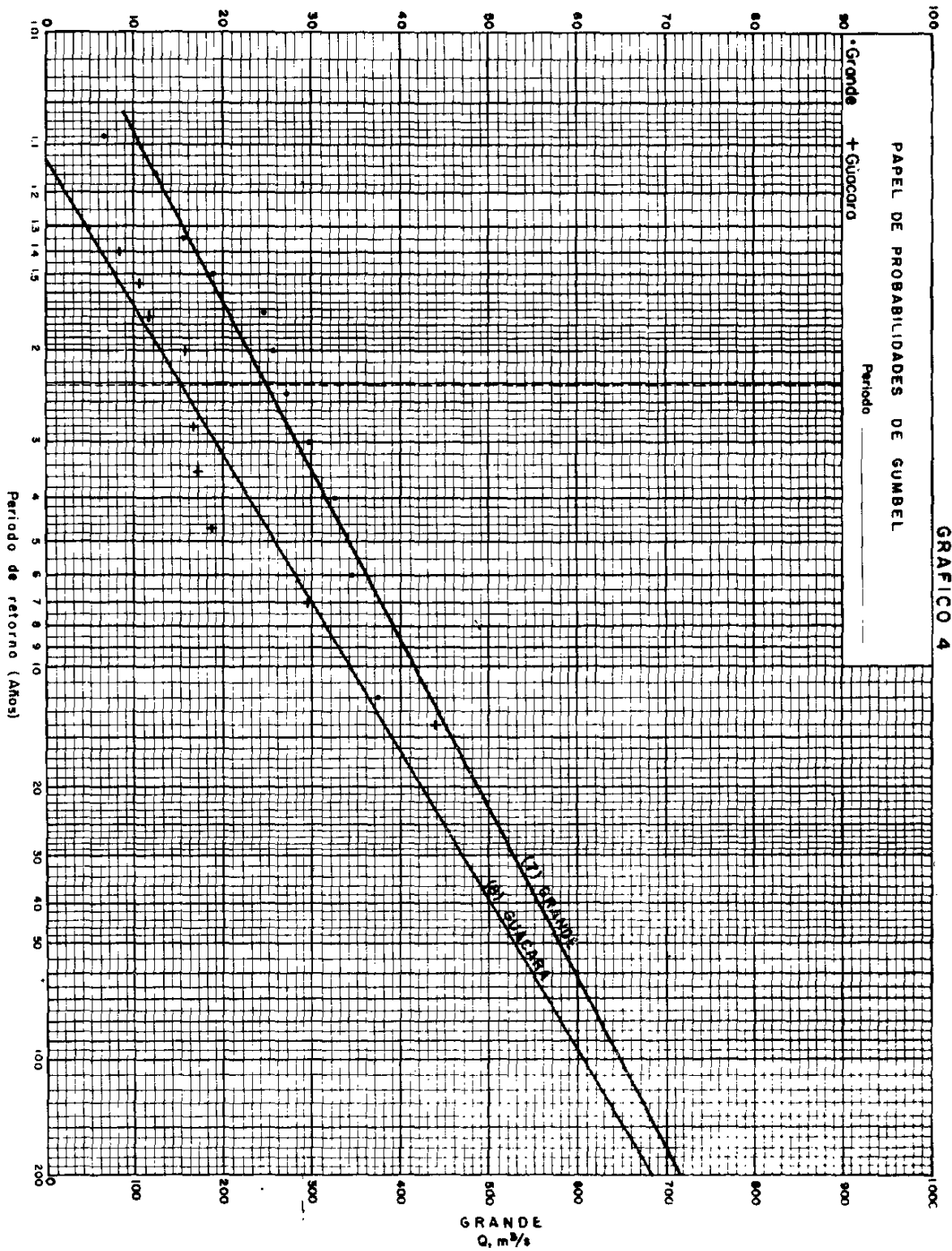
ACARIGUA
 $Q, m^3/s$



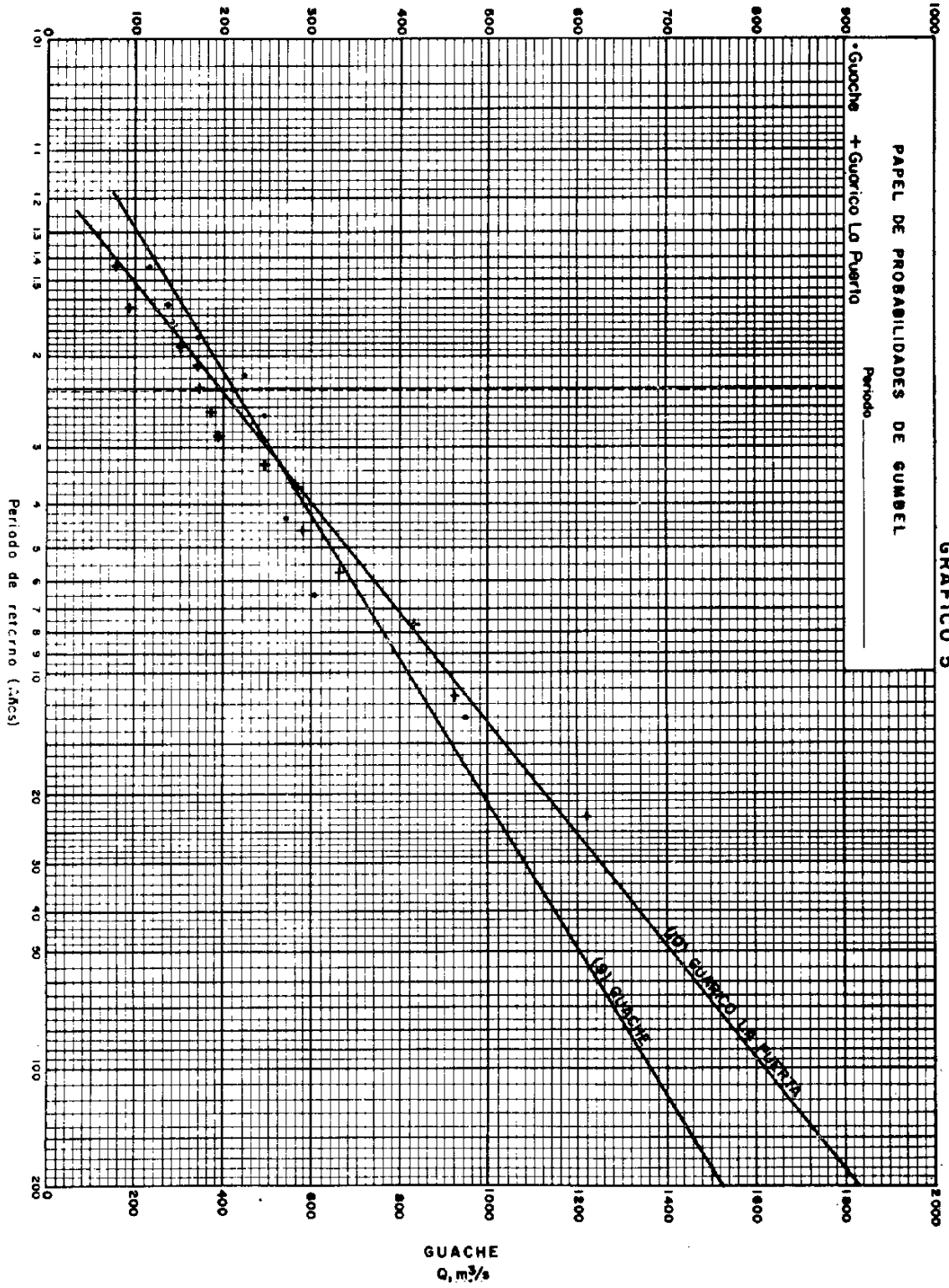




GUACARA
Q, m³/s

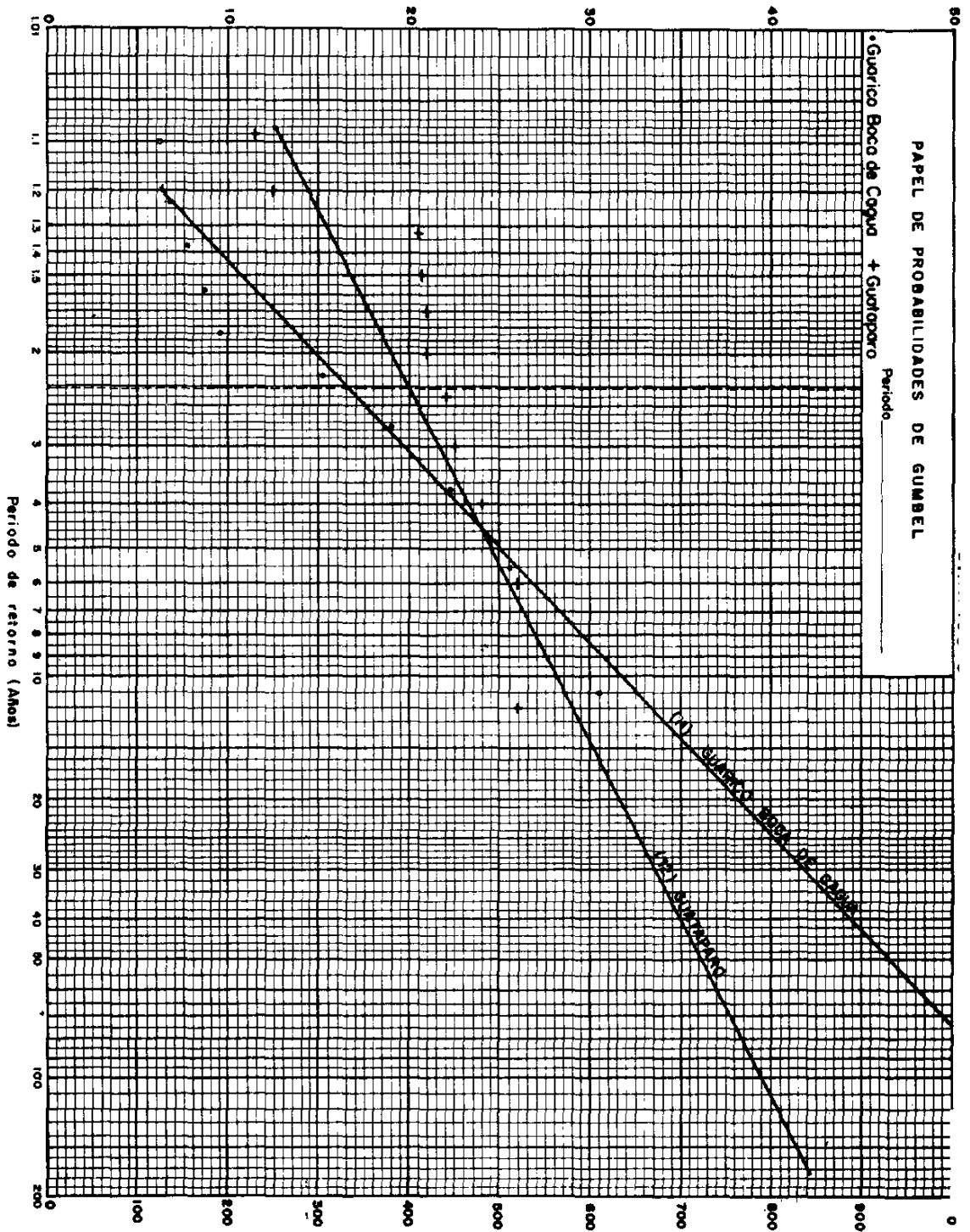


