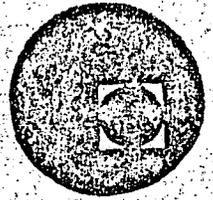




centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS DEL CENTRO DE EDUCACION CONTINUA

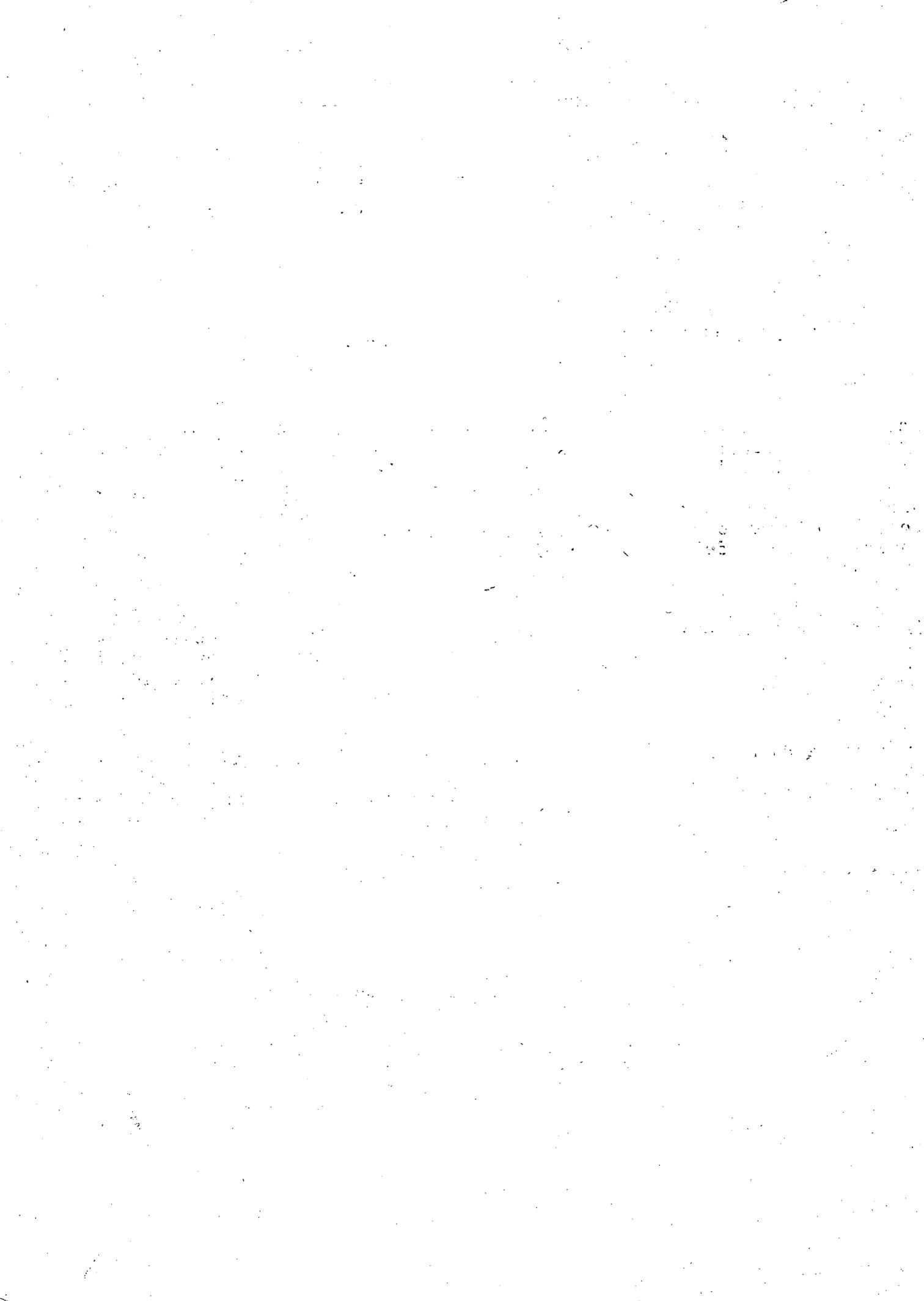
Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del Jefe del Centro de Educación Continua, Dr. Pedro Martínez Pereda, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso. Las personas que deseen que aparezca su título profesional precediendo a su nombre en la constancia, deberán entregar copia del mismo o de su cédula a más tardar el SEGUNDO DIA de clases, en las oficinas del Centro con la señorita Barraza, encargada de inscripciones.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona encargada de entregar las notas del curso. Las inasistencias serán computadas por las autoridades del Centro, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo del 80% de asistencia.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece el Centro están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso. Las personas comisionadas por alguna institución deberán pasar a inscribirse en las oficinas del Centro en la misma forma que los demás asistentes entregando el oficio respectivo.

Con objeto de mejorar los servicios que el Centro de Educación Continua ofrece, al final del curso se hará una evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos por parte de los asistentes.





THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
5800 S. UNIVERSITY AVENUE  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

RECEIVED

NOV 10 1964

1964 NOV 10 10 10 AM

Dear Sir:

I have your letter of October 28, 1964, regarding the  
loan of a copy of your book, "The Chemistry of the  
Carbonium Ion," to the University of Chicago Library.  
I am sorry that I cannot return the book to you  
at this time, but it is currently on loan to the  
Department of Chemistry Library, which is  
responsible for its care and return.

I am sure that you will understand the situation  
and that the book will be returned to you as  
soon as possible. I am sure that you will  
understand the situation and that the book  
will be returned to you as soon as possible.

I am sure that you will understand the situation  
and that the book will be returned to you  
as soon as possible. I am sure that you  
will understand the situation and that the  
book will be returned to you as soon as  
possible.

DIRECTÓRIO DE PROFESORES DEL CURSO: "HIDROLOGIA SUPERFICIAL"

1. ING. RAMON DOMINGUEZ MORA  
Instituto de Ingeniería  
Ciudad Universitaria  
México 20, D.F.  
548-97-95
2. ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA  
San Lorenzo # 154 Desp. 402  
Col. del Valle  
México 12, D.F.  
575-40-77 ext. 46
3. ING. JAVIER GONZALEZ VILLARREAL  
Melchor Ocampo # 4557, 7° Piso  
México 16, D.F.  
Tel. 511-00-36
4. ING. CESAR HERRERA TOLEDO  
Tépico # 40-3° Piso  
México 7, D.F.  
578-30-20
5. ING. OMAR LUCERO  
Facultad de Física  
Apdo. Postal 270  
Jalapa, Veracruz  
792-02
6. DR. ROLANDO SPRINGALL  
Insurgentes Sur # 254 Desp. 507  
México, D.F.  
584-77-88



CENTRO DE EDUCACION CONTINUA, DESFI, UNAM.

CURSO: HIDROLOGIA SUPERFICIAL

FECHA: Del 28 de Agosto al 22 de Septiembre

Duración: 40 h

---

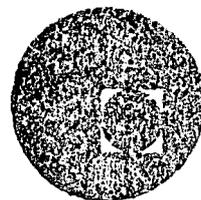
T E M A	PROFESOR	FECHA	HORARIO
1. INTRODUCCION Definición, historia, aplicaciones y limitaciones de la hidrología. El ciclo hidrológico; sus componentes y funcionamiento.	DR. ROLANDO SPRINGALL	Agosto 28	17:00-18:00
2. TEMPERATURA Y HUMEDAD ATMOSFERICA Temperatura atmosférica, humedad atmosférica, vientos.	ING. OMAR LUCERO	Agosto 28	18:00-21:00
3. LA PRECIPITACION Formación, formas de precipitación, tipos, medición, ajuste de registros, histograma, precipitación media, análisis altura-área-duración, precipitación probable, curvas intensidad-duración-frecuencia.	ING. OMAR LUCERO	Agosto 30	17:00-21:00
4. EVAPOTRANSPIRACION Factores que afectan la evaporación, medición de la evaporación, fórmulas para determinar la evaporación en vasos, el proceso de transpiración, factores que afectan la transpiración, determinación de la evapotranspiración, uso consuntivo, método de Blaney-Criddle modificado, requerimiento de riego en zonas tropicales	ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA	Septiembre 4	17:00-21:00
5. EL ESCURRIMIENTO Y LA CUENCA El proceso de escurrimiento, medición del escurrimiento, componentes de un hidrograma, definición de una cuenca, clasificaciones de una cuenca según sus características físicas.	DR. ROLANDO SPRINGALL	Septiembre 6	17:00-21:00

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

T E M A	PROFESOR	FECHA	HORARIO
<p>6. LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE Aplicaciones, métodos estadísticos</p> <p>Regionalización, determinación de la tormenta de diseño, aplicaciones del hidrograma unitario, análisis de flujos mínimos</p>	DR. ROLANDO SPRINGALL	Septiembre 8	17:00-21:00
<p>7. MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO</p> <p>La fórmula racional, modelos para cuencas pequeñas: Modelo de Chow, IPAI-WV y Seshapa-Rao, el hidrograma unitario, modelos que simulan el comportamiento del ciclo hidrológico: Modelos de Stanford</p>	ING. CESAR HERRERA TOLEDO	Septiembre 11 Septiembre 13	17:00-21:00 17:00-19:00
<p>8. HIDROLOGIA OPERACIONAL</p> <p>Necesidad de su utilización, método de Fiering, método de los componentes.</p>	ING. RAMON DOMINGEZ M.	Septiembre 13 Septiembre 18	19:00-21:00 17:00-21:00
<p>9. INTRODUCCION A APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS</p> <p>Funcionamiento de un vaso, estimación de la capacidad de una presa derivadora, estimación de la capacidad total de un vaso, funcionamiento de un sistema de vasos.</p>	ING. JAVIER GONZALEZ V.	Septiembre 20 Septiembre 22	17:00-21:00 17:00-19:00
10. MESA REDONDA		Septiembre 22	19:00-21:00



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de Ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

I N T R O D U C C I O N

DR. ROLANDO SPRINGALL

AGOSTO, 1978



## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Definición

De acuerdo con el U.S. Council for Science and Technology\* "Hidrología es la ciencia que trata de las aguas de la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivientes. El dominio de la hidrología abarca la historia de la existencia total del agua sobre la tierra".

De acuerdo con los métodos matemáticos, la hidrología paramétrica se define como "La aproximación a la hidrología en donde el ciclo hidrológico es tratado como un sistema determinado".

Dentro de la hidrología paramétrica el término "Simulación" se define como "El desarrollo y aplicación de modelos matemáticos para representar la iteración de la variación del tiempo en los procesos físicos".

### 1.2 Proceso Histórico

Es interesante previo al inicio del curso, revisar brevemente los progresos realizados en el pasado hacia el estado presente del conocimiento

---

\*Price W E, Heindl L A; What is hydrology? Trans Amer Geophys Union-49: 2: 529, 1968.

por lo que respecta a la hidrología física. Es necesario considerar dos escuelas paralelas de investigación; el campo de la investigación dentro de la hidrología y el desarrollo paralelo de las técnicas de medición y cálculo. Aquí, el término ciencia se define como "El conocimiento adquirido por observación y experimentación, probadas en forma crítica y cimentadas bajo principios generales". La ciencia de la hidrología no significa que este completamente formalizada y se requiere de un trabajo considerable por hacer antes de que principios generales formales -- puedan ser desarrollados, mismos que satisfactoriamente representen toda la amplitud y profundidad de la ciencia.

Recordando una definición sobre el hombre, en la cuál se describe así -- mismo como un animal que hace herramientas. Esta referencia se refleja claramente en el desarrollo de la hidrología. El hidrólogo utiliza -- herramientas, por medio de las cuales mide y calcula, y junto con sus -- colegas de otras ciencias, sucesivamente ha desarrollado y manufacturado mejores implementos para observar los procesos y probar las teorías de su investigación. El desarrollo de las técnicas y equipos con los cuales observa y calcula han corrido en forma muy proxima, paralelamente a la investigación dentro de la ciencia de la hidrología. La innovación de nuevos métodos o técnicas de cálculo, a menudo resulta en progreso del desarrollo de la hidrología. Uno de los mejores ejemplos de esto es el desarrollo de la computación electrónica rápida, las cuales han originado

do un incremento considerable en las actividades de investigación, ayudando en una serie de pruebas críticas de viejas filosofías y un desarrollo más activo de nuevas teorías.

Para tener una idea clara de las etapas más definidas de los dos campos paralelos de investigación, los cuales se pueden referir como el desarrollo de la teoría y el desarrollo de las herramientas, es necesario regresar a tiempos pasados. Cuatro períodos de desarrollo pueden ser presentados

1. Filosofía primitiva; medidas y cálculos rudimentarios, 3500 A C - 1500 D C.
2. Filosofía basada en experimentación y desarrollo de técnicas de medición, 1500 D C - 1800 D C.
3. Período filosófico y desarrollo de técnicas de cálculo mejorado 1800 D C - 1954 D C.
4. Filosofía de la iteración de la hidrología integral y la era de la computación. 1954 D C a la fecha.

Biswas\* a desarrollado un libro que permite conocer con un mayor detalle la historia de la hidrología.

---

\*Biswas AK: History of Hydrology. Amsterdam, North Holland. 1971

En tabla 1.1 se muestra en orden cronológico el desarrollo paralelo que ha tenido la teoría, mediciones y técnicas de cálculo relacionadas con la hidrología, desde 1880 a 1972\*. Esto abarca parte del tercero y la totalidad del cuarto período antes mencionado.

### 1.3 Aplicaciones y Limitaciones

Para plantear las aplicaciones de la Hidrología, se debe partir de la premisa de que el hombre no puede existir sin el agua. Por lo anterior, en la época actual, el conocimiento de la hidrología y el disponer de gente preparada en este campo es de importancia fundamental para un efectivo manejo del agua, trascendental para nuestra sociedad.

Aunque el uso del agua para actividades domésticas es vital, su uso en la industria, comercio, agricultura y recreación es básico dentro del desarrollo del país.

Dado que el agua es un líquido vital y escaso, es lógico pensar que debemos de contar con técnicas adecuadas para la planeación, manejo y desarrollo de los aprovechamientos hidrológicos del país. Una planeación y manejo efectivo de los recursos de agua es el compromiso del hidrólogo y solo es posible alcanzarlo si se entiende claramente los sistemas físicos que deben manejar. Por otra parte, se requieren modelos matemáticos confiables para evaluar y predecir el funcionamiento de los sistemas

---

\*Fleming, G. "Computer Simulation Techniques in Hydrology"  
Elsevier, Environmental Science Series, 1975

TABLA 1.1

DESARROLLO PARALELO DE LA TEORIA, MEDICIONES  
Y TECNICAS DE CALCULO EN HIDROLOGIA DE 1880 A 1972\*

FECHA	TEORIA	MEDICIONES	CALCULO
1883	RIPPL Curva masa para el diseño del almacenaje		
1885, 1889	MANNING Fórmula de flujo		HOLLERITH Mejora la impresión de cartas para datos de entrada
1898		HERSCHEL Venturi	
1900	PLANCK Teoría sobre la radiación del cuerpo negro		
1905		SLICHTER Técnicas de trazadores en mediciones de flujo de agua subterránea	
1914	HAZEN Conceptos de Hidrología estocástica		
1915	HORTON Teoría de la licuación de la nieve		
1922	Se establece la Asociación Internacional de Hidrología Científica		
1924	FOSTER Curvas de frecuencia teórica aplicadas a la Ingeniería		
1929	FOLSE Primeros intentos en simulación determinística de procesos del escurrimiento		
1930			BUSH Primera computadora analógica
1932	SHERMAN Teoría del Hidrograma Unitario		
1933	HORTON Teoría de la Infiltración, I.C.E. Envolventes de avenidas específicas		
1935	Mc CARTHY Métodos de tránsito de Muskingum		
1936	Evolución de la Investigación de operaciones		
		BURNS & RAYNER Telemetría en Control de Poder	
			AITKEN Implementación de la máquina analítica
1941	GUMBEL Teoría de valores extremos en Hidrología		
1943			ECKERT & MAUCHLEY ENIAC Computadoras electrónicas (primera generación de computadoras)
1944	BERNARD Meteorología en relación con las avenidas		
			NEWMANN Concepto de almacenamiento de memoria

TABLA 1.1 (cont.)

FECHA	TEORIA	MEDICIONES	CALCULO
1949		BARDEEN & BRATAIN Invención de los transistores	CAMBRIDGE UNIV Primera computadora con almacenaje en memoria, (segunda generación de computadoras)
1950	SUGAWARA Primer modelo de la fase de tierra total del Ciclo Hidrológico		
1951	KOHLER, LINSLEY Técnicas de correlación coaxial		
1954	PHILIP Desarrollos mas amplios de la teoría de la infiltración		
1955	LIGHTHILL & WHITHAM Teoría de la onda cinemática		
1956	HARVARD Iniciación de programas de investigación en los aprovechamientos Hidráulicos Aplicación del análisis de sistemas a los aprovechamientos Hidráulicos Programa de Stanford a los aprovechamientos Hidráulicos		BELL TELEPHONE Introducción a los datos por teléfono y terminales de tele comunicaciones. Desarrollo en microcircuitos (tercera generación de computadoras)
1958	U.S. CORP OF ENGINEERS Inicio del desarrollo del modelo SSARR		
1959	LINSLEY & CRAWFORD. Concepto de la simulación determinística usando computadoras digitales. Programa de investigación de Stanford		
1960	Desarrollo acelerado en simulación, sistemas e hidrología estocástica		Introducción a computadoras con grande memoria y alta velocidad: IBM 360, BURROUGHS B 5500, CDC, ICL, GEC
1962	PROGRAMA HARVARD SOBRE EL AGUA. Integración de los aspectos de economía, de ingeniería y políticas en los aprovechamientos hidráulicos INSTITUTO BRITANICO DE HIDROLOGIA. Se establece		
1965	Se inicia la Decada Hidrológica Internacional		
1967	PHILIP Énfasis sobre microprocesos en Hidrología		
1969	Se implementa la predicción en tiempo real de las avenidas		

TABLA 1.1 (cont.)

FECHA	TEORIA	MEDICIONES	CALCULO
1970	Se aceleran los estudios en hidrología urbana		Se implementa el concepto de memoria virtual Computadoras en serie IBM-370
1971	Simulación de efectos sobre el uso de tierras		
1972	Aplicación de sistemas de gran escala en aprovechamientos regionales del agua	Técnicas laser, ultrasónicas y electromagnéticas en la medición de flujo	

hidrológicos.

El hidrólogo juega un papel elemental en esta problemática y entendimiento de la misma. Su competencia tiene un tremendo impacto en todas las actividades de los aprovechamientos hidrológicos.

Este curso pretende proveer al estudiante de un entendimiento de los aspectos físicos de los sistemas hidrológicos y la manera en la cuál las componentes hidrológicas pueden sintetizarse para una efectiva planeación y preparación de modelos de diseño.

Desde el punto de vista de diseño de una obra hidráulica, los principales objetivos de la hidrología pueden resumirse en dos grandes grupos\*

a) Obtención de la avenida máxima que con una determinada frecuencia puede ocurrir en un cierto lugar, lo cual es necesario considerar al diseñar vertedores, puentes y drenajes en general

b) Conocimiento de la cantidad, frecuencia y naturaleza de ocurrencia del transporte del agua sobre la superficie terrestre. Esto se requiere en el diseño de sistemas de irrigación, abastecimiento de agua aprovechamientos hidroeléctricos y navegación de ríos.

Por lo que respecta a las limitaciones de la hidrología, estas se relacionan con la información hidrológica disponible y la complejidad de los pro

---

\*R. Springall "Hidrología. Primera parte" Publicación del Instituto de Ingeniería, D 7, UNAM (Abril 1970)

cesos naturales con los cuales trata.

Lo anterior involucra que en general cada problema es único y es difícil analizarlos con un sistema deductivo riguroso. Esto ha involucrado que al tratar de uniformizarse los criterios, se plantean cada vez sistemas más complejos en donde interviene un mayor número de parámetros, que en ocasiones son difíciles de cuantificar.

Al aplicar un criterio hidrológico para el análisis de un problema, debe considerarse que la aplicación del mismo no involucra el resultado esperado, a menos que las bases con las que se elaboró dicho criterio sean las mismas a las del problema. En caso contrario deberá tomarse en cuenta este hecho en la interpretación del resultado y darle a éste el peso que merece. Conforme se disponga de mayor información hidrológica se podrán ir ajustando los criterios existentes, elaborar otros y tener una mayor seguridad en los resultados hidrológicos que se obtengan.

#### 1.4 Información hidrometeorológica disponible

Desde el punto de vista hidrológico se requiere que la información que proporciona una red hidrometeorológica sea la indispensable que permita:

- evaluar los recursos hidráulicos disponibles
- evaluar los requerimientos de dichos recursos
- diseñar obras para su aprovechamiento y operación de las

mismas

predecir los fenómenos hidrometeorológicos extremos

Ante esto, el país ha venido realizando grandes esfuerzos, principalmente en los últimos 50 años, tendientes a crear una red hidrometeorológica adecuada que satisfaga los requerimientos antes mencionados.

A la fecha, la República Mexicana cuenta con una amplia red de estaciones climatológicas e hidrométricas controladas principalmente por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos ( SARH ) y en parte por la Comisión Federal de Electricidad ( CFE ) y la Comisión Internacional de Límites y Aguas ( CILA ). En la tabla 1.2 se indica el número de estaciones climatológicas e hidrométricas en operación en la República Mexicana \*

La Dirección de hidrología de la S.A.R.H. ha dividido el país en 37 regiones hidrológicas y tiene planos con la posición de las estaciones climatológicas e hidrométricas que se encuentran en cada una de ellas, con su nombre, años de registro y dependencia que la controla ( p.ej. fig 1.1 ). Además de una serie de publicaciones, ha elaborado algunos atlas climáticos de diversas cuencas del país, así como las cartas de isoyetas medias anuales de la República Mexicana, en el período de 1931 a 1970. En la tabla 1.3 se muestran las principales

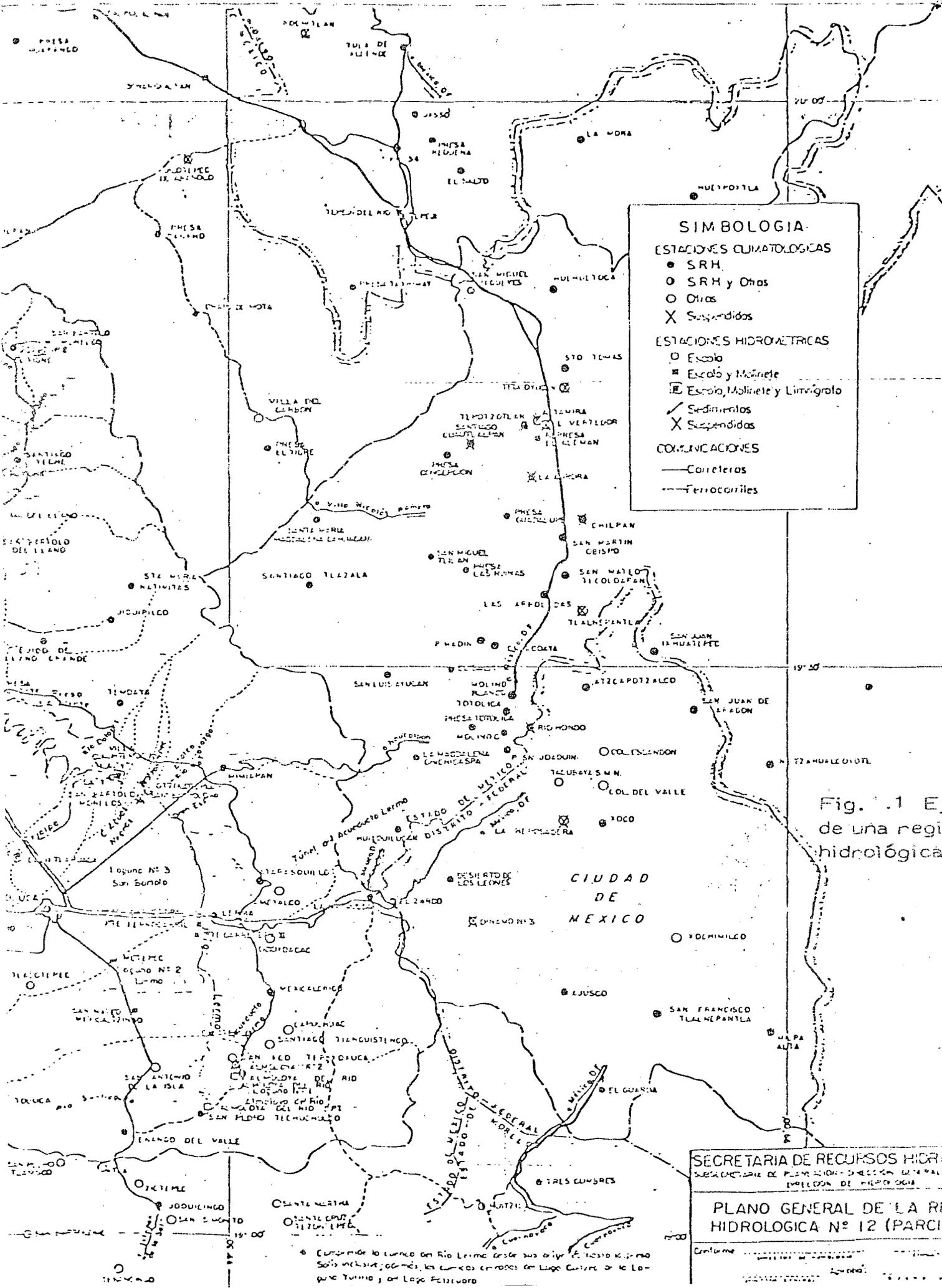
---

\* " Red hidrología, elementos básicos" Documentación de la CPNH, No. 3 --  
SARH

TABLA No. 1.2

NUMERO DE ESTACIONES CLIMATOLOGICAS E HIDROMETRICAS  
DE LA REPUBLICA MEXICANA EN 1970

JUM.	ESTADO	Número de Estaciones Climatológicas		Número de Estaciones Hidrométricas	
		Pluviómetros	Pluviógrafos	Escalas	Limnigrafos
1	Aguascalientes	28	1	11	2
2	B. California	55	8	9	4
3	B. Calif. Sur	56	8	2	1
4	Campeche	32	3	2	1
5	Coahuila	41	4	16	4
6	Colima	22	5	4	3
7	Chiapas	175	36	89	60
8	Chihuahua	140	7	29	14
9	Distrito F.	54	14	4	1
10	Durango	83	10	27	12
11	Guanajuato	84	8	25	2
12	Guerrero	112	23	42	20
13	Hidalgo	66	13	25	13
14	Jalisco	170	16	67	42
15	Estado México	173	25	82	28
16	Michoacán	132	14	68	30
17	Morelos	36	2	16	6
18	Nayarit	44	5	21	17
19	Nuevo León	67	11	26	3
20	Oaxaca	184	29	46	24
21	Puebla	132	10	73	35
22	Querétaro	23	2	8	2
23	Quintana Roo	27	3		1
24	San Luis Potosí	103	6	22	9
25	Sinaloa	98	11	39	8
26	Sonora	102	11	32	17
27	Tabasco	42	10	16	6
28	Tamaulipas	87	15	31	14
29	Tlaxcala	28	3	4	1
30	Veracruz	195	22	60	41
31	Yucatán	37	7	0	0
32	Zacatecas	54	3	16	7
Total de Estaciones		2 682	345	912	428



**SIMBOLOGIA**

**ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS**

- SRH
- SRH y Otros
- Otros
- X Suspendidos

**ESTACIONES HIDROMÉTRICAS**

- Escala
- Escala y Molinete
- ▤ Escala, Molinete y Limnógrafo
- ✓ Sedimentos
- X Suspendidos

**COMUNICACIONES**

- Carreteras
- - - Ferrocarriles

Fig. 1 E  
de una región  
hidrológica

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS  
SUBSECRETARÍA DE PLANEACIÓN - DIRECCIÓN GENERAL  
DE POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS

**PLANO GENERAL DE LA RED  
HIDROLÓGICA N° 12 (PARCELA)**

Conforme a: ...

Continuar la curva en Rio Lerma desde sus orillas hasta el punto  
sólo inclusive, además, los cursos en rios de Lago Cuicatlan de la Laguna  
Toluca y de Lago Patzcuaro

TABLA - No. 1.3

INFORMACION HIDROLOGICA EN LA REPUBLICA MEXICANA

PUBLICACION	ALCANCE	FRECUENCIA	DEPENDENCIA
Boletín Hidrológico del Valle de México	Datos Hidrométricos y Meteorológicos del Valle de México	Anual	Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, SARH
Boletín del Servicio	Observaciones pluviométricas y termométricas*	Mensual	Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional
Boletín Hidrométrico	Escurrimientos del río Colorado y otros ríos internacionales del Oeste	Anual	Comisión Internacional de Límites y Aguas, - SRE
Boletín Hidrométrico	Datos Hidrométricos y climatológicos del río Papaloapan	Anual	Comisión del Papaloapan, SARH
Boletín Hidrológico	Datos Hidrométricos*	Periódica	Comisión Federal de Electricidad
Boletín Meteorológico	Datos Meteorológicos*	Periódica	Comisión Federal de Electricidad
Boletín Hidrológico	Datos Hidrométricos**	Periódica	Dirección de Hidrología, SARH
Boletín Climatológico	Datos Climatológicos región Hidrológica - No. 12 - A ( parcial )	Información hasta Dic. de 1972	Dirección de Hidrología, SARH

\* Se refieren a sus estaciones en toda la República Mexicana

\*\* Abarca información por región Hidrológica. El país está dividido en 37 regiones Hidrológicas.

Fuente: Investigación realizada por Consultores, S.A.

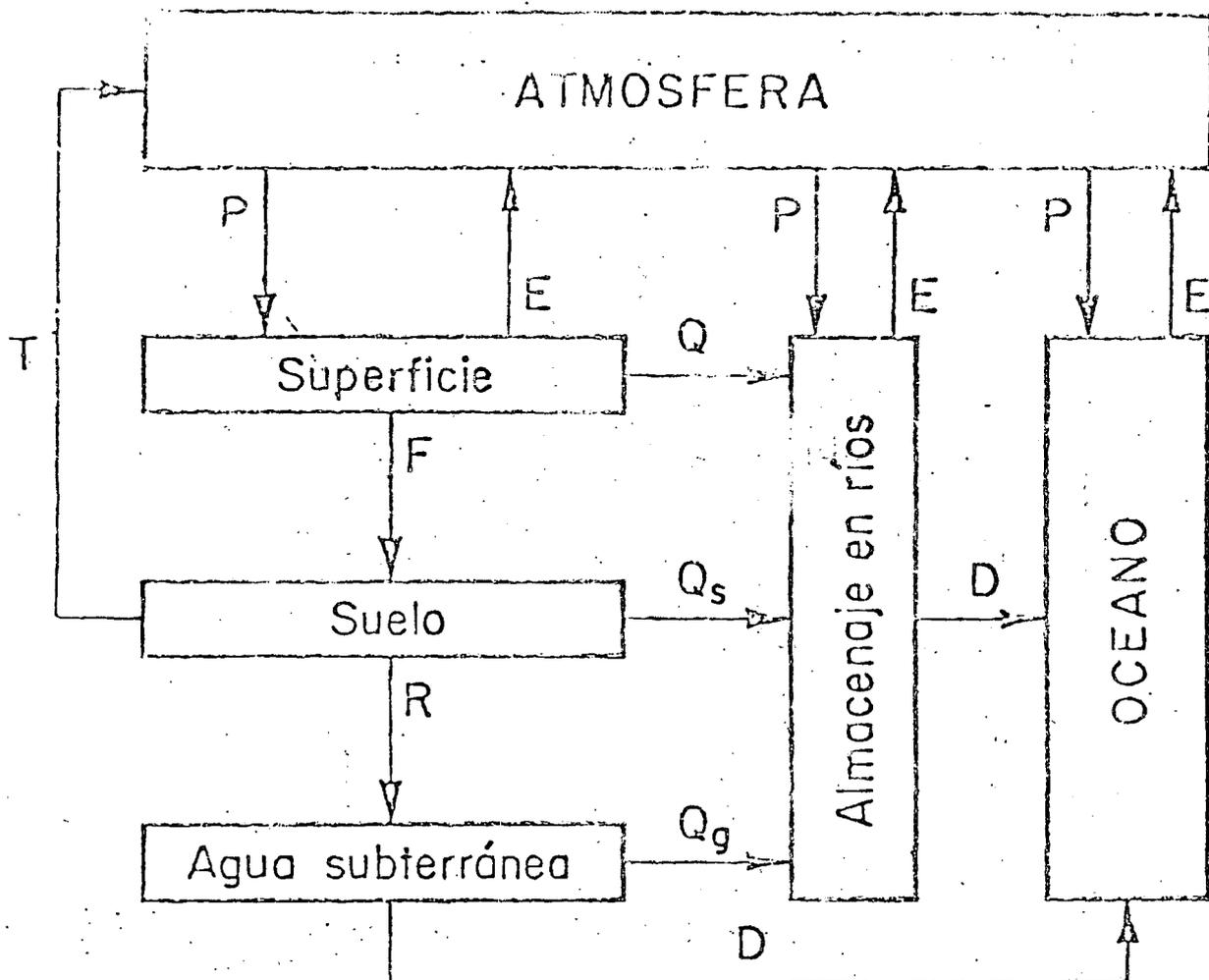
publicaciones en el país relacionadas con información hidrológica.

#### 1.5 Ciclo Hidrológico:

El ciclo Hidrológico es un proceso continuo por medio del cual el agua es transportada de los océanos a la atmósfera, a la tierra y regresa al mar.

Dentro de este ciclo existen diversos subciclos. Un ejemplo de esto es la -- evaporación del agua de la superficie terrestre y su subsecuente precipitación sobre ella antes de regresar al océano. La fuerza que controla la totalidad -- del sistema del transporte del agua proviene del sol, el cual provee la energía requerida para la evaporación. Cabe hacer notar que las cualidades del agua también cambian durante su paso a través del ciclo; el agua de mar se convier -- te en agua fresca por la evaporación. En la fig. 1.2 se muestra la represen -- tación cualitativa del ciclo hidrológico y en la fig. 1.3 las fases que estudia -- la hidrología.

Como puede observarse en la fig. 1.3, las componentes del ciclo hidrológico involucran las diversas fases a que esta sujeta una cuenca hidrológica. Esto es básico en el análisis de los procesos hidrológicos y en el desarrollo de -- modelos de simulación, los cuales tratan al ciclo hidrológico como un sistema cerrado y definen en forma continua los parámetros de entrada y salida a dicho sistema.



- |                               |                                      |                                   |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| E - Evaporación               | P - Precipitación                    | T - Transpiración                 |
| Q - Escurrimiento superficial | $Q_s$ - Escurrimiento subsuperficial | $Q_g$ - Escurrimiento subterráneo |
| F - Infiltración              | D - Descarga a los océanos           | R - Recarga                       |

Fig 1.2 Ciclo Hidrológico. Representación cualitativa

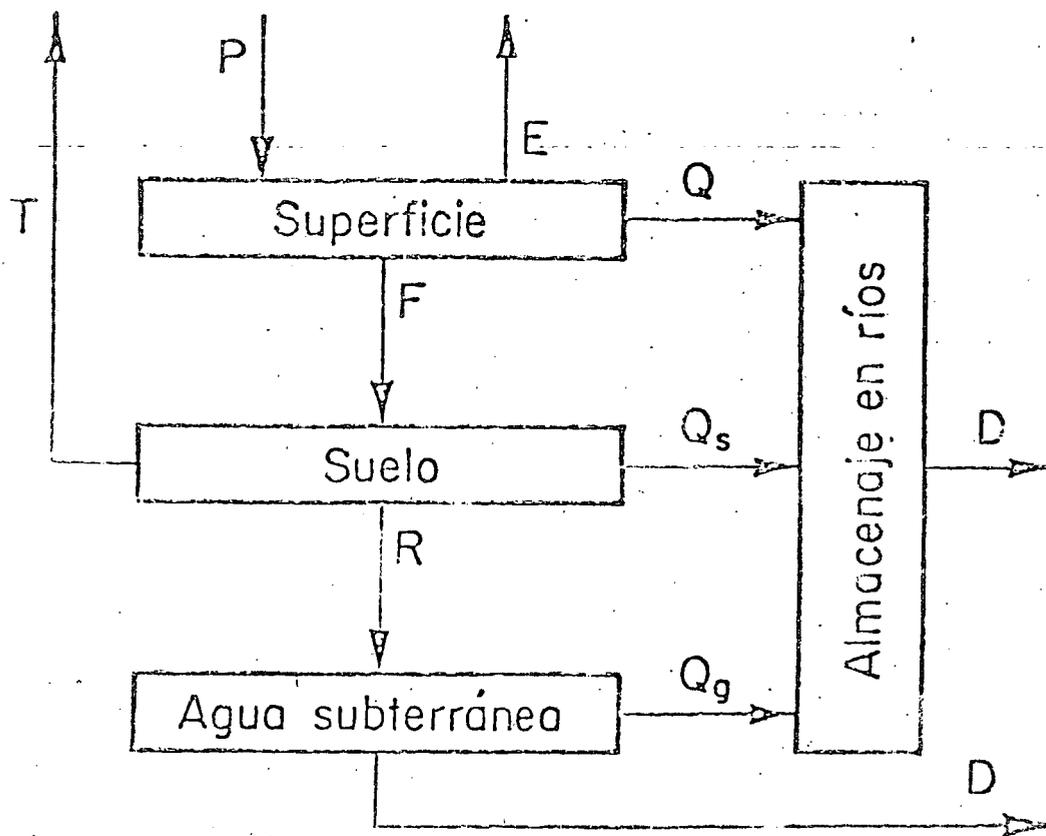
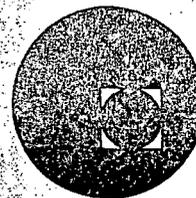


Fig. 1.3 Fases que estudia la Hidrología



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

TEMPERATURA, HUMEDAD ATMOSFERICA,  
PRECIPITACION

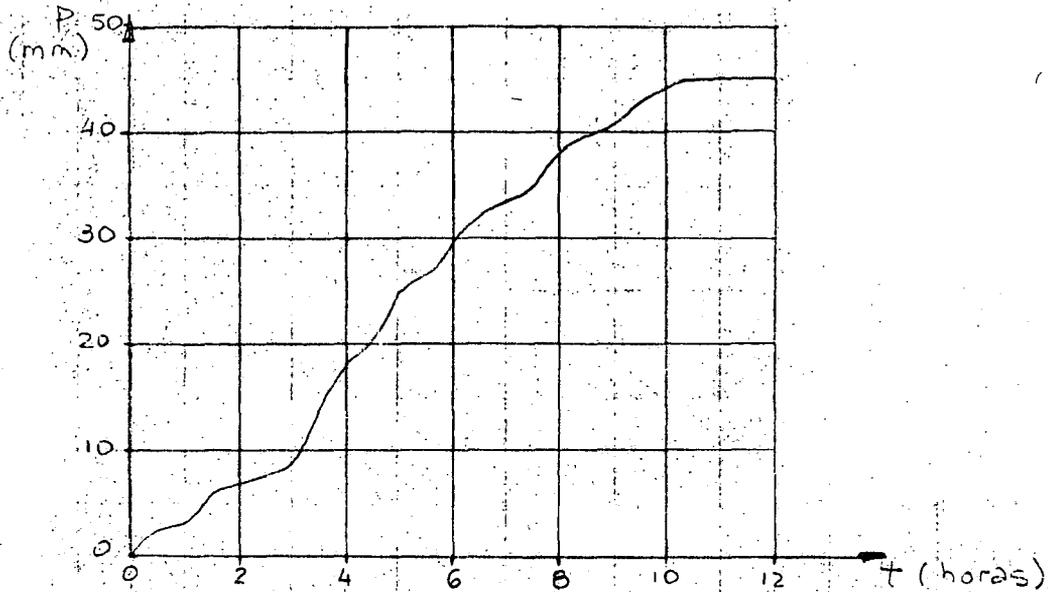
12  
ING. OMAR LUCERO  
SEPTIEMBRE DE 1978



## Curva de Masa

Se denomina curva de masa a una gráfica de la precipitación acumulada, caída durante una tormenta en función del tiempo.

Ejemplo:



La curva de masa de la lluvia de una tormenta propvee una información completa sobre las cantidades caídas, y la manera en que esa precipitación, registrada en un pluviógrafo, se distribuyó en el tiempo.

En muchas aplicaciones interesa conocer cuál fué la altura de lluvia caída, dentro de períodos fijos. La gráfica de la altura de precipitación correspondiente a cada período, se denomina hietograma.