GUARICO LA PUERTA
 $Q, m^3/s$



GUATAPARO

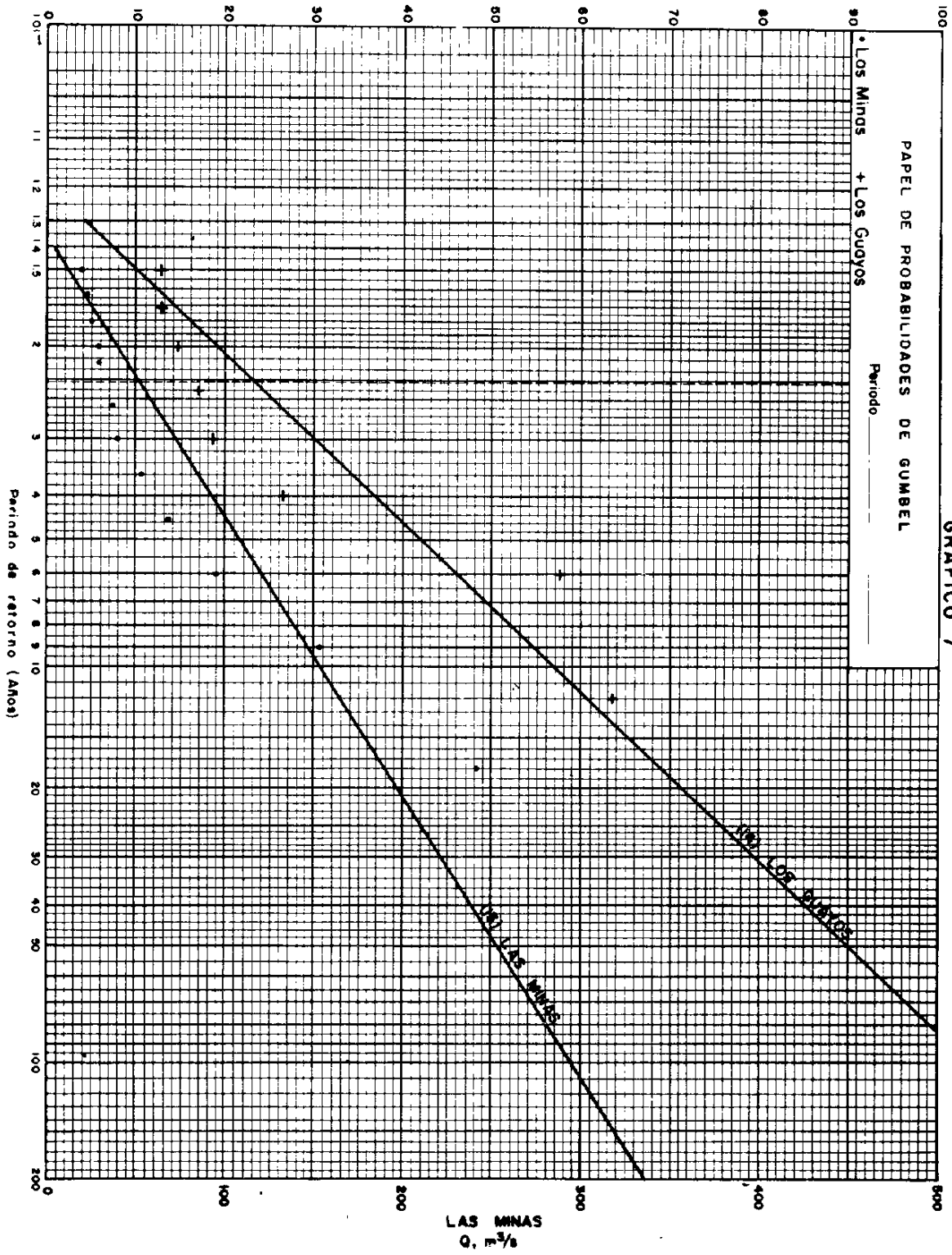
Q, m³/s



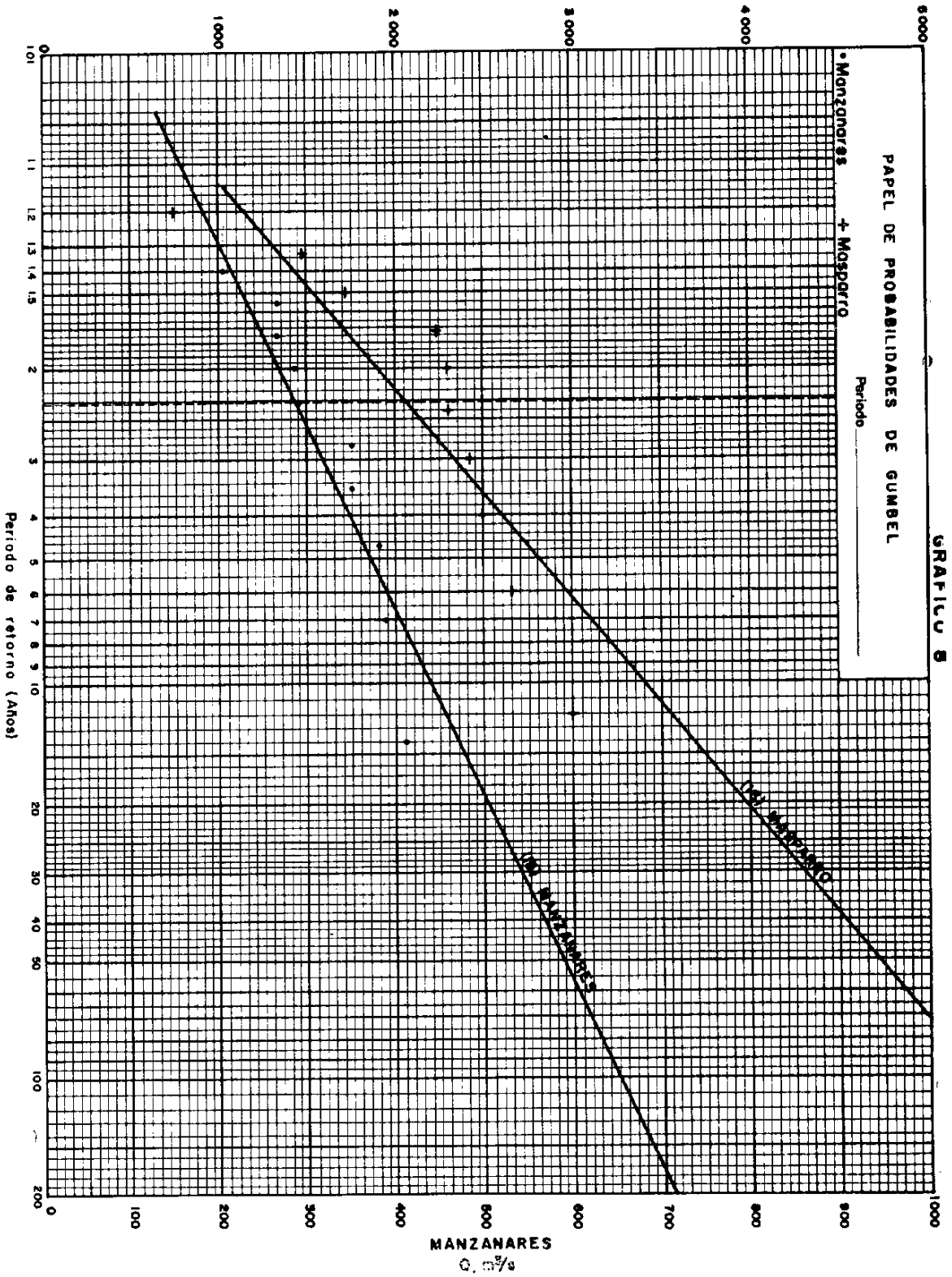
GUARICO BOCA DE CAGUA

Q, m³/s

LOS GUAYOS
Q, m³/s

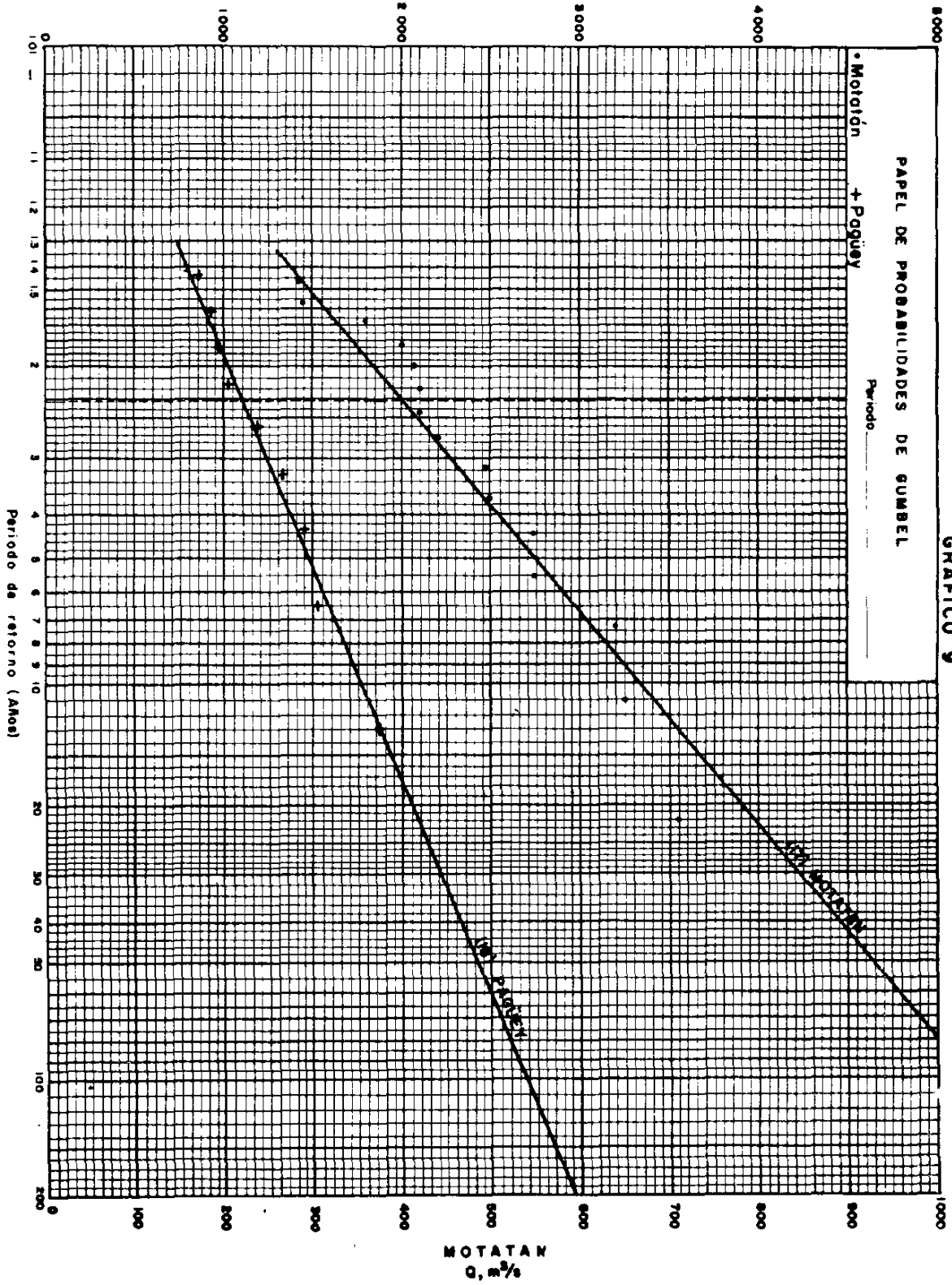


MASPARRO
Q, m³/s

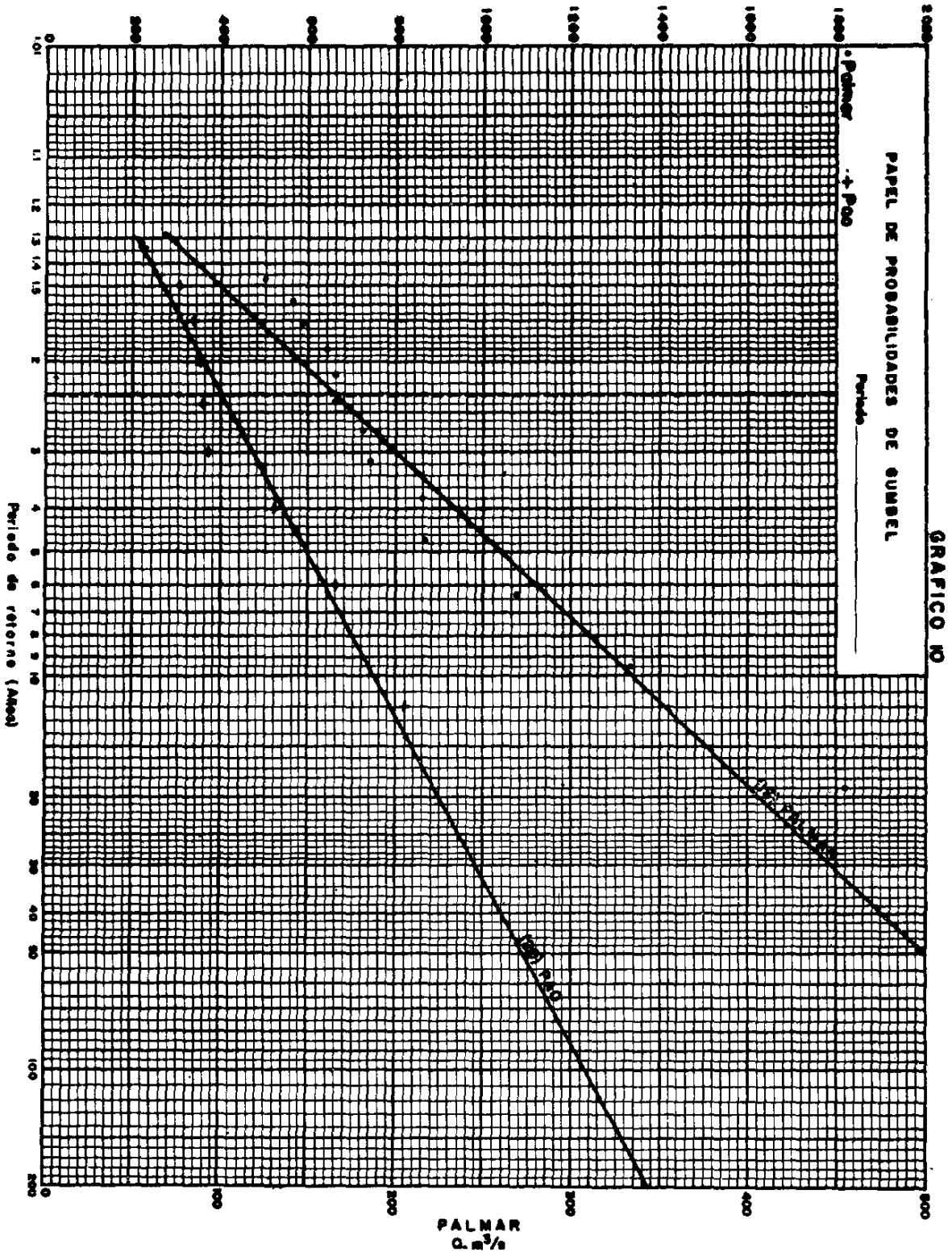


MANZANARES
Q, m³/s