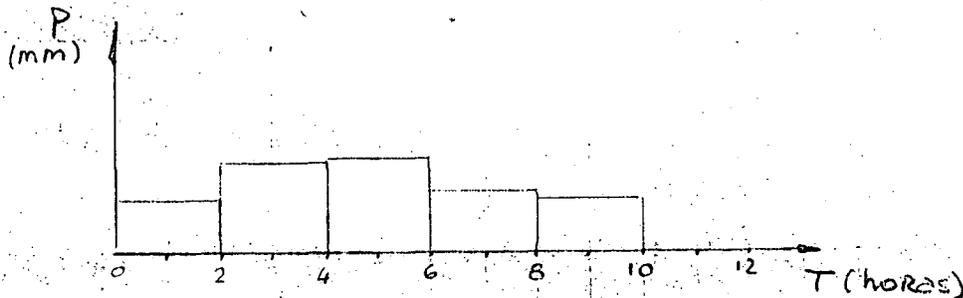
A continuación se da un ejemplo de cálculo de hietogramas para

diferentes intervalos de tiempo, para la tormenta correspondiente a la curva de masa indicada anteriormente.

Hora	P (mm) Acum.	$\Delta P$ (mm) para $\Delta t = 2 \text{ hrs}$	$\Delta P$ (mm) para $\Delta t = 4 \text{ hrs}$	$\Delta P$ (mm) para $\Delta t = 6 \text{ hrs}$	$\Delta P$ (mm) para $\Delta t = 12 \text{ hrs}$
0	0				
2	6.4	6.4			
4	17.8	11.4	17.8	30.0	
6	30.0	12.2	20.0		45.0
8	37.8	7.8			
10	45.0	7.2	7.2	15.0	
12	45.0	0.			

Obsérvese en la tabla de valores anterior, que al considerar los valores de la curva de masa, correspondientes a horas pares, se ha perdido parte de la información original. Sin embargo esa pérdida de información puede no tener importancia dependiendo de los objetivos que se persiguen.

En la tercera columna se muestran los valores de altura de lluvia caída durante el intervalo correspondiente, que para esta columna es de dos horas. En las columnas siguientes los valores de lluvia caída se refieren a intervalos de tiempo mayores. A medida que va aumentando el intervalo considerado, va disminuyendo el detalle de la variación de la lluvia en el tiempo. La siguiente gráfica corresponde al hietograma de  $\Delta t = 2$  horas.



### Precipitación Areal Media.

Las mediciones de precipitación efectuadas con un pluviómetro o pluviógrafo, se refieren estrictamente a una pequeña zona alrededor del instrumento. Para muchos fines se considera que la precipitación que ha caído sobre un pluviómetro es similar a la que ha caído sobre un área de 25 km<sup>2</sup>, que rodea al instrumento.

Sin embargo en muchos estudios, principalmente hidrológicos es necesario conocer el volumen de agua caída sobre una determinada zona du-

rante una tormenta. Como el volumen de agua precipitada depende del área de la zona, en general se prefiere trabajar con la altura de lluvia caída.

La precipitación es la variable meteorológica de comportamiento espacial más irregular. Bajo ciertas condiciones las alturas de lluvia caída pueden presentar grandes variaciones en pequeñas distancias.

Es necesario disponer de métodos que permitan calcular la precipitación real media. Los tres métodos más comunes son: El uso de promedios aritméticos, el uso de mapas isoyetales y el uso de polígonos Thiessen.

#### Promedio Aritmético:

En este método, la precipitación areal media se considera igual a la medida aritmética de los valores de altura de precipitación registrados en los pluviómetros de la zona, en un período especificado.

Es decir que si representamos por  $\bar{P}$  la precipitación areal media en una zona, se tiene

Donde  $P_i$  es la precipitación medida en el pluviómetro  $i$ , durante el período especificado, y  $n$  es el total de pluviómetros en la zona.

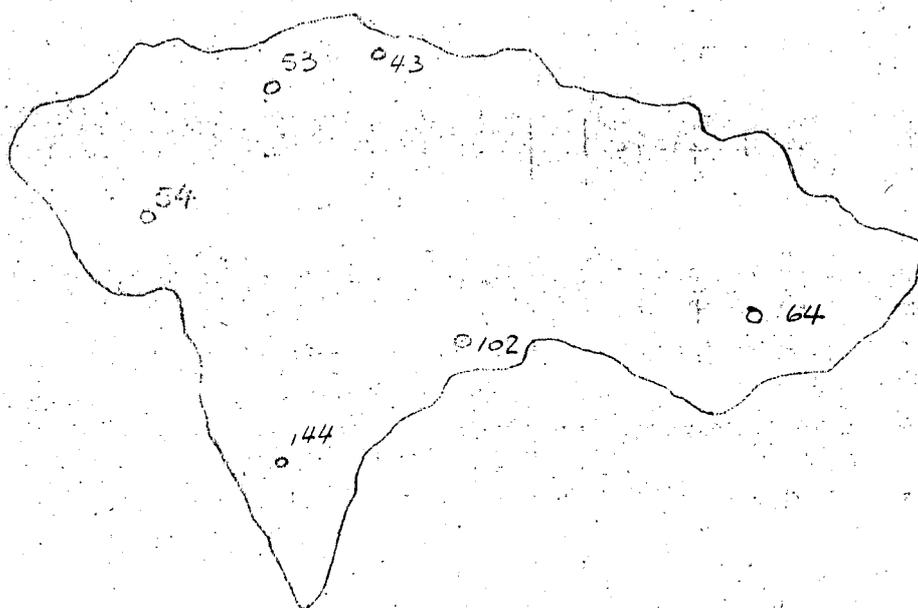
Este método es el más sencillo, pero también es el que puede proveer resultados menos fidedignos.

Para que el resultado sea aproximadamente correcto, es necesario

que la zona posea una buena densidad pluviométrica, y que el terreno sea llano. Otra ventaja del método es que no se requiere conocer la ubicación geográfica del instrumental, pero por esa misma razón si el instrumental no se encuentra distribuido de manera homogénea se pueden producir errores grandes en el valor de la  $\bar{P}$ .

Ejemplo:

El dibujo siguiente representa los límites de una cuenca, en la que han sido indicados los puntos geográficos en que se hallan ubicados una serie de pluviómetros. Los números indican los valores de precipitación total registrados durante una tormenta que duró 24 h. (tomado de: Hidrología, por R. Springall).



La precipitación areal media en esa cuenca fue:

$$\bar{P} = \frac{54 + 53 + 144 + 102 + 64 + 43}{6} = 76,7\text{mm}$$

### Método de Isoyetas.

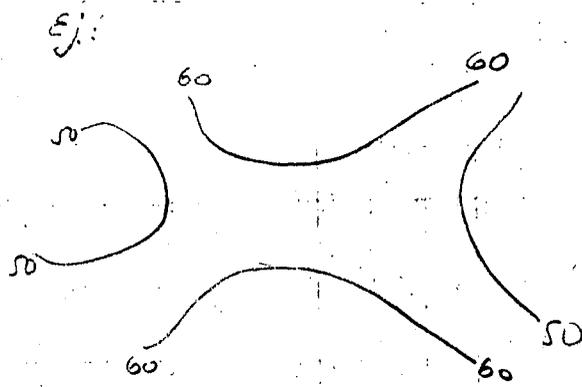
Las isoyetas son líneas que unen puntos en los que ha caído igual altura de precipitación.

Como sólo se conoce la precipitación caída en donde ésta ha sido medida, es evidente que siempre habrá un cierto grado de subjetividad en el trazado de las isoyetas.

Aunque desde hace bastante tiempo se han ido desarrollando programas de computadoras, para que sean las mismas computadoras las que trazan las isoyetas, la subjetividad sigue estando presente en la elección del criterio de trazado, aunque se logra uniformidad de criterio y rapidez. Debe tenerse presente que el trazado de mapas isoyetales es una tarea tediosa que demanda un cierto tiempo, cuando es realizada manualmente.

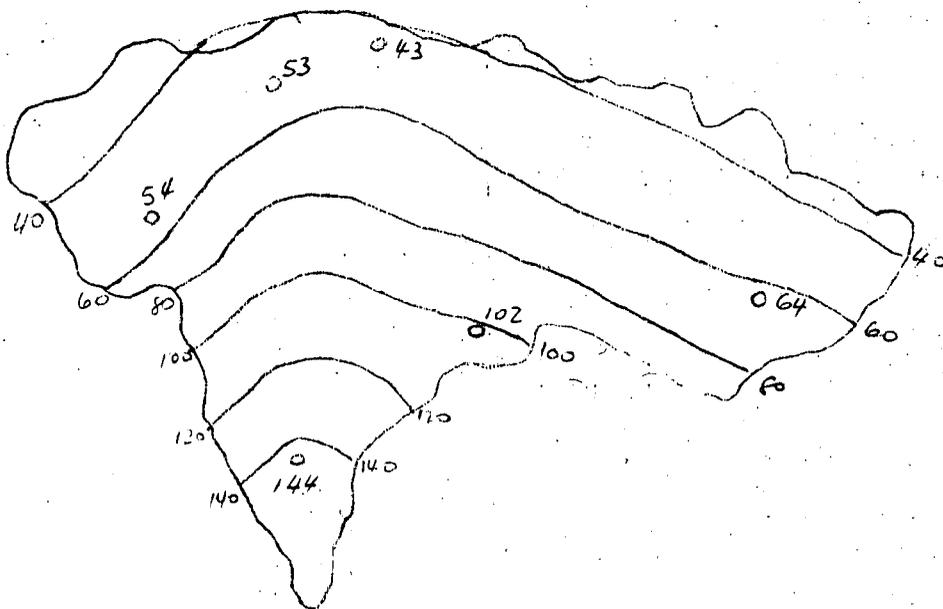
Es conveniente tener presente lo siguiente:

- 1) El trazado debe comenzar por los valores más altos
- 2) Es conveniente usar interpolación lineal
- 3) En la zona de collado los valores de isoyetas enfrentadas deben ser iguales:



- 4) Una vez finalizado el análisis, controlar que no omisión de valores isoyetales.
- 5) Es conveniente no trazar isoyetas de valor superior a la máxima altura de precipitación que indican los pluviómetros de la zona, puesto que en ese caso nada indicaría que se presentaron valores mayores.

Para el caso de la cuenca mencionada anteriormente, el mapa isoyetal es el siguiente:



Para hallar la precipitación areal media mediante el método de las isoyetas, se calcula el volumen total de agua caída y se divide este valor por el área de la zona. El volumen total de agua caída se calcula multiplicando el área comprendida entre dos isoyetas, por el valor medio de esas dos isoyetas.

Ejemplo:

Isoyetas	Altura media de precipitación (m m) $p_i$	Area entre isoyetas $A_i$	Volumen $p_i * A_i$
160-140	150	335	50250
140-120	130	397	51610
120-100	110	602	66220
100-80	90	1142	102780
80-60	70	1167	116690
60-40	50	2403	120150
40-35	37.5	799	29963
Suma		7345	537663

Por lo consiguiente se tiene:

$$\bar{P} = \frac{537\ 663}{7345} = 73.2 \text{ mm}$$

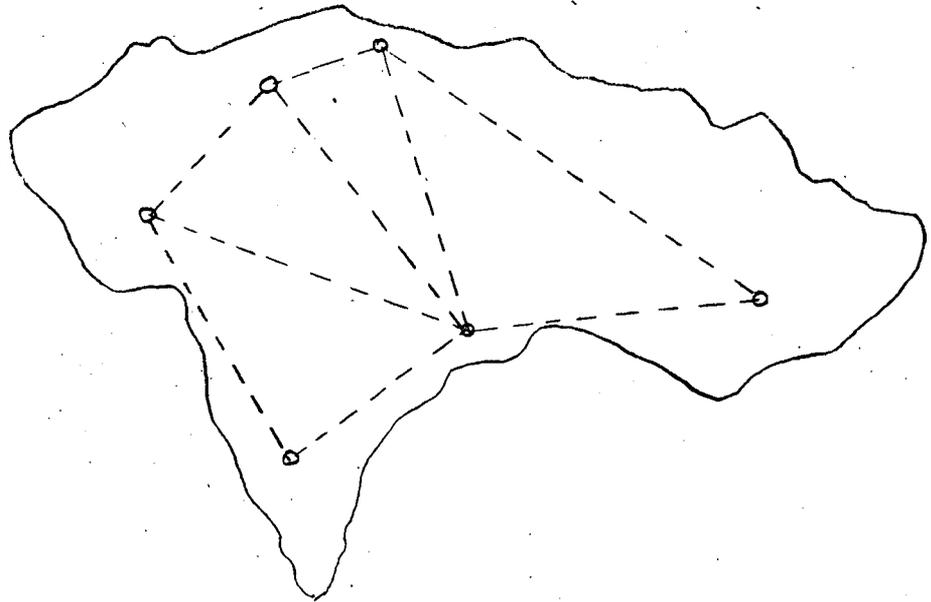
## Método de Poligonos de Thiessen

El método del promedio aritmético aunque muy rápido y simple, es el que mayor error puede producir; el método isoyetal produce resultados mejores pero demanda un tiempo excesivo para su ejecución.

El método de los poligonos de Thiessen, aunque menos preciso que el método isohietal, es adecuado para la mayoría de los propósitos, con la ventaja adicional de no requerir demasiado tiempo para los cálculos.

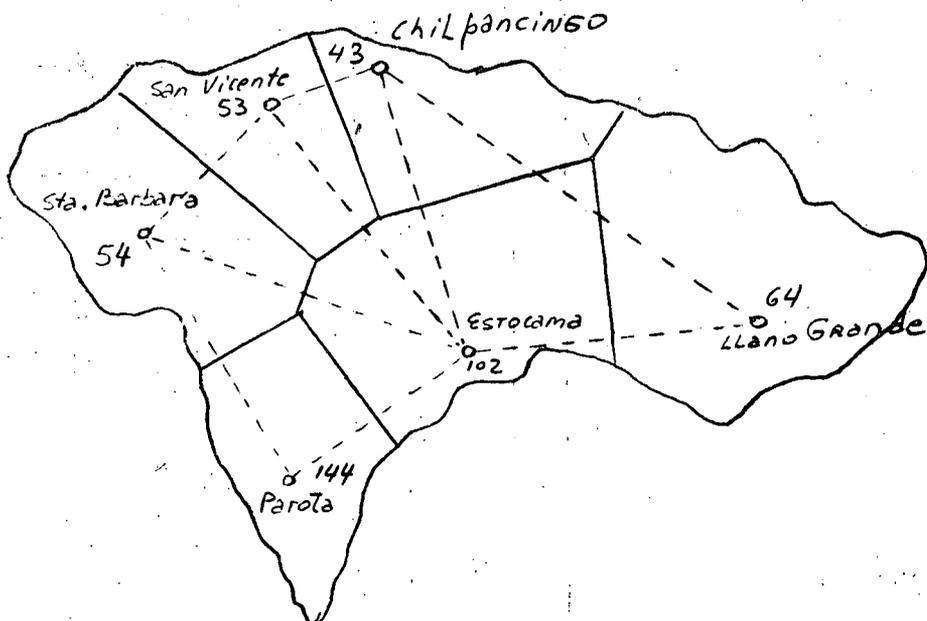
Este método se basa en la determinación de áreas poligonales, que se consideran las áreas representativas de cada uno de los pluviómetros de una zona. Se supone que dentro del área representativa de cada pluviómetro, la altura de precipitación es igual a la que se midió en el pluviómetro respectivo.

Para determinar los poligonos de Thiessen, primero se construyen triángulos auxiliares tales que unan a tres pluviómetros cercanos. Las localidades donde se hallan los puestos pluviométricos deben quedar en los vértices de cada triángulo. Estos triángulos auxiliares deben ser contiguos pero nunca superpuestos. En la siguiente figura se ve un ejemplo de trazado de triángulos auxiliares.



Una vez construidos los triángulos auxiliares, se trazan perpendiculares a cada uno de los tres lados del triángulo, de manera que pasen por el punto medio del respectivo lado para cada triángulo las tres perpendiculares bisectoras se unirán en un punto. Cada uno de esos puntos constituye un vértice de un polígono, y las perpendiculares bisectoras forman los lados de los polígonos.

Ejemplo:



Luego de determinar los polígonos que les corresponden a cada pluviómetro, se borran los triángulos auxiliares para mayor claridad del dibujo.

El área de cada polígono es determinada usando un planímetro. En el caso de la cuenca del dibujo anterior todos los polígonos lindan con el parteaguas, que constituye parte del límite de cada polígono. En muchos otros casos se presentan pluviómetros que tienen polígono de Thiessen sin tramos comunes al parteaguas de la cuenca.

Para calcular la precipitación media en una cuenca, se efectúa la suma de las precipitaciones  $p_i$ , medidas durante un intervalo especificado, en cada pluviómetro, afectando a cada valor de un coeficiente de peso igual al porcentaje del área total de la cuenca que representa el correspondiente polígono.

Es decir que si  $p_i$  y  $A_i$  representan la precipitación y el área del polígono de Thiessen de cada pluviómetro, y  $A_t$  es el área total de la cuenca, la precipitación areal media,  $\bar{P}$ , de la cuenca es:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n p_i \frac{A_i}{A_t}$$

donde  $n$  es el número total de pluviómetros.

Se muestra a continuación el cómputo de la precipitación areal media mediante el método de Thiessen

Estación	Precip (mm).	Area del Polígono Km <sup>2</sup>	Volumen (mm Km <sup>2</sup> )
Santa Bárbara	54	1244	67176
San Vicente	53	837	44361
Chilpancingo	43	995	42785
Llano Grande	64	1888	120832
Estocama	102	1494	152388
Parota	144	887	127728
		7345	555270

Por consiguiente es:

$$\bar{P} = \frac{555270}{7345} = 75.6 \text{ mm}$$

Relación entre la precipitación puntual, la precipitación areal.

Si bién la medición efectuada con un pluviómetro únicamente se refiere estrictamente hablando, a la lluvia caída sobre el mismo, las variaciones espaciales de la lluvia no son tan grandes como para que no se la pueda considerar representativa de la lluvia caída sobre un área dada circundante al pluviómetro.

El problema es determinar el tamaño de esa área alrededor del pluviómetro. En general se acepta que en una región de 25 km , en cuyo centro se halla el instrumento, la precipitación caída es igual a la que

se midió en ese pluviómetro.

Sin embargo, es de gran interés conocer cual es la relación existente entre la precipitación medida en un punto y la precipitación areal media, en una zona circundante. La razón de ello es que generalmente los pluviómetros tienen áreas representativas mayores de 25 km<sup>2</sup>, y por consiguiente es necesario conocer una relación que permita estimar la precipitación caída en el área representativa del pluviómetro, para superficies mayores que unos pocos kilómetros cuadrados.

La corrección a efectuar a la medición efectuada en un pluviómetro, es función del tamaño del área en cuestión, y de la duración de la tormenta. Esa corrección se determina experimentalmente mediante el análisis de un gran número de tormentas. La siguiente gráfica es una relación aceptada en los Estados Unidos de América.

## ESTRUCTURA OBSERVACIONAL

### La Red Pluviométrica

No existen pautas definidas y universales para el diseño de una red pluviométrica. La gran variabilidad que presenta la precipitación en el tiempo y en su distribución espacial es un factor que produce una gran complejidad en el problema de diseño de redes.

Debe destacarse que una red observacional está destinada a uno o más objetivos técnicos, y cada objetivo lleva implícito una escala meteorológica temporal y espacial.

Por esas razones cada caso debe ser analizado en particular, teniendo en cuenta no solamente objetivos técnicos y razones meteorológicas, sino que también ha de tenerse presente el factor logístico y el económico, factores estos últimos que son los que dan forma final a una red observacional.

Es una norma fundamental en la obtención de información hidrometeorológica en general, que es ineficiente y sumamente perturbador el hacer acopio de la información de una red observacional sin el simultáneo análisis de calidad. No respetar esta regla fundamental puede conducir, con mayor frecuencia de lo que se cree, a descubrir que una parte no despreciable de la información es de mala calidad. De esta manera no solamente se habrá perdido la oportunidad de disponer de importante información, sino que además se deberá emplear tiempo, personal y dinero para una depuración de datos que, en oportunidades, no puede proveer suficientes beneficios.

La densidad que debe tener una red pluviométrica está deter-

minada, a los fines hidrometeorológicos, por el error máximo tolerable con que se puede trabajar en un estudio determinado. Debe destacarse, sin embargo, que el error en la determinación de la precipitación caída en una cuenca hidrográfica también dependerá de las características de las lluvias sobre esa región.

La Organización Meteorológica Mundial (1970) señala que las estaciones de observación se pueden dividir en tres categorías: Estaciones principales, estaciones secundarias y estaciones especiales.

Las estaciones principales son aquellas que son instaladas para ser operadas indefinidamente y de manera continua. Proveen registros de larga extensión y buena calidad que permiten las caracterizaciones regionales de la precipitación.

Sin embargo, el mantenimiento de una extensa red pluviométrica puede ser oneroso. Por ese motivo se utiliza un segundo tipo de estaciones pluviométricas, denominadas estaciones secundarias, cuya función es explorar el grado de correlación existente entre la precipitación caída en ellas, con la precipitación caída en los pluviómetros de las estaciones principales. De esta manera, si existe una buena correlación entre las mediciones efectuadas en ambos tipos de estaciones, se podrá estimar la precipitación caída en otras zonas en base a la precipitación medida en las estaciones principales.

Una vez terminado el estudio de la relación entre la estación principal y la estación secundaria, esta última es trasladada a otra región. De esta manera se puede tener una estimación aceptable de la precipitación caída en una zona, en base a unas pocas estaciones principales.

Finalmente, las estaciones especiales son aquellas que proveen información únicamente para fines especiales, y generalmente son operadas por plazos cortos. Un ejemplo es la instalación de un evapotranspirómetro a fin de conocer el orden de magnitud de la evapotranspiración potencial, para lo cual se lo opera a lo largo de un año solamente.

La OMM recomienda una densidad mínima de puestos pluviométricos, según sean las características topográficas y climáticas de la zona considerada. Estas normas aparecen en la Tabla N° 1.

Cabe señalar que al diseñar una red pluviométrica es conveniente tener en cuenta el movimiento de las tormentas, como es puntualizado por Nicks (1965). Al respecto Hershfield (1968) señala que la dirección en que se distribuyen los pluviómetros es más importante que la densidad pluviométrica.

TABLA N° 1

DENSIDAD MINIMA DE PUESTOS PLUVIOMETRICOS

Tipo de Región	Rango de densidad para una red mínima Area en Km <sup>2</sup> por puesto	Rango de densidad provisional solo en condiciones muy difíciles. Area en km <sup>2</sup> por puesto
Regiones llanas de zonas tropicales, mediterráneas o templadas	600 - 900	900 - 3000
Regiones montañosas de zonas tropicales, templadas o mediterráneas. Islas montañosas pequeñas con precipitación muy irregular. Red hidrográfica muy densa.	100 - 250  25	250 - 1000
Zonas áridas y polares.	1500 - 10000	

Para el caso que no se pueda, por algún motivo, tomar en cuenta el movimiento de las tormentas es de interés señalar que una distribución uniforme del instrumental (por ejemplo, siguiendo la configuración de una cuadrícula) aparentemente provee una mejor estimación de la precipitación que una distribución aleatoria de los puestos pluviométricos (Linsley y Kohler (1951), Huff y Neil (1957), Sharp, Owen y Gibbs (1961)).

En el caso de una red de estaciones principales, generalmente son las redes pluviométricas nacionales que como información de especial importancia proveen valores areales medios de lluvia para grandes intervalos de tiempo, son interesantes las conclusiones arribadas por Rodríguez y Mejía (1973). Estos autores señalan que por más que se intensifique la densidad de la red pluviométrica para obtener el valor areal medio a largo plazo de la lluvia con un preestablecido nivel de precisión, es inevitable que durante suficiente tiempo la red esté operando. Además señalan lo costoso que resulta pretender disminuir el intervalo temporal necesario, por medio de una mayor densidad instrumental.

Las redes nacionales deben estar destinadas a obtener información de muy buena calidad pero de carácter general.

La información pluviométrica con gran detalle espacial no debe ser provista por las redes nacionales.

Hasta el presente nadie sabe como determinar la densidad pluviométrica óptima para un estudio hidrológico de una cuenca, en la que no se dispone de información previa. Sin embargo en la práctica se pueden seguir las siguientes pautas para la planificación de una red pluviométrica:

En primer lugar se debe conocer cual es el monto máximo de dinero que se dispondrá. Debe tenerse presente que el costo de la red involucra la adquisición del instrumental, su instalación, mantenimiento, inspecciones periódicas y pago a los observadores y a los auxiliares técnicos que controlarán la tarea de los observadores

La obtención de cartografía de la zona es imprescindible. Con los mapas a la vista se podrá tener una primera idea de las características del terreno, existencia de caminos y de potenciales lugares de instalación.

Si se dispone de dinero suficiente como para efectuar una implementación instrumental masiva, se sigue el criterio de instalar el mayor número posible de instrumental. Una vez que se obtenga un registro que incluya la época de tormentas convectivas aisladas, se podrá efectuar un análisis de correlaciones. Este análisis permitirá conocer los puestos pluviométricos redundantes a los fines hidrológicos, y por lo tanto susceptible de ser levantados.

En el caso más común, de un presupuesto limitado, conviene distribuir los pluviómetros de manera lo más homogénea posible en la cuenca. Debe señalarse aquí un aspecto práctico muy importante en el diseño de la red pluviométrica. Si la capacidad y disposición de los observadores disponibles, en zonas alejadas la disponibilidad de los mismos puede ser casi nula, es sospechosa conviene disminuir el peso relativo de las mediciones de esos instrumentos. Para ello se procurará aumentar la densidad en zonas de observadores de pobre capacidad de asimilación del entrenamiento. Recuérdese que un observador deficiente a cargo de un pluviómetro que tiene un área representativa relativamente muy grande, puede producir

un verdadero desastre en el cálculo de la precipitación media de la cuenca.

En casos como este no se debe vacilar en incrementar significativamente el monto pagado al observador.

Si la cuenca es llana, la distribución homogénea del instrumental es de esperar. Si por el contrario, existe orografía, se debe colocar instrumental también en la zona alta de la cuenca. En este último caso, es conveniente tener presente que la precipitación caída en la parte alta de la cuenca puede ser significativamente mayor que en el valle, por consiguiente aún los pluviómetros de la alta cuenca que posean un polígono de Thiessen relativamente pequeño, pueden tener una importancia relativa no despreciable en el cálculo de la precipitación media caída en la cuenca.

Una vez efectuado un primer análisis de la cantidad de los puestos pluviométricos instalados y del número y lugar de puestos a instalar, se debe proceder a visitar la zona.

La inspección a la zona bajo estudio es imprescindible. Se obtendrá de esta manera una evaluación exacta del estado de conservación del instrumental ya existente, y una estimación subjetiva del grado de interés que muestran los observadores. El recorrido del terreno permitirá determinar la posibilidad de la instalación, operación y mantenimiento del instrumental de la red proyectada.

Con no poca frecuencia se encontrará que los caminos no permiten un acceso razonablemente adecuado, o que no existen pobladores en las cercanías que pueden encargarse de las tareas de observación. En esos casos se buscarán nuevas alternativas para la ubicación de los puestos pluviométricos.

Una vez completada la implementación comienza el período de

control de la información . Este control persigue dos objetivos: Detectar mal funcionamiento de los aparatos registradores o errores y descuidos por parte del observador.

Finalmente se debe cuidar que el archivo de la información sea efectuado de manera que asegure un rápido acceso y conservación adecuada de los registros. Neff (1965), en un trabajo sobre los principios del diseño de redes pluviométricas, señala que no solamente se debe tener presente la implementación de la red, sino que también el tabulado y análisis de la información es de gran importancia por los fondos que demandarán.

Al implementar una red pluviométrica, o hidrometeorológica, debe tenerse presente en la programación de trabajo, la formación del grupo de analistas de datos que controlarán la calidad de la masa de información obtenida.

Si es necesario implementar una red pluviométrica para una cuenca, y no se dispone simultáneamente de los fondos o el personal suficiente para analizar la información, debe darse especial importancia a las tareas de inspección de la red.

También es necesario tener presente que no siempre las tareas de gabinete permiten detectar errores, no muy exagerados , producidos por un funcionamiento inadecuado del instrumento o por un mal entrenamiento del observador. Esto es especialmente cierto cuando no ha habido un control de calidad simultáneo con la obtención de la información.

A fin de mantener una buena calidad de información son importantes las inspecciones periódicas de los puestos pluviométricos. Esas inspecciones permitirán detectar inconvenientes en el instrumental , y además tendrán el saludable efecto de mostrarle

al observar que su trabajo es seguido con la atención que corresponde, evitándose de esta manera que pueda llegar a creer que nadie utilizará los datos.

El observador es la base de la red observacional. Si él falla, - serán inútiles la mejor programación, el mejor diseño de red y el costoso equipo instrumental.

Es conveniente considerar a una red pluviométrica como un sistema de obtención de datos factibles de ser modificado. De acuerdo al Informe No. 12 de la OMM (1969) al implementar una cuenca resulta apropiado efectuar en una primera etapa una implementación masiva de instrumental, de ser posible económicamente. En un periodo de dos años, que en casos de urgencia se puede reducir a un año, se tendrá la información suficiente como para discernir aquellos puestos pluviométricos lo suficientemente correlacionados con otros, como para que no se justifique su ulterior mantenimiento. Este instrumental innecesario puede ser entonces destinado a otra cuenca.

Finalmente cabe señalar que es una construmbre generalizada e incorrecta el pedir al especialista una "buena" información pluviométrica, sin especificar previamente que se entiende por "buena", es decir sin señalar el error máximo que permite el objetivo buscado y el dinero disponible.

## Información de una Red Pluviométrica

La inspección de la red pluviométrica de una cuenca debe ocupar un lugar preponderante en aquellos estudios en que sea necesario el conocimiento de la información pluviométrica.

A pesar de la importancia que tienen esas inspecciones, con frecuencia son realizadas sin método. En una cuenca con un buen número de puestos pluviométricos esta carencia de metodología de trabajo puede disminuir en forma apreciable la utilidad de la inspección realizada.

Normalmente se debe considerar que una inspección es realizada para satisfacer los siguientes objetivos.

- 1°) Establecer el funcionamiento y calidad de los puestos pluviométricos de interés para el estudio en cuestión.
- 2°) Determinar zonas aptas para el establecimiento de instrumental, en caso de ser necesario nuevos puestos pluviométricos.
- 3°) Efectuar una evaluación general sobre las necesidades de renovación de instrumental.
- 4°) Tratar de establecer el interés manifestado por los observadores.

Con los objetivos arriba mencionados presentes, se seleccionan los puestos pluviométricos a inspeccionar. Es imprescindible el trazado de un recorrido tentativo de la inspección, de esta manera se evitarán muchos kilómetros de innecesarias idas y venidas.

A fin de que tanto las instalaciones de los pluviómetros como los instrumentos en sí, sean calificados de manera homogénea a través de la duración del viaje, es conveniente establecer dos tablas de calificación para las instalaciones y para los instrumentos respectivamente, y referir las calificaciones estrictamente a estas tablas.

<u>Tabla de calificación del Instrumento</u>	
M	Presencia de cualquier tipo de perforación que afecte la medición de manera significativa.
R-	Presencia de obstrucciones y perforaciones que no afecten significativamente las mediciones.
R+	Pluviómetro viejo sin perforaciones, muy abollado, difícil de encajar la boca colectora o pintado de negro.
B	Pluviómetro razonablemente bien conservado, sin pintura negra.
MB	Pluviómetro nuevo.

<u>Tabla de calificación de la Instalación</u>	
M	Instalado en un lugar que invalida las mediciones.
R	No cumple las especificaciones establecidas por la OMM, pero puede dar razonables resultados.
B	Cumple las especificaciones de la OMM y no está muy lejos de la casa del observador.

La tabla de calificación de la Instalación se presenta en 3 categorías, que se considera un número suficiente para la evaluación de las instalaciones de los puestos pluviométricos de una red. Para la calificación del instrumento se han adoptado 5 categorías, como se puede ver en la tabla respectiva. El mayor detalle en la calificación del estado del instrumento se debe a las necesidades de evaluación de los datos para depuración, y a una mejor estimación de las necesidades de renovación de pluviómetros que la red bajo estudio pudiese demandar.

A los fines de evaluación de la calidad de los datos pluviométricos se puede establecer la siguiente correspondencia aproximada:

CALIFICACION DEL PLUVIOMETRO	IMPLICANCIA EN TERMINOS DE CALIDAD DE INFORMACION
Muy Bueno	Provee datos aceptables para cualquier finalidad
Regular +	Causa inconvenientes si el observador no es cuidadoso y dedicado.
Regular -	Provee datos que no son fidedignos.
Malos	Dato descartable por pésima calidad.

Debe tenerse presente que solo los datos de los pluviómetros calificados como Buenos y Muy Buenos, son utilizables sin reservas para cualquier finalidad. Los pluviómetros calificados como Regular + son aceptables si el campo pluviométrico es analizado teniendo además datos provenientes de pluviómetros Buenos. Sin embargo los pluviómetros Regular + ya han pasado su vida útil y por lo tanto se debe proceder a su remplazo.

Los pluviómetros calificados como Regular -, presentan inconvenientes tales que, en presencia de una red observacional razonable, se aconsejará la no consideración de los datos provistos por ellos. Sin embargo, necesidades conyunturales hacen que esos registros deban, a veces, incluirse en los análisis a pesar de la baja calidad, en aquellos casos en que el descarte de los mismos reduzca considerablemente la densidad de la red. Los pluviómetros pertenecientes a la categoría Malos no pueden usarse.

#### El Observador

Frecuentemente para disminuir los inconvenientes que puede presentar un ocasional mal funcionamiento del pluviógrafo, se instala junto a este un pluviómetro.

Obviamente la función del pluviómetro es proveer el total diario de lluvia caída cuando el pluviógrafo no funciona o lo hace defectuosamente. Sin embargo una atención descuidada por parte del observador puede invalidar las mediciones efectuadas en el pluviómetro.

Es muy conveniente la calificación de la calidad de la medición que efectúa el observador. Con esta finalidad a medida que se va efectuando la recopilación de la información de ambos tipos de instrumentos, pluviómetro y pluviógrafo, se observan las veces que existen diferencias significativas entre ambas mediciones.

Cabe definir ahora cuando la diferencia entre las mediciones es significativa. Aproximadamente una diferencia del 15% entre ambos valores de precipitación diaria puede implicar una falla en el mecanismo del pluviógrafo, o una medición descuidada del

pluviómetro.

En general es muy poco probable que un observador que no haya efectuado las correspondientes mediciones pluviométricas incluya datos apócrifos mediante la lectura de la faja pluviométrica.

Cuando existen problemas con la calidad de las observaciones estos pueden ser permanentes o transitorios. El caso "permanente" se debe a que el observador ha perdido el interés en efectuar las mediciones, por consiguiente solo resta cambiar de persona para esas tareas, si es posible.

De no ser posible cambiar de observador, por ejemplo por estar el instrumental en su domicilio, y no haber posibilidad de corregir su actitud, es decididamente preferible que el pluviógrafo sea atendido por el personal de la institución que mantiene la red observacional. En caso de que así fuese decidido, puede suceder que un pluviógrafo semanal sea incómodo de atender. La solución consistiría entonces en reemplazar el instrumento por uno de atención mensual; sin embargo se pierde el control que provee el instrumento.

Si el observador tiene una actitud permanentemente descuidada hacia el instrumental, y no es posible que el pluviógrafo sea atendido por personal de la institución, conviene tomar la drástica medida de cambiar de ubicación el puesto pluviométrico.

La insistencia en querer tener un registro pluviográfico, o pluviométrico, homogéneo (en el sentido de que los instrumentos no fueron cambiados de lugar) a lo único que conduce en casos de mala atención, es a obtener datos de pésima calidad que no tienen uti

lidad. Esto no solo implica que valioso instrumental es desaprovechado, sino que posiblemente queden zonas de una cuenca sin la correspondiente información.

Si el puesto pluviométrico solo tiene pluviómetro, ante una actitud de desinterés de parte del observador solo cabe cambiar la localización del instrumento.

Cuando existen problemas en la calidad de la información debido al observador, que se presenten de manera "transitoria", se debe tratar de determinar la posible causa.

Una frecuente causa de inconvenientes es la mala costumbre de algunos observadores de no efectuar las mediciones diariamente. A consecuencia de ello los valores de precipitación aparecen acumulados. Se originan de esta manera dos problemas: por una parte está el inconveniente de no tener los valores desglosados en forma diaria, y por otra parte los totales acumulados de dos o más días de precipitación en general son erróneos, debido a la evaporización del agua en el jarro colector. Si el pluviómetro es de chapa galvanizada sin pintura blanca, y la humedad relativa ambiente baja, la evaporación que se produce puede desfigurar totalmente la medición.

Respecto a este último problema, cuando el observador no corrige su actitud la solución más conveniente y barata consiste en mantener bien pintado de blanco la pared exterior del pluviómetro.

De esta manera se obtendrá una buena disminución de la cantidad de agua evaporada.

Como comentario final sobre el tema del observador cabe citar las palabras de Neff (1965): "un instrumento no puede ser mejor que la persona que leerá las mediciones".

## ESTRUCTURA ANALITICA

### Coefficiente de correlación lineal

Supongamos la existencia de dos pluviómetros, denominados con letras mayúsculas X e Y, tales que los valores de precipitación, denominados con letras minúsculas x e y respectivamente, en ellos medidos mantengan una relación perfectamente lineal. Es decir que se cumple la siguiente ecuación:

$$y = ax + b$$

donde a y b son dos constantes. En este caso hipotético los valores de precipitación de ambos pluviómetros quedan mutuamente determinados. Solamente serían necesarias dos observaciones simultáneas para determinar los coeficientes a y b.

Una vez determinada la recta simplemente se procedería a levantar uno de los puestos pluviométricos, por ser ya innecesario.

Es evidente que en la relación no se encuentran este tipo de relaciones funcionales perfectas.

Sin embargo frecuentemente se observa que si se grafican los valores de precipitación de dos puestos pluviométricos, con los ejes coordenados ortogonales correspondiendo a cada uno de los pluviómetros, los puntos que se obtienen se agrupan de manera de configurar, en forma más o menos nítida, una franja de aspecto lineal. Es decir que los puntos se distribuyen con mayor o menor dispersión en las proximidades de una recta.

El grado de dispersión, con respecto a una línea recta, de los puntos del plano (X, Y) se cuantifica mediante el uso del coeficiente de correlación lineal , que es definido por:

$$r = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

donde  $\sigma_x, \sigma_y$  son las desviaciones típicas de las variables pluriométricas  $X$  e  $Y$ ,  $\mu_{xy}$  es la covarianza respectiva. Estos tres números son estimados para una muestra de tamaño  $n$ , de la siguiente manera:

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - m_x^2 \quad ; \quad s_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - m_y^2$$

$$m_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - m_x m_y$$

donde  $s_x, s_y$  y  $m_{xy}$  son las desviaciones típicas y la covarianza muestrales, respectivamente.

El coeficiente de correlación tiene la propiedad de que su valor absoluto puede tomar valores entre 0 y 1, es decir

$$-1 \leq \rho \leq 1$$

Cuando el valor absoluto del coeficiente de correlación es igual a 1 la relación es funcional lineal, es decir que los valores conjuntos de  $X$  e  $Y$  definen una recta.

A medida que va disminuyendo el valor absoluto de  $r$ , va aumentando la dispersión de los puntos alrededor de una línea recta, hasta que al tomar el valor cero se dice que las dos variables no están correlacionadas.

Sin embargo podría suceder que dos variables no estuviesen correlacionadas y que el coeficiente de correlación lineal calculado de una muestra determinada, no fuese cero.

Esto se debe a que el coeficiente de correlación lineal de una muestra también es una variable muestral, y que por lo tanto tendrá una función de distribución. Se puede preguntar entonces cuál es la probabilidad de obtener un valor del coeficiente de correlación li

neal, que esté dentro de cierto intervalo, en el caso de que las variables fuesen no correlacionadas. Este importante tema será tratado más adelante.