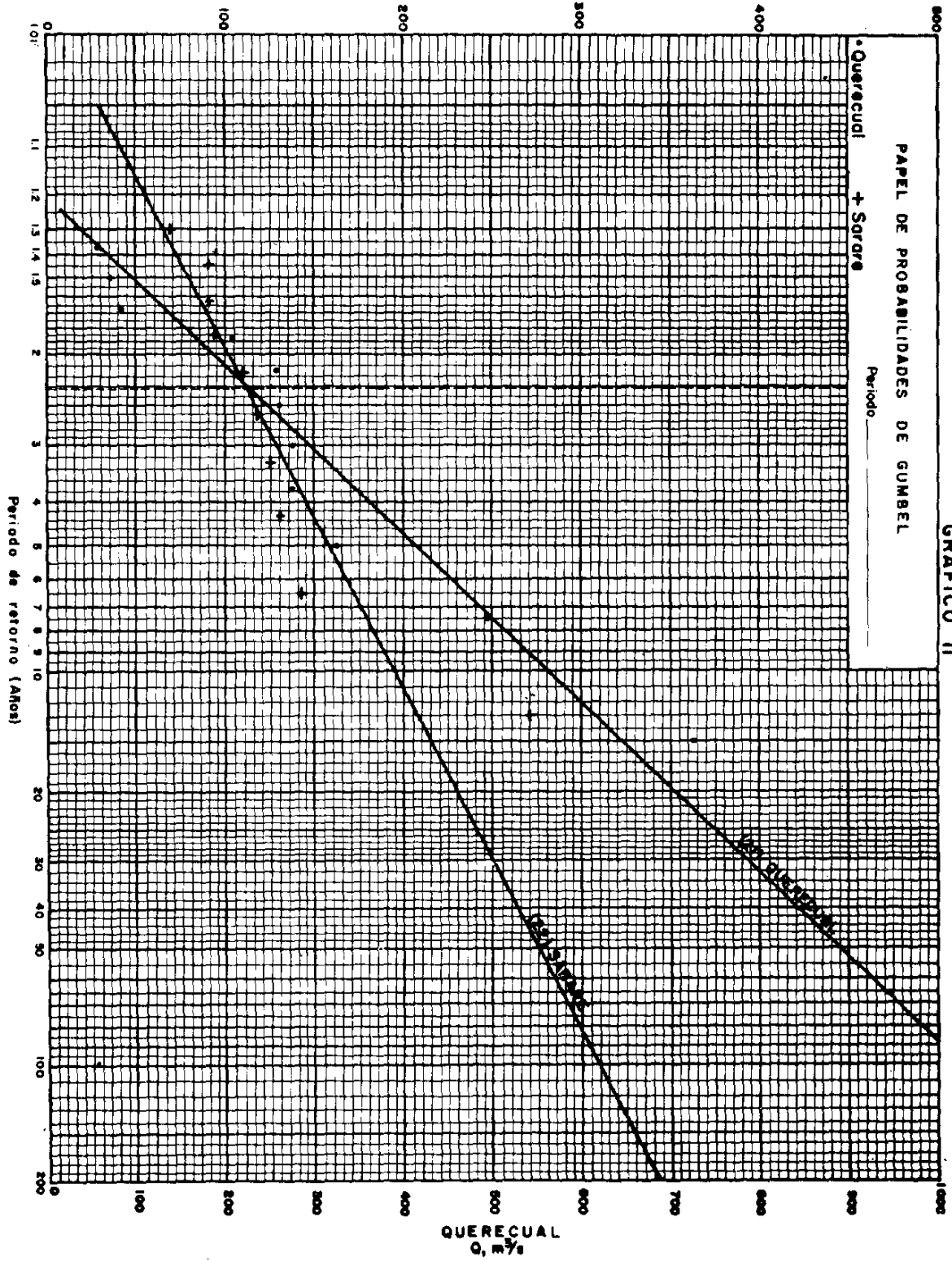
PAGÜEY
Q, m³/s

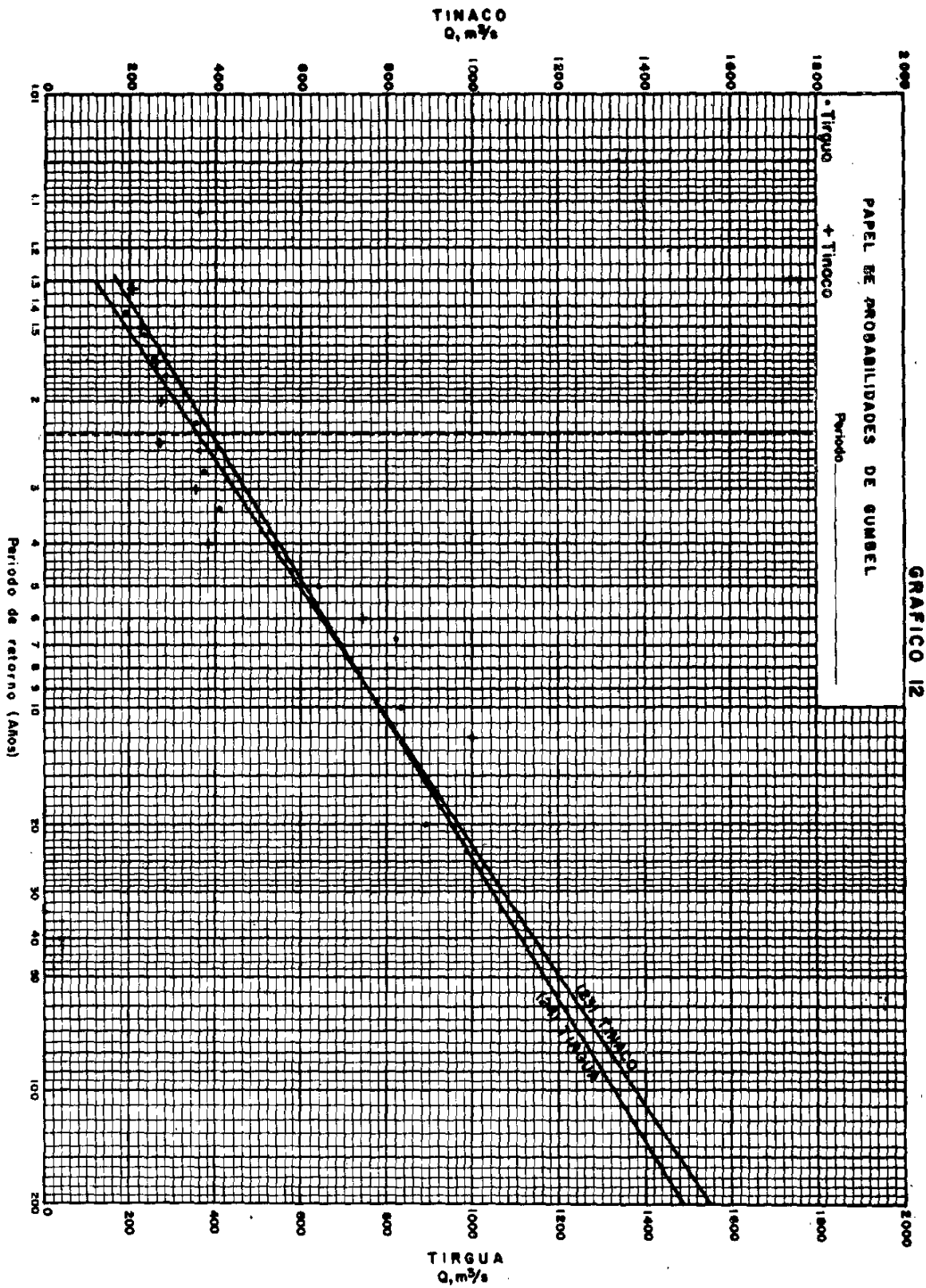


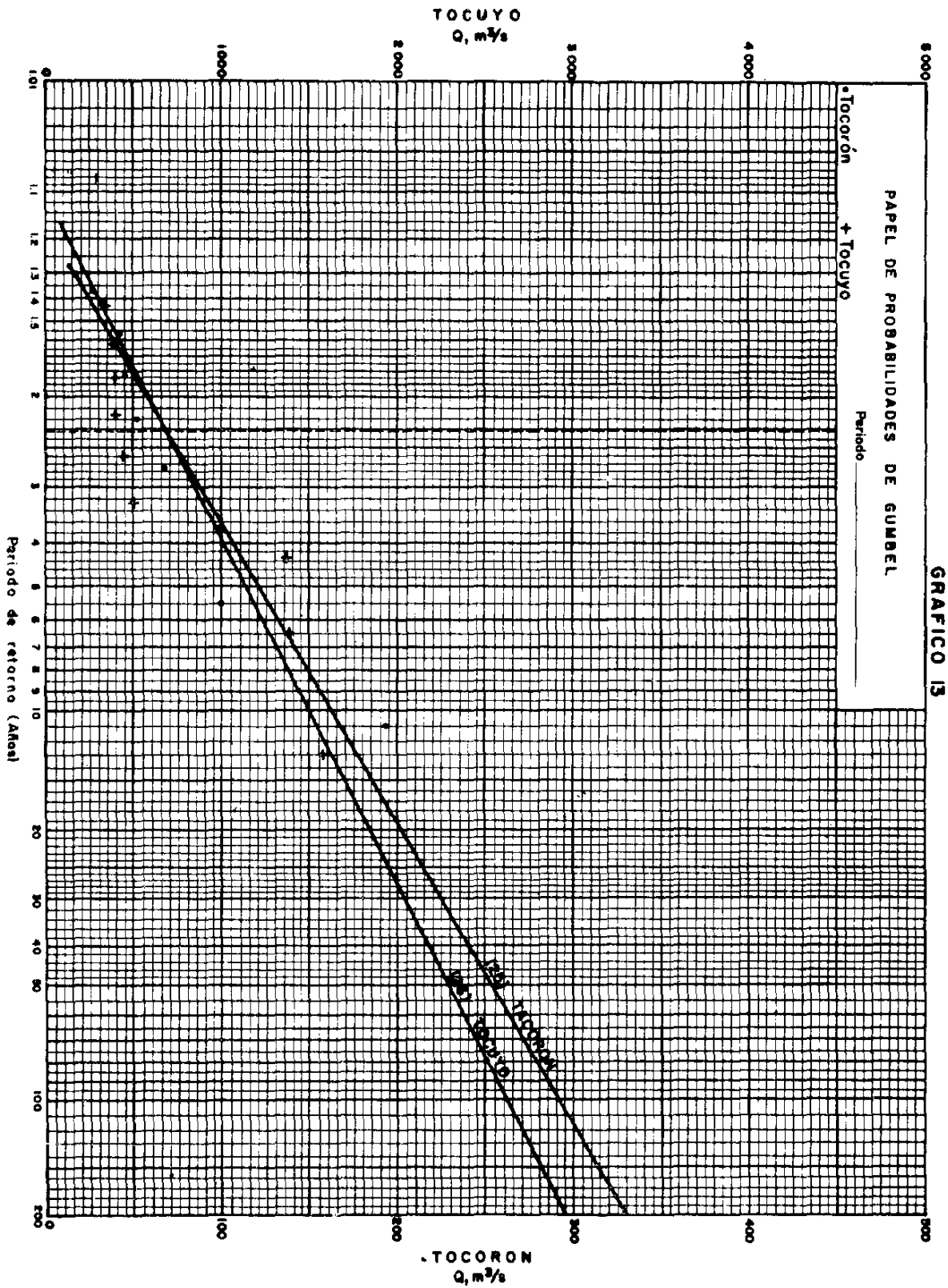
PAG
Q. M³/s

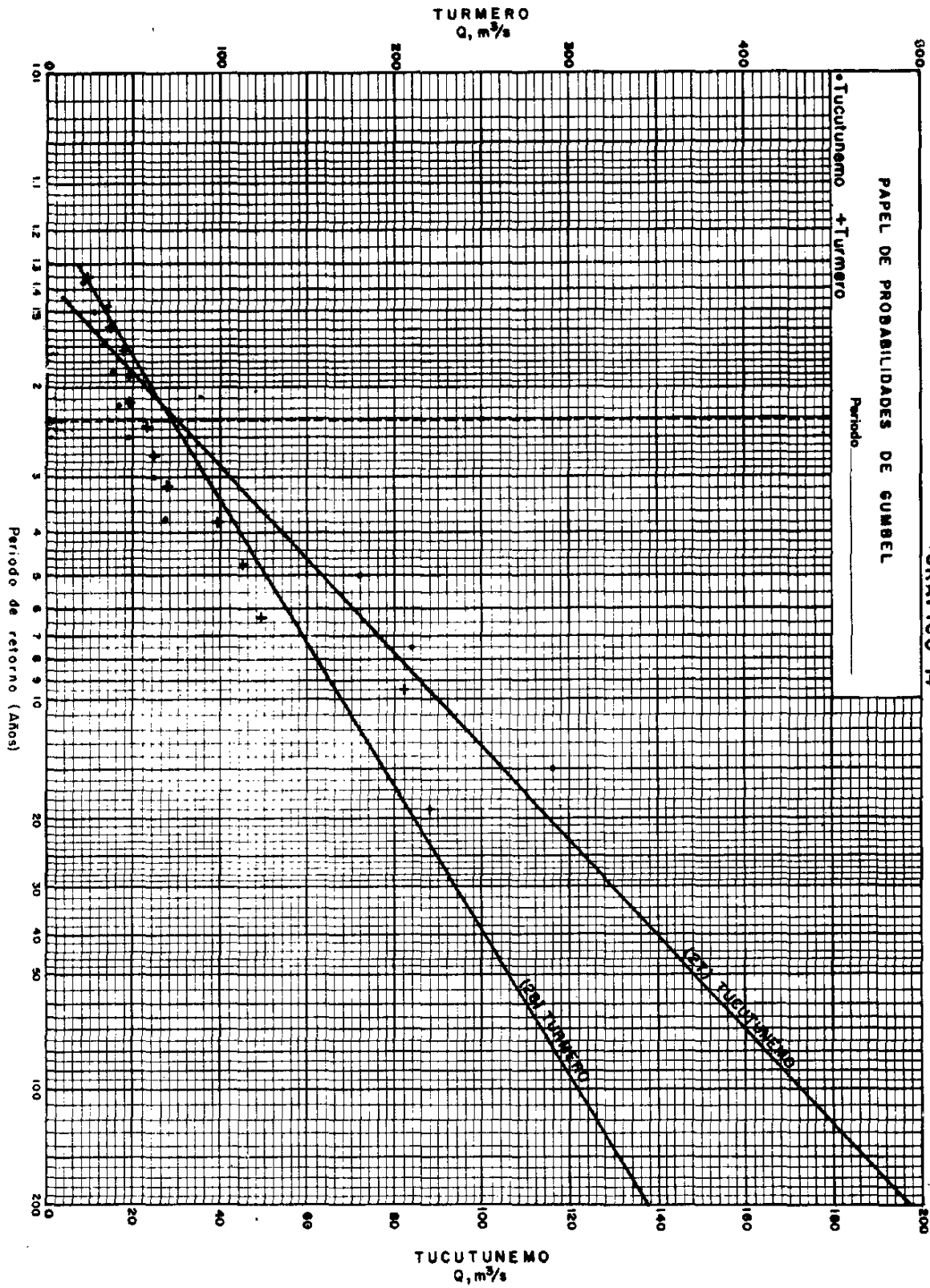


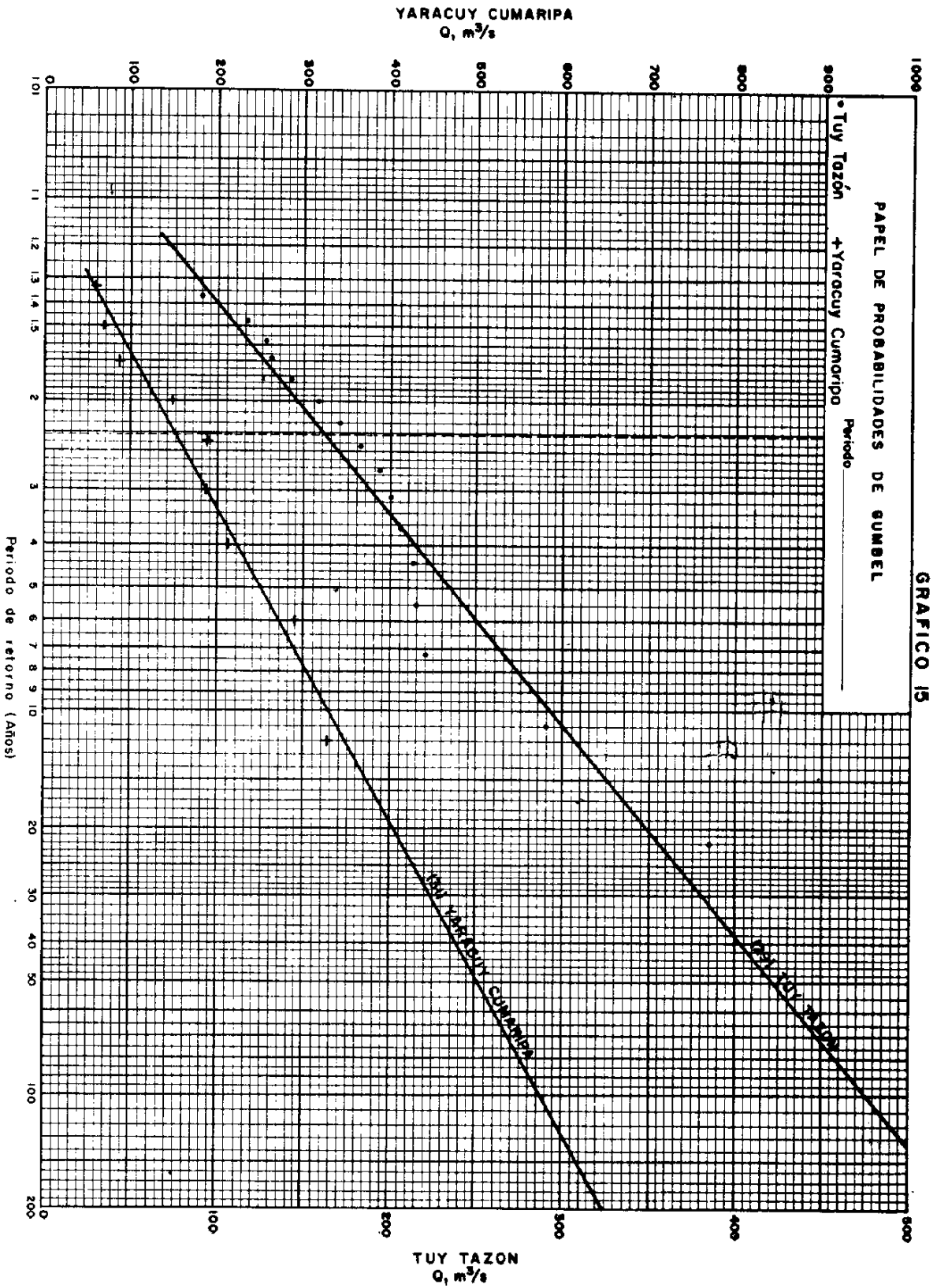
SARARE
 $Q, m^3/s$



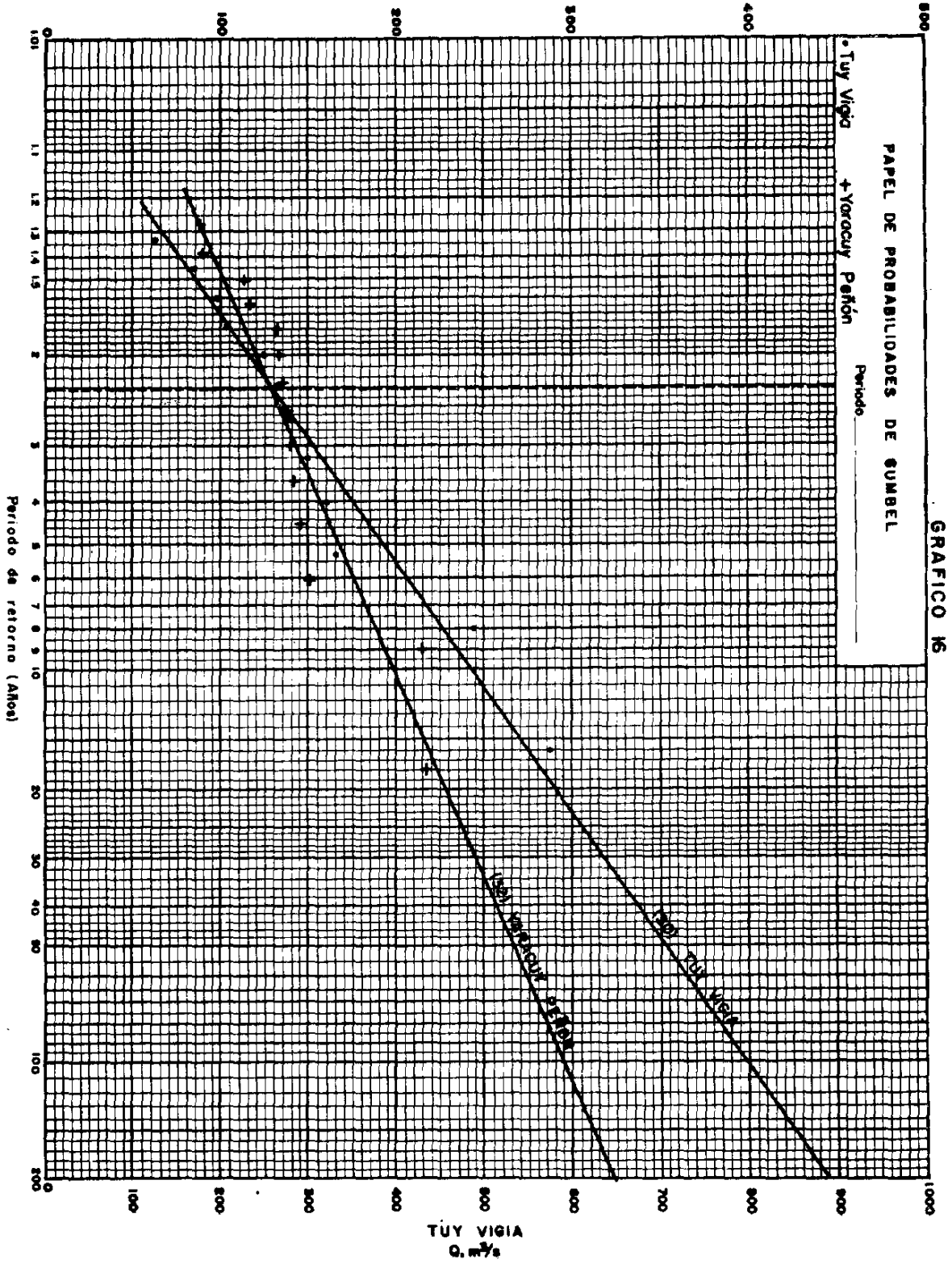




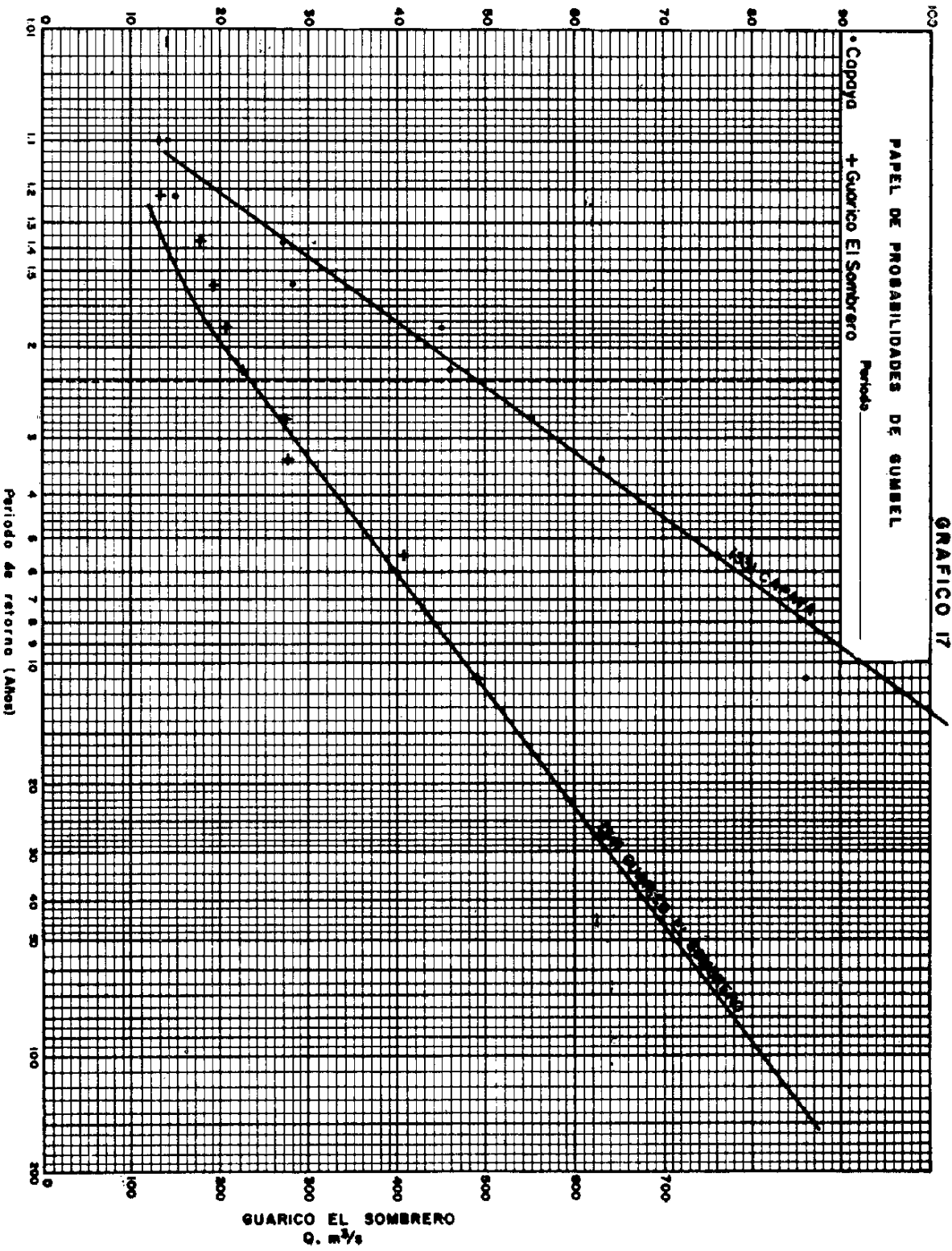