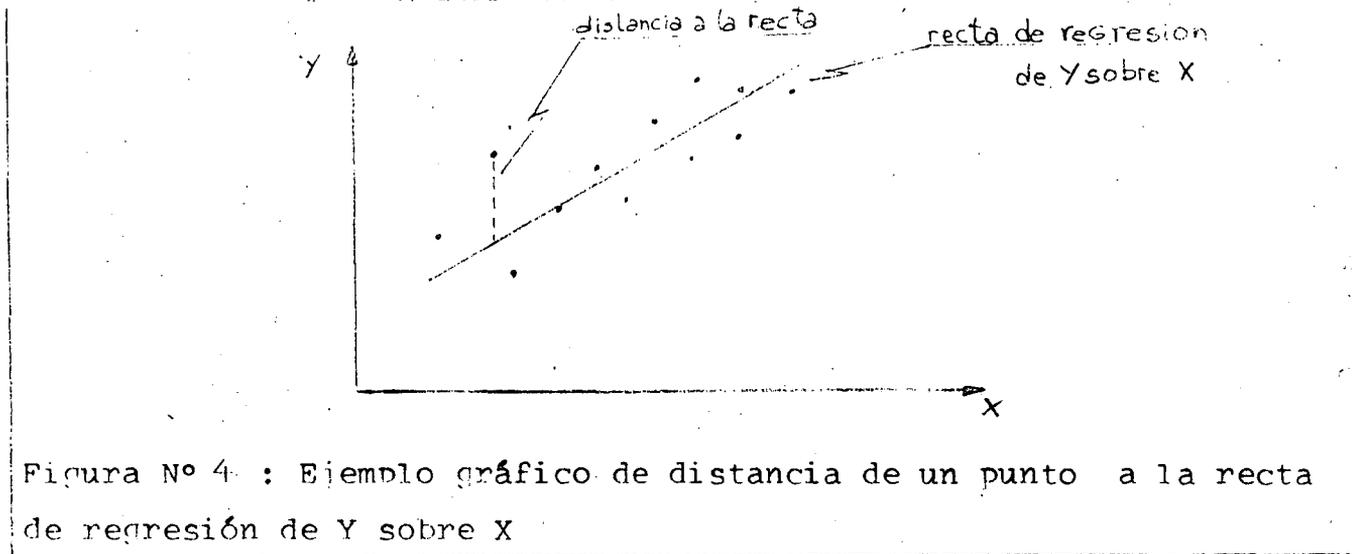
#### 4.2 Rectas de regresión

El conjunto de los valores de precipitación observados simultáneamente en dos puestos pluviométricos, define una serie de puntos en un plano. Es evidente que es de gran utilidad obtener una línea recta que se ajuste de la mejor manera posible a ese conjunto de puntos. Esta línea recta se denomina "recta de regresión".

Supongamos que los valores posibles de obtener con un pluviómetro denominado X se indican sobre el eje de las abscisas de un sistema cartesiano ortogonal, mientras que los valores posibles de un pluviómetro denominado Y se indican sobre el eje de las ordenadas. Los dos valores, observados simultáneamente, del par de pluviómetros definen un punto  $(x,y)$  en el plano. Una recta de regresión que se ajuste al conjunto de puntos  $(x,y)$ , pasará por muy pocos puntos o, tal vez, por ninguno de ellos. Supongamos además que se desea obtener una recta de regresión que permita determinar Y en función de X, en este caso se dice que la recta de regresión es de Y sobre X. Si por el contrario, se desea que la recta esté dada como X en función de Y se dice que la recta de regresión es de X sobre Y.

Cuando la recta de regresión no pasa por un punto cualquiera, este punto se encuentra a una cierta distancia de ella, es decir se comete un error si se adopta el valor que provee la recta. Esta distancia, o error, se debe calcular midiéndola en una dirección paralela al eje Y (si la recta es de regresión de Y sobre X), puesto que el interés

radica en la diferencia entre el valor observado y el valor previsto para la variable.



Para determinar la recta de regresión de Y sobre X, se requiere que ella haga mínima la media de los cuadrados de las distancias desde los puntos  $(x,y)$ , calculadas en una dirección paralela al eje Y. Es decir que si la recta buscada es:

$$y = \alpha x + \beta$$

Se busca que los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  tengan valores tales que se cumpla:

$$E \left\{ (y - \alpha x - \beta)^2 \right\} = \text{mínima}$$

donde E significa esperanza estadística o media.

Por consiguiente los valores buscados de  $\alpha$  y  $\beta$  se determinan resolviendo el sistema:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} E \left\{ (y - \alpha x - \beta)^2 \right\} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} E \left\{ (y - \alpha x - \beta)^2 \right\} = 0$$

y se obtiene:

$$\alpha = \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x}, \quad \beta = \bar{y} - \alpha \bar{x}, \quad \text{con } \bar{y} = E(y) \text{ y } \bar{x} = E(x)$$

Reemplazando por las expresiones de  $\alpha$  y  $\beta$  se obtiene la ecuación de la recta de regresión de Y sobre X.

$$y = \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} x + \left( \bar{y} - \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x} \right)$$

De esta última ecuación es evidente que cuanto menor es el coeficiente de correlación entre las dos variables, más horizontal es la recta de regresión de Y sobre X.

Es conveniente señalar que la recta de regresión de Y sobre X es válida únicamente para estimar los valores de la variable Y a partir de los valores observados en la variable X.

Aplicado al problema de tratamiento de la información pluviométrica, lo señalado anteriormente implica que si se ha obtenido la recta de regresión del pluviómetro Y sobre el pluviómetro X se la podrá utilizar para llenar vacíos de información en el pluviómetro Y, supuesto que existen los datos contemporáneos del pluviómetro X. Pero si se presentase el caso de que el registro del pluviómetro X careciese de datos durante un cierto período y se quisiese completarlos en base a las mediciones contemporáneas del puesto Y, no se podría utilizar la misma recta de regresión.

Para este último caso sería necesario emplear la recta de regresión de X sobre Y, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$x = \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y} y + \left( \bar{x} - \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \bar{y} \right)$$

Componente aleatoria supuesta a una relación lineal.

Con la finalidad de analizar con más detenimiento el significado del coeficiente de correlación lineal  $\rho$ , se estudiará a continuación que sucede cuando a una relación lineal perfecta entre las variables aleatorias X e Y, se le suma una componente aleatoria.

Por hipótesis se tiene que entre las mediciones efectuadas en los pluviómetros X e Y, se cumple la siguiente relación:

$$y = ax + b$$

Por consiguiente la relación entre las varianzas es:

$$\sigma_y^2 = a^2 \sigma_x^2$$

y también se cumple:

$$b = \bar{y} - \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x}$$

Se introduce ahora una componente aleatoria R, que no está correlacionada con x, y que tiene un valor medio  $\bar{R}$  igual a cero y una varianza igual a  $\sigma_R^2$ . Es decir que los valores de Y vienen dados por:

$$y = ax + b + R$$

La varianza de la nueva serie del pluviómetro Y es:

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= a^2 \sigma_x^2 + \sigma_R^2 \\ &= \sigma_y^2 + \sigma_R^2 \end{aligned}$$

Se determina a continuación el nuevo valor del coeficiente de correlación (que antes de agregar la componente aleatoria no correlacionada era igual a 1), que se define por:

$$\rho_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

La covarianza  $\mu_{xy}$  se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \mu_{xy} &= \frac{1}{n} \sum x_i (a x_i + b + R_i) - \bar{x} \bar{y} \\ &= \frac{1}{n} \sum a x_i^2 + x_i b + x_i R_i - \bar{x} (a \bar{x} + b) \\ &= a \left[ \frac{1}{n} \sum x_i^2 - \bar{x}^2 \right] + \frac{1}{n} \sum x_i R_i \end{aligned}$$

Pero se cumple:

$$\frac{1}{n} \sum x_i^2 - \bar{x}^2 = \sigma_x^2$$

sustituyendo en la expresión de  $\mu_{xy}$  se obtiene finalmente

$$\mu_{xy} = a \sigma_x^2 + \frac{1}{n} \sum x_i R_i$$

El segundo término del miembro de la derecha es nulo porque tienen validez las siguientes equivalencias:

$$\frac{1}{n} \sum x_i R_i = \mu_{xR} + \bar{x} \bar{R} = \rho_{xR} \sigma_x \sigma_R + \bar{x} \bar{R}$$

pero  $\rho_{xR} = 0$ , además por hipótesis es  $\bar{R} = 0$ , y finalmente se obtiene

$$\frac{1}{n} \sum x_i R_i = 0$$

Entonces se puede expresar el coeficiente de correlación como sigue:

$$\rho_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{a \sigma_x^2}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \operatorname{sg}(a)$$

donde  $\text{sg}(a) = \text{signo de la constante } a$ , entonces:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_y \text{sg}(a)}{\sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_R^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_y}\right)^2}} \quad (10)$$

De esta última expresión se deduce

$$\rho_{xy}^2 = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_y^2 + \sigma_R^2}$$

A su vez se obtiene:

$$\sigma_R^2 = \left( \frac{1 - \rho_{xy}^2}{\rho_{xy}^2} \right) \sigma_y^2$$

pero como es:

$$\sigma_y^2 = \sigma_y^2 + \sigma_R^2$$

se obtiene mediante una sustitución:

$$\sigma_y^2 = \sigma_y^2 + \left( \frac{1 - \rho_{xy}^2}{\rho_{xy}^2} \right) \sigma_y^2$$

$$\rho_{xy}^2 = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_y^2}$$

Es decir que al agregar una componente aleatoria a la relación lineal funcional original, disminuye el valor absoluto del coeficiente de correlación entre X e Y, además cambia la varianza observada de Y,  $\sigma_y^2$ , de manera inversamente proporcional al cuadrado del coeficiente de correlación observado.

La fórmula anterior no presenta discontinuidad para  $\rho_{xy} = 0$  porque, por hipótesis, no se puede incluir este valor; téngase presente al respecto, que se parte de la suposición de u-

na existente relación funcional entre X e Y, que no se puede anular mediante la introducción de una componente aleatoria no correlacionada, solo se puede disminuir su importancia.

Debido a que se cumplen las siguientes relaciones:

$$\sigma_y^2 = \sigma_y^2 + \left(\frac{1-\rho^2}{\rho^2}\right)\sigma_y^2 \quad ; \quad \sigma_y^2 = \sigma_y^2 \rho^2 \quad ; \quad \rho = \rho_{xy}$$

combinándolas se obtiene:

$$\sigma_y^2 = \rho^2 \sigma_y^2 + (1-\rho^2) \sigma_y^2$$

El primer término de la derecha da la proporción de la varianza de la serie de Y que proviene de la varianza de X a través de la supuesta relación lineal funcional, mientras que el segundo término del miembro de la derecha indica la proporción de la varianza de Y que es causada por la componente aleatoria no correlacionada con X.

Se demuestra en general y facilmente que la distancia D del punto (x,y) a la recta de regresión de Y sobre X, que es definida por:

$$D = y - \alpha x - \beta$$

cumple las siguientes propiedades:

$$E[D] = 0$$

$$E[(x-\bar{x}) \cdot D] = 0$$

O sea que las distancias a la recta de regresión mencionada son muestras de una población que tiene un valor medio igual a cero y que presenta una covarianza con la variable X que también es nula, o sea que no está correlacionada con la variable aleatoria X. Además la varianza de la variable aleatoria D es:

$$E(D^2) = \sigma_y^2 (1-\rho^2)$$

## REPRESENTATIVIDAD DEL COEFICIENTE DE CORRELACION LINEAL

Es evidente que el valor del coeficiente de correlación lineal obtenido entre dos series pluviométricas, dependerá de los valores que componen a esas muestras. Es decir que el coeficiente de correlación muestral es también una variable muestral.

Al ser el coeficiente de correlación una variable muestral, es necesario asegurarse que el valor obtenido no sea puramente aleatorio. Para dar un ejemplo: Supóngase la existencia de dos puestos pluviométricos que, de alguna manera, se sabe que las mediciones no están mutuamente correlacionadas. Es decir que en este caso el coeficiente de correlación lineal entre ambas poblaciones es cero. Sin embargo, en la realidad no se tiene acceso a las poblaciones en su totalidad, sino que solamente se observa una parte de ellas, que es la muestra. Pero puede suceder que la muestra, por ejemplo: 50 años de datos anuales simultáneos para cada puesto, por azar produzca un valor del coeficiente de correlación que no sea igual a cero. En este caso se debe disponer de algún método que permita tomar una decisión respecto de si el valor calculado de  $r$  puede provenir de un  $\rho = 0$ , o si por el contrario, está indicando que  $\rho$  no es igual a cero.

Este problema estaría resuelto si se conociese la función de distribución del valor muestral del coeficiente de correlación, puesto que en este caso se aceptarían todos aquellos valores de  $r$  que pertenezcan a un intervalo  $(r_1, r_2)$ , tal que ese intervalo represente un valor de probabilidad preestablecido. La dificultad proviene de que la función de distribución del coeficiente de correlación muestral, además de ser generalmente muy complicada, sólo se conoce para distribuciones especiales de la población bidimensional (es decir de la población obtenida considerando los pares simultáneos

(x, y) de observaciones en los pluviómetros X e Y)

Conrad (1944) propone utilizar la siguiente expresión para la varianza de r:

$$D^2(r) = \frac{(1 - r^2)^2}{n}$$

donde n es el número de observaciones. Sin embargo esta fórmula comúnmente no es utilizable porque sólo es adecuada para muestras muy grandes, n > 500, (ver Fisz 1963) ó Kendall y Stuart (1967, volumen 2)).

Si se quiere docimar la hipótesis de que las mediciones efectuadas simultáneamente en dos pluviómetros, son independientes entre sí, y además se sabe que las respectivas funciones de distribución de la lluvia son funciones normales, se puede utilizar la variable muestral:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{n-2}$$

que posee una distribución de Student con n - 2 grados de libertad

El análisis de la representatividad del coeficiente de correlación se mejora empleando una transformación de r, que se aproxima a una distribución normal muy rápidamente a medida que crece el número de observaciones n. Esta función de r, descubierta por Fisher es:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}$$

que para pequeños valores de  $\rho$  tiene una varianza igual a  $\frac{1}{n-3}$  y una

media dada por:

$$\frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)}$$

Es importante recordar que se  $\rho = 0$ , las dos poblaciones son independientes si son normales, caso contrario solamente se puede decir que no son interdependientes (ver Kendall y Stuart (op. cit.), pag. 288 y siguientes). Sin embargo también es importante tener presente que cuando se tratan fenómenos hidrológicos y atmosféricos no se busca causalidad, sino que se desea generalmente encontrar una relación predictiva que se evidencie.

## Aplicaciones del Coeficiente de Correlación Lineal

### Diseño de redes

Al diseñar una red pluviométrica se desea obtener el menor número posible de pluviómetros que provean una adecuada representación del campo pluviométrico. La definición acertada de la expresión "adecuada representación" dependerá del uso que se le dará a la información.

Los requisitos impuestos sobre conocimiento de la cantidad de lluvia caída no son los mismos, por ejemplo, en el caso del cálculo de la lluvia media caída en una cuenca de varios miles de kilómetros cuadrados de extensión, que cuando se desea conocer precipitaciones extremas sobre una localidad a los fines del diseño de desagües.

El factor económico requiere que se evite la información redundante. Si dos pluviómetros están altamente correlacionados, por ejemplo con un coeficiente de correlación lineal del 98%, se puede levantar uno de ellos y obtener el valor estimado de la precipitación caída mediante la información del otro pluviómetro.

Es conveniente entonces que una vez constituida una red pluviométrica se efectúa un estudio de correlaciones a fin de detectar los posibles casos de redundancia. La redistribución del instrumental que estuvo proveyendo información redundante contribuye al mejor aprovechamiento del dinero.

El concepto de redundancia en la información puede ser muy bien aprovechado si deliberadamente se busca la generación de series con un gran coeficiente de correlación con un pluviómetro dado, mediante la implementación masiva.

De esta manera trabajando con dos grupos de puestos pluviométricos, permanentes unos y transitorios los otros, se puede proveer una mejor información del campo pluviométrico en una región con un máximo provecho del dinero disponible.

Con respecto a la relación que los pluviómetros deben tener entre si, **Hershfield** (1965) ha sugerido que el coeficiente de correlación entre puestos adyacentes no debe ser menor de 0.9 para tormentas individuales. Es decir que el 80% de la varianza de un pluviómetro está explicada por la regresión lineal con otro pluviómetro adyacente. Si bien Hershfield recalca la arbitrariedad de la elección de ese valor, es de suponer que el valor del coeficiente de correlación a tener entre pluviómetros adyacentes tiene que ser próximo a ese valor. Téngase presente que para  $r=0,80$  que da sin explicar por una relación lineal el 36% de la varianza de la serie de uno de los pluviómetros. Hershfield también destaca que las líneas de isocorrelación alrededor de un pluviómetro no son circulares, sino que adoptan formas irregulares cerradas.

Sin embargo debe señalarse que Hershfield encontró que valores  $r=0.90$  estaban a distancias del orden de los 6 km. Es evidente que para un estudio hidrológico en una cuenca de mediana dimensión (por ejemplo:  $10.000 \text{ km}^2$ ) planear una red con pluviómetros a 6 km de distancia entre si no sería económico.

Con respecto a la interpretación del coeficiente de correlación en función de algunas características de las tormentas, así como consideraciones sobre su uso en el diseño de redes pluviométricas, se puede leer el artículo de Sharon (1972) aunque algunos de los tópicos son tratados más en extenso en este trabajo.

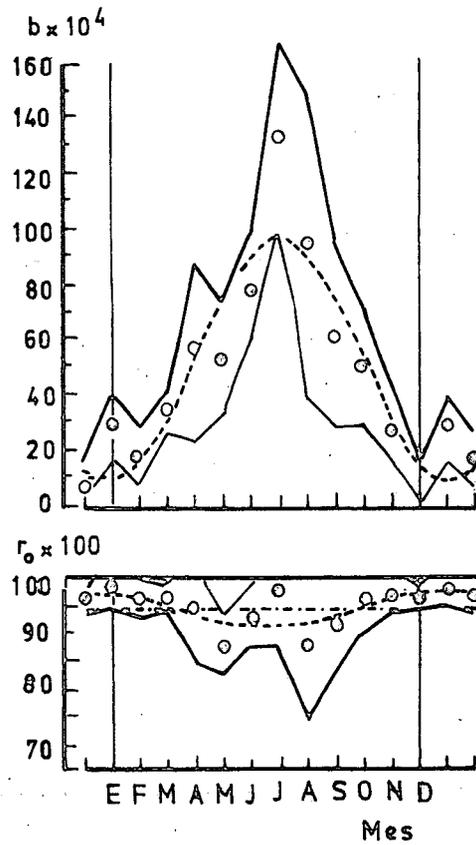


Figura Nº 5 Relación entre valores estimados de parámetros y mes del año para un modelo lineal de decaimiento del coeficiente de correlación con la distancia. Los trazos llenos incluyen los intervalos del 95%, las líneas de trazos son curvas sinusoidales ajustadas de los valores estimados de los parámetros indicados (según Ph. Th. Stol, 1972)

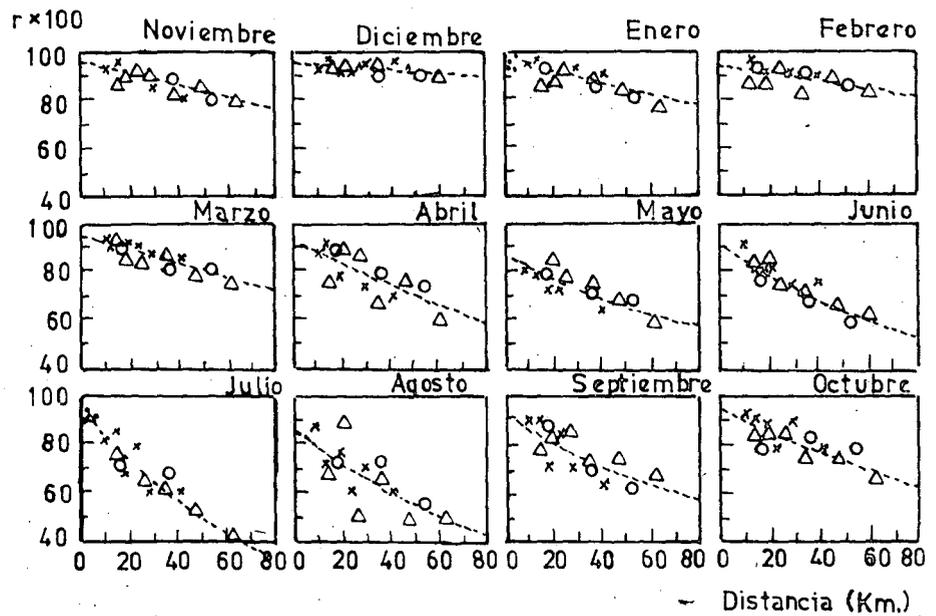


Figura Nº 6 Relación entre el coeficiente de correlación y distancia entre pares de puestos para cada mes del año. (según Ph. Th. Stol 1972)

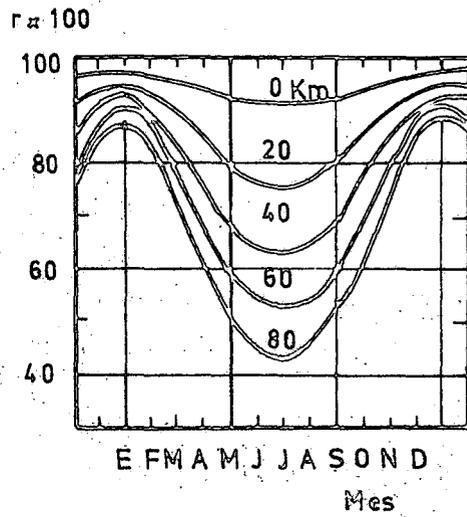


Figura Nº 7 Relación entre valores suavizados del coeficiente de correlación y mes del año. Los valores paramétricos (en Km) son para distancias medias (según Ph. Th. Stol, 1972)

Una metodología práctica basada en consideraciones teóricas, es la desarrollada por Kagan (1972). El método permite estimar la densidad pluviométrica en una cuenca para obtener un error medio preestablecido, en los valores de lluvia media caída sobre la región. La técnica propuesta por Kagan es discutida en la sección 5.0 al tratar los errores de la precipitación areal media, y se desarrolla un ejemplo de aplicación al diseño de redes.

#### 4.4.2 Depuración de series pluviométricas

La depuración de series pluviométricas comprende tres aspectos que, si bien aparentemente diferentes, en esencia son equivalentes. El rellenado de una serie incompleta básicamente consiste en estimar datos pluviométricos en una localidad determinada basándose en la información proveniente de puestos pluviométricos que muestren una buena correlación con la serie incompleta.

El control de las observaciones pluviométricas en una región es equivalente a la comparación de cada uno de los valores medidos en un pluviómetro, con los provistos por los restantes puestos de la red considerada. Si algunos valores se considerasen erróneos, se los corrige mediante una estimación del valor verdadero, efectuada sobre la base del resto de la información.

Para el problema de depuración de datos se deben seleccionar los puestos pluviométricos a utilizar para estimar y comparar datos, utilizando aquellos que presentan un valor grande de coeficiente de correlación. En la estimación de datos se utiliza generalmente, entre otros métodos, el uso de rectas de regresión.

#### 4.4.3 Variación del Coeficiente de Correlación con la Distancia

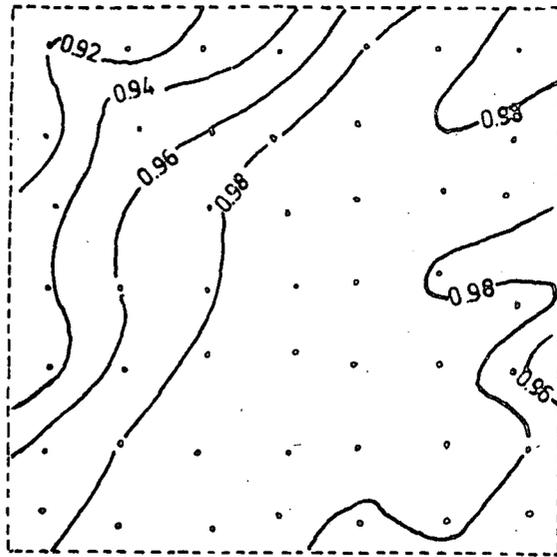
Al estudiar series pluviométricas, es de esperar que la relación entre las mediciones efectuadas simultáneamente disminuya a medida que los pluviómetros estén más alejados entre sí. Al respecto se presentan dos necesidades: Primeramente es, de interés conocer la manera en que decae esa correspondencia, o expresado en términos más rigurosos se puede preguntar cómo decae el valor del coeficiente de correlación lineal con la distancia entre los pluviómetros. En segundo lugar se debe conocer la manera en que el aumento de la distancia entre los pluviómetros afecta a la simultaneidad de las mediciones que se toman en cuenta.

Stol (1972) publicó un trabajo que muestra los resultados obtenidos en un estudio sobre las variaciones del coeficiente de correlación lineal, en función de la distancia y la época del año. Sin embargo este estudio no contempla la posibilidad de que la función coeficiente de correlación-distancia entre estaciones no sea monótonamente decreciente.

Este autor, en el estudio mencionado, trabajó con dos modelos de variación del coeficiente de correlación con la distancia para datos de lluvia diaria, uno lineal y el otro cuadrático. El modelo lineal, posiblemente de mayor interés, está definido por:

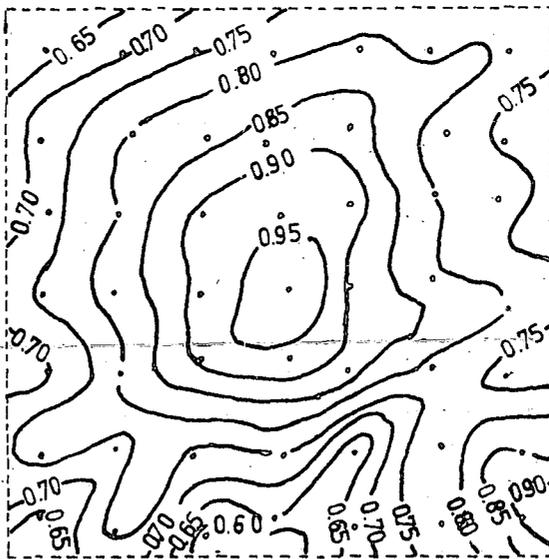
$$\Gamma(x,t) = \rho_0(t) \exp[-\beta(t)x]$$

donde  $\rho_0$  y  $\beta$  son dos parámetros que se estiman de la muestra. El parámetro  $\rho_0$ , según Stol, está dado por el valor a que tiende el conjunto muestral cuando  $x \rightarrow 0$ . Sin embargo es de destacar que Stol no efectuó la d<sup>o</sup>cima correspondiente de la hipótesis  $\rho_0 = 1$  para



0 1 2 3 4 5  
Millas

Lluvia de centro de baja presión



0 1 2 3 4 5  
Millas

Lluvia de tormenta de masa de aire

Figura Nº 8 Campo de correlación producido en lluvias de centro de baja presión y lluvias de tormenta de masa de aire. (Según Huff y Shipp 1969.)

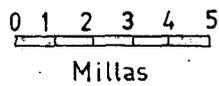
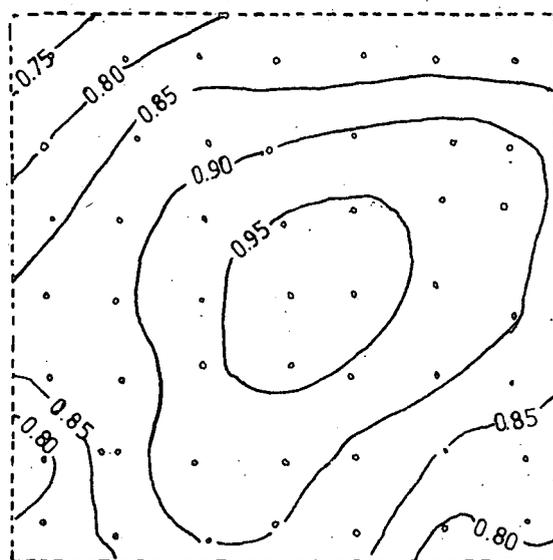


Figura Nº 9 Campo de correlaciones producido en lluvias de tormentas frontales. (Según Huff y Shipp 1969)

$x \rightarrow 0$ , por consiguiente es cuestionable su elección para el valor de  $\rho_0$ .

En la zona estudiada por Stol, se encontró que el coeficiente de correlación disminuye más rápidamente con la distancia en Verano que en Invierno.

En la Figura N° 5 se observa la dependencia del parámetro  $\beta$  con la época del año. La curva de trazo indica una curva sinusoidal ajustada al conjunto de valores de  $\beta$ , se observa que en su mayor parte cae dentro del intervalo del 95%. La Figura N° 6 muestra un gráfico de la variación del coeficiente de correlación lineal en función del mes y de la distancia entre estaciones. Finalmente la Figura N° 7 muestra la variación suavizada del coeficiente de correlación en función del mes y la distancia, para el caso analizado por Stol (1972).

En la Figura N° 6 se evidencia el efecto de la presencia de tormentas convectivas, mediante el rápido decrecimiento del valor del coeficiente de correlación con la distancia durante los meses de verano. Este mismo efecto se observa en las curvas suavizadas de la Figura N° 7.

La cantidad de precipitación promedio tiene poca influencia sobre las correlaciones puntuales, según Huff y Shipp (1969), quienes también estudiaron las características del campo de correlaciones de acuerdo al tipo de situación meteorológica (ver Figura N° 8 y N° 9). Para este estudio de la influencia de la situación meteorológica se utilizaron las alturas puntuales totales de lluvia caída en cada tormenta, definiéndose como tormenta cualquier período de precipitación separado no menos de 6 horas de cualquier otra lluvia.

En las Figuras recién mencionadas del trabajo de Huff y Shipp se observa nuevamente que la precipitación proveniente de nubes aisladas o aglomerados de cumulonimbus tiene asociada valores del coeficiente de correlación que decrecen rápidamente con la distancia, según se ve en la figura correspondiente al caso de lluvias de tormenta de masas de aire. Por el contrario, en el caso de lluvias provenientes de centros de baja presión, se evidencia que el coeficiente de correlación decrece más suavemente. Esto se debe a que generalmente los centros de baja presión poseen una abundante cantidad de nubes del tipo estratificado, que no presenta variaciones espaciales de la lluvia tan marcadas como en el caso de las nubes cumulonimbus aisladas.

El caso del campo de correlaciones producido en lluvias provenientes de tormentas asociadas con el pasaje de frentes fríos, muestra una variación del coeficiente de correlación, con la distancia, que es intermedia entre los dos casos anteriores. Esto es una consecuencia del tipo de estructura nubosa, que se presenta con agrupamientos, numerosos en algunos casos, de nubes convectivas del tipo cumulonimbus, además de otras.

Un estudio efectuado por Sharon (1974) señala que el coeficiente de correlación no necesita ser una función monótonamente decreciente, especialmente cuando se refiere a la precipitación diaria. Este autor puntualiza dos casos.

El primer caso se refiere a la probable existencia de cambios bruscos en la curvatura de la función coeficiente de correlación distancia, que estén relacionados con las dimensiones de las células convectivas. Aunque Sharon no expresa con claridad su punto de vista, desde el enfoque de la dinámica de nubes se puede pensar que

r(d)

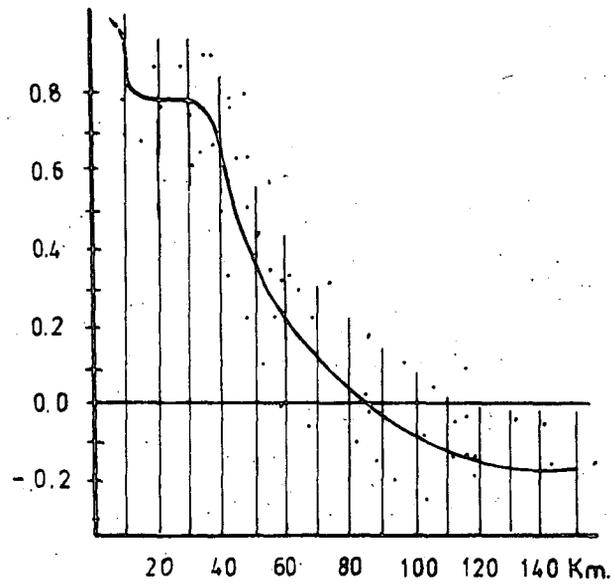


Figura Nº 10 Coeficientes de correlación de precipitación diaria, en días con convección celular pronunciadas, en función de la distancia, para estaciones en New England. Según Sharon (1974).

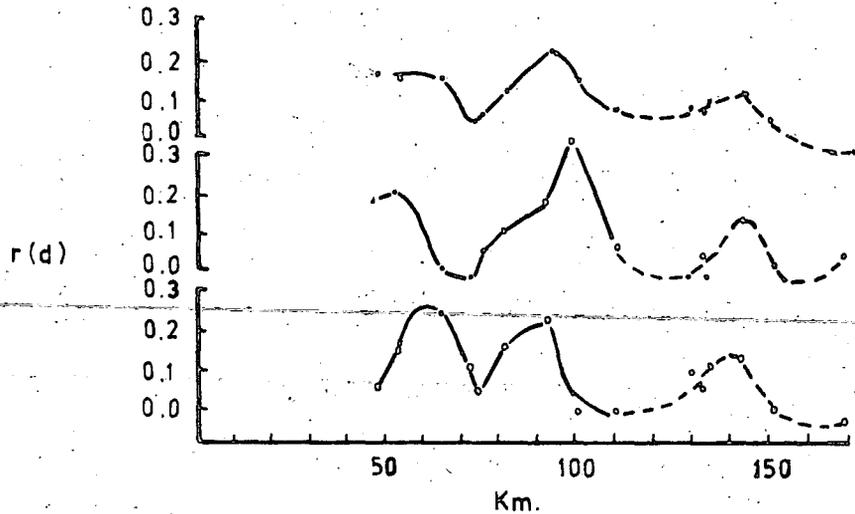


Figura Nº 11 Funciones seleccionadas de correlación de precipitación diaria en Tanzania. Años 1959 a 1968. a = Diciembre a Abril (n= 970); b = Diciembre (n = 205); c = Marzo (n = 210). Según Sharon (1974).

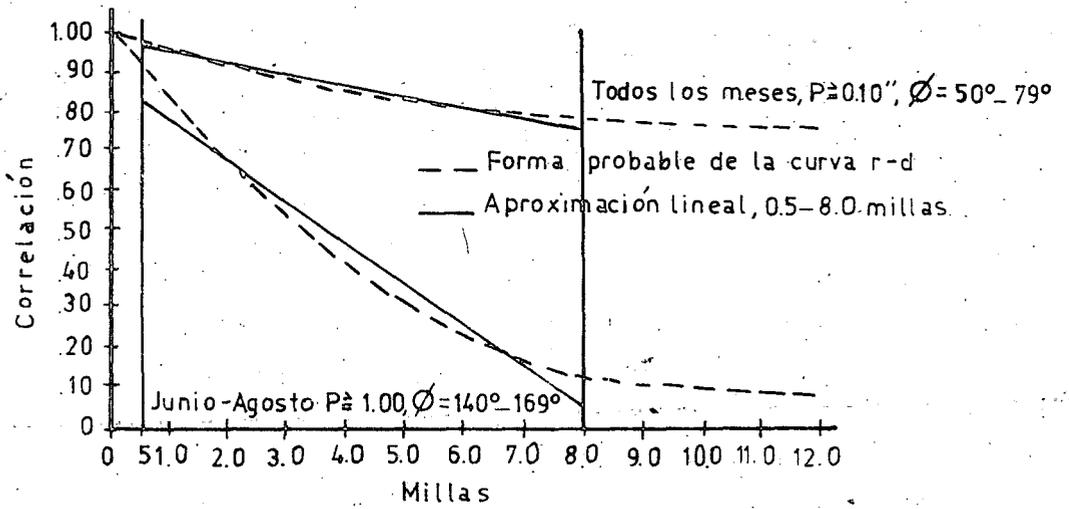


Figura N° 12 Forma probable de las curvas de correlacion en función de la distancia y las aproximaciones lineales. Según Hendrick y Comer (1970).

el mecanismo de generaciones de la convección impone una escala espacial. Se sabe, por ejemplo, que la presencia de un cumulonimbus inhibe los mecanismos generadores de fuerte convección en su cercanías (Hill, 1973). En la Figura N° 10 Sharon nota dos puntos de fuerte curvatura, a 10Km y 30-40 Km de distancia, aunque es difícil estar totalmente seguro al respecto, a raíz de que la muestra no es suficientemente grande.

El segundo caso es el de la existencia de máximos secundarios que posiblemente estén asociados con la escala de la convección, mencionada recientemente, o con la organización espacial de las tormentas (ver Figura N° 11).

Para el caso de distancias pequeñas es poco probable que el coeficiente de correlación muestre una variación con la distancia que no sea monótonamente decreciente, como aparece en la Figura N° 12 de Hendrick y Comer (1970). Es conveniente en el caso de áreas pequeñas recordar que la variabilidad aparente de la lluvia puede deberse a razones de exposición o de funcionamiento (Rodda, 1971).

Hutchinson (1969) efectuó un estudio destinado a establecer si la topografía del terreno afecta al coeficiente de correlación entre pluviómetros. Los resultados de Hutchinson indican un más rápido decaimiento del coeficiente de correlación con la distancia en el caso de un terreno con acentuadas variaciones topográficas, que en el caso de un terreno llano, para datos mensuales y anuales. En este trabajo Hutchinson sugiere un método para modificar los polígonos de Thiessen que aparenta mejorar el cálculo de la precipitación media para valores mensuales y anuales.

Para finalizar esta discusión se recomienda la lectura del trabajo de Austin y Haize (1972), en el que se efectúa un análisis de la estructura de las configuraciones espaciales de la precipitación.

## 5.0 ERRORES EN LA PRECIPITACIÓN AREAL MEDIA

En un gran número de aplicaciones, y especialmente en Hidrología, la precipitación areal media, o lámina de agua caída sobre una zona, constituye una información de primera necesidad.

Sin embargo la precipitación media no se puede medir directamente. Se calcula a través de la información obtenida mediante pluviómetros o pluviógrafos, distribuidos en la cuenca bajo estudio. Evidentemente si se colocase un enorme número de pluviómetros se podría conocer con gran exactitud la precipitación caída en una zona, pero de esta manera los costos de implementación del instrumental ascenderían a cifras excesivamente grandes. Además en no pocos casos una distribución masiva de pluviómetros no es posible debido a factores logísticos. Finalmente los errores que existen en la medición de otras variables del ciclo hidrológico volverían inciertos los beneficios que podría proveer un exacto conocimiento de la precipitación areal media.

Muchas veces es conveniente pensar en el valor de la precipitación areal media como un índice aproximado indicativo del volumen de lluvia caída, y no como su valor exacto.

Cuando el objetivo consiste en obtener la precipitación media en una cuenca pequeña, a fin de utilizar su valor en el cálculo de los valores de escurrimiento, un solo pluviómetro puede ser suficiente. Sin embargo es conveniente tener una pequeña red funcionando durante algunos meses, de manera de obtener una recta de regresión entre el valor areal medio de la precipitación y la precipitación medida en el pluviómetro que ha de permanecer en forma permanente, de

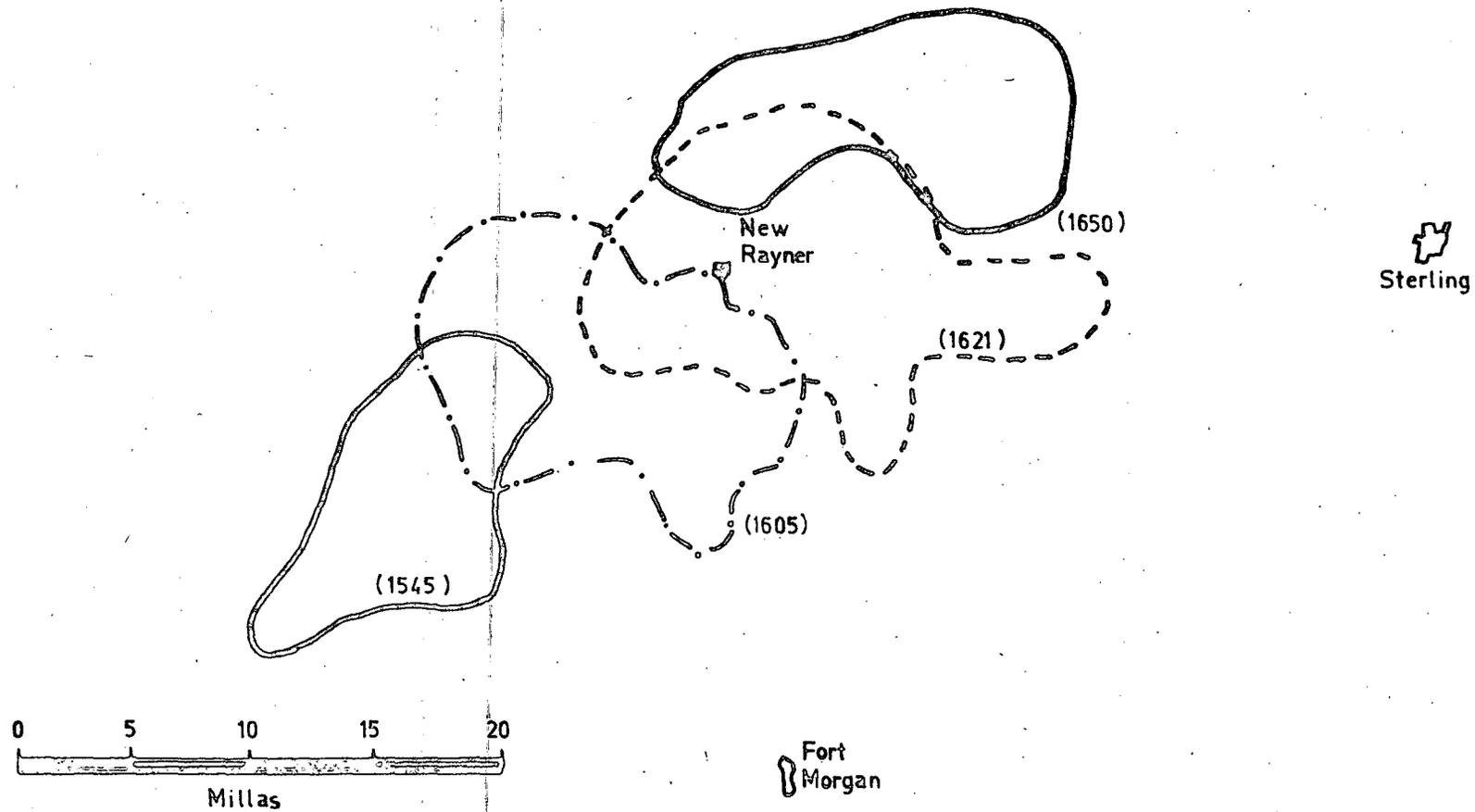


Figura N<sup>o</sup> 13 : Ecos de radar de la tormenta principal del 6 de Julio de 1969, los números entre paréntesis indican hora local. (Según Goyer 1970)

esta manera se obtienen mejores resultados (Amorocho et al , 1968).

Según Linsley y Kohler (1951) cuando se utiliza únicamente un pluviómetro en una cuenca pequeña, del orden de 200 millas cuadradas, este debe ser colocado en el centro de la misma. Estudios efectuados por ellos indicaron que cuando el pluviómetro fue colocado en una esquina del área (de 10 millas x 22 millas) el error en el cálculo de la precipitación media era casi el doble del error cometido utilizando un único pluviómetro en el centro del área.

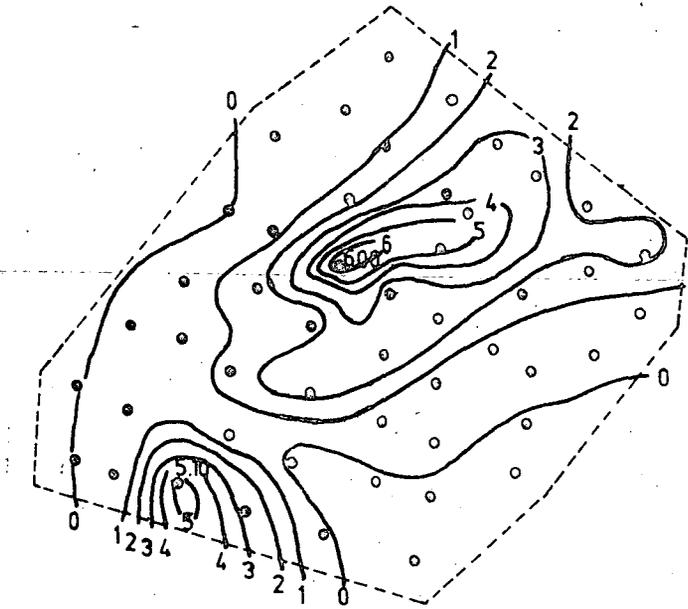
A fin de comprender la base de las dificultades meteorológicas en la determinación de la precipitación media supongamos una región en la que existen, durante un período dado,  $N$  células precipitantes por unidad de área que se distribuye con probabilidad uniforme sobre la región, cada célula cubre un área  $A$ . Se supone, además que la región considerada es circular, al igual que la sección de las células precipitantes. (Esto no es correcto porque las nubes se mueven, ver Figura N° 13 (Goyer, 1970) en la que aparecen los ecos de radar de una gran tormenta).

La probabilidad de que llueva en la región es igual a la probabilidad de que llueva dentro de un círculo de área igual a

$$\pi \left[ \left( \frac{1}{\pi} \right)^{1/2} + \left( \frac{A}{\pi} \right)^{1/2} \right]^2 = \left[ 1 + A \right]^2$$

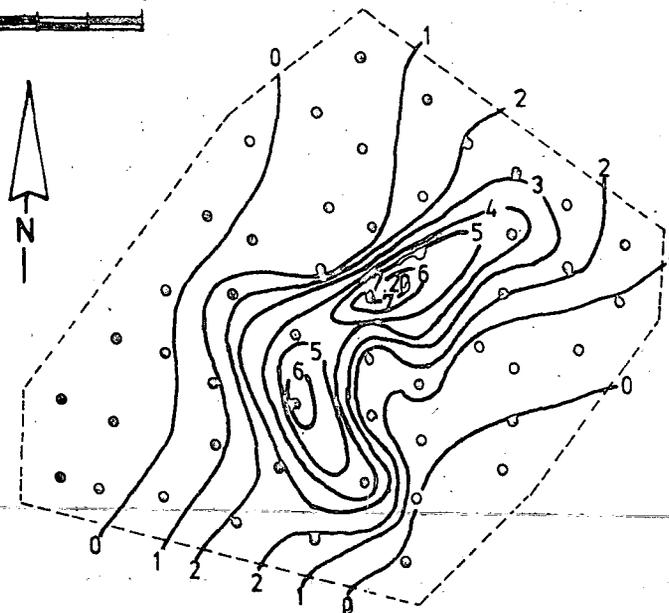
La probabilidad de que llueva sobre un pluviómetro es igual a la probabilidad de que una o más nubes precipitantes se encuentren dentro de un área  $A$  que rodea al pluviómetro. Epstein (1966) propuso para la probabilidad de que  $n$  células se encuentren simultáneamente dentro del área  $A$ , una distribución de Poisson:

$$e^{-NA} \frac{(NA)^n}{n!}$$



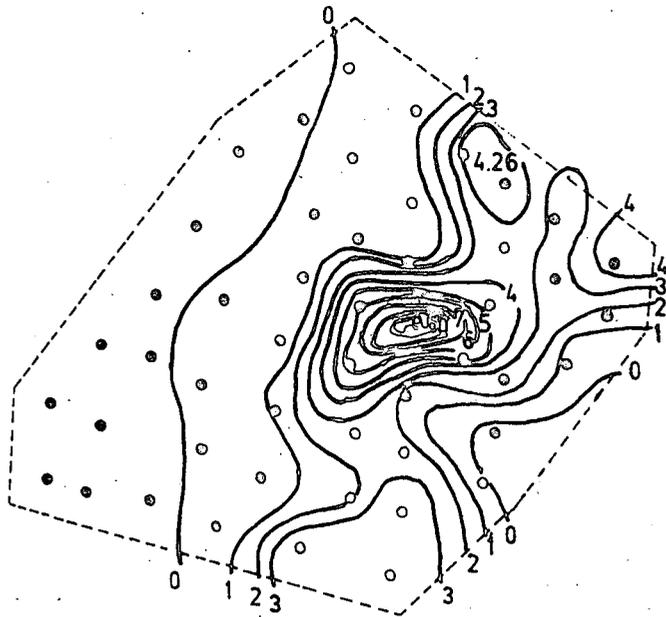
a) Hora: 16 h. 05 m. - 16 h. 06 m.

0 1 2 3 Millas



b) Hora: 16 h. 09 m. - 16 h. 10 m.

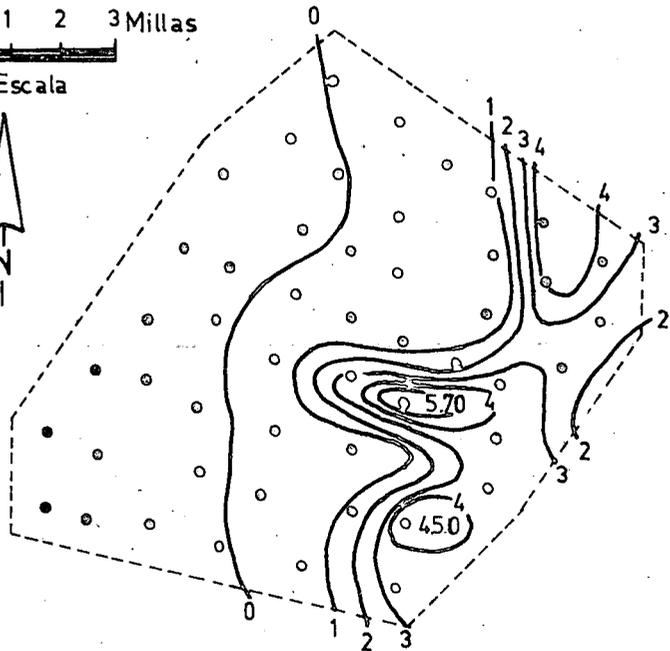
Figura Nº: 14a. Configuración de las intensidades de lluvia (expresadas en intensidad promedio en pulgadas por hora durante el minuto indicado. (Según Huff y Changnon, 1965).



c) Hora: 16 h. 13 m. - 16 h. 14 m.

0 1 2 3 Millas

Escala



d) Hora: 16 h. 17 m. - 16 h. 18 m.

Figura No 14b: Idem figura No 14a

Por lo tanto la probabilidad de que una ó más células estén dentro del área A es:

$$P(n \geq 1) = 1 - e^{-\lambda} \quad ; \quad \lambda = NA$$

Es decir que si llueve en una cuenca, la probabilidad de que la lluvia sea detectada en un pluviómetro aumenta cuanto mayor sea el número de células precipitantes y disminuye cuanto menor sea el tamaño de las mismas. Debe recordarse, sin embargo, que la detección es sólo una parte del problema, puesto que el volúmen de lluvia caída no es uniforme en toda la zona en que ocurre la precipitación.

Si además los valores de precipitación en que se está interesado se refieren a pequeños intervalos de tiempo, el problema de la detección se complica aún más. En las Figuras Nº (14 a) y Nº (14 b) (de Huff y Changnon, 1965) se observan las variaciones temporales en configuración pluviométrica, registradas en una red de muy alta densidad. En estas figuras son evidentes las reducidas dimensiones que pueden tener los centros de alta intensidad de precipitación y además la rapidez con que varían las localizaciones de los mismos.

~~Una metodología de uso muy común para el estudio de los errores en el cálculo de la precipitación media la constituye el trabajar con parte de una red pluviométrica, suponiendo que el valor provisto por toda la red es el "correcto", y estudiar cuales son las variaciones que se producen en el cómputo de la lámina media de agua a medida que va disminuyendo el número de pluviómetro (ver por ejemplo, Huff (1970), Nicks (1965)).~~

Tabla Nº 4

Comparación de mediciones máxima en un pluviómetro, para distintas densidades instrumentales.

Fecha de la Tormenta	Medición Máxima Observada			
	158 Pluviómetros	80 Pluviómetros	40 Pluviómetros	20 Pluviómetros
	(Pulg.)	(Pulg.)	(Pulg.)	(Pulg.)
9/ 2/62	6.28	6.28	6.03	3.5
9/16/62	5.89	5.17	4.28	4.80
9/20/62	5.82	5.09	4.90	3.62
6 /23/63	5.76	5.25	4.48	5.30
6 / 1 / 62	5.40	4.82	3.60	3.69
5 / 9 / 64	4.08	4.08	4.08	3.98
4 /26/63	4.05	3.80	3.00	3.25
5 /26/62	3.77	2.80	2.35	2.54
4 /26/62	3.55	3.55	2.30	1.53
7 /27/ 62	3.51	3.51	2.53	1.86
7/13/63	3.15	3.15	3.08	3.08
7/10/63	3.13	1.62	1.62	1.14
9/ 4/62	2.63	2.63	2.63	0.86

Tabla presentada por Nicks (1965)

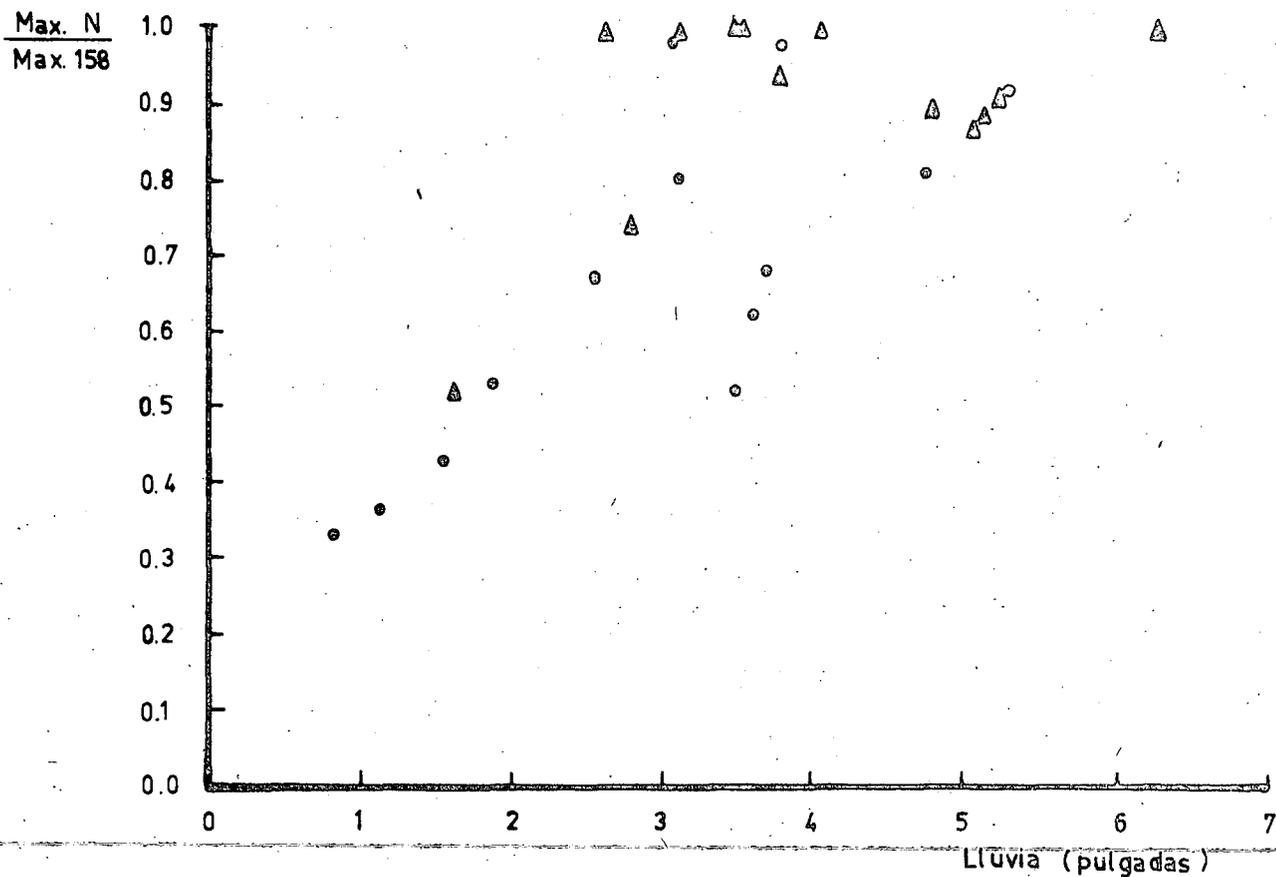


Figura N° 15 Cociente entre el valor máximo registrado con una red de N° pluviómetros y la red máxima de 158 pluviómetros, en función de la precipitación máxima registrada en la red parcial. (N: 20 (●); 80 (△)).

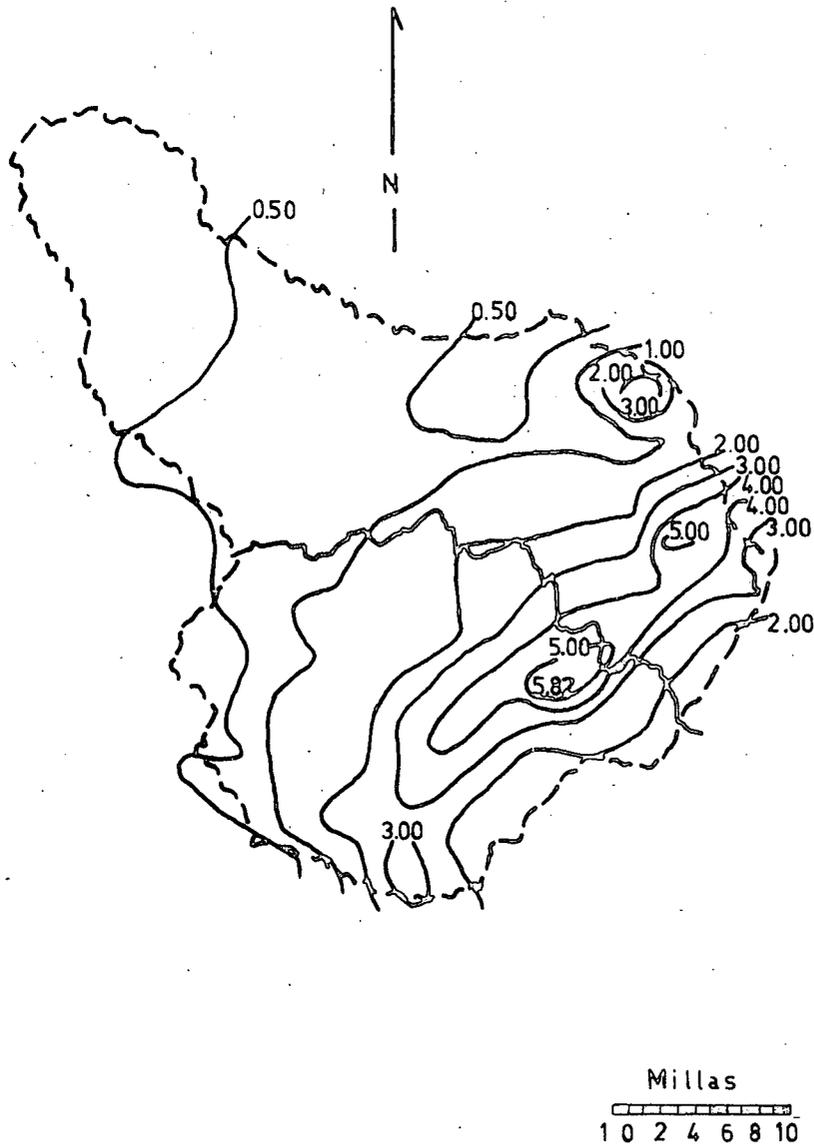


Figura N° 16 Precipitación (en pulgadas) ocurrida el 20 de Septiembre de 1962, en ARS Study Reach (Washita River Watershed). El trazado isohietal se efectuó con la información de 158 pluviómetros - Según Nicks (1965)

Nicks (1965) ha señalado que en una red con una densidad de 1 pluviómetro cada 9 millas cuadradas, y con un total de 158 puestos, el total de instrumentos se podía reducir a 10 sin desmedro en la estimación de la precipitación areal-media. Las diferencias mayores entre las dos densidad de redes, fueron encontradas para los valores más grandes de precipitación.

Sin embargo el error en la detección de los valores máximos de lluvia caída en la red puede alcanzar porcentajes considerables.

Al respecto en la tabla N° 4 (Nicks, 1965) se han tabulado los valores máximos de lluvia total observada en pluviómetros, para cuatro densidades pluviométricas distintas. Se observa que en este caso particular los valores máximos obtenidos con una red de 158 pluviómetros no difieren sustancialmente de los valores obtenidos con una red de 80 pluviómetros, sin embargo reducir la densidad de la red a la cuarta parte, 40 pluviómetros, puede dar origen a diferencias que comienzan a ser significativas.

Los valores máximos registrados en un pluviómetro de una red de 20 instrumentos tienen poca relación con los que ocurrieron en la cuenca.

En la Figura N° 15 se han graficado los datos de la Tabla N° 4, previa elaboración de manera de presentar más claramente los efectos de la densidad instrumental.

Si se piensa en el cálculo de frecuencias de lluvias extremas, en base a valores puntuales, es evidente los inconvenientes que puede causar una red de pobre densidad. Puede verse en la Figura N° 16 (Nicks, 1965) que los valores diarios también pre

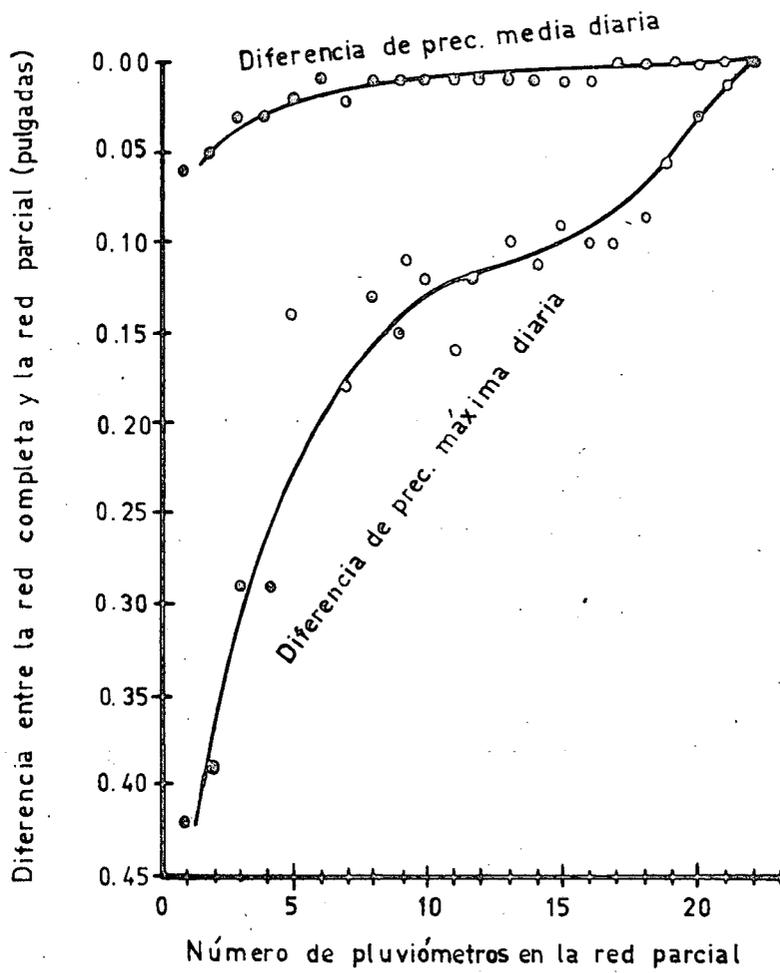


Figura Nº 17 Diferencias de precipitación diaria promedio y máxima entre las redes parciales y la red completa de 22 puestos pluviométricos. Según Hendrick y Comer (1970).

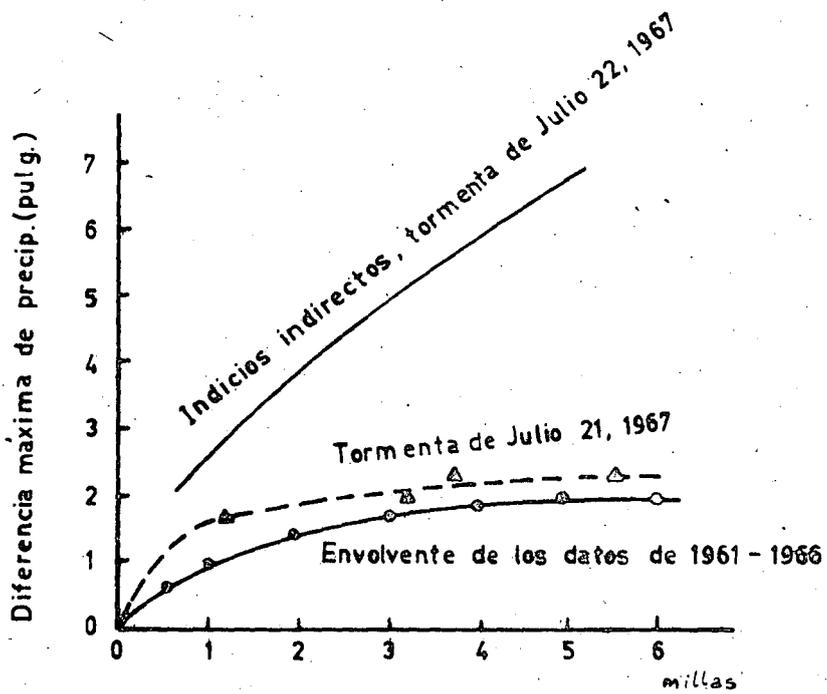


Figura Nº 18 Diferencias de precipitación diaria máxima entre estaciones en función de la distancia, Según Hendrick y Comer.(1970)

sentan zonas de máximos en reducidas extensiones.

En un estudio sobre redes pluviométricas, desarrollado por Hendrick y Comer (1970), también se analizaron las diferencias obtenidas en los volúmenes de agua caída y los valores máximos caídos, en una cuenca de 43 millas cuadradas de superficie, de acuerdo a la densidad pluviométrica. Estos resultados, graficados en la Figura N° 17, muestran nuevamente que la detección de valores máximos es muy sensible a la densidad de la red pluviométrica, no ocurriendo así para los valores de lluvia media en el área (trazo superior de la figura).

También, se observa claramente en la Figura N° (18) (Según Hendrick y Comer, 1970), que las diferencias máximas entre las precipitaciones medidas en distintos pluviómetros, pueden alcanzar valores muy significativos aún para pequeñas distancias.

La consecuencia práctica, en lo que hace al error de la precipitación media, de la presencia de lluvia proveniente de células convectivas, puede verse en las conclusiones arribadas por Huff (1970), referidas a áreas entre 50 y 550 millas cuadradas. Este autor señala que para un error fijo determinado, la densidad instrumental necesaria durante la estación cálida (con abundantes precipitaciones de nubes convectivas) es 2 ó 3 veces mayor que la necesaria durante la estación fría (que muestra más abundancia de precipitaciones provenientes de nubes estratificadas).

A su vez los requerimientos de densidad instrumental disminuyen a medida que el lapso tomado en consideración aumenta.

## Precipitación Máxima Probable.

Se define a la precipitación máxima probable como la altura de precipitación teóricamente más grande que es posible para una cuenca en particular, para una determinada duración y en una época del año específica.

La PMP para todas las duraciones y tamaños del área generalmente es producida por diferentes tipos de tormentas. Las precipitaciones producidas por perturbaciones atmosféricas de escala sinóptica producen los valores PMP para áreas extensas y grandes duraciones, mientras que los valores PMP para áreas menores de  $1000 \text{ km}^2$  y duraciones menores de 5 horas son producidas por cumulonimbus.

A veces la PMP se obtiene de una sola tormenta, especialmente cuando se trata de cuencas de grandes superficies, observada y maximizada que es igual a la PMP por lo menos para una duración y tamaño de áreas. También se denomina tormenta máxima probable (TMP) a una tormenta hipotética que produciría la PMP para todas las duraciones en toda el área de la cuenca y valores más bajos para áreas menores en la cuenca.

No existen procedimientos que permitan determinar si una estimación de PMP es excesiva o insuficiente.

## Estimación de la precipitación máxima.

El método hidrometeorológico para estimar la precipitación máxima consiste de tres etapas principales: transposición de valores de lluvia de tormentas determinadas, maximización de las alturas de lluvia de las tormentas y determinación de la envolvente de los valores transpuestos máximos.

### Maximización por humedad.

El procedimiento más común para maximizar tormentas es el denominado maximización por humedad. La hipótesis sobre la que reside este método es que una tormenta observada, entre las más intensas ocurridas en la zona bajo estudio, hubiera precipitado más agua si la atmósfera hubiera tenido más humedad disponible en el momento de ocurrencia del fenómeno.

La maximización por humedad supone, además que ya han sido observadas tormentas que han transformado con la máxima eficiencia el vapor de agua de la atmósfera en lluvia.

El aire al ascender varía su temperatura de acuerdo al gradiente vertical adiabático seco, una vez alcanzado el nivel de saturación el cambio de temperatura que manifiesta el aire en su ascenso está dado por el gradiente vertical pseudo-adiabático saturado.

El punto de rocío es una variable indicadora del contenido de humedad del aire. El punto de rocío, o temperatura de rocío, es la temperatura a la que el aire se satura cuando es enfriado isobáricamente. En la maximización hidrometeorológica la temperatura de rocío se utiliza porque es una variable que indica únicamente el contenido de humedad de la atmósfera.

### Agua precipitable

Una medida del contenido de vapor de agua en la atmósfera es el agua precipitable, que se define como el equivalente en agua líquida del vapor de agua de una columna de aire, expresada como un espesor con unidades en mm, que llegue hasta el tope de la atmósfera.

Si  $M_a$  es la masa de agua en una columna de sección  $A$ ,  $\delta_a$  el peso específico del agua líquida, y  $\rho_w$  el peso específico del vapor de agua en la columna de aire, se tiene

$$M_a = A \int_{h=0}^{\infty} \rho_w dh \quad [M_a] = \text{gr}$$

o también

$$\frac{M_a}{\delta_a A} = H = \frac{1}{\delta_a} \int_{h=0}^{\infty} \rho_w dh ; [H] = \text{cm}$$

si se utiliza la ecuación hidrostática se tiene:

$$dz = - \frac{dp}{\rho_a g}$$

donde  $dz$  es el incremento en altitud,  $dp$  la variación en presión atmosférica, y  $\rho_a$  la densidad del aire atmosférico. Se puede sustituir  $dz$ :

$$H = \frac{1}{\delta_a} \frac{1}{g} \int_{p=p_0}^0 \frac{\rho_w}{\rho_a} dp$$

pero por definición es

$$q = \frac{\rho_w}{\rho_a}$$

donde  $q$  es la humedad específica, que es igual al cociente entre la masa de vapor y la masa total de aire húmedo que lo contiene

Finalmente queda

$$H = \frac{1}{\delta_a g} \int_{p=p_0}^0 q dp$$

(Ecuación de Solari)

en donde  $p_0$  representa el valor de la presión de superficie. El cálculo de unidades es como sigue

$$[dp] = \text{m.s} = 10^3 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} ; \text{dina} = \frac{\text{gr cm}}{\text{seg}^2}$$

o sea

$$[dp] = \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}^2} ; [\delta_a] = \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} ; [g] = \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2}$$

$$[H] = \frac{\text{cm}^3}{\text{gr}} \frac{\text{seg}^2}{\text{cm}} \frac{\text{gr}}{\text{cm seg}^2} = \text{cm}$$

La ecuación de Solst debe ser calculada mediante el conocimiento de la distribución de la humedad vertical con la altura. Sin embargo todavía la red aerológica no es lo suficientemente densa como para disponer de la información de la distribución vertical de humedad en cualquier lugar.

Si además se supone que la precipitación es producida por el aire que converge en capas bajas, el valor de agua precipitable que interesa es el que posee la parcela que asciende pseudo-adisbáticamente saturada. Esa cantidad de agua precipitable está determinada en esas condiciones por la temperatura de rocío.

La elección de una distribución vertical de humedad dada por un proceso -- pseudo-adisbático saturado, que comienza en la superficie para una determinada temperatura de rocío, tiene la ventaja adicional de que esa distribución vertical de humedad quede especificada al conocer el punto de rocío. Además el punto de rocío es una variable que se determina en las estaciones metereológicas, que existen en un número mucho mayor que el de las estaciones aerológicas.

Los valores de agua precipitable, para una dada temperatura de rocío en su superficie y para un gradiente vertical pseudo-adisbático saturado de temperatura, se hallan tabulados en la mayoría de los libros de hidrometereología.

#### Análisis de los puntos de rocío

Para aplicar el método de maximización por humedad es necesario caracterizar tanto la distribución vertical de la humedad en la tormenta, como la distribución vertical de humedad más desfavorable que pueda ocurrir en el lugar bajo estudio. Aquí se utiliza la palabra desfavorable en el sentido de productora de las mayores precipitaciones.

Para ambos casos se adopta una distribución vertical pseudo. adiabática de temperatura. Deben determinarse los puntos de rocío de la tormenta y el correspondiente a la zona bajo estudio.

Puntos de rocío con 12 horas de persistencia.

La práctica en la selección del punto de rocío representativo de la tormenta, y el representativo de la humedad máxima probable para la zona, se basa en la selección de valores que manifiesten persistencia por horas. El intervalo de persistencia comúnmente elegido es de 12 horas. Se elige el máximo punto de rocío persistente durante 12 horas consecutivas.

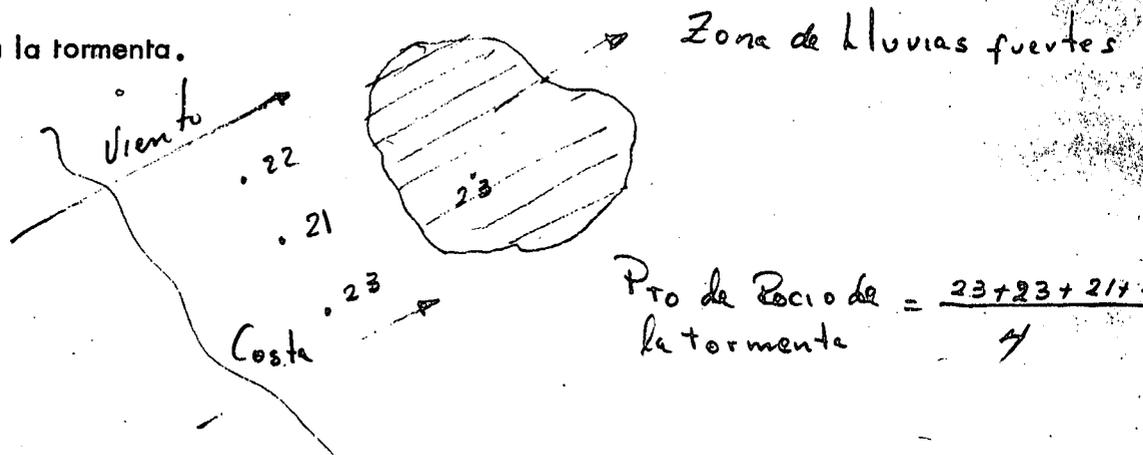
Ej. :

Hora	00	06	12	18	00	06	12	18
Punto de rocío (°C)	22	22	23	24	26	24	20	21

• Punto de rocío máximo persistente en 12 horas : 24 °C

Punto de rocío (persistente en 12 horas) representativo de la tormenta.

Se eligen los puntos de rocío más altos, en la zona en que sopló el viento predominantemente hacia la tormenta.



El punto de rocío medido en localidades que difieran en altitud, debe ser calculado a su valor de 1000 m antes de promediar.

### Puntos de rocío máximos (persistentes por 12 horas)

Para determinar el punto de rocío máximo en una región, se examinan los registros de varias estaciones meteorológicas en la región. Los registros preferentemente deben tener más de 50 años de extensión. En caso de que no existiesen registros de esa longitud es aconsejable efectuar un análisis de frecuencia y tomar valores correspondientes a un período de retorno de 100 años.

En las regiones cercanas al mar, en que no se dispongan de registros de suficiente extensión, las temperaturas del mar permiten tener una estimación razonable de los puntos de rocío máximos. Por ejemplo, en las regiones costeras del golfo de México, los puntos de rocío con 12 hrs. de persistencia a 1000 m, van de 1°C a 2°C por debajo de la temperatura mensual media del mar, cuando se miden sobre tierra en la dirección de los vientos prevalecientes.

### Maximización de la tormenta en su lugar de ocurrencia.

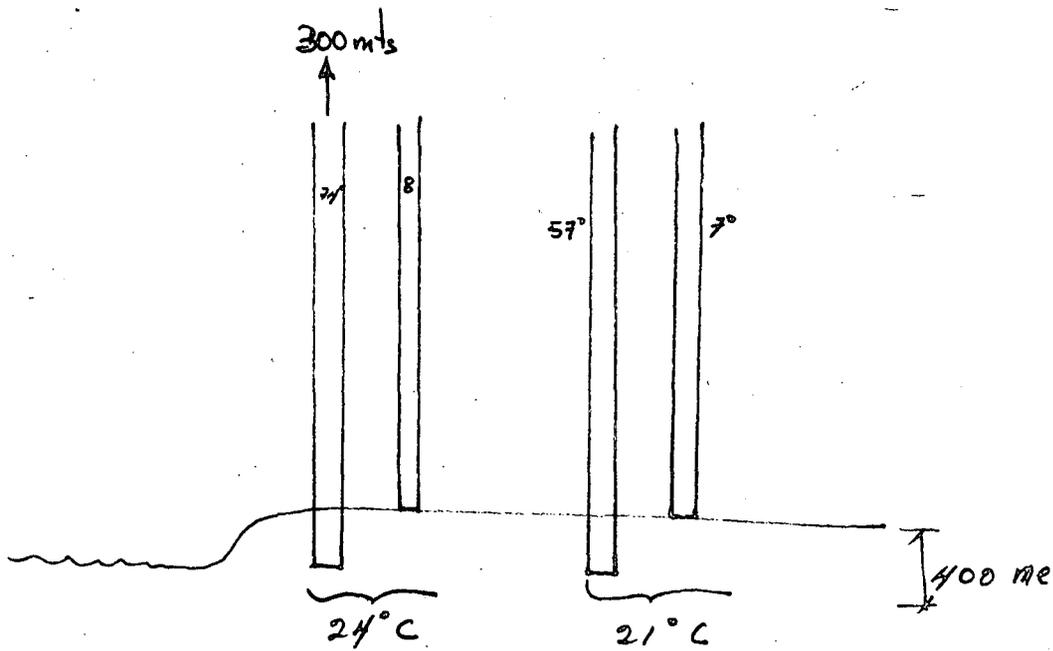
La maximización de la tormenta en su lugar de ocurrencia consiste en multiplicar las cantidades observadas de precipitación por el cociente ( $T_m$ ) del agua precipitable máxima ( $W_m$ ) determinado para el lugar, al agua precipitable ( $W_T$ ) estimada para la tormenta:

$$T_m = \frac{W_m}{W_T}$$

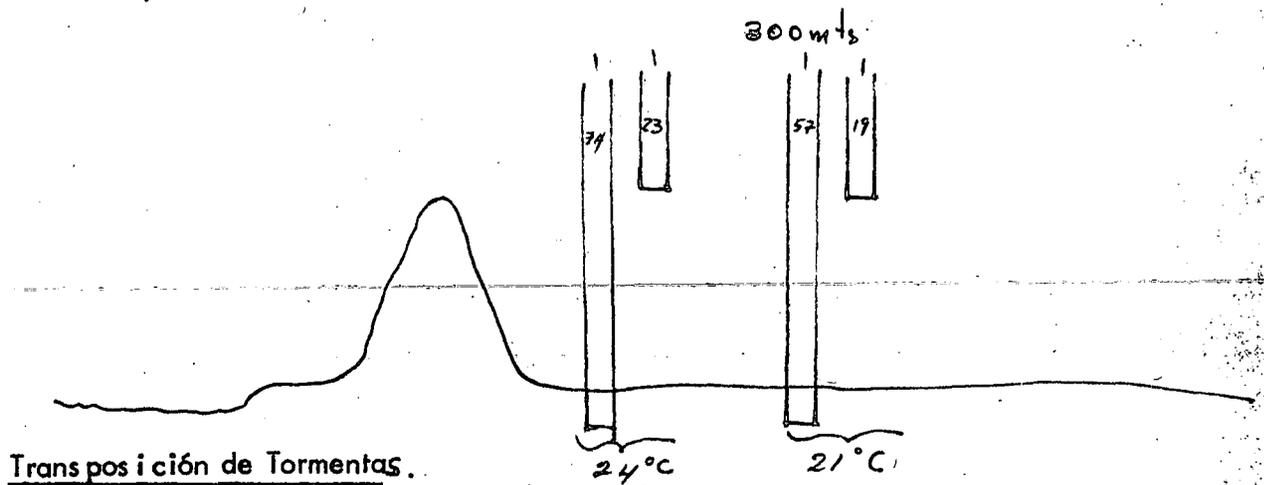
Ejemplo si  $W_m(24^\circ\text{C}) = 74.8 = 66^\circ\text{C}$  (Tormenta a 400 metros de altura tope al máximo)

$$y \quad W_T (21^\circ C) = 57 - 7 = 50^\circ C$$

$$\text{es } T_n = \frac{67}{50} = 1.32$$



Si entre la fuente de humedad y el lugar existiese una cadena montañosa de 1200 m de altura, se toma como nivel inferior el nivel de la cresta de las montañas



Transposición de Tormentas.