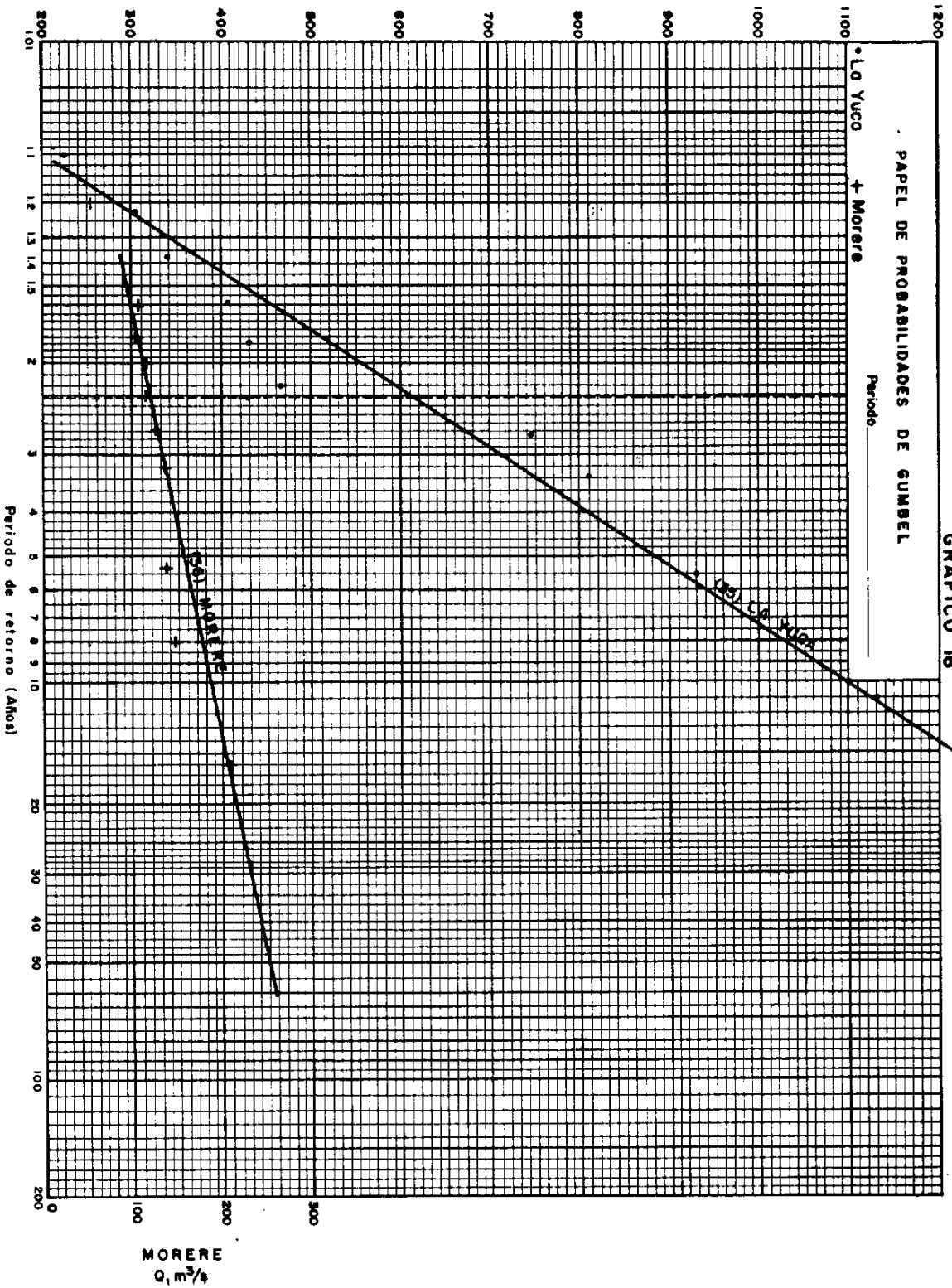
YARACUY PENON
Q, m³/s

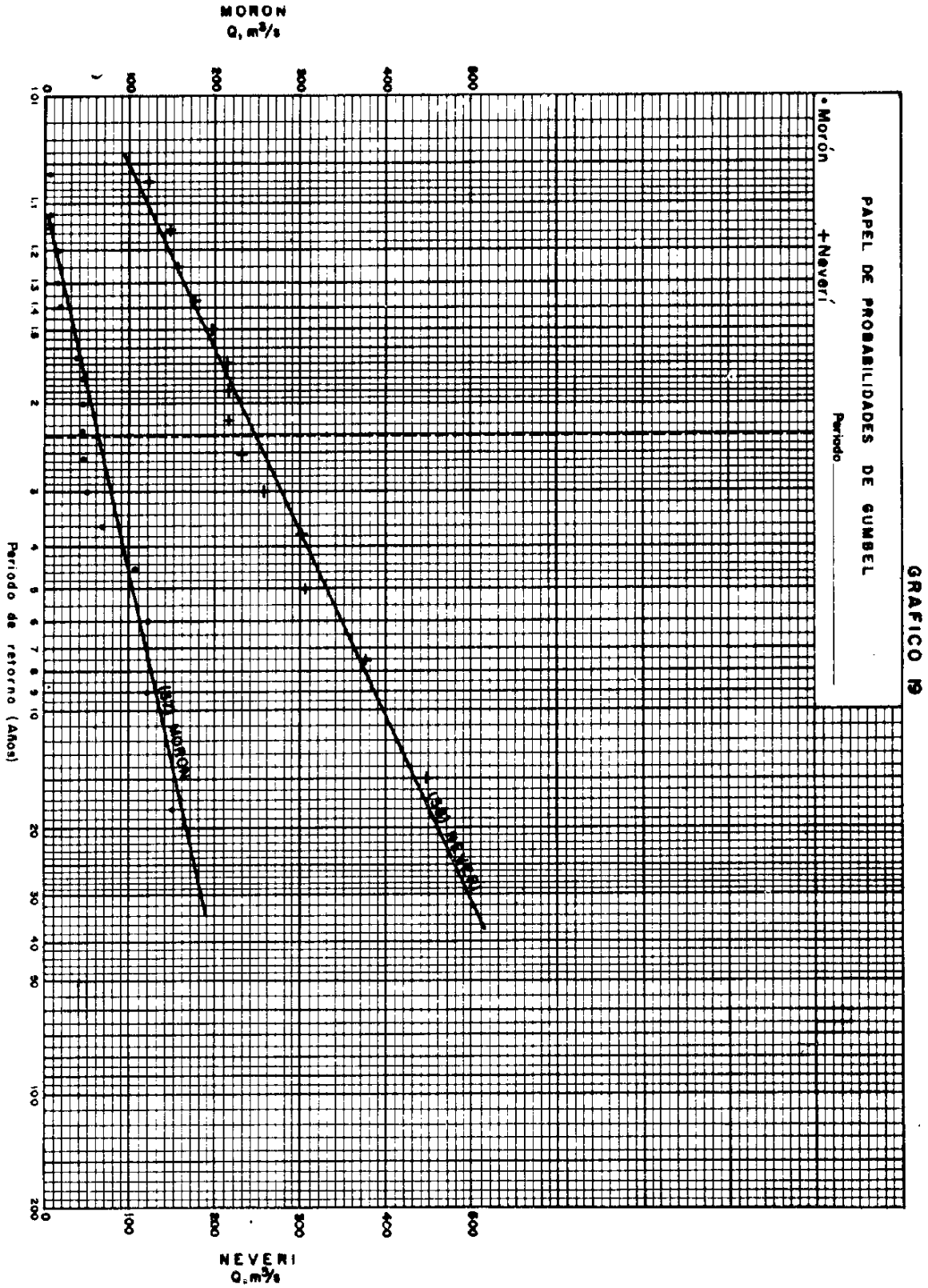


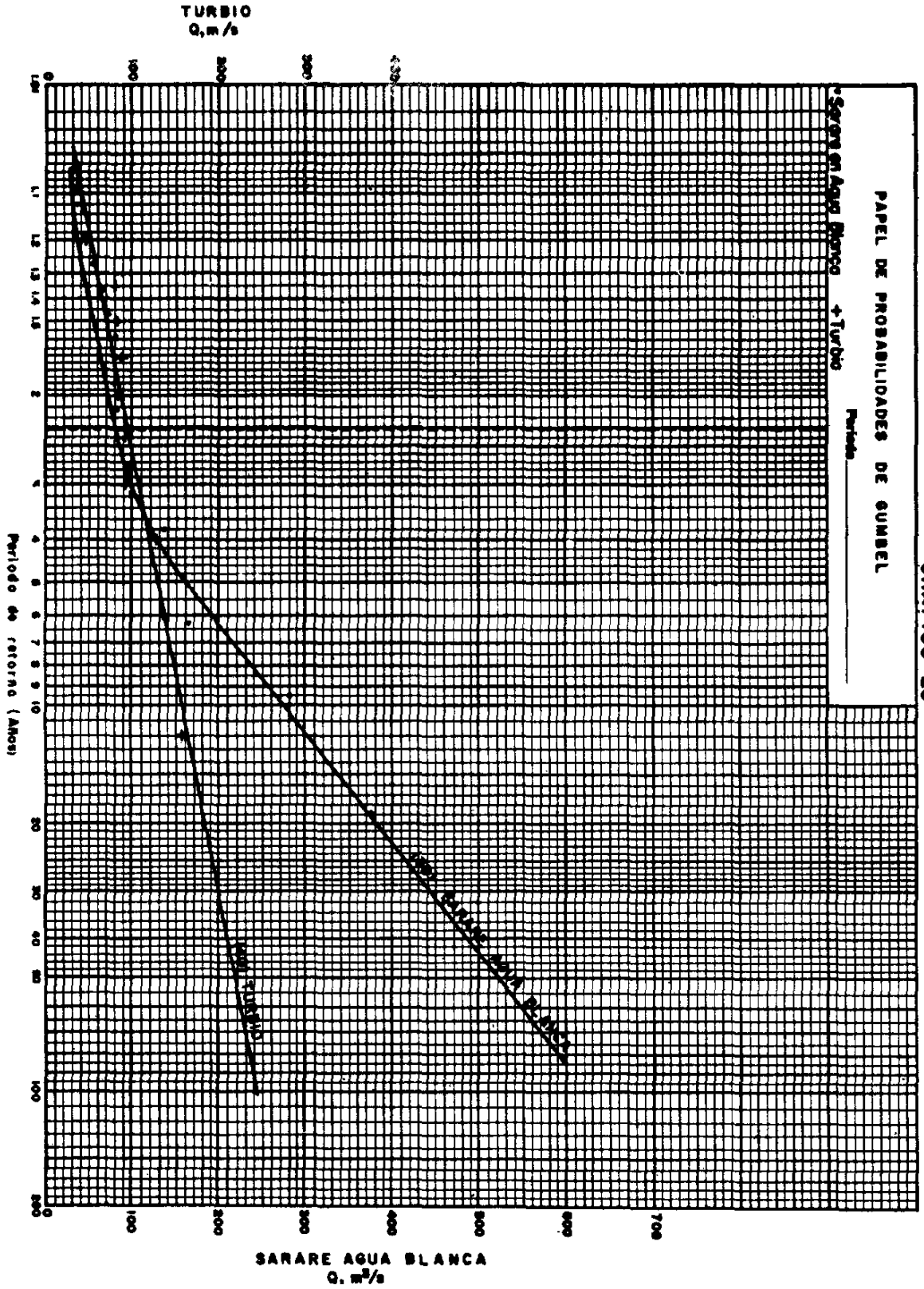