Para estimar la precipitación máxima probable sobre una cuenca particular es necesario usar toda la información histórica disponible. Una parte muy importante de esa evidencia histórica comprende las tormentas más importantes que ocurrieron en regiones

vecinas a la cuenca bajo estudio. Se denomina transposición al traslado numérico de la tormenta a la región de interés.

Para transponer una tormenta es necesario primero identificar claramente el tipo de tormenta, y delimitar la región de ocurrencia de la misma para asegurarse que la cuenca bajo estudio pertenece a esa región.

Se debe prestar atención también a los controles topográficos, si en el lugar de ocurrencia de la tormenta no existieran cadenas montañosas que obstaculizaran el flujo de aire húmedo desde el mar, no se debe transponer la tormenta a una región en que ese bloqueo ocurra.

#### Ajuste de Transposición por Humedad.

Se calculan primeramente los puntos de rocío máximos en la región en que ocurrió la tormenta, y en la nueva región a que ella será transpuesta. Luego ambos valores son convertidos a agua precipitable, y el factor de ajuste  $\Gamma_T$  está dado por :

$$\Gamma_T = \frac{W_M \text{ en la nueva región}}{W_M \text{ en la zona de la tormenta.}}$$

#### Ajuste Combinado Por Maximización y Humedad.

Dado que

$$\Gamma_M = \frac{W_M \text{ en la zona de tormenta}}{W_T}$$

y que

$$T_T = \frac{W_M \text{ en la nueva región}}{W_M \text{ en la zona de la tormenta}}$$

el ajuste combinado será :

$$T_M \cdot T_T = \frac{W_M \text{ en la nueva región}}{W_T}$$

Envolventes.

El uso de envolventes se considera un paso final necesario para estimar la PMP.

Esto se debe a que ninguna tormenta seguramente podría producir valores extremos de lluvia para todas las duraciones y tamaños de área.

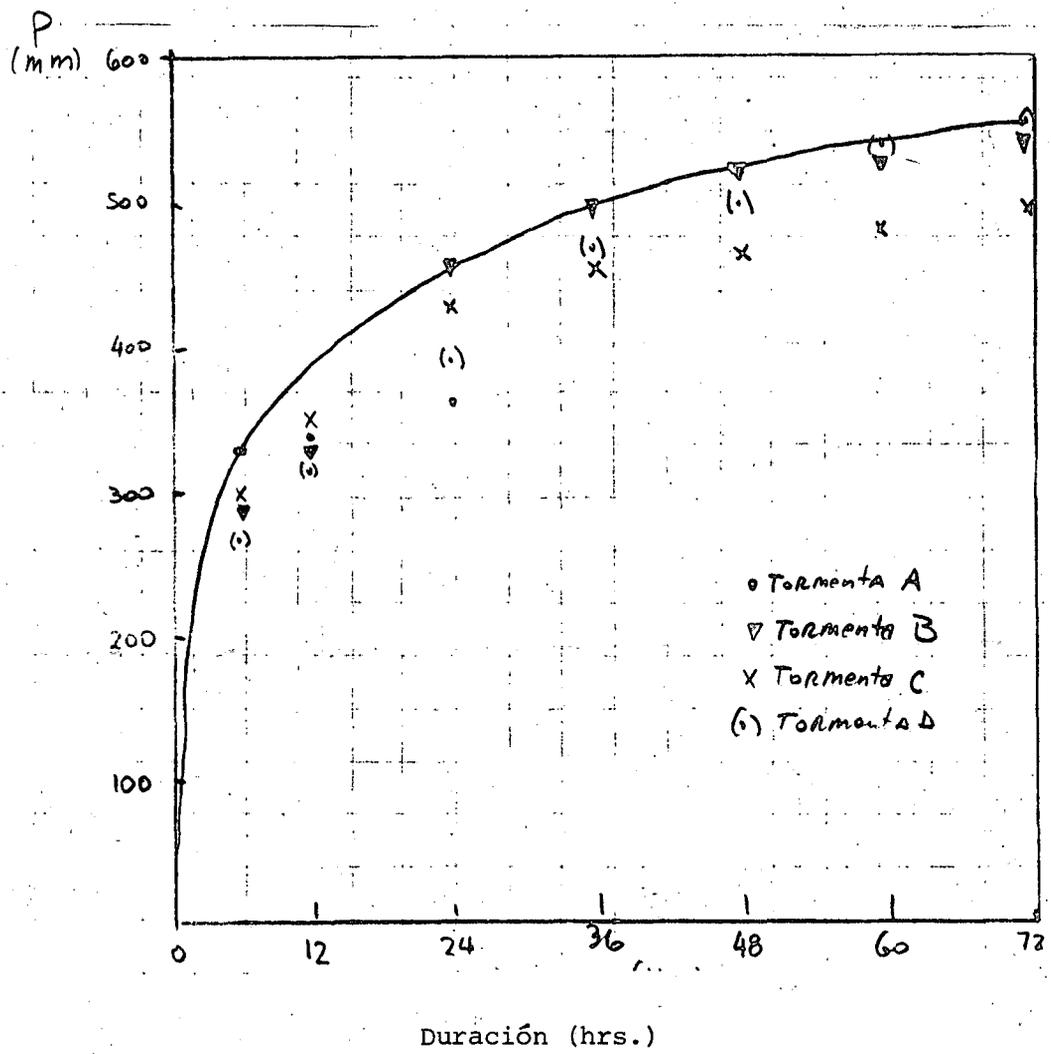
El trazado de una envolvente consiste en la selección de los valores más grandes de un grupo de datos.

Envolventes

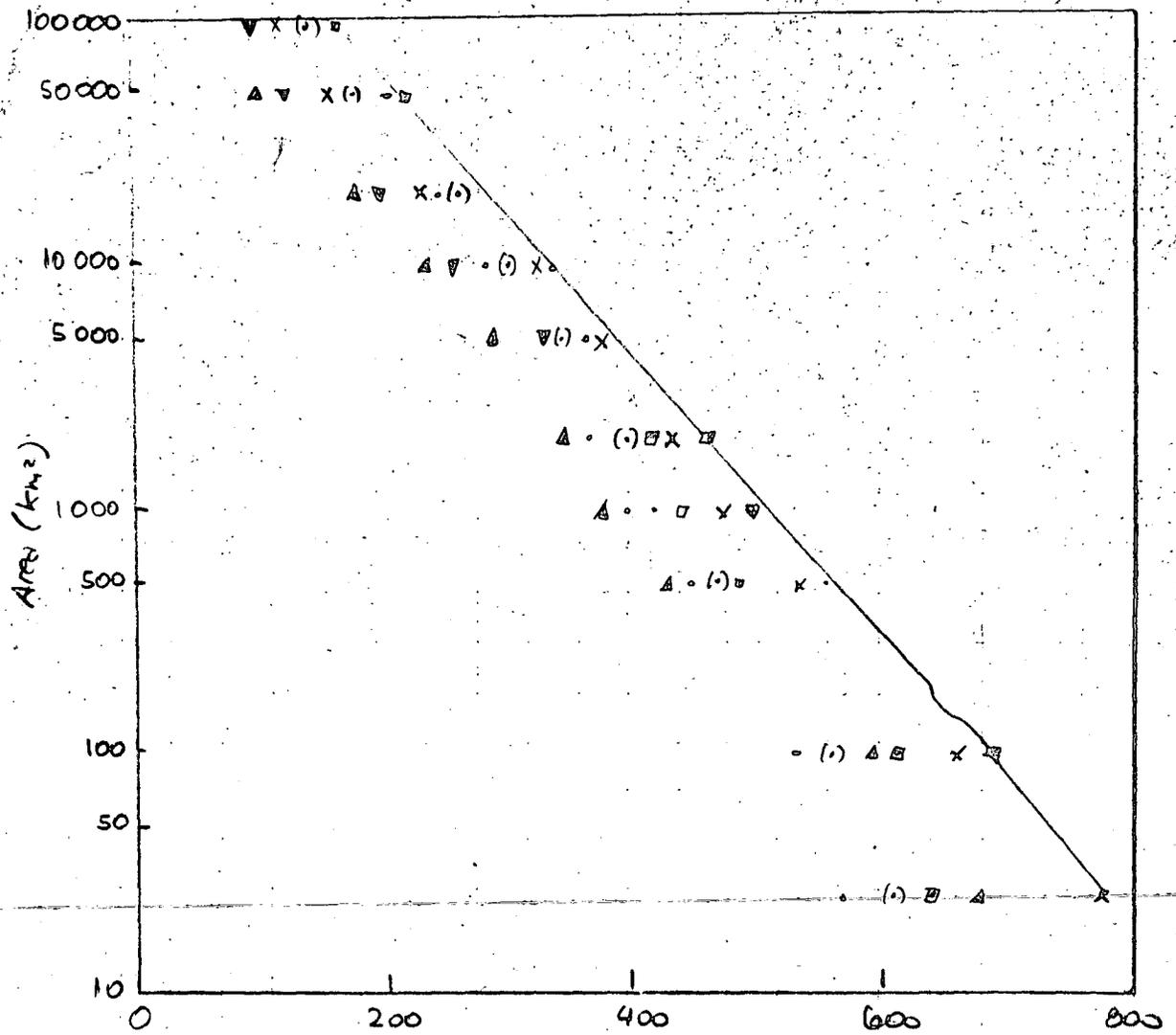
El uso de envolventes se considera un paso final necesario para estimar la PMP. Esto se debe a que ninguna tormenta seguramente podría producir valores extremos de lluvia para todas las duraciones y tamaños de área.

El trazado de un envoltente consiste en la selección de los valores más grandes de un grupo de datos.

Ejemplos:



Envoltente de Altura-Duración para 2000 Km<sup>2</sup>

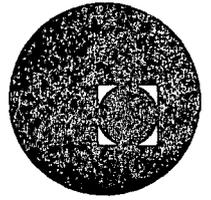


Hp (para 24 horas) mm

Esta envolvente es más general



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

P R E C I P I T A C I O N

ING. OMAR LUCERO

AGOSTO, 1978

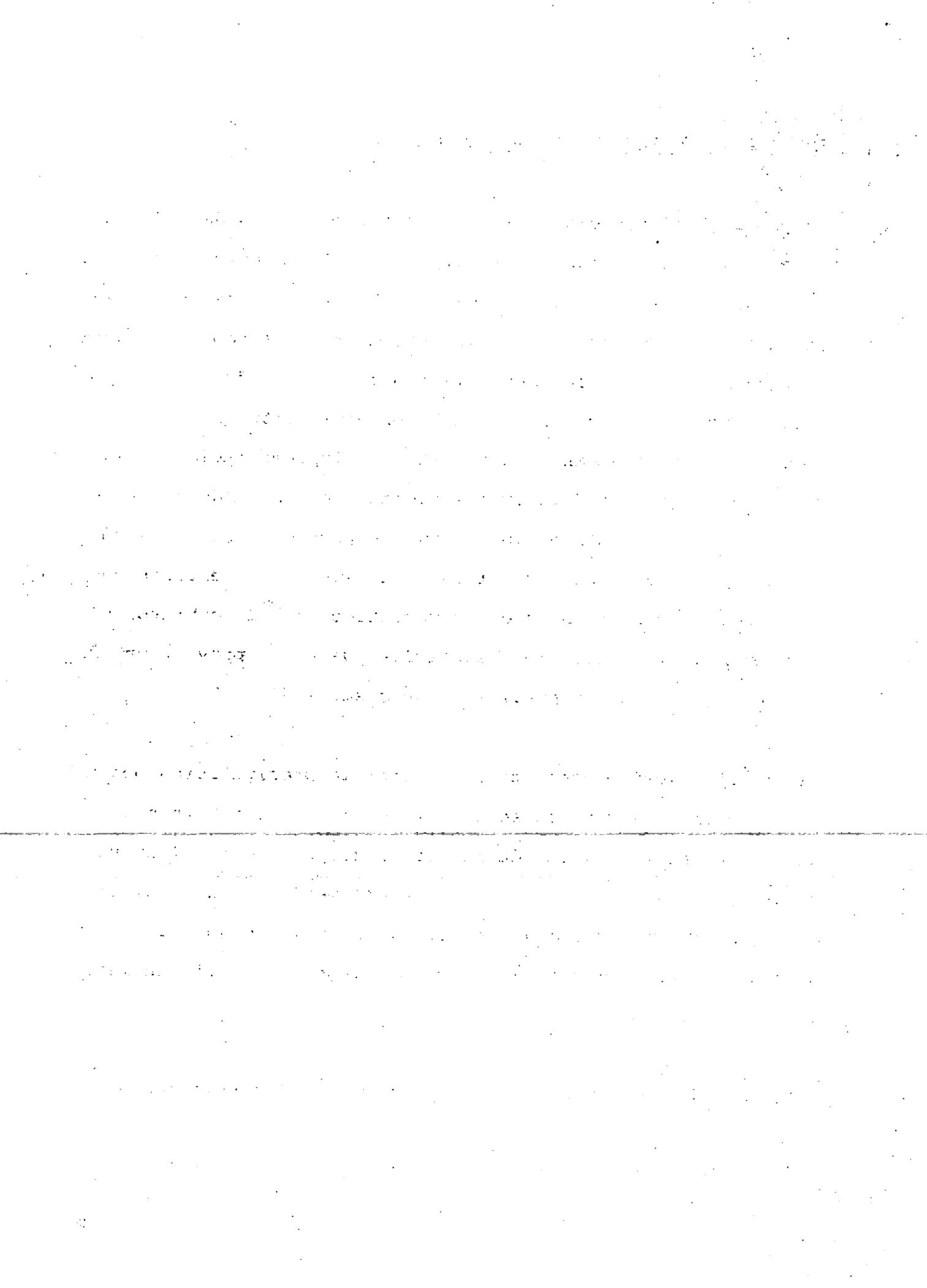


### 3.4.2 ERRORES EN LA PRECIPITACION AREAL MEDIA

La precipitación media constituye una información de primera necesidad en los estudios hidrológicos, sin embargo ella no se puede medir directamente. Para su determinación se debe apelar a los métodos de cálculo anteriormente señalados. Evidentemente si se colocase un enorme número de pluviómetros se podría conocer con gran exactitud la precipitación caída en una zona, pero de esta manera los costos de implementación de la red ascenderían a cifras excesivamente grandes. Además en no pocos casos una distribución masiva de pluviómetros no es posible debido a factores logísticos. Finalmente los errores que existen en la medición de otras variables del ciclo hidrológico volverían inciertos los beneficios que podrá proveer un exacto conocimiento de la precipitación areal media.

Cuando el objetivo consiste en obtener la precipitación media en una cuenca pequeña un solo pluviómetro puede ser funcionando durante algunos meses de lluvia, para poder determinar una recta de regresión entre el valor areal medio de la precipitación y la precipitación medida en el pluviómetro que ha de permanecer en forma permanente. De esta manera se obtienen mejores resultados (Amdrocho et al., 1968).

Según Linsley y Kohler (1951) cuando se utiliza únicamente un

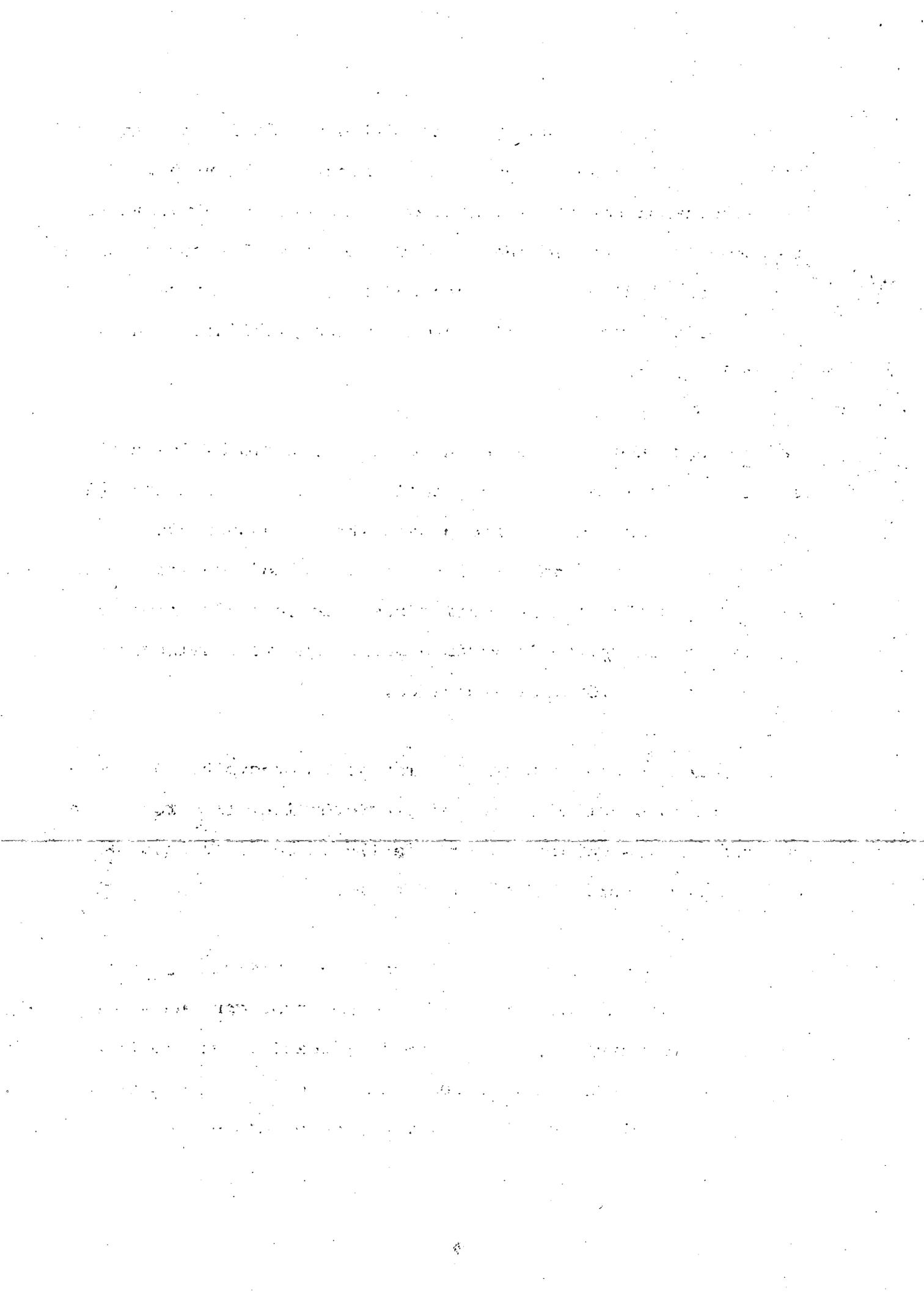


pluviómetro en una cuenca pequeña, del orden de 200 millas cuadradas, este debe ser colocado en el centro de la misma. Estudios efectuados por ellos indicaron que cuando el pluviómetro fué colocado en una esquina del área (de 10 millas por 22 millas) el error en el cálculo de la precipitación media era casi el doble del error cometido utilizando un único pluviómetro en el centro del área.

Una metodología de uso muy común para el estudio de los errores en el cálculo de la precipitación media, la constituye el trabajar con parte de una red pluviométrica, suponiendo que el valor provisto por toda la red es el "correcto"; de esa manera se estudian cuales son las variaciones que se producen en el valor de la precipitación media a medida que va disminuyendo el número de pluviómetros incluidos.

Debe destacarse que si bien el valor de la precipitación media depende de la densidad de la red pluviométrica, el error en la detección de los valores máximos de lluvia caída en la zona puede alcanzar porcentajes considerables.

Al respecto se han tabulado en la tabla No 3.4 (Nicks, 1965) los valores máximos de lluvia total observados con cuatro densidades pluviométricas, en una red de investigación que tenía un pluviómetro cada 9 millas cuadradas. Se observa que en este caso particular los valores máximos obtenidos con el total



de los pluviómetros, 158, no difieren sustancialmente de los valores obtenidos con una red de 80 pluviómetros, sin embargo reducir la densidad de la red a la cuarta parte, 40 pluviómetros, puede dar origen a diferencias que comienzan a ser significativas. Se observa en la tabla mencionada que los valores máximos de lluvia puntual observados con una red de 20 instrumentos tienen poca relación con los que ocurrieron en la cuenca.

Nicks señala, sin embargo, que el total de 158 pluviómetros en la red, podría ser disminuido a 10 sin desmedro en el cálculo de la precipitación media.

En un estudio sobre redes pluviométricas, desarrollado por Hendrick; Comer (1970), también se analizaron las diferencias obtenidas en la precipitación media y en los valores máximos puntuales registrados, en una cuenca de 43 millas cuadradas, de acuerdo a la densidad pluviométrica. Estos resultados, graficados en la Figura No 3.14, muestran nuevamente que la detección de valores máximos es muy sensible a la densidad de la red pluviométrica, no ocurriendo así para los valores de lluvia media en el área (trazo superior de la figura).

#### CONTROL, AJUSTE DE DATOS

Uno de los primeros problemas que encuentra el hidrólogo al iniciar un estudio, es que muy posiblemente los datos pluvio-

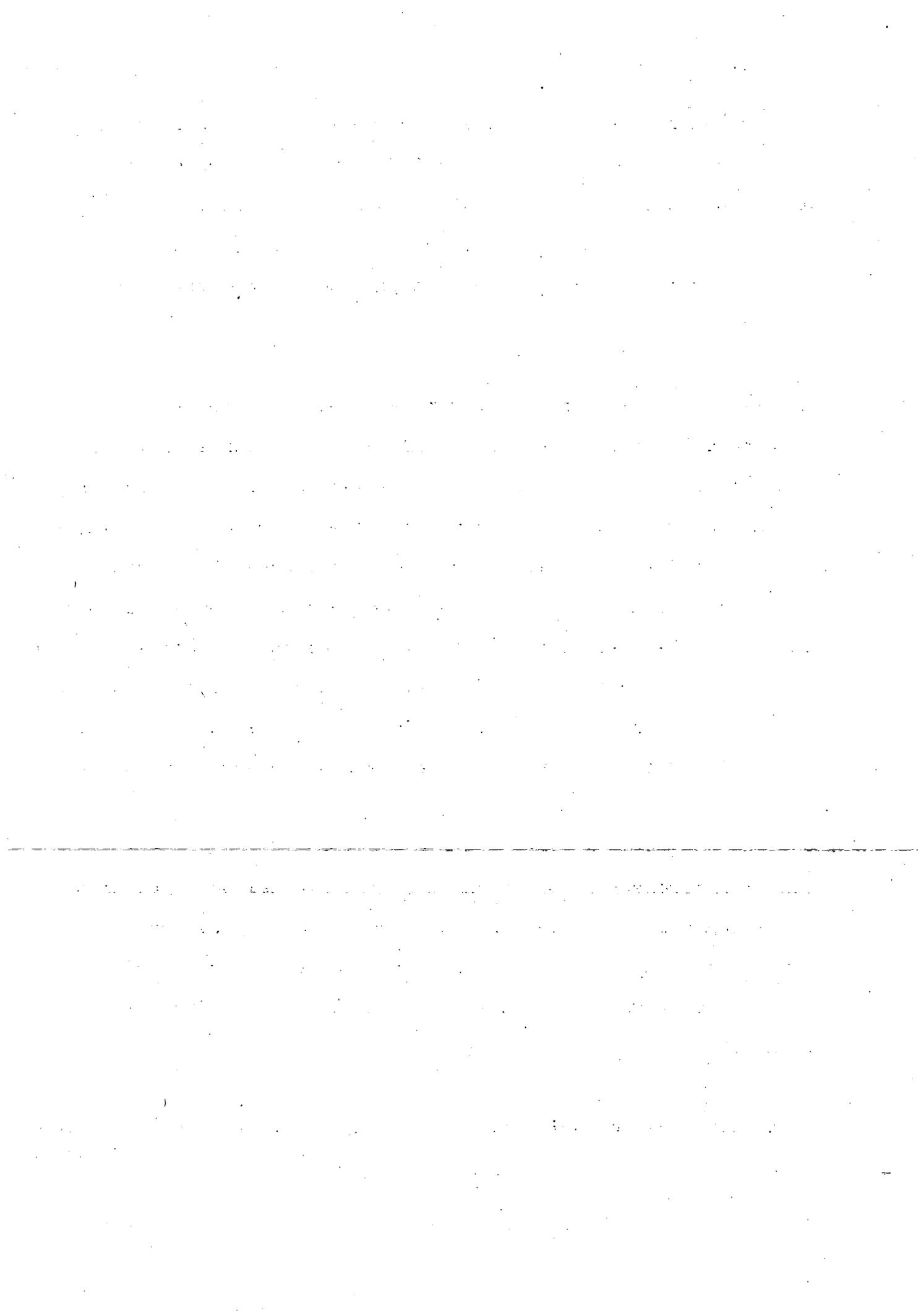


métricos existentes no estén exentos de error. El procedimiento por el cual estos errores se defectan y corrigen se denomina "depuración". Si el estudio hidrológico incluye la implementación de una red pluviométrica en una cuenca, la necesidad de la depuración de la información pluviométrica obtenida es de rigor.

Las razones que obligan a depurar la información pertenecen a dos grupos: errores debidos al observador y errores debido al instrumento. Entre los errores provenientes del observador están las equivocaciones producidas en la medición de la lluvia, registro incorrecto de la fecha en que se produjo la lluvia o lectura tardía del volumen caído (frecuentemente no se efectúan las mediciones los fines de semana) con los consiguientes inconvenientes de evaporación parcial del agua dentro del pluviómetro, y la incorrecta atribución del volumen caído, a un solo día cuando pudo haber provenido de dos o más días seguidos con lluvia.

Entre los errores que provienen del instrumental se encuentran los causados por pérdidas debidas a roturas del pluviómetro, obstrucciones en el embudo, mal funcionamiento en el caso del pluviógrafo, registro incorrecto de la fecha en que se colocó la faja.

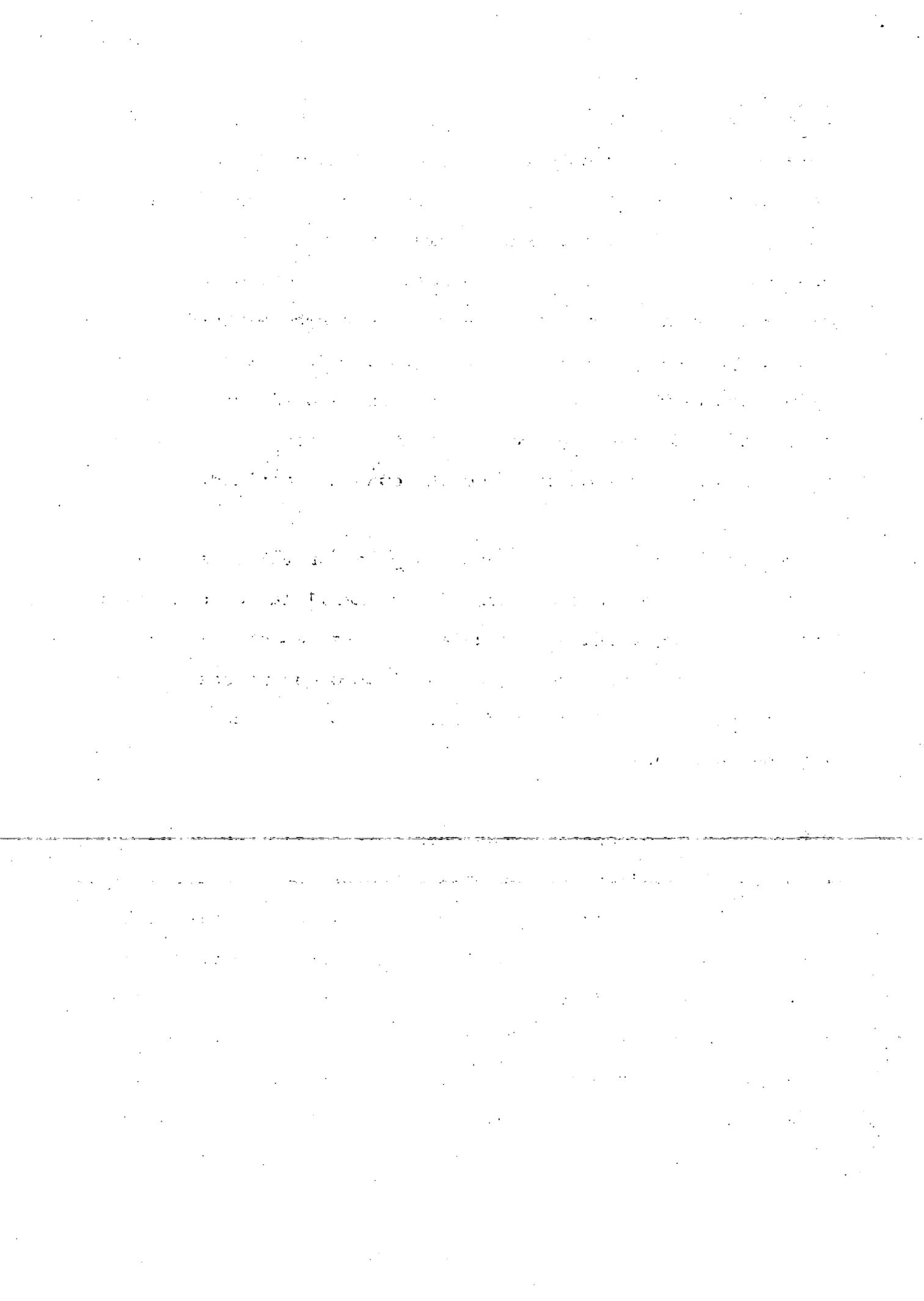
Al depurar la información pluviométrica, el primer punto a considera



es el control de la fecha de la precipitación. Este control rara vez se puede efectuar con toda la información meteorológica a la vista (mapas sinópticos, fotos de satélite), puesto que la depuración de la información pluviométrica siempre debe ser un compromiso entre el objetivo ideal de un control detallado al máximo de la información, y el costo y tiempo empleados. Además siempre debe tenerse presente que el dato que no midió se ha perdido definitivamente. Lo más que se puede obtener es una estimación del mismo, por consiguiente no tiene justificación aumentar los costos en busca de una dudosa exactitud.

Una metodología sencilla y adecuada para controlar la fecha, de la lluvia, consiste en escribir en planillas encolumnadas, los valores registrados de lluvia en todas las estaciones de la cuenca. De esta manera los días lluviosos aparecerán como franjas escritas. Véase la figura No 3.15 conjuntamente con el mapa de la cuenca.

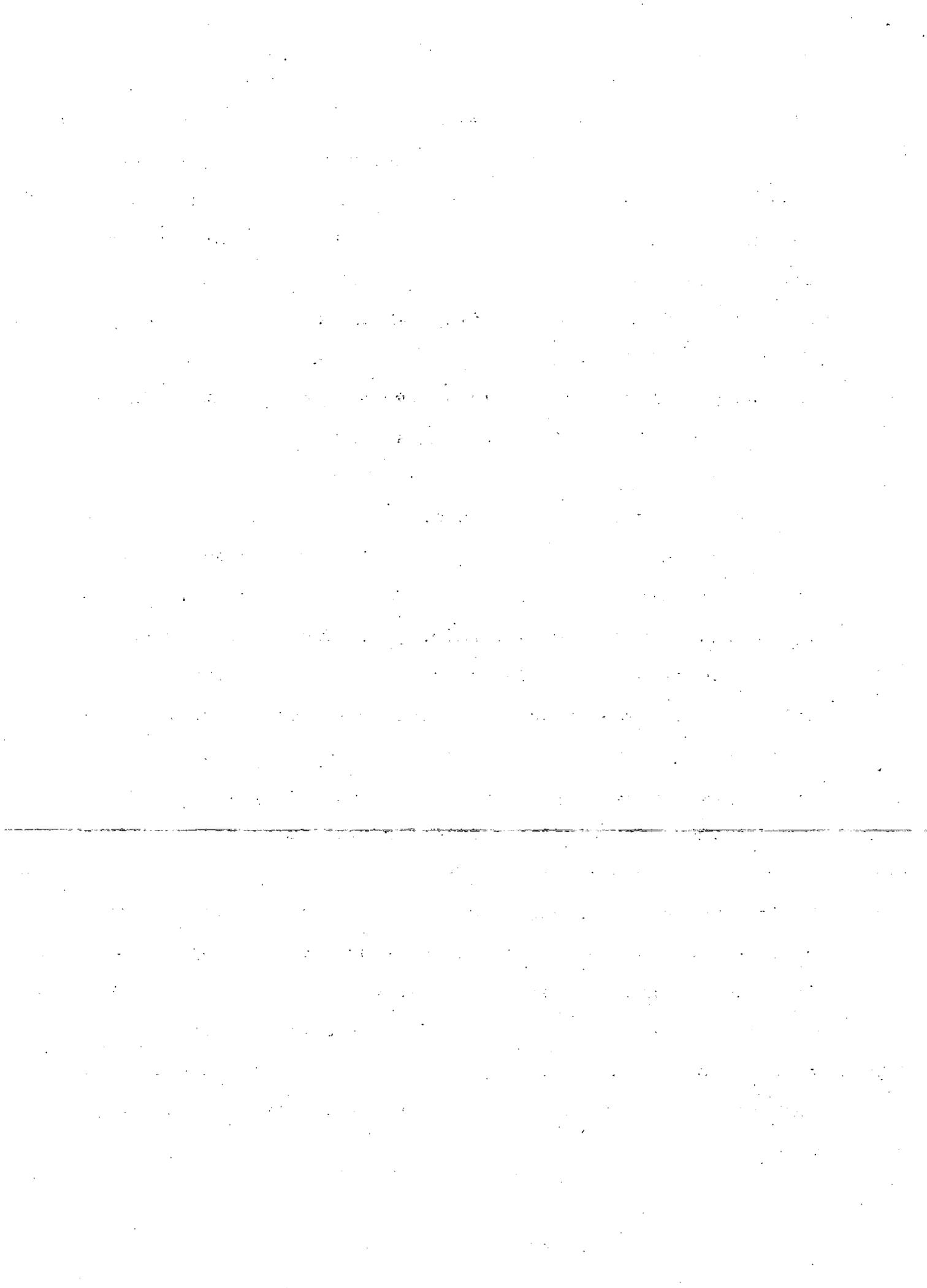
Sin embargo se presentan dudas cuando la precipitación no ocurrió por el pasaje de una extensa perturbación sinóptica, sino que fué producida por cumulonimbus producidos en forma aislada. Si las tormentas que se presentaron en la zona fueron escasas en relación al tamaño de la cuenca, puede existir una marcada indefinición respecto de sí sobre un puesto pluviométrico no llovió o si llovió pero la cantidad de lluvia caída no fué anotada. En estos casos se puede pensar que la utilización de mapas sinópticos puede aumentar la información disponible para



tomas una decisión sobre bases más seguras, sin embargo no siempre esto es cierto y además el recurrir a los mapas sinópticos eleva considerablemente los tiempos y costos de la depuración. Disponer de observaciones de ecos de radar meteorológico es altamente efectivo para saber si llovió o no sobre una región, pero además de ser raro la disponibilidad del mismo, la elaboración de la información del radar aumentaría los costos de depuración del dato de lluvia a niveles que en la mayoría de los estudios hidrológicos no se justifican.

Si existen pluviógrafos dentro de la cuenca, ellos pueden ayudar de manera efectiva al control de la fecha en que ocurrió la precipitación. En general las estaciones meteorológicas de la categoría tienen pluviógrafo, y usualmente son puestas al cuidado de personal elegido bajo criterio de idoneidad más estrictos. Por esas razones al efectuar el control de la fecha de lluvia normalmente se considera correcta a la información proveniente de las estaciones meteorológicas de la categoría a menos que existan razones fundadas para dudar de la calidad.

Un inconveniente frecuente es descubrir que para un período de lluvia de más de un día, el observador efectuó una única lectura, generalmente el último día de lluvia. Esta situación será evidente por el alto valor de lluvia registrado, relativo a los otros puestos pluviométricos, además si se acumulan los valores de precipitación de puestos pluviométricos vecinos ge-



neralmente se obtienen similares órdenes de magnitud de lluvia caída. En este caso se debe prorrotar la cantidad acumulada e incorrectamente registrada en el último día; una manera simple de hacerlo es efectuar el prorroteo en los otros días de manera proporcional al porcentaje diario del total de lluvia caída en un puesto vecino durante toda la secuencia lluviosa.

Una vez controlada la fecha se debe proceder al control de las cantidades registradas. A menos que los valores registrados en un pluviómetro sean anormalmente más grandes que los registrados en otros más cercanos, no es una tarea obvia y evidente decidir cuando un dato es o no es correcto.

El control de las magnitudes de lluvia caída registradas, se tiene que basar en un minucioso conocimiento de las características temporales y espaciales de la lluvia. Cabe señalar que ese conocimiento sólo se posee en unos pocos países, porque para obtenerlo hacen falta buenas redes, y también redes observacionales construídas especialmente para la investigación.

A pesar de lo anteriormente expuesto, no se está tampoco totalmente inerte frente al problema de estimación de la veracidad de un dato de lluvia. Por supuesto que cuando el conocimiento de las características de la distribución de la lluvia es pobre y la densidad de la red es baja, disminuye la confiabilidad en los resultados obtenidos, a pesar de que es necesario

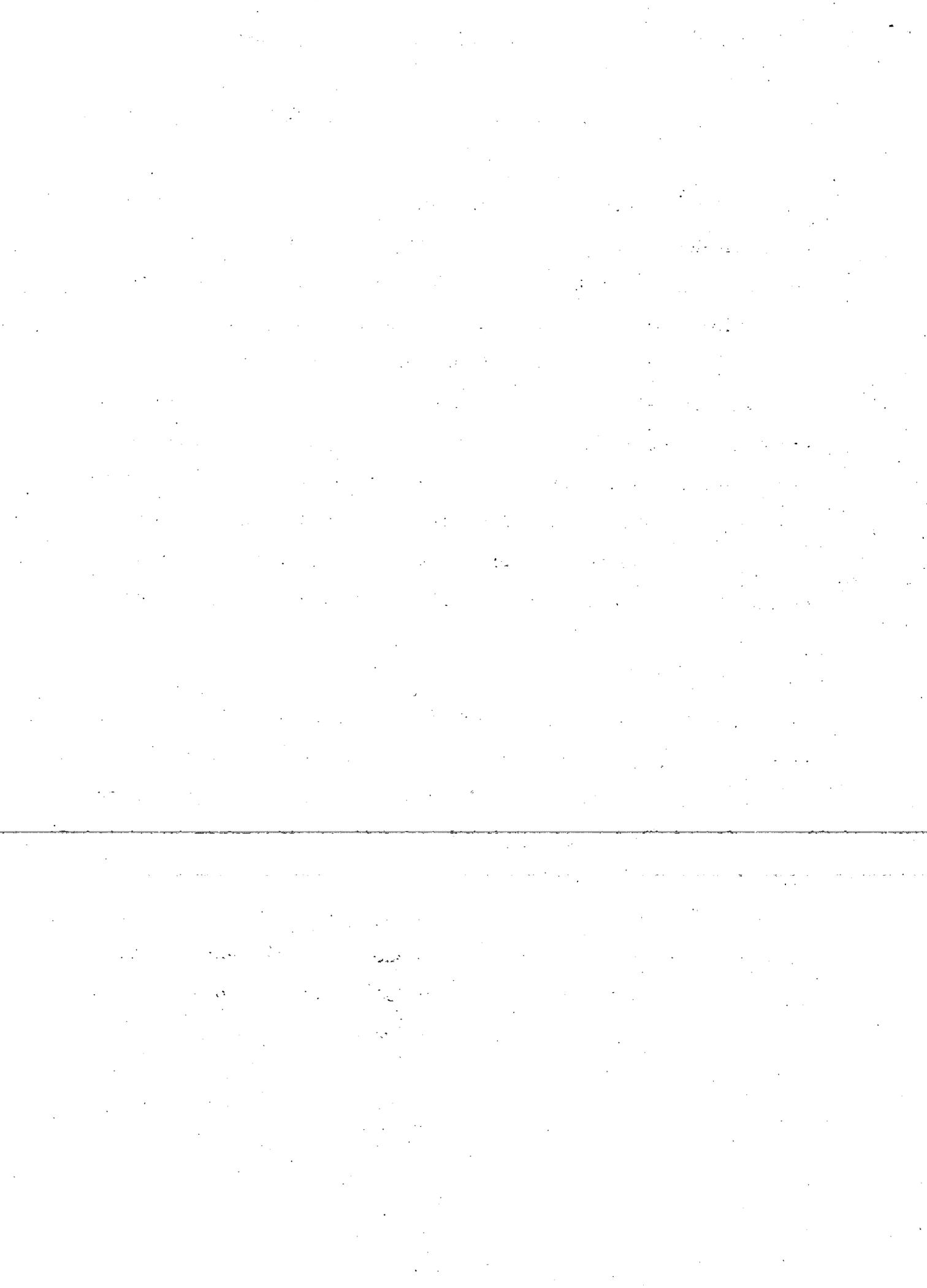


aumentar el grado de sofisticación de las técnicas matemáticas.

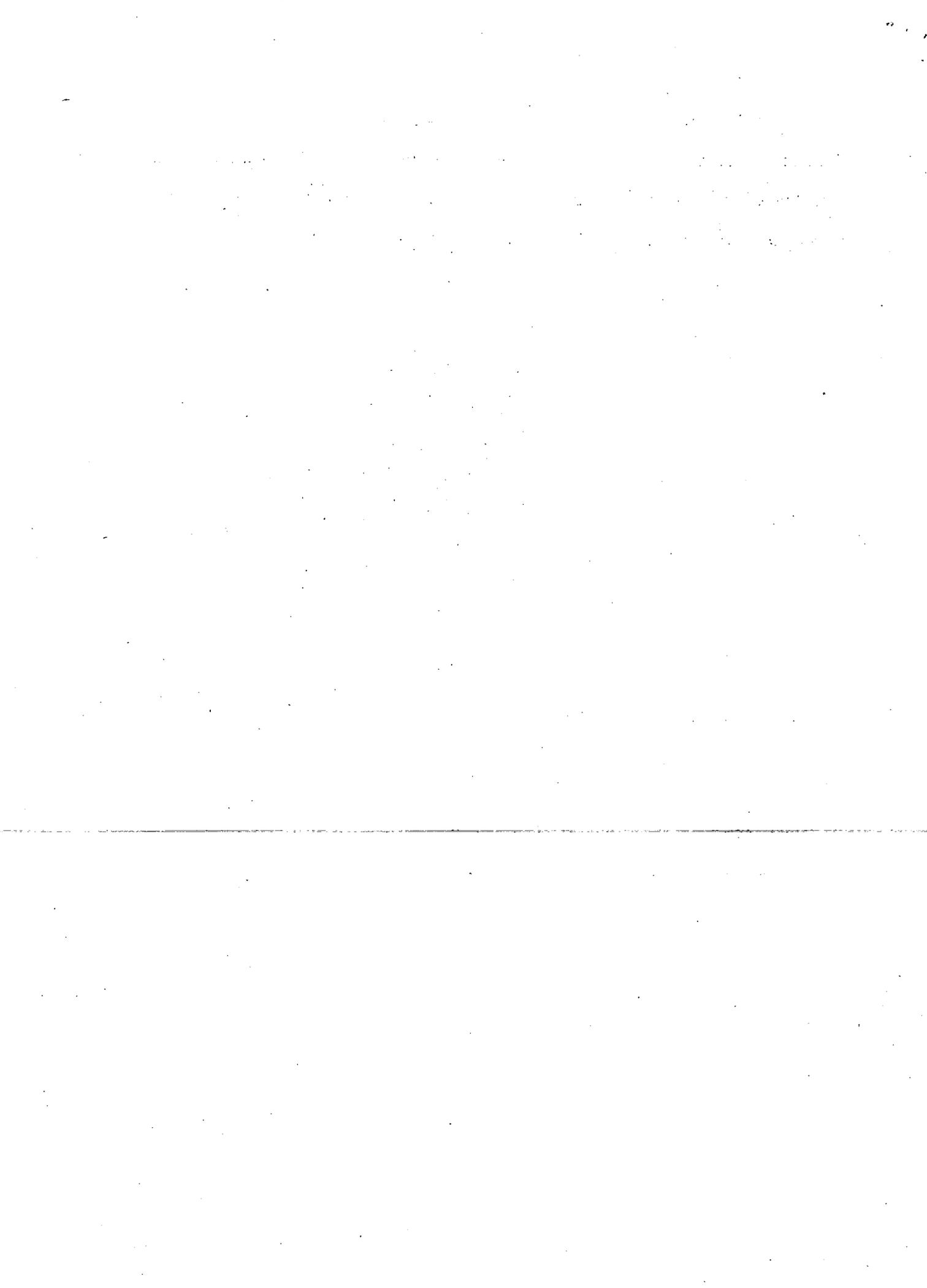
Los métodos de control de cantidad de lluvia caída se pueden di  
vidir en dos grandes ramas: Métodos de control basados en la  
consistencia del dato con el campo de lluvia, es decir consis-  
tencia externa a la serie de un pluviómetro, y los métodos ba-  
sados en el grado de consistencia que tiene el valor observado,  
con referencia a los datos que integran la serie del puesto plu-  
viométrico, es decir consistencia interna. Este último método,  
basado en las propiedades de la serie de datos observados en el  
puesto pluviométrico requiere cautela en su uso; a pesar de  
ello con frecuencia hay que apelar a él, puesto que el pluvió-  
metro más cercano a veces se halla tan lejos que poco apoyo pue-  
de dar.

Cabe señalar que las dificultades aumentan a medida que dismi-  
nuye el período de observación. Es más fácil depurar datos de  
lluvia anual que datos de lluvia diaria, debido a que la confi-  
guración del campo pluviométrico anual es más suave que el cam-  
po pluviométrico diario.

Un ejemplo de método basado en la consistencia externa es el  
uso de mapas isohietales para descubrir valores que no siguen  
las características generales del campo pluviométrico.



Los criterios de aceptación o rechazo de un dato en base a la consistencia interna, es decir la consistencia del dato referida a toda la serie observada, en esencia se basan en la probabilidad de aparecer que tiene el valor registrado.



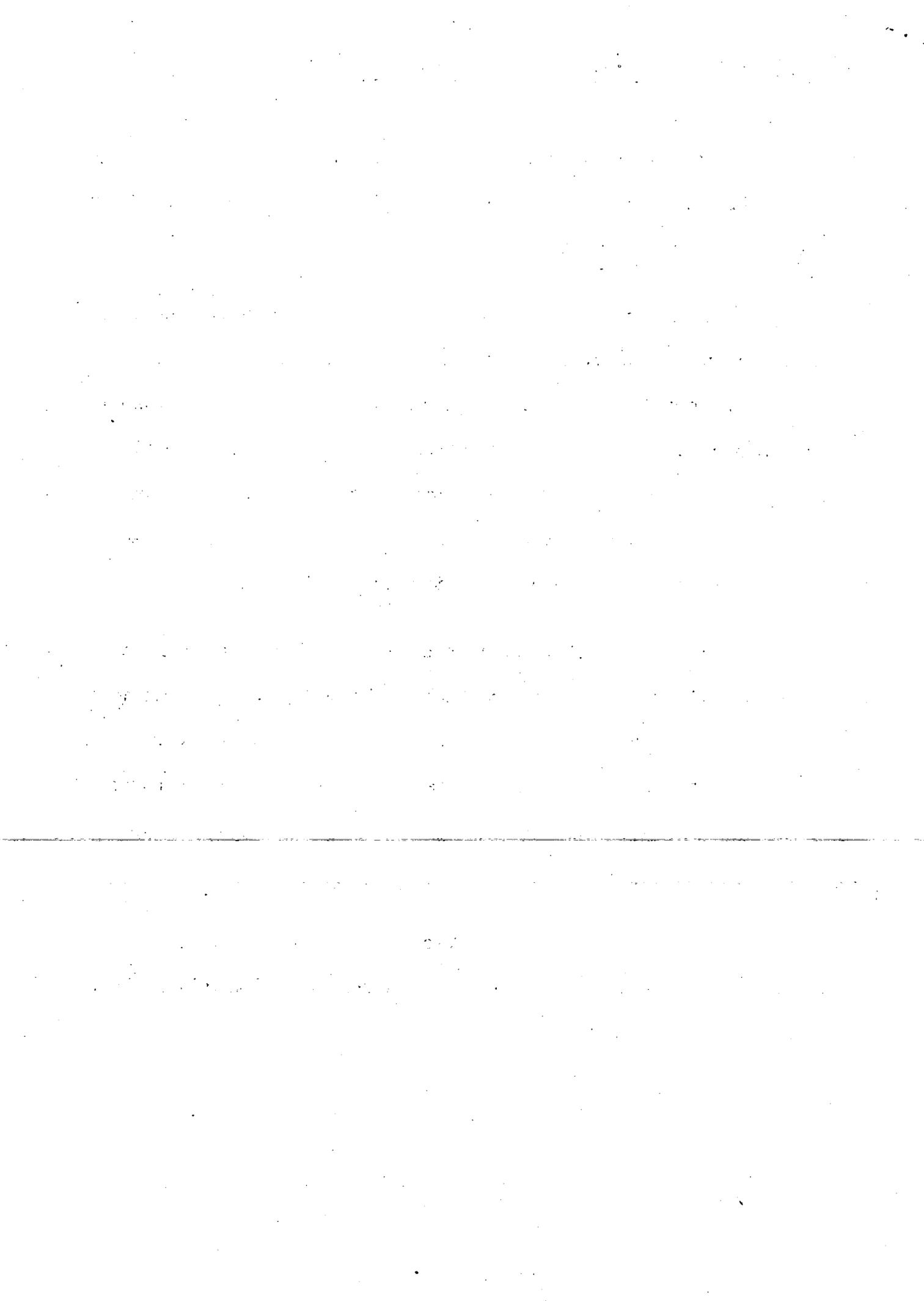
## Frecuencia de Chaparrones de Determinada Duración

Las curvas de masa de tormentas fuertes, muestran chaparrones intensos que pueden tener duraciones de cinco minutos y llegar hasta la duración total de la tormenta.

Para una determinada duración, el chaparrón más intenso es el que se considera el máximo de esa tormenta. A partir de todas las tormentas en un año se pueden obtener el chaparrón máximo anual, para la duración especificada, o todos los chaparrones, independientes entre sí, que superarán un valor base. De esta manera al analizar todos los años de registro se puede obtener una serie de máximo anuales, primer caso, o una serie de duración parcial, segundo caso.

El análisis estadístico de las series de duración parcial y de las series de máximos anuales producen valores diferentes para tiempos de retorno pequeño, aunque convergen para tiempos de retorno mayores de 10 años. En general, es más conveniente usar la serie de máximos anuales, para el cálculo de eventos extremos que excedan un tiempo de recurrencia de 10 años.

En EE.UU. de América han sido calculados los coeficientes de conversión para pasar de los valores de una serie anual a los valores de una serie de duración parcial y viceversa:



Coefficientes de conversión entre series de máx. anuales, duración -  
parcial.

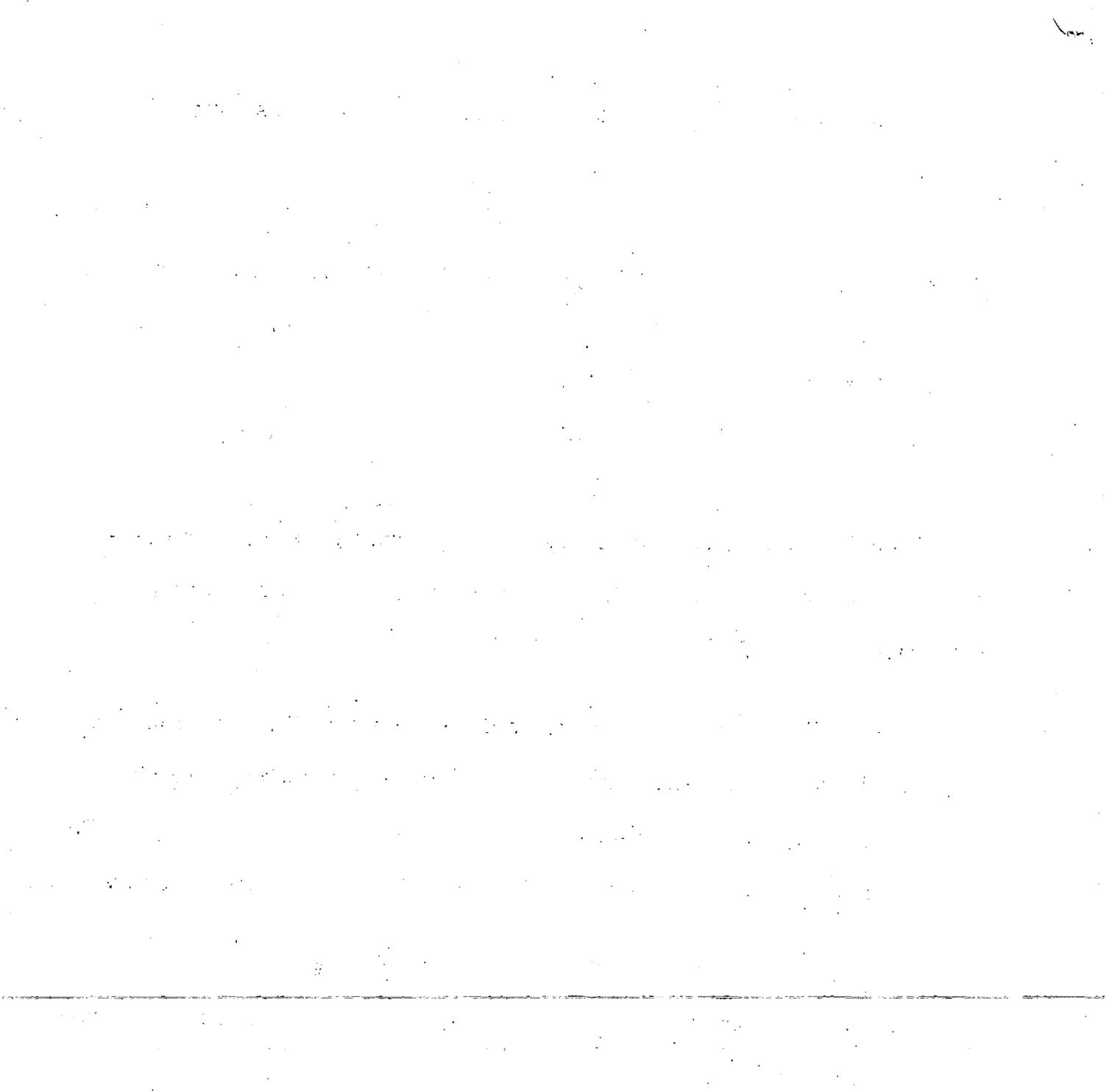
Período de retorno	Anual <u>a</u> duración parcial	Duración parcial a anual
1 en 2 años	1.14	0.88
1 en 5 años	1.04	0.96
1 en 10 años	1.01	0.99

El análisis de las curvas de masa de los chaparrones muestra que --  
cuanto más corta la duración del mismo, mayor es la intensidad de la pre-  
cipitación.

Si se grafican los valores de intensidad de lluvia en función de la dura-  
ción del chaparrón, se obtienen una serie de curvas de forma hiperbólica, -  
cada una de ellas correspondiente a un determinado tiempo de retorno. Es  
ta relación se puede representar por una ecuación de la siguiente forma:

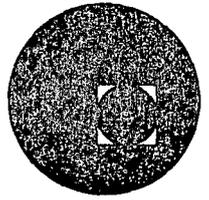
$$i = \frac{c T_r}{(D + b)^n}$$

donde c, b y n son constantes, de D es la duración (en minutos) del chaparrón  
y  $T_r$  el tiempo de retorno.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam

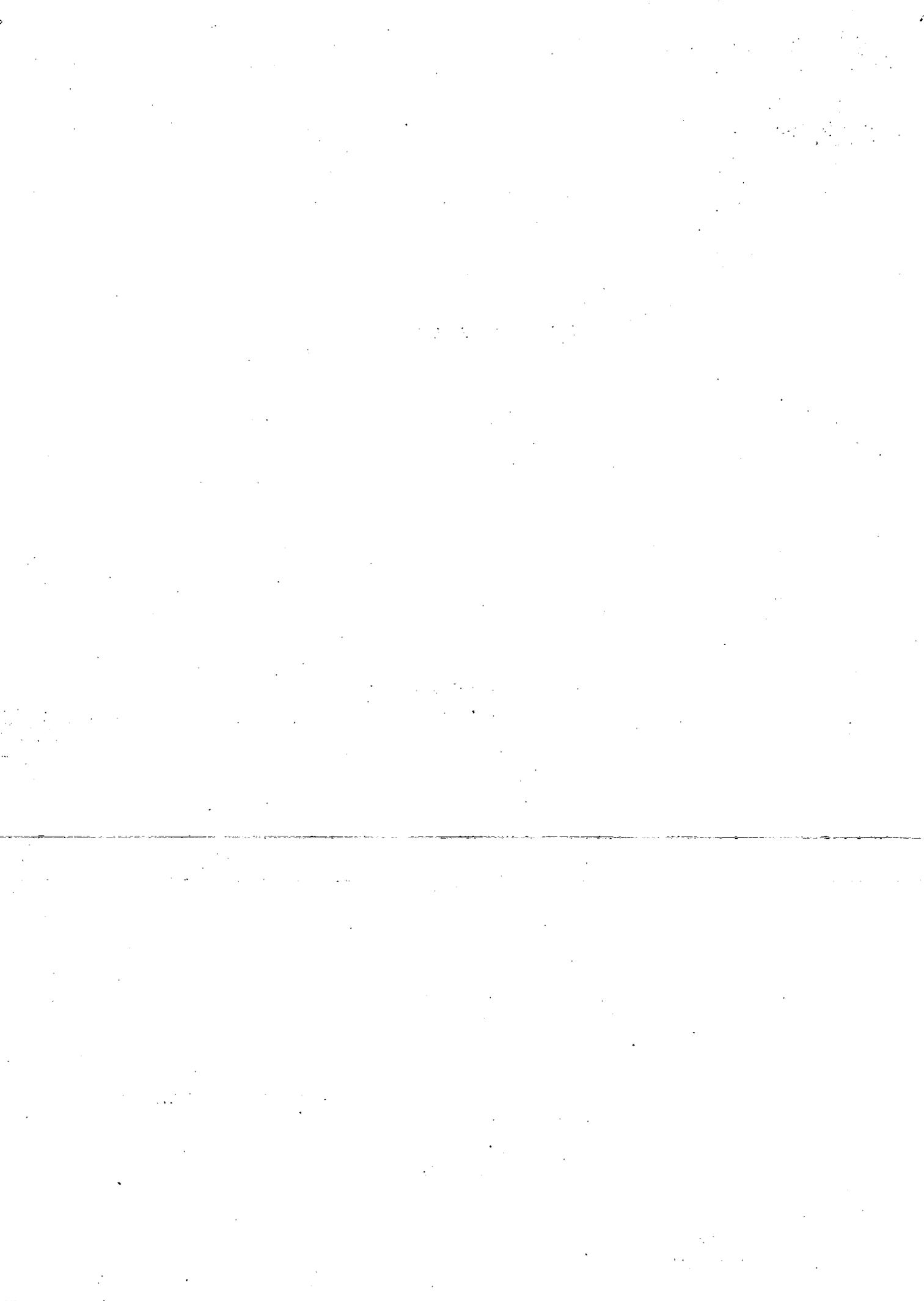


HIDROLOGIA SUPERFICIAL

EVAPORACION Y TRANSPIRACION

ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA

AGOSTO, 1978



## 6. EVAPORACION Y TRANSPIRACION

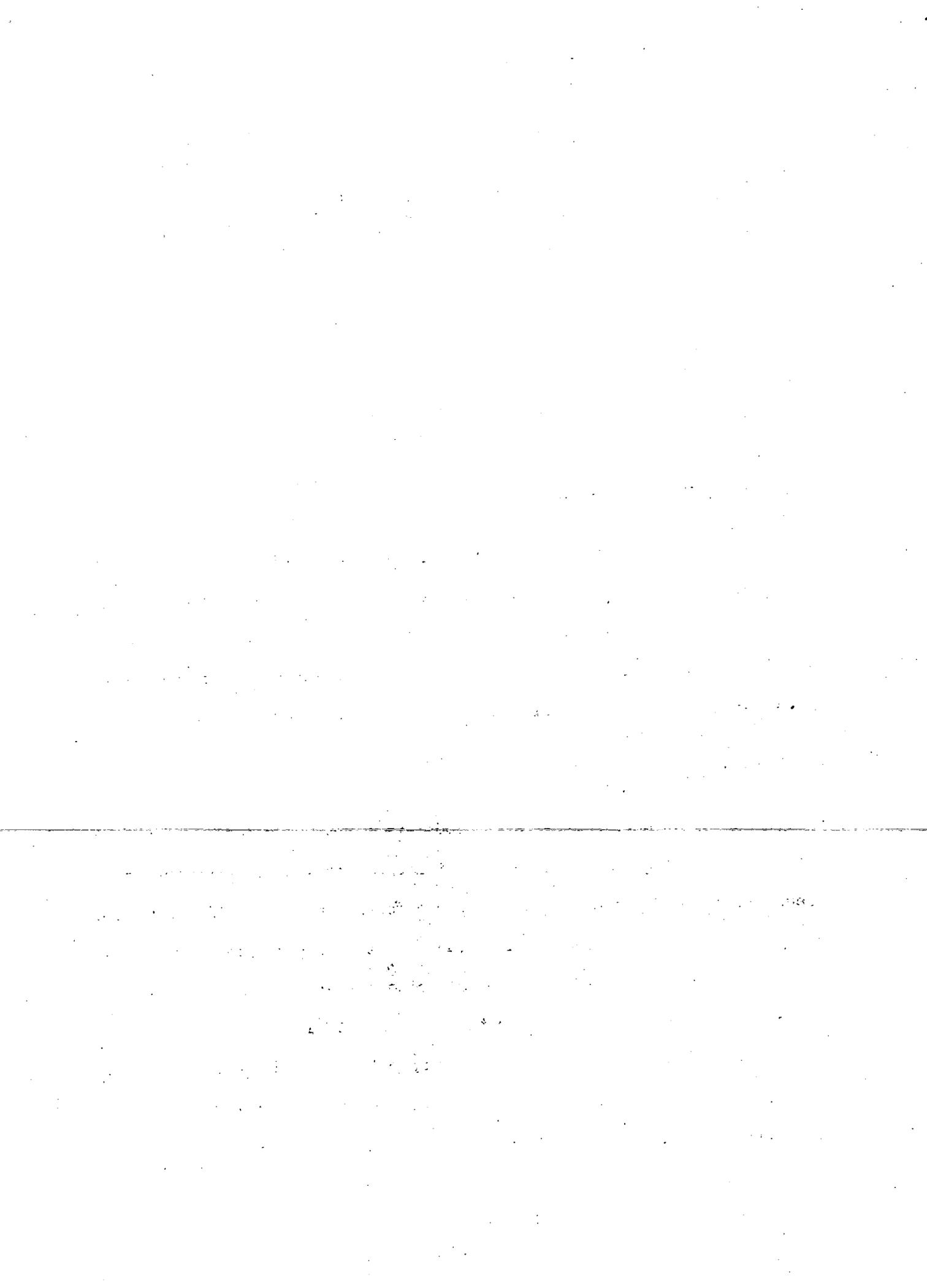
En este capítulo se estudia una componente más del ciclo hidrológico. Se analizan la evaporación, la transpiración y la evapotranspiración que es la conjunción de las dos, lo cual es de importancia fundamental en el aprovechamiento del agua. Se indican los factores que intervienen en estos procesos, así como la forma de medirlos y determinarlos.

### 6.1 Naturaleza del proceso

El agua regresa a la atmósfera a través de las acciones combinadas de evaporación, sublimación y transpiración. Estas acciones son esencialmente modificaciones de un solo proceso. La evaporación es el proceso por el cual las moléculas del agua, en la superficie de un recipiente o en la tierra húmeda, adquieren suficiente energía cinética debido a la radiación solar, y pasan del estado líquido al gaseoso.

Un aumento en la temperatura del agua origina una mayor evaporación, ya que se incrementa la velocidad de las moléculas del agua y disminuye la tensión superficial.

Per - 1



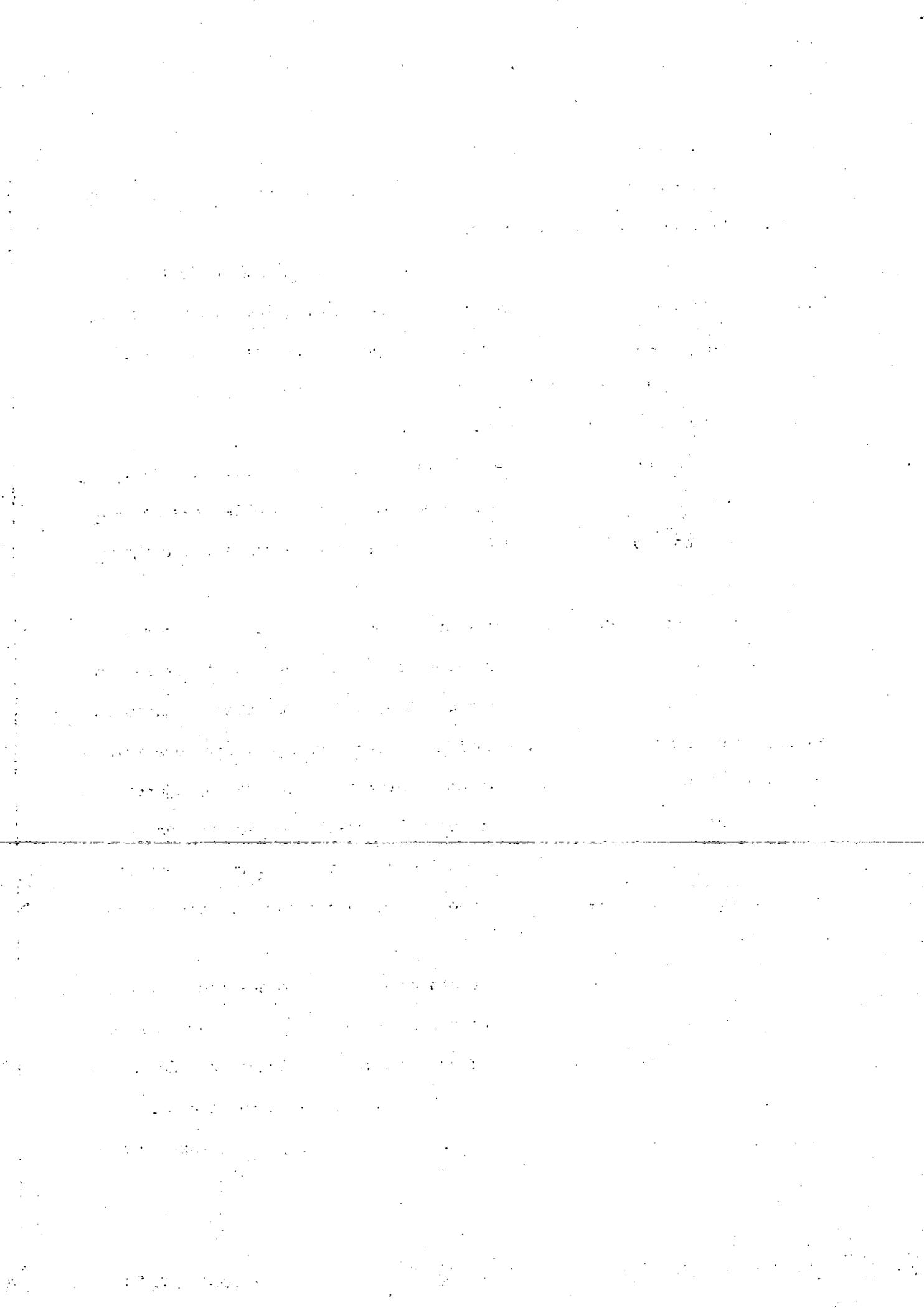
La sublimación difiere de la evaporación solo en que las moléculas del agua pasan directamente del estado sólido al gaseoso. La transpiración es el proceso por el cual el agua absorbida por las plantas regresa a la atmósfera en forma de vapor.

Durante la evaporación, el movimiento de las moléculas que escapan de la superficie del agua produce una presión, denominada presión de vapor. Esta es una presión parcial del vapor de agua en la atmósfera, ya que en una mezcla de gases, cada gas ejerce una presión parcial, la cual es independiente de la de otros gases.

Si en un espacio cerrado se considera a  $p$  como la presión total del aire húmedo contenido en ese espacio, y a  $p'$  como la presión debida al aire seco, la diferencia  $e = p - p'$  será la presión de vapor ejercida por el vapor de agua.

Para propósitos prácticos, la máxima cantidad de vapor de agua que puede existir en cualquier espacio dado es una función de la temperatura, y es independiente de la coexistencia de otros gases. Cuando un espacio dado contiene la máxima cantidad de vapor de agua, para una temperatura dada, se dice que el espacio está saturado, y la presión ejercida por el vapor de agua en ese medio se denomina presión de saturación. La temperatura a la cual se satura un espacio dado se conoce con el nombre de punto de rocío. Cualquier disminución de esa temperatura origina la condensación.

Tratando de ver el proceso en conjunto, puede considerarse que parte del vapor de agua liberado por evaporación de la superficie del agua, puede retornar a esta, una vez que se condensa. Cuando el número de moléculas que escapan de la superficie libre del agua es igual al número de moléculas que retorna a esta, el espacio se satura y se alcanza un equi



librio entre la presión ejercida por las moléculas que escapan y la presión atmosférica. Esto implica que la evaporación es mayor que la condensación si el aire sobre la superficie del agua no está saturado.

## 6.2 Factores que afectan a la evaporación

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que la evaporación está relacionada con la diferencia entre la presión de vapor de la masa de agua y la existente en el aire sobre la superficie de la misma, temperaturas del aire y agua, velocidad del viento, presión atmosférica, y calidad del agua.

### 6.2.1 Diferencias en la presión de vapor

Si se considera que  $e_w$  es la presión de vapor del agua, y  $e_a$  la presión de vapor del aire sobre la superficie del agua, se puede decir que la evaporación es proporcional a  $e_w - e_a$ .

Cuando el aire es más caliente que el agua, su presión de saturación  $e_s$  es mayor que la de la superficie del agua ( $e_s > e_w$ ), y la evaporación continúa hasta que  $e_a = e_w$ , lo cual ocurrirá antes de que el aire llegue a saturarse. Sin embargo, si el aire es más frío que el agua, se tendrá que  $e_s < e_w$  y la evaporación continuará hasta que  $e_a = e_w$ , lo cual ocurrirá antes de que el aire llegue a saturarse. Además, si el aire es más frío que el agua, se tendrá que  $e_s < e_w$  y cuando se alcance el equilibrio, o sea cuando  $e_a = e_w$ , existirá un estado de sobresaturación ( $e_a > e_s$ ), o la condensación ocurrirá en el aire.



## 6.2.2 Temperatura

Este aspecto y el anterior están íntimamente relacionados ya que la presión de vapor depende de la temperatura. La cantidad de emisión de moléculas de la masa de agua está en función de su temperatura, ya que a mayor temperatura, mayor será la energía molecular liberada. La evaporación no depende de la temperatura de la superficie del agua, sino del resultado directo del incremento en la presión del vapor con la temperatura.

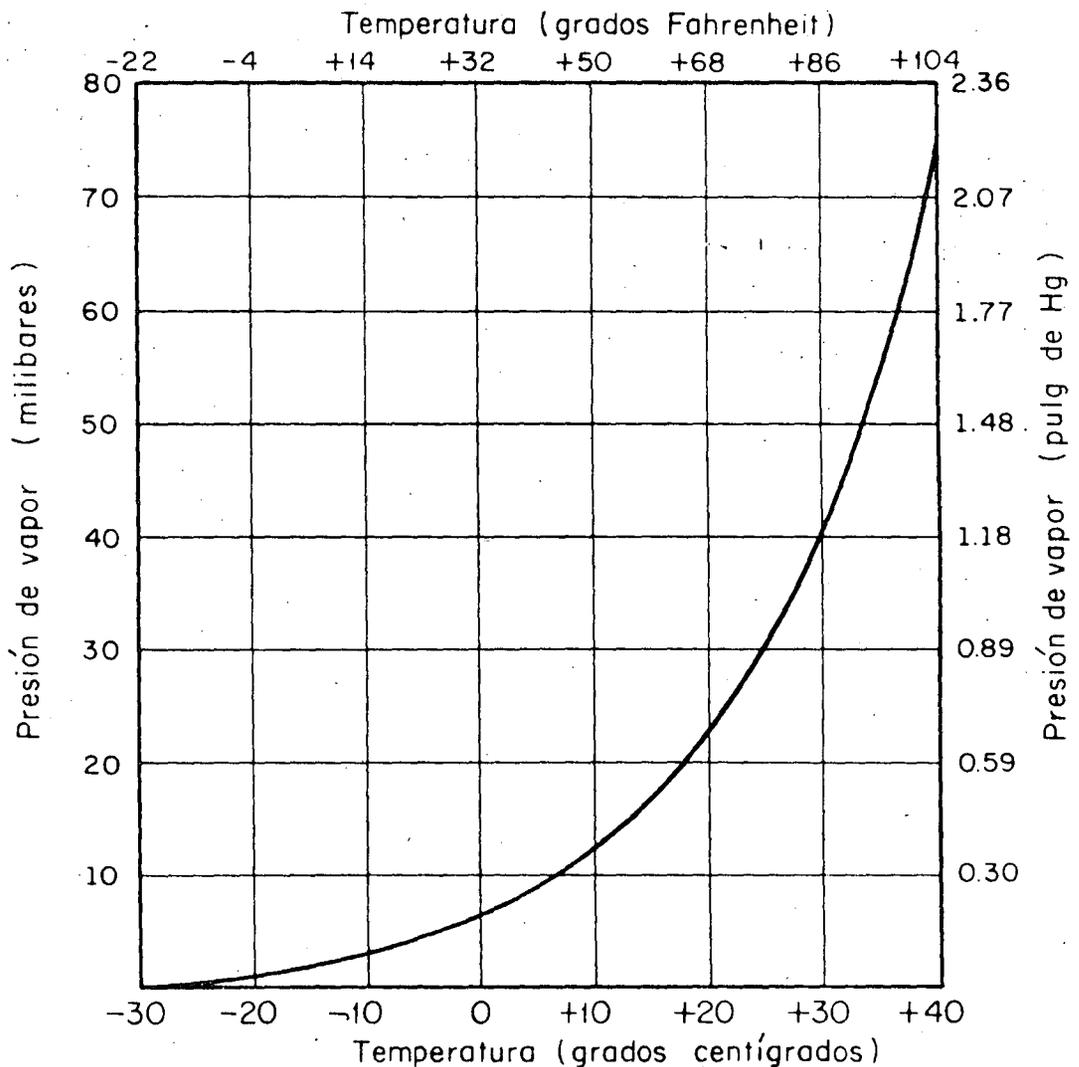
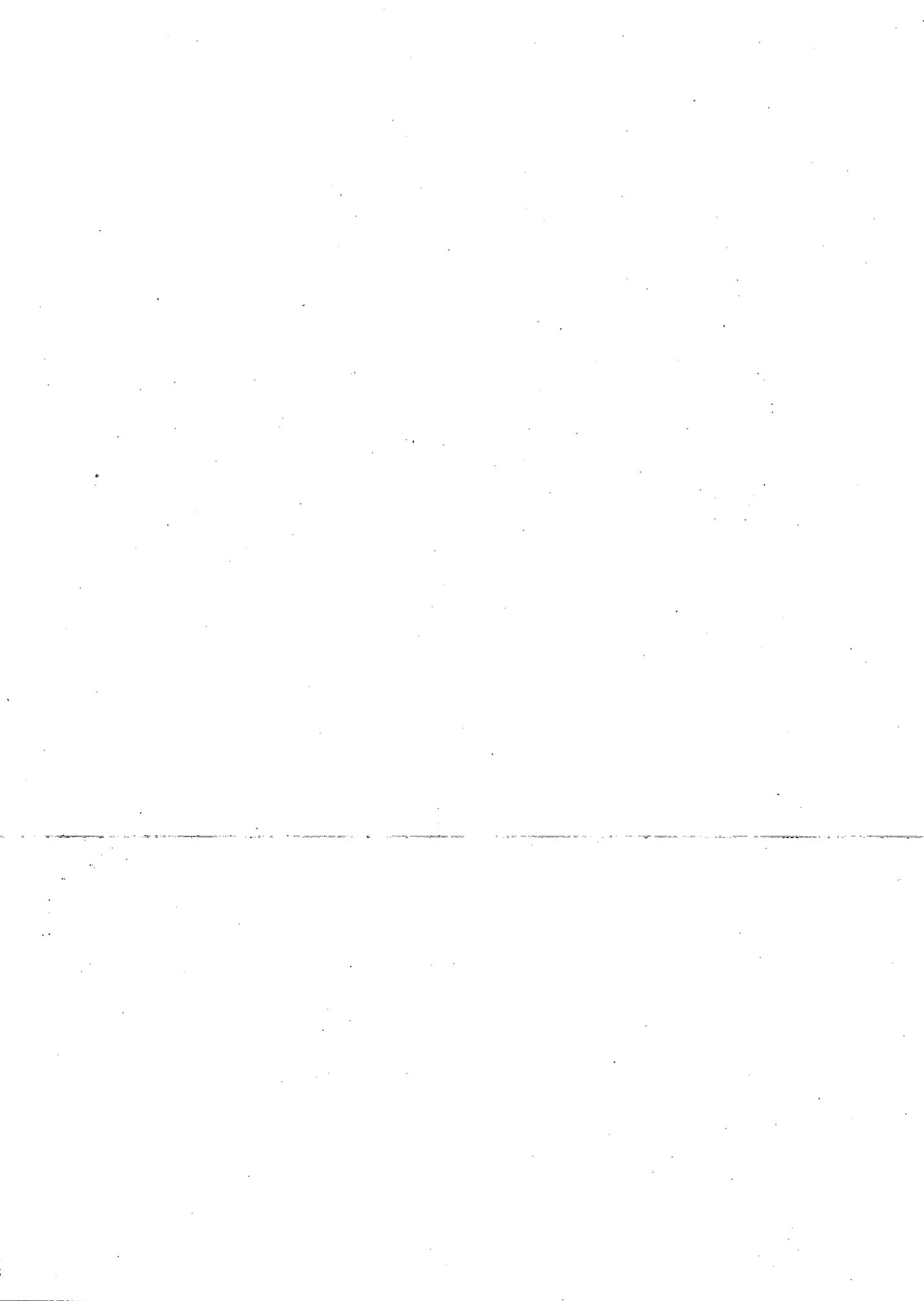


Fig 6.1 Relación entre la temperatura del aire y la presión de saturación



En la figura anterior se muestra la variación entre la temperatura del aire y la presión de saturación.