CAPAYA
Q. m³/s

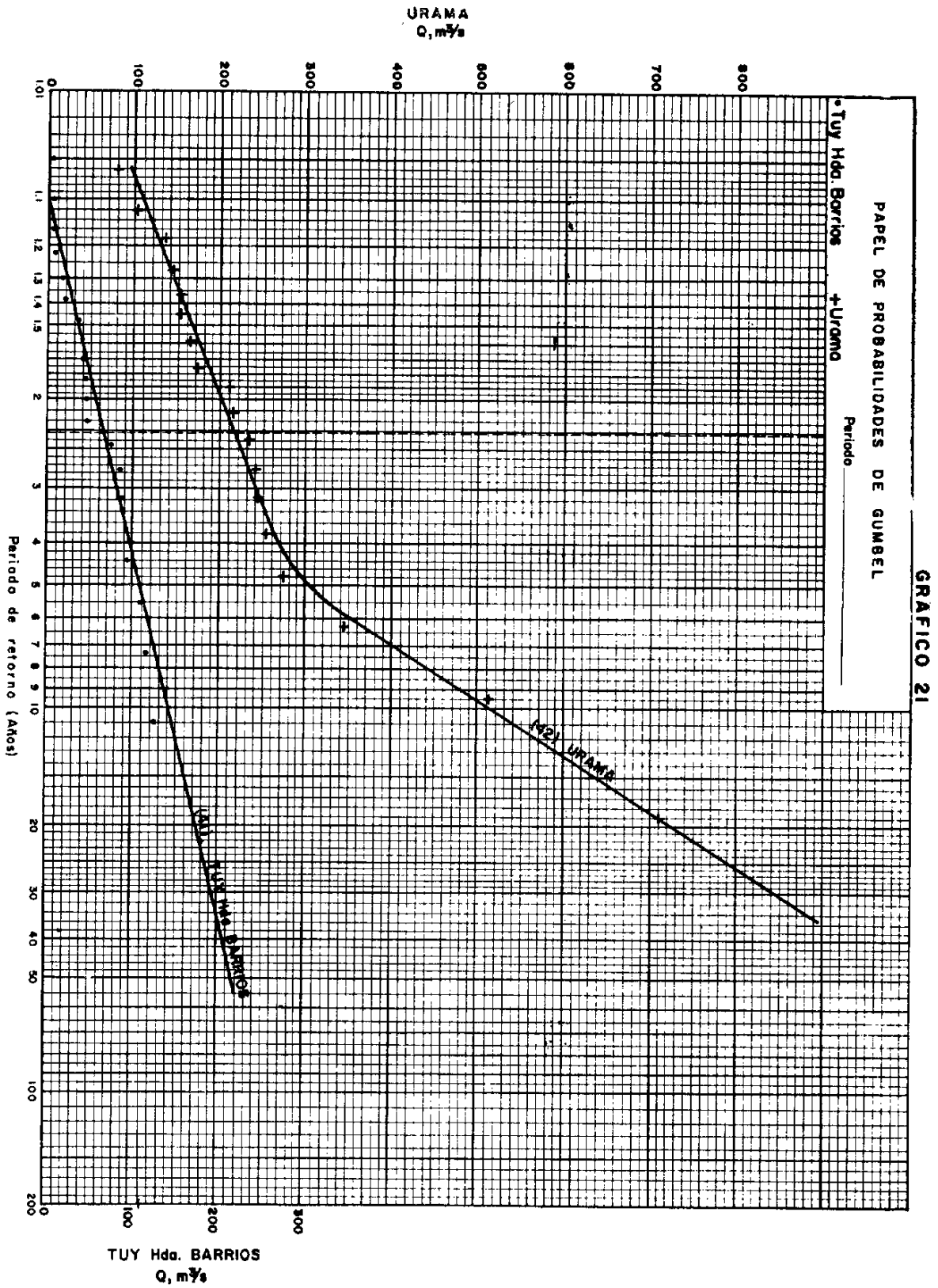


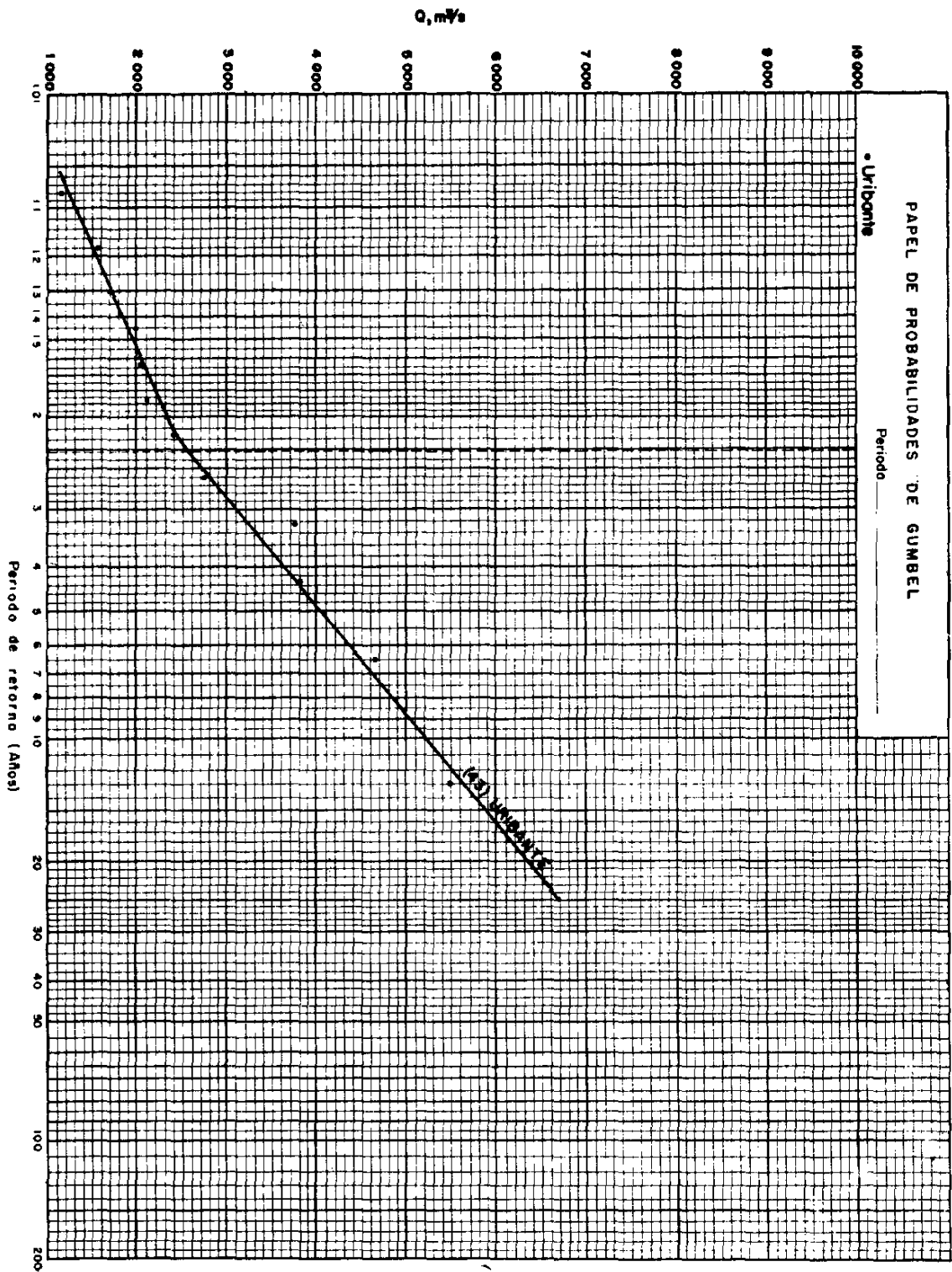
LA YUCA
 $Q, m^3/s$











α

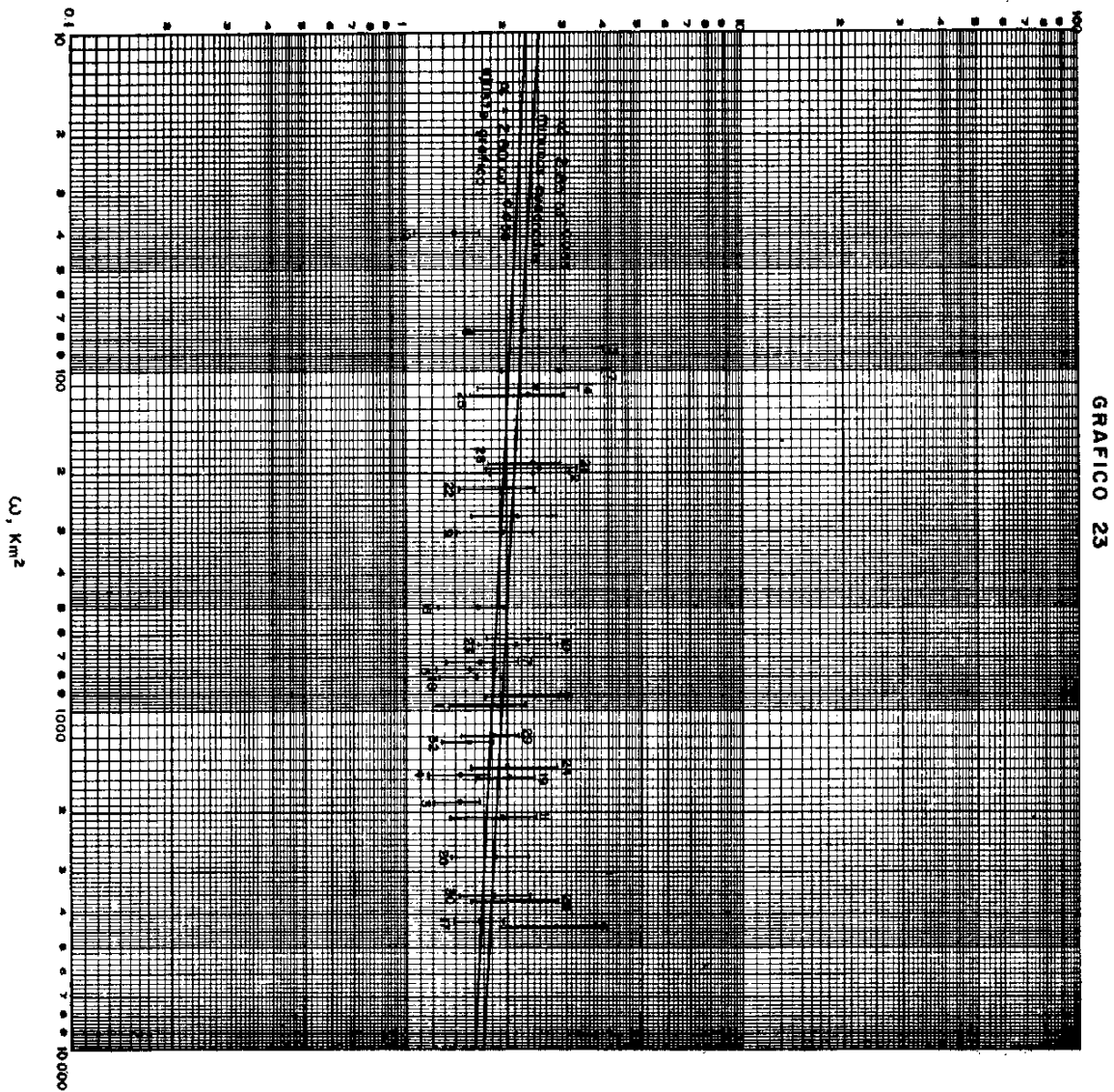