### 6.2.3 Viento

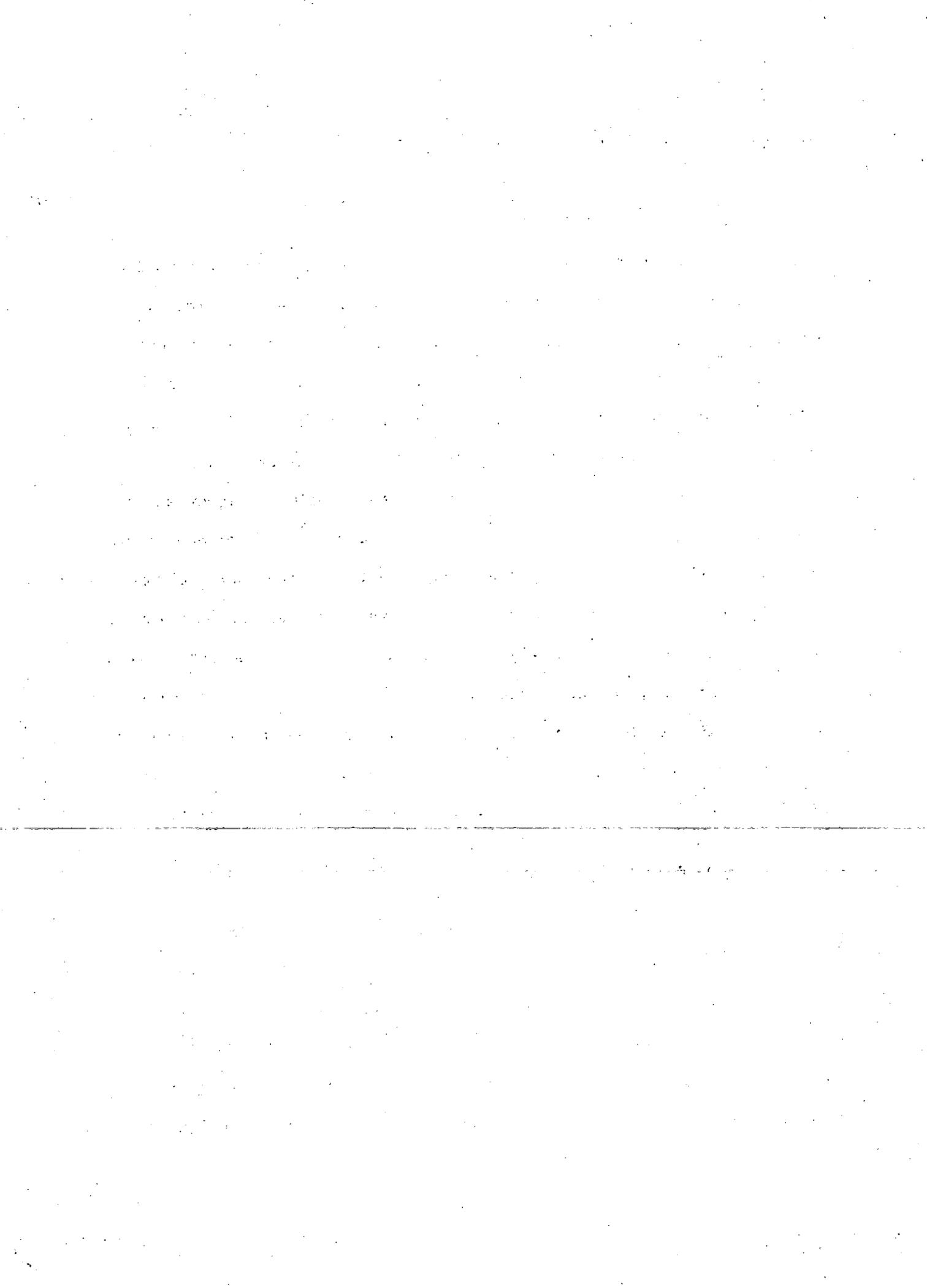
El viento es un elemento efectivo para remover las moléculas que se desprenden de la superficie del agua debido a la evaporación, lo que origina variaciones en las características de la masa de aire que se encuentra sobre esta. Puede, así, traer masas de aire caliente, lo cual origina un aumento de evaporación; si la masa de aire es frío, puede disminuir la evaporación e, inclusive, favorecer la condensación.

El efecto del viento sobre la evaporación es mayor en grandes masas de agua que en pequeñas. Esto se debe a que una vez que el viento desplaza el vapor de agua que se encuentra en el aire sobre la superficie del agua y se altera la evaporación, se requieren variaciones muy grandes de velocidad para que se altere apreciablemente la evaporación existente. En el caso de pequeños recipientes, un incremento pequeño en el viento puede ser suficiente para remover el vapor de agua que se está generando. En extensas áreas de agua, pueden requerirse velocidades grandes y movimientos turbulentos de aire para que se incremente la evaporación.

### 6.2.4 Presión atmosférica

La presión atmosférica está tan íntimamente relacionada con los otros factores que afectan la evaporación, que es prácticamente imposible estudiar los efectos de sus variaciones bajo condiciones naturales.

La evaporación puede disminuir con el incremento de altitud. El número de moléculas de aire por unidad de volumen aumenta con la presión. Consecuentemente, ante presiones altas hay más oportunidad de las moléculas



que escapan de la superficie libre del agua choquen con las del aire y retornen al líquido.

#### 6.2.5 Calidad del agua

La cantidad de evaporación, menor en agua salada, disminuye conforme se incrementa el peso específico.

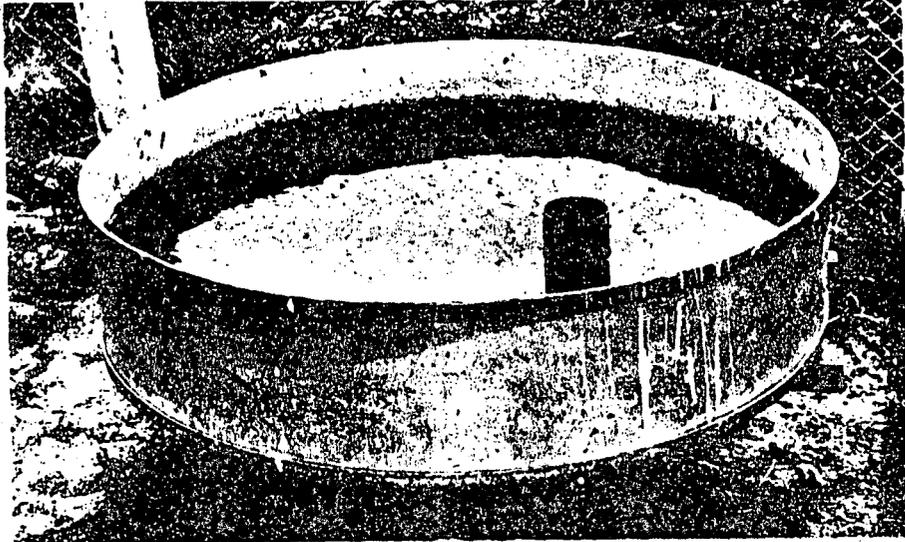
### 6.3 Medición de la evaporación

Como la evaporación es de gran importancia dentro del ciclo hidrológico, se han hecho grandes esfuerzos tendientes a establecer un método que permita medirla en forma directa. Obviamente, lo primero que se ocurre para determinar la evaporación en lagos y recipientes es usar la ecuación de equilibrio, y medir el gasto que entra y sale, la lluvia y el agua que se infiltra. Sin embargo, el agua que se infiltra no se puede valuar, y los errores al medir los otros factores pueden exceder a la evaporación. Por lo tanto, este procedimiento no se puede aplicar para valuar la evaporación.

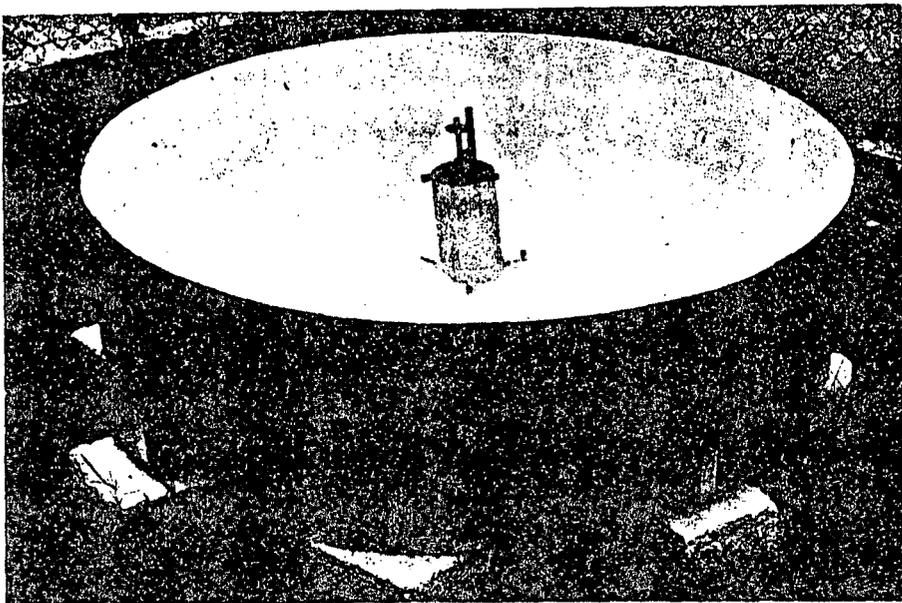
La medición del grado de evaporación de una región se puede hacer en forma directa usando un evaporímetro. El evaporímetro más usual consiste en un recipiente circular de lámina abierto en su parte superior, de aproximadamente 1.20 m de diámetro y 0.26 m de alto (fig 6.2).

El recipiente se llena de agua hasta un nivel arbitrario y se mide la variación del nivel después de un cierto tiempo, usualmente un día. Para medir el nivel del agua se introduce dentro del recipiente un cilindro de reposo que contiene un tornillo con vernier. La diferencia de niveles proporciona un índice de evaporación en la región.





a) Vista general con el cilindro de reposo



b) Detalle del vernier dentro del cilindro de reposo y forma de colocarlo

Fig 6.2 Evaporímetro



Como la evaporación está relacionada con los cambios atmosféricos, además del evaporímetro se acostumbra instalar otros aparatos que permitan registrar distintos datos meteorológicos. Los elementos meteorológicos más importantes son el movimiento del aire, su temperatura y la de la superficie del agua, humedad atmosférica y precipitación (véase inciso 3.1.3).

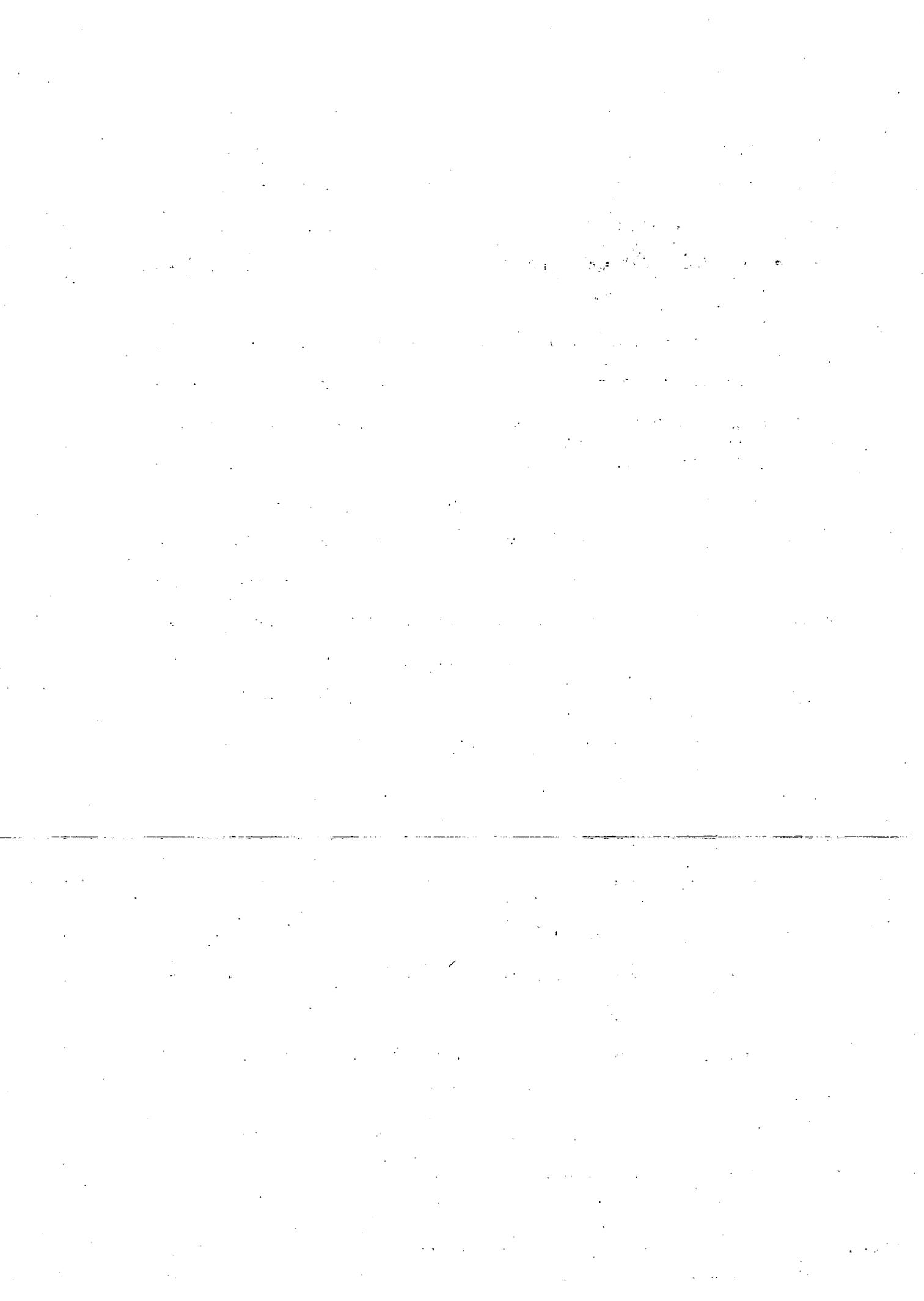
El problema que plantean las mediciones de evaporación efectuadas con el evaporímetro es su extrapolación a la zona donde se quiere conocer esta componente. En el caso del almacenaje en una presa o un lago, el principal problema es la variación de la masa de agua almacenada con respecto a la contenida por el evaporímetro. Puede decirse que la evaporación registrada por un evaporímetro es mayor que la evaporación que puede sufrir una masa adyacente de agua. La relación de evaporaciones se conoce con el nombre de coeficiente del evaporímetro. Este coeficiente es variable y, usualmente, más alto en invierno que en verano; además, los coeficientes de evaporación mensual varían más que los de evaporación anual, pudiéndose considerar que los coeficientes medios oscilan entre 0.70 y 0.80.

#### 6.4 Fórmulas de evaporación

Existe una gran diversidad de ecuaciones para valuar la evaporación, las cuales se pueden agrupar en

- a) ecuaciones empíricas obtenidas a partir de relaciones entre datos de evaporímetros y elementos climáticos
- b) ecuaciones basadas en consideraciones teóricas de cambios de energía.

Las ecuaciones del primer grupo se basan en la ley de Dalton, modificándola de acuerdo con los factores que afectan a la evaporación.



Las del segundo involucran hipótesis basadas en evidencias experimentales o coeficientes, los cuales se deben valorar empíricamente.

#### 6.4.1 Ecuaciones empíricas

Como se vió al principio de este capítulo, la evaporación es proporcional a la diferencia entre la presión de vapor de agua,  $e_w$ , y la presión de vapor del aire,  $e_a$ , que se encuentra sobre la superficie del agua. Esto se puede expresar, según la fórmula de Dalton, como

$$E = k(e_w - e_a) \quad (6.1)$$

donde  $k$  es un coeficiente de proporcionalidad. Esta ecuación es válida cuando el agua y el aire están a la misma temperatura.

La ec 6.1 se ha usado como base de una gran variedad de expresiones. Así, para evaporaciones mensuales se puede usar la fórmula de Meyer, la cual se expresa en la forma

$$E = c(e_s - e_a) \left[ 1 + \frac{V_w}{16.09} \right] \quad (6.2)$$

donde

- $c$  constante empírica que tiene un valor aproximado de 38 para evaporímetros y pequeños depósitos, y de 28 para grandes depósitos
- $E$  evaporación mensual, en cm
- $e_a$  presión de vapor del aire basada en la temperatura media mensual del aire y en la humedad relativa en la cercanía de los depósitos pequeños. Para depósitos grandes, los datos se deben recabar a 10 m sobre la superficie libre del agua. La presión de vapor se expresa en pulgadas de Hg



$e_s$  presión de saturación del vapor correspondiente a la temperatura media mensual del aire si se trata de depósitos pequeños, y a la temperatura media mensual del agua, para depósitos grandes. Se expresa en pulgadas de Hg

$V_w$  velocidad media mensual del viento registrada a 10 m sobre la superficie, en km/h

Para evaporaciones diarias, Horton propone la ecuación

$$E = 1.016 (\psi e_s - e_a) \quad (6.3)$$

donde

$$\psi = 2 - e^{-0.0128 V_w} \quad (6.4)$$

Las variables tienen el mismo significado que en la fórmula de Meyer (ec 6.2), solo que ahora se usan valores diarios en lugar de mensuales.

La ec 6.3 solo sirve para pequeños depósitos. Para grandes depósitos, el valor encontrado de E se multiplica por

$$(1-P) + P \frac{\psi - 1}{\psi - h} \quad (6.5)$$

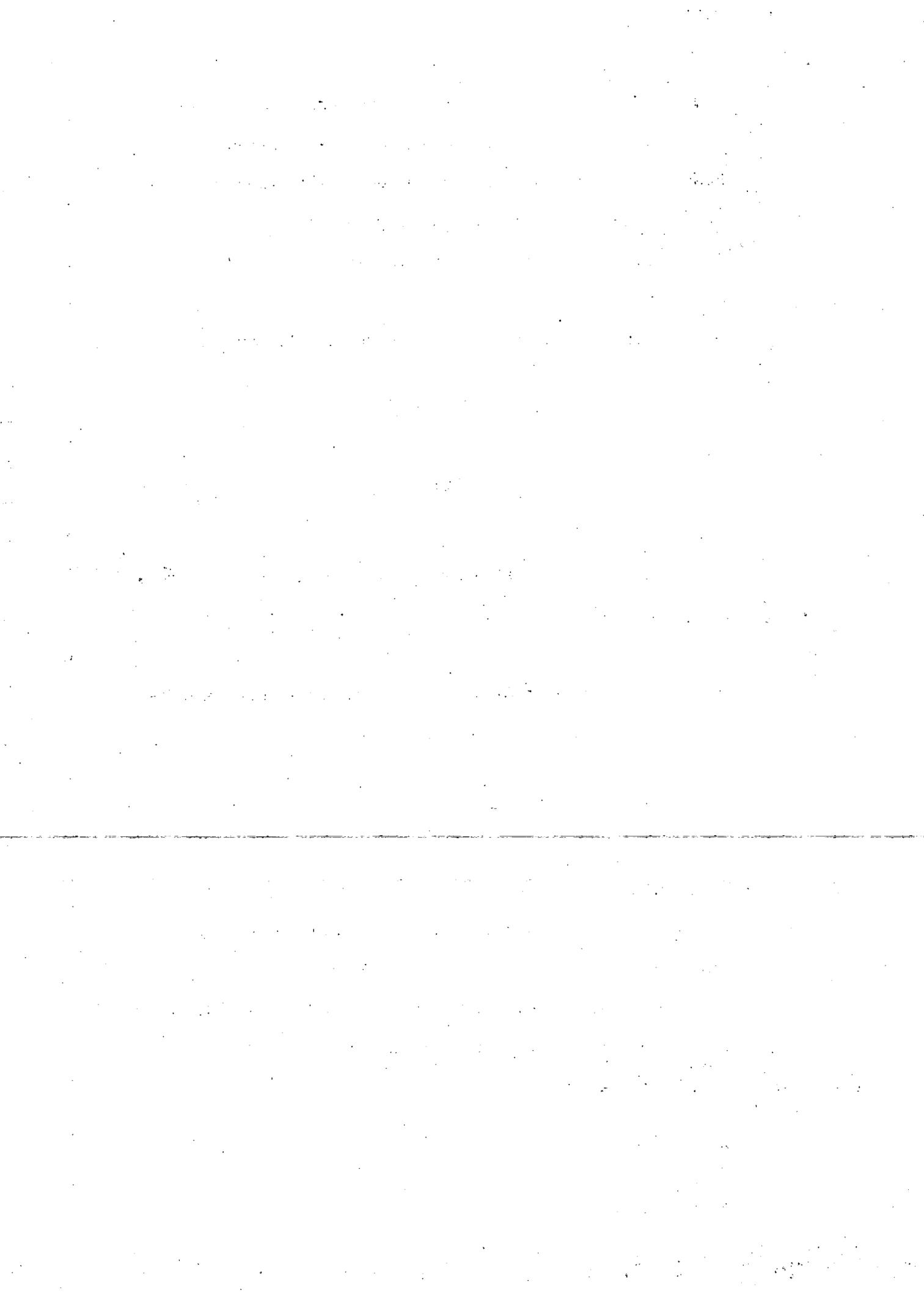
donde

h humedad relativa

P fracción del tiempo durante el cual el viento es turbulento

$\psi$  factor de viento, ec 6.4

Basándose en una correlación gráfica coaxial, Linsley encontró, para valuar la evaporación en función de parámetros meteorológicos, una relación general de la forma



$$E = c(e_s - e_a)(b a V_w^n)$$

donde a, b, c y n son constantes a determinar basándose en los valores conocidos de los parámetros meteorológicos, que en este caso son  $e_a$ ,  $e_s$  y  $V_w$ ; y el valor de la evaporación E.

#### 6.4.2 Ecuaciones basadas en cambios de energía

Siendo el movimiento vorticoso el principal mecanismo por el cual el vapor de agua es removido de la vecindad de la superficie sujeta a evaporación, existen numerosas expresiones para determinarla basándose en consideraciones de transporte de masa por cambios turbulentos. De estas expresiones, la ecuación de Thornthwaite-Holzman ha dado resultados satisfactorios. Suponiendo una condición atmosférica adiabática y una distribución logarítmica en la vertical de la velocidad del viento y de la humedad, esta ecuación puede expresarse como

$$E = \frac{210.43 (e_1 - e_2) (V_{w2} - V_{w1})}{(T - 459.4) \ln (h_2/h_1)^2} \quad (6.6)$$

donde

E	evaporación, en cm/h
$e_1, e_2$	presión de vapor, en la altura inferior $h_1$ y en la superior $h_2$ , respectivamente, sobre la superficie del agua, en pulgadas de Hg
T	temperatura media del aire entre $h_1$ y $h_2$ , en °F
$V_{w1}, V_{w2}$	velocidad del viento para $h_1$ y $h_2$ , respectivamente, en km/h

Otro enfoque para calcular la evaporación se conoce con el nombre del método del balance del calor, y aunque existen diversas expresiones, estas son difíciles de aplicar por los problemas que se presentan al tratar de valorar algunos de los parámetros que intervienen.



## 6.5 Transpiración

La transpiración es esencialmente igual a la evaporación, solo que la superficie, de la cual las moléculas de agua escapan, no es la del agua, sino principalmente la de las hojas de las plantas.

Los factores que afectan a la transpiración pueden ser fisiológicos o ambientales. Los factores fisiológicos más importantes son la densidad y comportamiento de las hojas, extensión y características de la cubierta protectora, estructura de la hoja y enfermedades de las plantas. Los principales factores ambientales son la temperatura, radiación solar, viento y humedad del suelo.

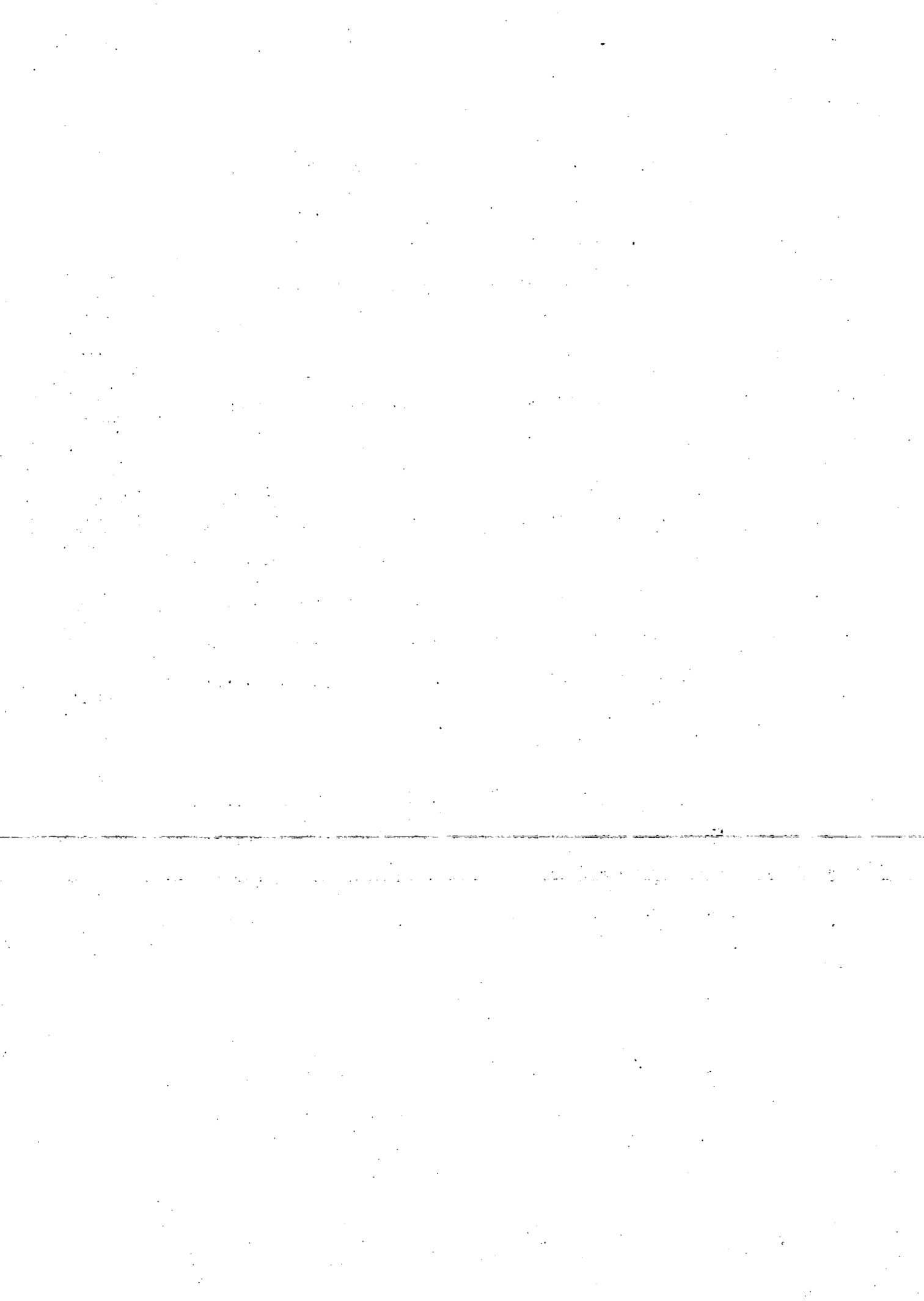
Como la pérdida de agua de la planta es gobernada por la diferencia de presión de vapor existente, puede decirse que este es el factor más importante de la transpiración. La diferencia de presión de vapor en el espacio comprendido entre las hojas y el aire exterior es una medida de la energía requerida para que el agua de las hojas se evapore.

## 6.6 Determinación de la transpiración

Ante la imposibilidad de medir la transpiración directamente en condiciones naturales, su determinación se limita a estudios de muestras en laboratorio, cuyos métodos se pueden dividir en dos clases, a) medición del agua transpirada y b) medición del cambio de peso debido a la pérdida de agua.

### 6.6.1 Medición del agua transpirada

Este método consiste en colocar una planta en un recipiente cerrado. La transpiración se determina a partir del cambio de humedad que se experimenta en el recipiente.



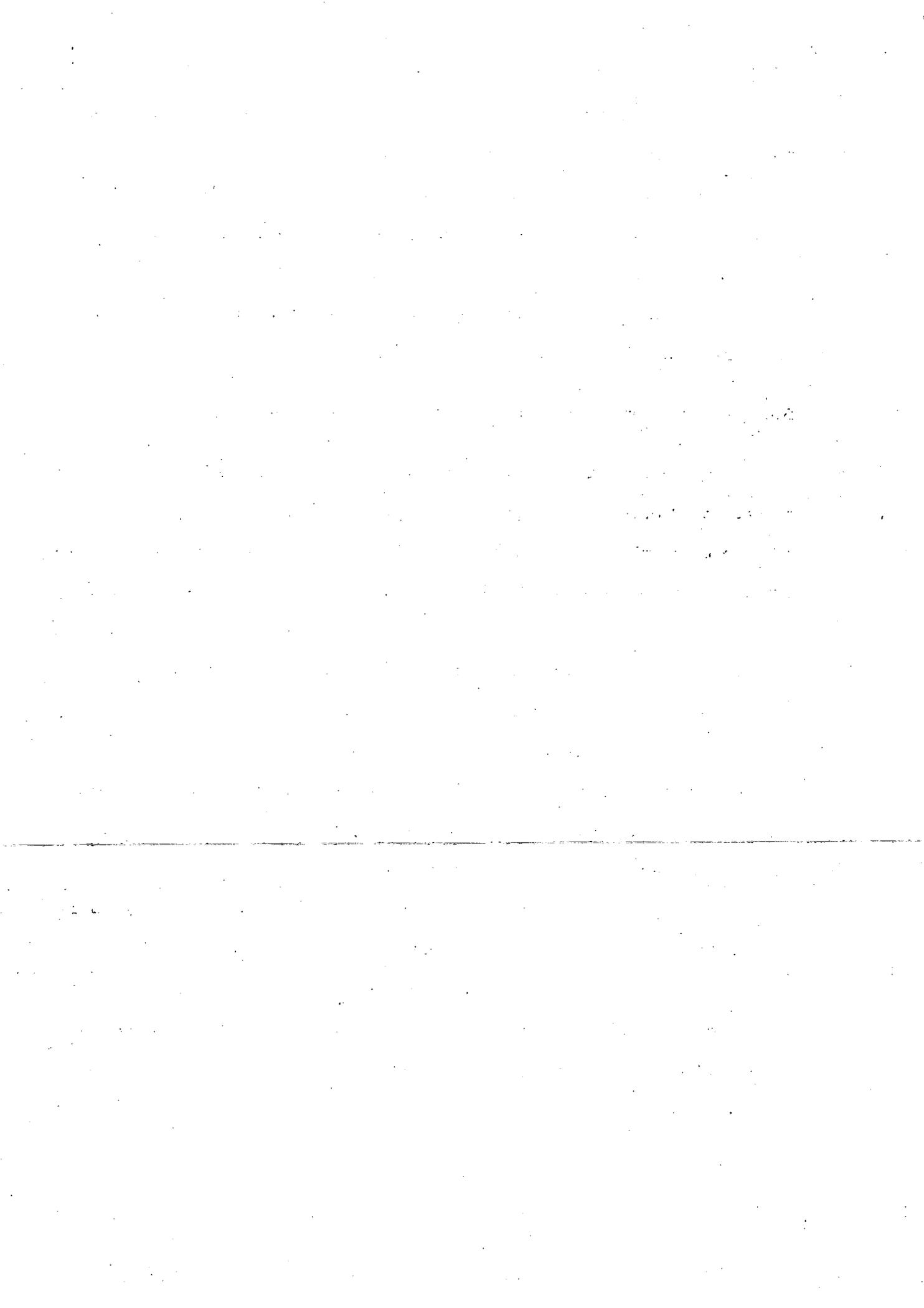
Sin embargo, a causa de la gran humedad desarrollada en el recipiente, este método no es muy satisfactorio. Una alternativa del método es aspirar el aire del recipiente cerrado por medio de tubos de absorción que contengan un agente secante, y medir la transpiración basándose en el incremento del peso de los tubos corregidos por humedad atmosférica. El empleo de estos métodos está limitado a cortos periodos de prueba sobre pequeñas plantas o porciones de las mismas.

#### 6.6.2 Medición del cambio en peso debido a la pérdida de agua

Un método práctico para medir la transpiración es usando un fitómetro. Consiste en una gran vasija llena de tierra en la cual se colocan una o más plantas. La superficie del suelo se sella para evitar la evaporación, así que solo la humedad que escapa se debe a la transpiración, y se determina por la pérdida de peso de planta y vasija. Si en el fitómetro se sustituye la tierra por agua, este recibe el nombre de potómetro y se utiliza para plantas de raíces poco profundas.

Los resultados de estos métodos para valuar la transpiración son buenos si las condiciones de las pruebas son comparables a la naturaleza sujeta a investigación. Desgraciadamente, la transpiración depende de muchas variables, por lo que una determinación precisa de esta no puede obtenerse fácilmente, y en caso de asignar un cierto valor a determinado cultivo este es generalmente de tipo cualitativo y no cuantitativo.

Debido a lo anterior, se acostumbra, generalmente, considerar a la transpiración combinada con la evaporación, y valuar lo que se llama la evapotranspiración. La evapotranspiración también recibe el nombre de uso consuntivo.



## 6.7 Métodos para valorar la evapotranspiración

Aun cuando se cuenta con bastantes métodos para estimar la evapotranspiración, ninguno se considera como general. Sin embargo, estos se pueden agrupar en tres categorías: aproximaciones teóricas basadas en la física del proceso de evapotranspiración, aproximaciones analíticas basadas en el balance de energía o cantidades de agua, y aproximaciones empíricas basadas en la relación regional entre la evapotranspiración medida y las condiciones climáticas. A continuación se describen los métodos más usuales.

### 6.7.1 Muestreo de la humedad del suelo

Este método es adecuado para valorar la evapotranspiración en campos de riego donde el suelo es uniforme y el nivel freático no influye en las fluctuaciones de humedad dentro de la zona de las raíces.

Para aplicar este método es necesario tomar muestras del suelo antes y después de cada riego, y determinar su contenido de humedad mediante pruebas estándar de laboratorio.

La evapotranspiración se calcula como

$$D = \frac{PVd}{100} \quad (6.7)$$

donde

- D. evapotranspiración, en cm
- d. espesor del suelo, en cm
- P. porcentaje de humedad del suelo, en peso
- V. peso específico relativo del suelo

Esta ecuación se emplea generalmente por unidad de área, y se puede aplicar a diferentes intervalos de tiempo de acuerdo con los muestreos.



treos efectuados, siendo posible llevar en una gráfica una relación de pérdidas por evapotranspiración respecto al tiempo.

#### 6.7.2 Mediciones con lisímetros

Este método se utiliza para valuar la evapotranspiración de cosechas individuales o vegetación natural observando su desarrollo en tanques o lisímetros, y midiendo la pérdida de agua necesaria para mantener el desarrollo en forma satisfactoria. Los tanques son generalmente de 60 a 100 cm de diámetro y con altura de 200 cm. Si las condiciones en el tanque son similares a las del campo, los resultados son aceptables.

#### 6.7.3 Mediciones del agua circulante

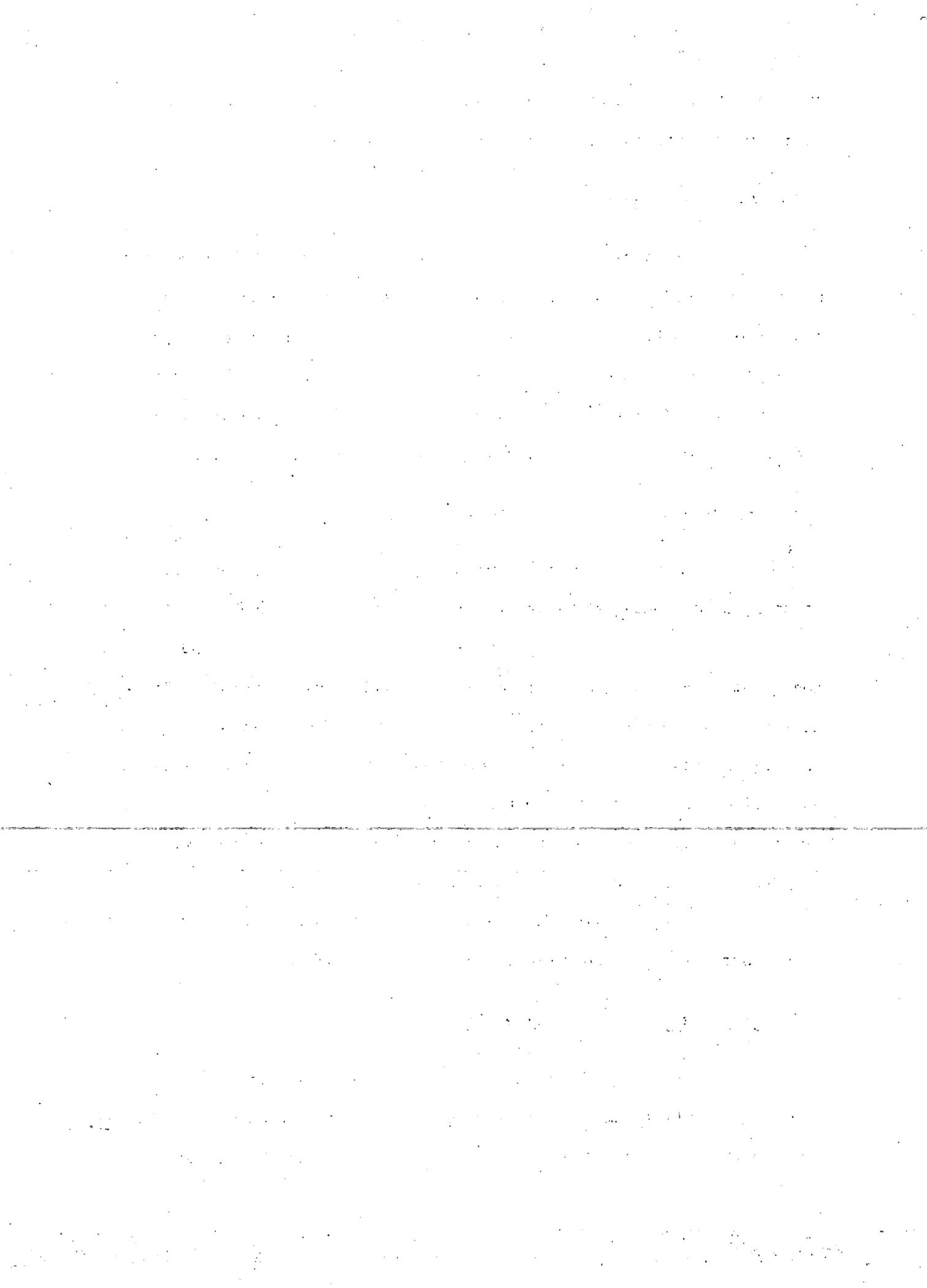
Este método involucra la aplicación del principio del balance de agua en grandes áreas de tierra que pueden ser mayores de 1 500 km<sup>2</sup>.

Para aplicar este criterio debe medirse la cantidad de agua que se utiliza para regar un área de tierra en determinado intervalo de tiempo. La diferencia entre esas dos cantidades y la cantidad de agua sobrante del área, ajustada por el cambio sufrido por el almacenaje de agua subterránea durante el mismo periodo, será una medida de las pérdidas sufridas por evapotranspiración. En general, se supone invariante el agua subterránea durante el periodo en estudio.

La exactitud de este método depende de la precisión que se tenga para determinar la cantidad de agua que circula.

#### 6.8 Ecuaciones de evapotranspiración

La falta de datos básicos y las dificultades que se presentan al querer hacer mediciones en el campo, y al tratar de aplicar los métodos vistos en el inciso anterior han ocasionado grandes esfuerzos para



desarrollar ecuaciones de evapotranspiración. Dichas ecuaciones relacionan la evapotranspiración con algunos datos climatológicos de fácil obtención.

A continuación se mencionan las ecuaciones más importantes para valorar la evapotranspiración.

#### 6.8.1 Ecuación de Lowry-Johnson

Considera una relación lineal entre el calor efectivo y la evapotranspiración. El calor efectivo se define como los grados acumulados, de temperaturas diarias máximas sobre 32 °F durante la estación de crecimiento del cultivo.