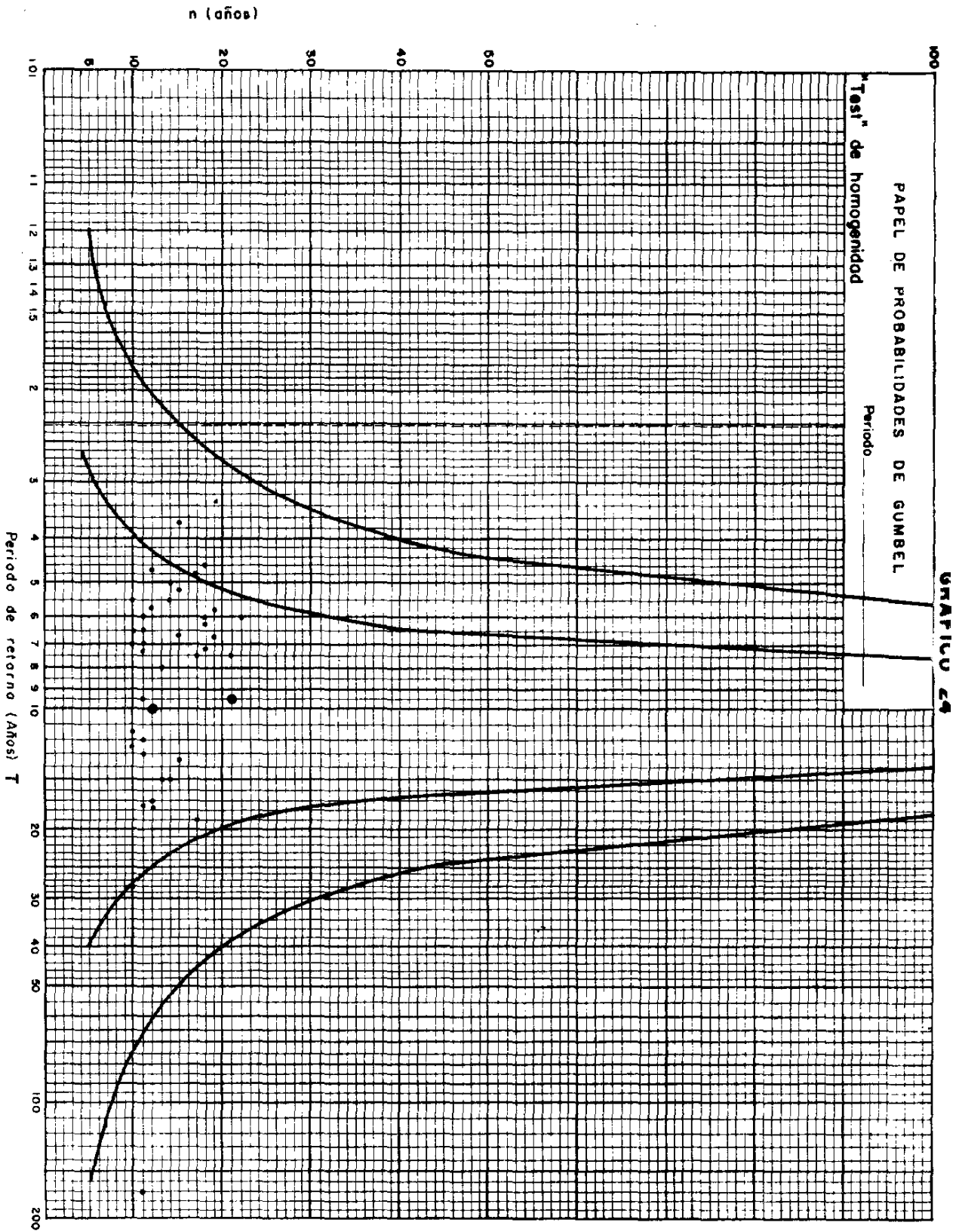


GRAFICO 23



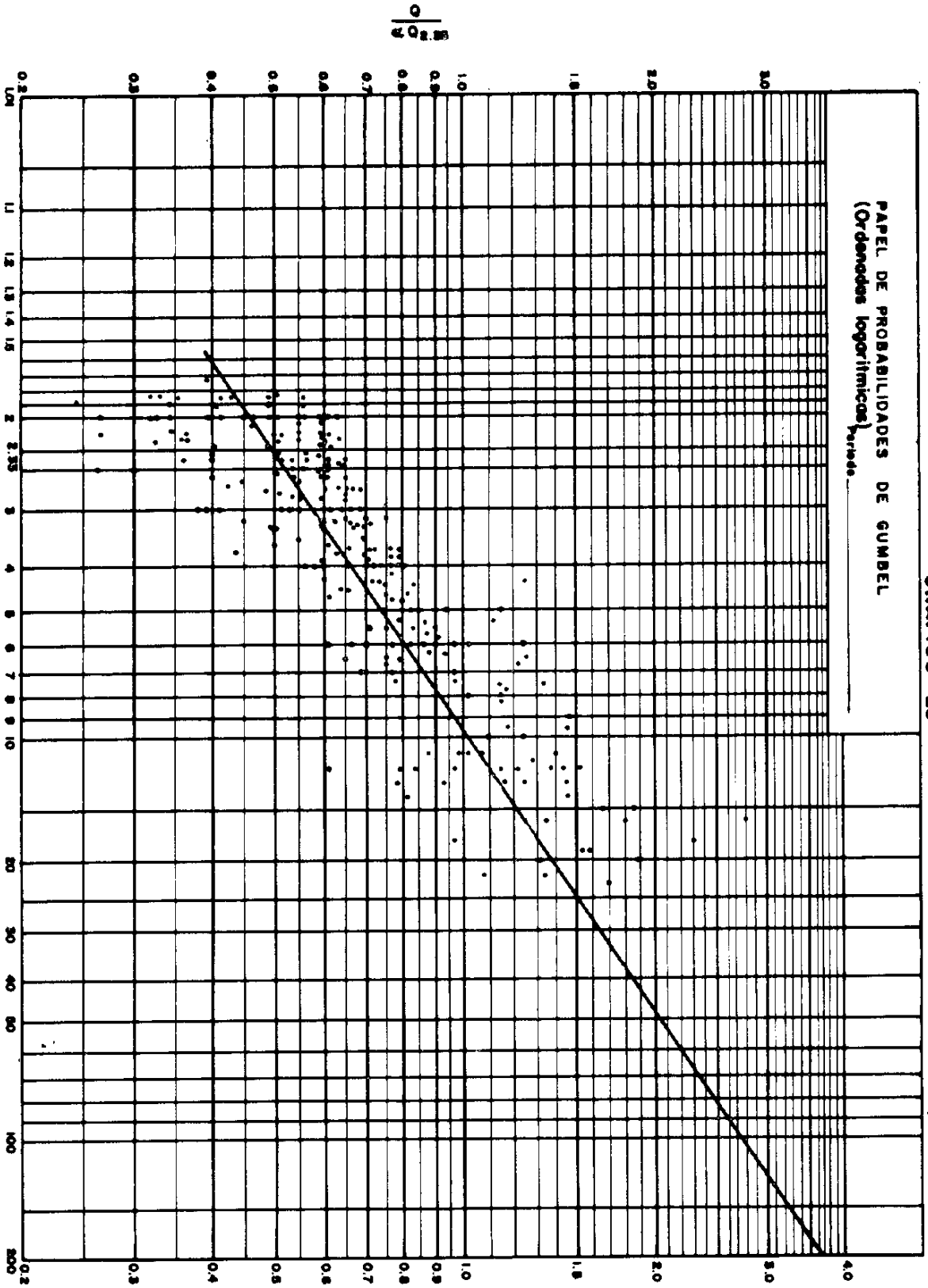


GRAFICO 25

$$\frac{Q}{\sigma Q_{0.99}}$$