Esta ecuación permite conocer el uso consuntivo o evapotranspiración de tierras agrícolas sobre una base anual, y se expresa como

$$U = 0.0048 H + 24 \quad (6.8)$$

donde

U evapotranspiración anual, en cm

H calor efectivo

#### 6.8.2 Ecuación de Blaney-Criddle

Esta ecuación se expresa como

$$U = 2.54 k \sum_{1}^n p t \quad (6.9)$$

donde

U evapotranspiración en  $m$  meses, en cm

k coeficiente de uso consuntivo, tabla 6.1

p porcentaje en función de la latitud y época del año, tabla 6.2

t temperatura media mensual, en °F

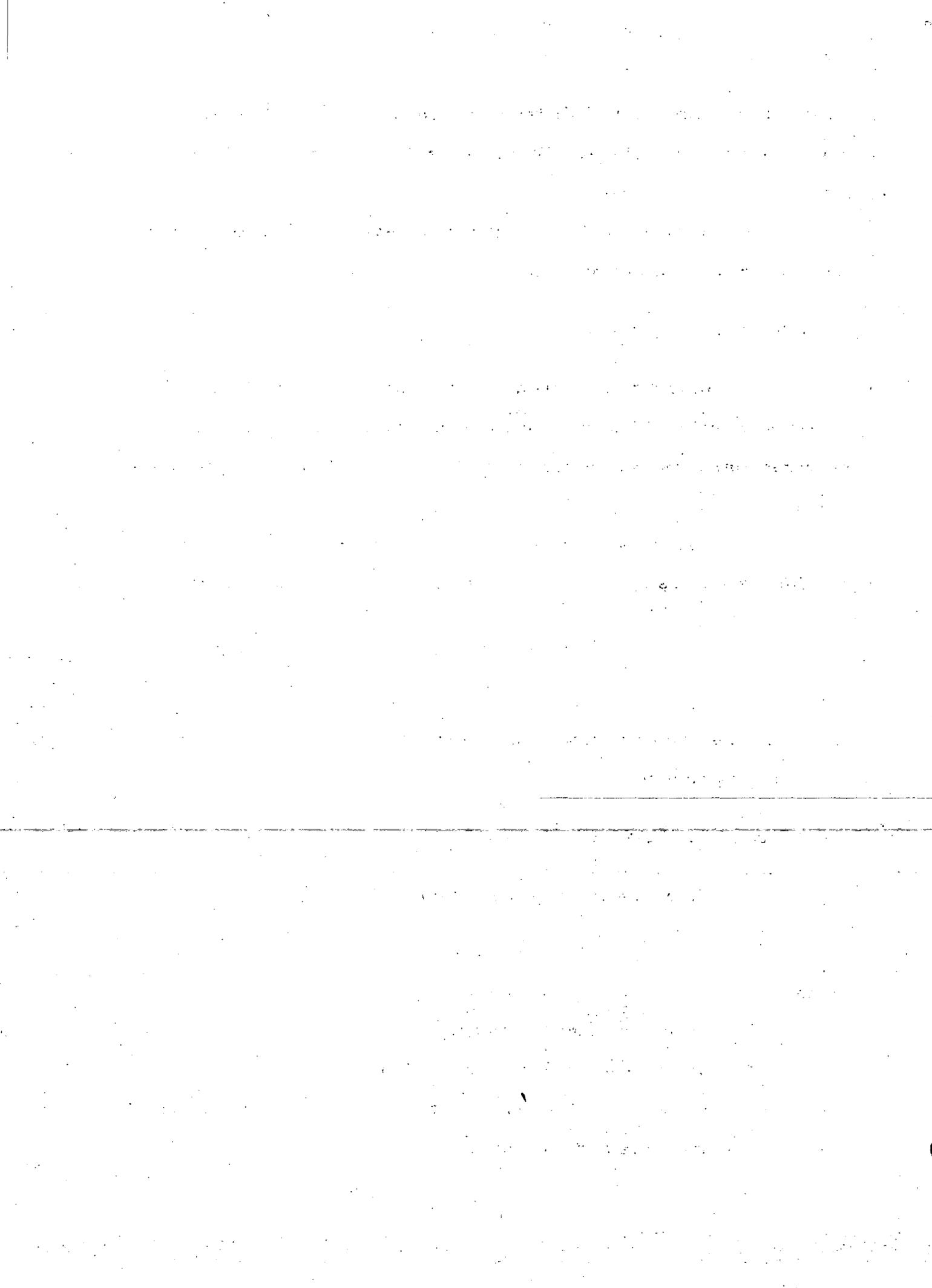


Tabla 6.1 Coeficientes de uso consuntivo

C u l t i v o	Periodo de crecimiento	K
alfalfa	entre heladas	0.80 - 0.85
algodón	7 meses	0.65 - 0.75
arroz	3 - 5 meses	1.00 - 1.20
cereales	3 meses	0.75 - 0.85
cítricos	7 meses	0.50 - 0.65
frijol	3 meses	0.60 - 0.70
lino	7 - 8 meses	0.80
maíz	4 meses	0.75 - 0.85
nuez	entre heladas	0.70
papa	3½ meses	0.65 - 0.75
pastos	entre heladas	0.75
remolacha	6 meses	0.65 - 0.75
sorgo	4 - 5 meses	0.70
tomate	4 meses	0.70
vegetales	3 meses	0.60

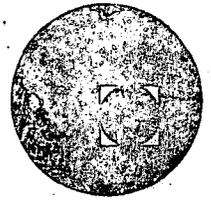
Tabla 6.2 Valores de 100 p en la ecuación de Blaney-Criddle (valor anual de p = 1.00)

Latitud, en grados	m e s e s											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	Norte											
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.57	6.98	5.04	4.22
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.76	9.77	9.39	9.37	8.36	7.87	6.97	6.86
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.42
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.26	7.75	7.88
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
	Sur											
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.87	9.33
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
40	10.27	8.63	8.67	7.49	6.97	6.37	6.76	7.41	8.02	9.21	9.71	10.49





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

EVAPOTRANSPIRACION

DETERMINACION DE COEFICIENTES UNITARIOS DE RIEGO

ING. JOSÉ ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA

AGOSTO, 1978



# DETERMINACION DE COEFICIENTES UNITARIOS DE RIEGO

## 1. - Objetivos

La finalidad de la presente tarea es la de familiarizar al estudiante con la determinación de los coeficientes unitarios de riego y su aplicación en el cálculo de la capacidad de los canales, para el diseño eficiente y económico de un sistema de conducción y distribución de agua en un proyecto de riego.

## 2. - Análisis teórico

El rendimiento óptimo de los cultivos a desarrollar en una zona de riego depende fundamentalmente del hecho de proporcionar la lámina de agua adecuada en cada caso, su determinación deberá tomar en cuenta las características particulares de los cultivos, las propiedades físicas de los suelos, así como los factores climáticos de la región.

En el presente trabajo se empleará fundamentalmente el método empírico de Blaney y Criddle modificado. La interrelación de los factores que intervienen en adecuado aprovechamiento de los recursos disponibles, se refleja a través de los coeficientes unitarios de riego.

## 3. - Problema

Obtener los coeficientes unitarios de riego para una superficie total de aprovechamiento agrícola de 4 400 ha, localizada en una zona cuya latitud es de 30 ° Norte. De acuerdo al plan de cultivos y características que se proponen:

Plan de Cultivos

Cultivo	Superficie	Ciclo vegetativo	Coefficiente global	Profundidad radicular
Algodón	1000	Abril-Septiembre	0.65	0.50
Pastos	300	Enero-Diciembre	0.75	0.40
Sorgo I	600	Mayo-Septiembre	0.70	0.45
Sorgo 2	200	Diciembre-Abril	0.70	0.45
Maíz I	800	Junio-Septiembre	0.80	0.50
Maíz 2	1100	Diciembre-Marzo	0.80	0.50
Frijol	400	Diciembre-Febrero	0.65	0.40
Total	4400			

Temperatura media mensual ( °C)

E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
12.5	13.4	17.2	18.7	23.2	21.9	20.8	20.0	19.8	17.6	15.5	14.0

Precipitación ( mm)

AÑO	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
1	12	8	3	0	4	73	142	171	229	84	20	17
2	0	0	18	0	17	127	170	250	129	80	72	14
3	12	0	0	0	0	46	195	94	220	46	32	8

## Datos varios

Precipitación efectiva aprovechable *	70 % en exceso de 5 mm
Densidad aparente	1.2
Capacidad de campo	0.25
Punto de marchitamiento permanente	0.13
Humedad inicial	Capacidad de campo
Eficiencia de conducción	85 %
Eficiencia parcelaria	70 %
Lapso de simulación	Mensual
Período de análisis	Tres años

### 4. - Solución

La solución se desarrollará en tres etapas:

- a). - Cálculo de usos consuntivos
- b). - Determinación de láminas de riego
- c). - Obtención de coeficientes unitarios de riego

#### a) Cálculo de usos consuntivos

La determinación del uso consuntivo de cada cultivo propuesto, se hizo tomando en consideración su ciclo vegetativo, obteniendo mes a mes el valor de los coeficientes de desarrollo (Kc) correspondientes, tomados de las respectivas curvas de desarrollo. Los valores así obtenidos se presentan en la Tabla No. 1.

\* Criterio simplista.

CULTIVO MES	PASTOS	ALGODON	SORGO 1	SORGO 2	MAIZ 1	MAIZ 2	FRIJOL
1	0.48			0.82		0.88	1.10
2	0.58			1.08		1.08	0.84
3	0.74			0.87		0.96	
4	0.86	0.24		0.65			
5	0.91	0.40	0.38				
6	0.93	0.83	0.82		0.51		
7	0.94	1.02	1.08		0.88		
8	0.92	0.88	0.87		1.08		
9	0.88	0.62	0.65		0.96		
10	0.80						
11	0.68						
12	0.56			0.38		0.51	0.67

TARLA No 1 COEFICIENTES DE DESARROLLO Kc DE ACUERDO AL  
CICLO VEGETATIVO DE CADA CULTIVO

Debido a que se emplearon los valores medios mensuales de la temperatura, sólo será necesario hacer la determinación de los usos consuntivos en el lapso de un año.

En la Tabla No. 2 se presenta la secuela seguida en la determinación de usos consuntivos.

En la segunda columna de dicha tabla, se consignan los valores de las temperaturas correspondientes a los meses de desarrollo de cada cultivo.

Los valores del porcentaje de horas-luz (p) se obtuvieron de las tablas publicadas en el Memorándum Técnico 231 de la S.R.H., considerando el valor de 30 ° de latitud Norte (tercera columna).

Los valores de f y  $K_t$ , consignados en las columnas 4 y 5 respectivamente, se calcularon de acuerdo a las expresiones:

$$f = (0.0457 t + 0.812) p$$

$$K_t = 0.03114 t + 0.2396$$

en donde t es la temperatura media mensual en °C.

El cálculo de los usos consuntivos mensuales (columna 9) se hizo afectando los valores de la columna 8 por la relación  $K/K'$  en la que K es el coeficiente global correspondiente al cultivo y  $K'$  se obtiene como la relación de la suma de los valores de la columna 8 y la suma de los valores de la columna 4.

Finalmente se obtiene el uso consuntivo total en el ciclo como la suma de los usos consuntivos mensuales correspondientes (suma de los valores de la columna 9).

Los resultados obtenidos (por cultivo) se muestran también en la Tabla No. 2.

## Detalle del cálculo de la relación K/K'

Algodón:

$$K' = \frac{58.08}{96.82} = 0.60$$

$$K \text{ global} = 0.65$$

$$\underline{K/K' = 1.08}$$

Pastos:

$$K' = \frac{110.2}{164.54} = 0.67$$

$$K \text{ global} = 0.75$$

$$\underline{K/K' = 1.12}$$

Sorgo 1

$$K = \frac{55.74}{82.29} = 0.68$$

$$K \text{ global} = 0.70$$

$$\underline{K/K' = 1.03}$$

$$0.74$$

Sorgo 2

$$\underline{K/K' = 1.30}$$

Maíz 1

$$\underline{K/K' = 1.08}$$

$$K \text{ global} = 0.80$$

Maíz 2

$$\underline{K/K' = 1.33}$$

Frijol

$$\underline{K/K' = 1.16}$$

$$0.66$$

TABLE NO. 2 - DETERMINACION DEL USO CONSULTIVO

MES	Temp. °C	Porcentaje horas-hombre (%)	f (cm)	K <sub>t</sub>	fK <sub>t</sub>	K <sub>c</sub>	fK <sub>t</sub> K <sub>c</sub>	J.C. (cm)
<b>PASTOS</b>								
ENE	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	0.48	3.05	3.42
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	0.58	3.82	4.28
MAR	17.2	8.38	13.39	0.775	10.38	0.74	7.68	8.60
ABR	18.7	8.72	14.53	0.822	11.94	0.86	10.27	11.50
MAY	23.2	9.53	17.84	0.962	17.16	0.91	15.62	17.49
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.93	14.75	16.52
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	0.94	14.20	15.90
AGO	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	0.92	12.61	14.12
SEP	19.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.88	10.77	12.06
OCT	17.6	7.99	12.91	0.788	10.17	0.80	8.14	9.12
NOV	15.5	7.19	10.93	0.722	7.89	0.68	5.36	6.00
DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.56	3.93	4.40
SUMAS			164.54				110.20	123.41
<b>ALGODON</b>								
ABR	18.7	8.72	14.53	0.822	11.94	0.24	2.87	3.10
MAY	23.2	9.53	17.84	0.962	17.16	0.40	6.86	7.41
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.83	13.16	14.21
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	1.02	15.42	16.65
AGO	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	0.88	12.06	13.02
SEP	19.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.63	7.71	8.33
SUMAS			96.82				58.08	62.72
<b>SORGO I</b>								
MAY	23.2	9.53	17.84	0.962	17.16	0.38	6.52	6.72
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.82	13.01	13.40
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	1.08	16.32	16.81
AGO	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	0.87	11.93	12.29
SEP	19.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.65	7.96	8.20
SUMAS			82.29				55.74	57.42
<b>SORGO II</b>								
DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.38	2.67	3.47
ENE	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	0.82	5.21	6.77
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	1.08	7.11	9.24
MAR	17.2	8.38	13.39	0.775	10.38	0.87	9.03	11.74
ABR	18.7	8.72	14.53	0.822	11.94	0.65	7.76	10.09
SUMAS			58.41				31.78	41.31
<b>MAIZ I</b>								
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.51	8.09	8.74
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	0.88	13.30	14.36
AGO	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	1.08	14.81	15.99
SEP	19.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.96	11.75	12.69
SUMAS			64.45				47.95	51.78
<b>MAIZ II</b>								
DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.51	3.58	4.76
ENE	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	0.88	5.59	7.43
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	1.08	7.11	9.46
ABR	14.2	8.38	13.39	0.775	10.38	0.96	9.96	13.25
SUMAS			43.88				26.24	34.90
<b>FRUTOS</b>								
DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.67	4.70	5.45
ENE	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	1.10	6.99	8.11
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	0.84	5.53	6.41
SUMAS			30.49				17.22	19.97

b) CALCULO DE LAMINAS DE RIEGO, LAMINA REAL, CAPACIDAD DE CAMPO, PUNTO DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE Y POLITICA DE HUMEDAD PARA CADA CULTIVO

1.- PASTOS

$$\text{Lamina de riego} = \frac{2}{3} (C.C. - P.M.P.) D.A. \times \text{Prof. radicular}$$

$$\therefore \text{Lamina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.4 = 0.0384 \text{ m} = 38.4 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real a aplicar} = \frac{\text{Lamina de riego}}{\eta_{\text{conduccion}} \eta_{\text{aprovechamiento}}} = \frac{0.0384 \text{ m}}{(0.85)(0.9)} = \frac{0.0384 \text{ m}}{0.595}$$

$$\therefore \text{Lamina real} = 64.5 \text{ mm}$$

$$C.I.(I) = C.C. \times D.A. \times h_r = 0.25 \times 1.2 \times 0.4 = 0.12 \text{ m} = 120 \text{ mm} = (C.C.)$$

$$P.M.P. = 0.13 \times 1.2 \times 0.4 = 0.0624 \text{ m} = 62.4 \text{ mm}$$

$$\text{Politica de humedad} = C.C. - \frac{2}{3} (C.C. - P.M.P.) = 120 - \frac{2}{3} (120 - 62.4)$$

$$P.H. = 81.6 \text{ mm}$$

2.- ALGODON

$$\text{Lamina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.5 = 48 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real} = \frac{48 \text{ mm}}{0.595} = 80.7 \text{ mm}$$

$$C.I.(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.5 = 150 \text{ mm} = (C.C.)$$

$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.5 = 0.078 \text{ m} = 78 \text{ mm}$$

$$P.H. = 150 - \frac{2}{3} (150 - 78) = 102 \text{ mm}$$

### 3- SORGO 1

$$\text{Lámina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.45 = 43.2 \text{ mm}$$

$$\text{Lámina real} = \frac{43.2 \text{ mm}}{0.595} = 72.6 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.45 = 135 \text{ mm} = CC$$

$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.45 = 70.2 \text{ mm}$$

$$PH = 135 - \frac{2}{3} (135 - 70.2) = 91.8 \text{ mm}$$

### 4- SORGO 2

$$\text{Lámina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.45 = 43.2 \text{ mm}$$

$$\text{Lámina real} = \frac{43.2 \text{ mm}}{0.595} = 72.6 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.45 = 135 \text{ mm} = CC$$

$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.45 = 70.2 \text{ mm}$$

$$PH = 135 - \frac{2}{3} (135 - 70.2) = 91.8 \text{ mm}$$

### 5- MAIZ 1

$$\text{Lámina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.5 = 48 \text{ mm}$$

$$\text{Lámina real} = \frac{48 \text{ mm}}{0.595} = 80.7 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.5 = 150 \text{ mm (cc)}$$

$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.5 = 78 \text{ mm}$$

$$PH = 150 - \frac{2}{3} (150 - 78) = 102 \text{ mm}$$

## 6- URIB 2

$$\text{Lamina de riesgo} = 48 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real} = 80.7 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 150 \text{ mm} = \text{cc}$$

$$DMP = 78 \text{ mm}$$

$$PH = 102 \text{ mm}$$

## 7- FRINOL

$$\text{Lamina de riesgo} = 38.4 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real} = 64.5 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 120 \text{ mm} = \text{cc}$$

$$DMP = 62.4 \text{ mm}$$

$$PH = 81.6 \text{ mm}$$

12

Precipitación aprovechable

AÑO	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
1	4.9	2.1	0	0	0.	47.6	95.9	116.2	156.8	55.3	10.5	8.4
2	0	0	9.1	0	8.4	85.4	115.5	171.5	86.8	52.5	46.9	6.3
3	4.9	0	0	0	0	28.7	133.0	62.3	154.0	28.7	18.9	2.1

c) Determinación de los coeficientes unitarios de riego

En base a los valores anterioremente calculados y mediante la aplicación del modelo de simulación conqum, se hizo la determinación de los coeficientes unitarios de riego como sigue:

Considerando como valor inicial de humedad la correspondiente a la capacidad de campo (columna 1), se resta de éste el uso consuntivo correspondiente y se agrega la lluvia aprovechable, obteniéndose los resultados presentados en la columna 4, que corresponden al estado de humedad al final del período. Si éste supera a la política de riego predeterminada, se pasa al siguiente mes, considerando este valor como inicial. En caso contrario habrá que dar riego suficiente hasta lograr la capacidad de campo. También podría ocurrir que la humedad al final del período fuera superior a la capacidad del campo, en este caso se considerará como valor inicial del siguiente período el correspondiente a la capacidad de campo ya que el exceso se pierde por gravedad.

Debido a la amplitud del período considerado en la simulación (un mes)-

MODELO DE SIMULACION CONQUIN PARA

PASTOS

SUPERFICIE = 300 Ha.

MES	2	3	4	5	6	7	8	9
	(mm) CI (I)	(mm) UC (I)	(mm) LL (I)	(mm) CF (I)	(mm) RIEGO	N: RIEGO	(mm) LAP. RIEGO REAL	(m <sup>3</sup> × 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
E	120.0	34.2	4.9	90.7				
F	90.7	42.8	2.1	50.0	70.0	1.82	117.4	352.2
M	120.0	86.0	0	34.0	86.0	2.24	144.5	433.5
A	120.0	115.0	0	5.0	115.0	2.99	192.8	578.6
M	120.0	174.9	0	-54.9	174.9	4.55	293.5	880.5
J	120.0	165.2	47.6	2.4	117.6	3.06	197.4	592.2
J	120.0	159.0	95.9	56.9	63.1	1.64	105.8	317.4
A	120.0	141.2	116.2	95.0				
S	95.0	120.6	156.8	131.2				
O	120.0	91.2	55.3	84.1				
N	84.1	60.0	10.5	13.6	106.4	2.77	178.7	536.1
D	120.0	44.0	8.4	84.4				
E	84.4	34.2	0	50.2	69.8	2.01	129.6	388.8
F	120.0	42.8	0	77.2	42.8	1.11	71.6	214.8
M	120.0	86.0	9.1	43.1	76.9	2.00	129.0	387.0
A	120.0	115.0	0	5.0	115.0	2.99	192.8	578.6
M	120.0	174.9	8.4	53.5	66.5	1.73	111.6	334.8
J	120.0	165.2	85.4	40.2	79.8	2.08	134.2	402.6
J	120.0	159.0	115.5	76.5	43.5	1.13	72.9	218.7
A	120.0	141.2	171.5	150.3				
S	120.0	120.6	86.8	86.2				
O	86.2	91.2	52.5	47.5	72.5	1.89	121.9	365.7
N	120.0	60.0	46.9	106.9				
D	106.9	44.0	6.3	69.2	50.8	1.32	85.1	255.3
E	120.0	34.2	4.9	90.7				
F	90.7	42.8	0	47.9	72.1	1.88	121.3	363.9
M	120.0	86.0	0	34.0	86.0	2.24	144.5	433.5
A	120.0	115.0	0	5.0	115.0	2.99	192.8	578.6
M	120.0	174.9	0	-54.9	174.9	4.55	293.5	880.5
J	120.0	165.2	28.7	-16.5	136.5	3.55	228.9	686.7
J	120.0	159.0	133.0	94.0				
A	94.0	141.2	62.3	15.1	104.9	2.73	176.1	528.3
S	120.0	120.6	154.0	153.4				
O	120.0	91.2	28.7	57.5	62.5	1.63	105.1	315.3
N	120.0	60.0	18.9	78.9	41.1	1.07	69.0	207.0
D	120.0	44.0	2.1	78.1	41.9	1.09	68.0	204.0

\* no

\* no

MODELO DE SIMULACION CONQUIN

PARA ALGODON

SUPERFICIE = 1000 Ha

MES	(mm) CI (I)	(mm) UC (I)	(mm) LL (I)	(mm) CF (I)	(mm) RIEGO	Nº RIEGOS	(mm) LAPANIA RIEGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
A	150.0	31.0	0.0	119.0	105.1	2.19	176.7	1767
M	119.0	74.1	0	44.9	94.5	1.97	158.9	1589
J	150.0	142.1	47.6	55.5	70.6	1.47	118.6	1186
J	150.0	166.5	95.9	79.4				
A	150.0	130.2	116.2	136.0				
S	136.0	83.3	156.8	209.5				
A	150.0	31.0	0	119.0				
M	119.0	74.1	8.4	53.3	96.7	2.01	162.2	1622
J	150.0	142.1	85.4	93.3	56.7	1.18	95.2	952
J	150.0	166.5	115.5	99.0	51.0	1.06	85.5	855
A	150.0	130.2	171.5	191.3				
S	150.0	83.3	86.8	153.5				
A	150.0	31.0	0	119.0				
M	119.0	74.1	0	44.9	105.1	2.19	176.7	1767
J	150.0	142.1	28.7	36.6	113.4	2.36	190.4	1904
J	150.0	166.5	133.0	116.5				
A	116.5	130.2	62.3	48.6	101.4	2.11	170.3	1703
S	150.0	83.3	154.0	220.7				

MODELO DE SIMULACION CONQUIN

DADA SOREGO 1

SUPERFICIE = 600 Ha.

MES.	(mm) CI (I)	(mm) UC (I)	(mm) LL (I)	(mm) CF (I)	(mm) RIESO	Nº RIESOS	(mm) LAMINA RIESO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
M	135	67.2	0	67.8	67.2	1.55	112.5	675.0
J	135	134	47.6	48.6	86.4	2.00	145.2	871.2
J	135	168.1	95.9	62.8	72.2	1.67	121.2	727.2
A	135	122.9	116.2	128.3				
S	128.3	82	156.8	203.1				
M	135	67.2	8.4	76.2	58.8	1.36	98.7	592.2
J	135	134	85.4	86.4	48.6	1.12	81.3	487.8
J	135	168.1	115.5	82.4	52.6	1.22	88.6	531.6
A	135	122.9	171.5	183.6				
S	135	82	86.8	139.8				
M	135	67.2	0	67.8	67.2	1.55	112.5	675.0
J	135	134	28.7	29.7	105.3	2.44	177.1	1062.6
J	135	168.1	133	99.9				
A	99.9	122.9	62.3	39.9	95.1	2.22	161.2	967.2
S	135	82	154	207.0				

MODELO DE SIMULACION CONQUIN

PARA SORGO 2

SUPERFICIE = 200 Ha

MES	(mm) CI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIEGO	N: RIEGOS	(mm) LIMITE RIEGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
D	135	34.7	8.4	108.7				
E	108.7	67.7	4.9	45.9	89.1	2.06	149.5	299.0
F	135	92.4	2.1	44.7	90.3	2.09	151.7	303.4
M	135	117.4	0	17.6	117.4	2.72	197.5	395.0
A	135	100.9	0	34.1	100.9	2.33	169.2	338.4

D	135	34.7	6.3	106.6				
E	106.6	67.7	0	38.9	96.1	2.22	161.2	322.4
F	135	92.4	0	42.6	92.4	2.14	155.4	310.8
M	135	117.4	9.1	26.7	108.3	2.51	182.2	364.4
A	135	100.9	0	34.1	100.9	2.33	169.2	338.4

D	135	34.7	2.1	102.4				
E	102.4	67.7	4.9	39.6	95.4	2.21	160.4	320.8
F	135	92.4	0	42.6	92.4	2.14	155.4	310.8
M	135	117.4	0	17.6	117.4	2.72	197.5	395.0
A	135	100.9	0	34.1	100.9	2.33	169.2	338.0

MODELO DE SIMULACION CONQUIN

DARA MAIZ 1

SUPERFICIE = 800 HA

MES	(mm) CI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIESGO	N° RIEGOS	(mm) LAMINA RIESGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
J	150	87.4	47.6	110.2				
J	110.2	143.6	95.9	62.5	87.5	1.82	146.9	1175.2
A	150	159.9	116.2	106.3				
S	106.3	126.9	156.8	136.2				
J	150	87.4	85.4	148				
J	148	143.6	115.5	119.9				
A	119.9	159.9	171.5	131.5				
S	131.5	126.9	86.8	91.4	58.6	1.22	98.4	787.2
J	150	87.4	28.7	91.3	58.7	1.22	98.4	787.2
J	150	143.6	133.0	139.4				
A	139.4	159.9	62.3	41.8	108.2	2.25	181.6	1452.8
S	150	126.9	154.0	177.1				

MODELO DE SIMULACION CONQUIN

PARA MAIZ 2

SUPERFICIE = 1100 Ha.

MES	(mm) CI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIESGO	N: RIESGO	(mm) ZANADA RIESGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
D	150	47.6	8.4	110.8				
E	110.8	74.3	4.9	41.4	108.6	2.26	182.4	2006.4
F	150	94.6	2.1	57.5	92.5	1.93	155.7	1712.7
M	150	132.5	0	17.5	132.5	2.76	222.7	2449.7

D	150	47.6	6.3	108.7				
E	108.7	74.3	0	34.4	115.6	2.41	194.5	2139.5
F	150	94.6	0	55.4	94.6	1.97	159	1749
M	150	132.5	9.1	26.6	123.4	2.57	207.4	2281.4

D	150	47.6	2.1	104.5				
E	104.5	74.3	4.9	35.1	114.9	2.39	192.9	2121.9
F	150	94.6	0	55.4	94.6	1.97	159	1749
M	150	132.5	0	17.5	132.5	2.76	222.7	2449.7

MODELO DE SIMULACION CONQUIN

DADA FRINOL

SUPERFICIE = 400 Ha

MES	(mm) CI (I)	(mm) UC (I)	(mm) LL (I)	(mm) CF (I)	(mm) RISGO	Nº RIEGOS	(mm) ESNINA RIEGO REAL	(10 <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
D	120	54.5	8.4	73.9	46.1	1.20	77.4	309.6
E	120	81.1	4.9	43.8	76.2	1.98	127.7	510.8
F	120	64.1	2.1	58.0	62.0	1.61	103.8	415.2
D	120	54.5	6.3	71.8	48.2	1.26	81.3	325.2
E	120	81.1	0	38.9	81.1	2.11	136.1	544.4
F	120	64.1	0	55.9	64.1	1.67	107.7	430.8
D	120	54.5	2.1	67.6	52.4	1.36	87.7	350.8
E	120	81.1	4.9	43.8	76.2	1.98	127.7	510.8
F	120	64.1	0	55.9	64.1	1.67	107.7	430.8

\* mo

# CALCULO DE LOS GASTOS UNITARIOS MAXIMOS DE CADA

## CULTIVO (1)

### 1- PASTOS

$$q_p = \frac{V_R^{(*)} (m^3 \times 10^3) (1000 \text{ Hts}/m^3)}{\text{Superficie (tiempo = seg. por mes)}} = \frac{880.5 \times 10^3 m^3 (10^3 \text{ Hts}/m^3)}{300 \text{ Ha} (2592 \times 10^3 \text{ s})}$$
$$q_p = \underline{1.132 \text{ Hts/s/Ha}}$$

### 2- ALGODON

$$q_a = \frac{1904 \times 10^3 \text{ Hts}}{1000 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{0.744 \text{ Hts/s/Ha}}$$

### 3- JORGO 1

$$q_{s1} = \frac{1062.6 \times 10^3 \text{ Hts}}{600 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{0.683 \text{ Hts/s/Ha}}$$

### 4- JORGO 2

$$q_{s2} = \frac{395 \times 10^3 \text{ Hts}}{200 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{0.762 \text{ Hts/s/Ha}}$$

### 5- MAIZ 1

$$q_{m1} = \frac{1452.8 \times 10^3 \text{ Hts}}{800 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{0.701 \text{ Hts/s/Ha}}$$

### 6- MAIZ 2

$$q_{m2} = \frac{2449.7 \times 10^3 \text{ Hts}}{1100 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{0.859 \text{ Hts/s/Ha}}$$

### 7- FRONON

$$q_f = \frac{544.4 \times 10^3 \text{ Hts}}{400 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{0.525 \text{ Hts/s/Ha}}$$

(1) Datos obtenidos de los modelos de simulación conguin para cada cultivo

(\*) Volumen real máximo para cada cultivo

sería necesario recetar riegos fraccionados (columna 6) para que el ejemplo resulte ilustrativo.

El número de riegos (columna 7) se obtuvo dividiendo el complemento necesario para lograr la capacidad de campo entre el valor de la lámina de riego previamente obtenida (columna 7).

La columna 8 se calcula multiplicando los valores de columna 7 por la lámina real de riego.

Finalmente la columna 9 muestra los valores de la lámina de riego real multiplicados por la superficie correspondiente, expresando los resultados en  $m^3 \times 10^3$ .

Una vez que se ha realizado la simulación para cada cultivo mes a mes durante los 3 años, se eligen los valores máximos del gasto unitario y se ordenan en orden decreciente, como se muestra en la Tabla de resultados finales y se procede a elaborar la representación gráfica de ellos.

## 5. - Resultados

El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla de Resultados Finales y se ilustra en la gráfica de coeficientes unitarios de riego.

## 6. - Conclusiones y recomendaciones

El empleo de la gráfica de coeficientes unitarios de riego permitirá obtener la capacidad de diseño de los canales del sistema de conducción y distribución.

TABLA DE RESULTADOS

FINALES

lts/s/Ha	Ha	Ha	$m^3 \times 10^3$	$m^3 \times 10^3$	lts/s/Ha	
$q_i$	$A_i$	$A_i$ acum.	$V_i$	$V_i$ acum.	$q_{if} = \frac{V_{i\text{acum}} \times 10^3}{A_{i\text{acum}} \times \Delta t}$	Cultivo
1.132	300	300	880.5	880.5	1.132	Pasto
0.859	1100	1400	2449.7	3330.2	0.918	Maíz 2
0.764	1000	2400	1904.0	5234.2	0.841	Algodón
0.762	200	2600	395.0	5629.2	0.835	Soya 2
0.701	800	3400	1452.8	7082.0	0.804	Maíz 1
0.683	600	4000	1062.6	8144.6	0.785	Soya 1
0.525	400	4400	544.4	8689.0	0.762	Frijol

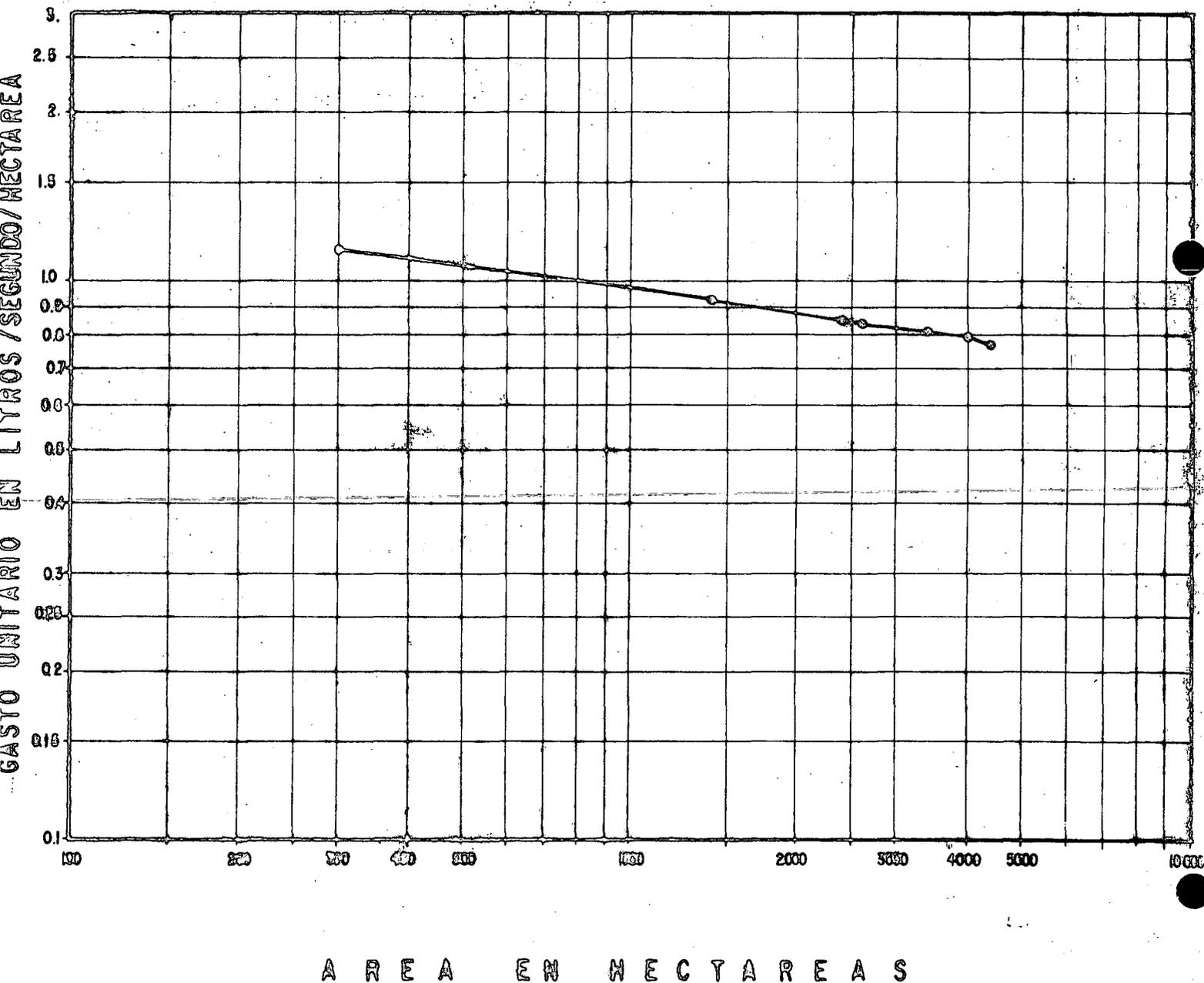
Es notorio el efecto del tamaño de la superficie dominada en el valor del coeficiente unitario de riego, cuyo valor aumenta en cuanto el área -- disminuye.

El período considerado en el análisis (un mes), resulta ser muy amplio, en casos reales podría no ser representativo de las condiciones que se deben considerar. Se recomienda efectuarlo a nivel decenal como mínimo.

El procedimiento empleado resulta ser muy laborioso (no obstante, - las simplificaciones propuestas), sin embargo, es simple y muy lógico.

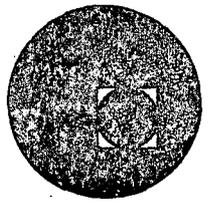
Se recomienda el empleo de un programa de computadora para su apli cación.

# COEFICIENTES UNITARIOS DE RIEGO





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

MODELOS DE SIMULACION  
CONQUIN

ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA

AGOSTO, 1978



# MODELO DE SIMULACION CONQUIN

## I PRESENTACION DEL PROBLEMA.

### I.1 Introducción:

En el presente trabajo se aborda el problema de seleccionar la capacidad de conducción de que habrá de dotarse a una red de distribución de agua para riego el cual puede concebirse como el dimensionamiento de una fuente de servicio.

El criterio para seleccionar una determinada capacidad de una fuente de servicio es el de dotarla de tamaño suficiente para que pueda funcionar eficientemente en condiciones críticas extremas entendiéndose como tales las concentraciones de demanda. En este caso la fuente de servicio es la red de canales y el servicio que suministra es el riego.

Una demanda para riego se origina cuando la humedad en el suelo, en el que se desarrolla un cultivo, es insuficiente para el desarrollo del mismo. De entre los factores que más influyen en este proceso pueden considerarse como de mayor importancia los climatológicos, tales como lluvia, evaporación, temperatura etc.; las características mismas del cultivo, la capacidad de los suelos para retener agua en condiciones que pueda ser aprovechada por los cultivos así como las costumbres y prácticas de riego seguidas por los usuarios. Todos estos factores son de naturaleza aleatoria, lo cual hace que el proceso que los integra tenga

también la misma naturaleza casual.

En este trabajo se pretende reproducir el proceso que origina las demandas de riego, de tal suerte que se obtenga la información necesaria para diseñar la capacidad de conducción de la red de canales y sobre todo conocer la probabilidad de que dicha capacidad resulte insuficiente.

Con esta información es posible balancear dos aspectos importantes como son el económico y la eficiencia de la red de distribución ya que una red capaz de satisfacer la totalidad de las demandas a que está sujeta a lo largo de su vida útil, es una red muy costosa ya que requiere de una fuerte inversión inicial, con costos de conservación elevados y grandes pérdidas por evaporación y filtraciones. Un diseño razonable es aquel en que se consideren posibles reducciones de la capacidad de los canales con el conocimiento del riesgo que se corre de no satisfacer la totalidad de las demandas.

## I.2 Presentación del Problema.

Al considerar a la red como una fuente de servicio sujeta a demandas casuales, el problema de la selección de la capacidad de la red de canales puede ser circunscrito a la determinación de la magnitud y frecuencia de las demandas, para lo cual es neces

rio definir el proceso que las origina.

A partir del establecimiento de un determinado tipo de cultivo en la zona de riego, se inicia el proceso que origina las demandas en el momento en que el contenido de humedad en el suelo es insuficiente para el desarrollo de la planta.

Dentro del proceso que origina las demandas, pueden identificarse a los factores de mayor influencia en la distribución de las demandas a los siguientes:

Cultivo: La influencia del tipo de cultivo está definida por sus requerimientos de agua, los cuales dependen de las características propias de la planta y de su grado de crecimiento.

Suelo: para que el agua sea aprovechada por los cultivos deberá ser depositada en el suelo y el contenido de humedad resultante, deberá quedar comprendido entre ciertos límites y hasta una cierta profundidad. La primera limitación sobre el contenido de humedad depende de las características físicas del suelo y la segunda del grado de desarrollo de la raíz de la planta, ya que se considera que éstas extraen humedad del suelo hasta una profundidad igual a la radicular.

Lluvia: el efecto de la lluvia en la distribución de los riegos está definido por las recuperaciones del contenido de

humedad del suelo que produce.

En base de lo anterior se puede establecer el espaciamiento de las demandas, como el tiempo que tarda la planta en consumir el agua almacenada en el suelo, tomando en cuenta las recuperaciones del contenido de humedad aprovechable producidas por la lluvia.

Un proceso así establecido puede definir el espaciamiento y magnitud de las demandas de riego, sin embargo, sólo es aplicable a un determinado cultivo que se desarrolla en un tipo de suelo con una cierta variación de la precipitación.

A fin de conocer las demandas a que está sujeta la red de canales, es necesario definir tantos procesos como posibles combinaciones de los diferentes tipos de cultivo, de suelo y zonas de precipitación existentes en la zona de riego, de tal suerte que las demandas obtenidas no sólo estén identificadas por su magnitud y época del año en que se producen sino que también estén localizadas físicamente en la red.

Los tipos de cultivo por implantar constituyen el plan de cultivos el cual tiene como características principales la fecha de siembra y de cosecha de cada uno, los requerimientos parciales de agua a lo largo del ciclo vegetativo de cada cultivo, la ex

tensión en que se van a desarrollar y el requerimiento total de agua para el ciclo agrícola. Una vez elaborado el plan de cultivos se puede aceptar que la distribución de los mismos dentro de la zona de riego se hace en forma casual, ya que se puede desarrollar cualquier tipo de cultivo en cualquier parte del distrito de riego.

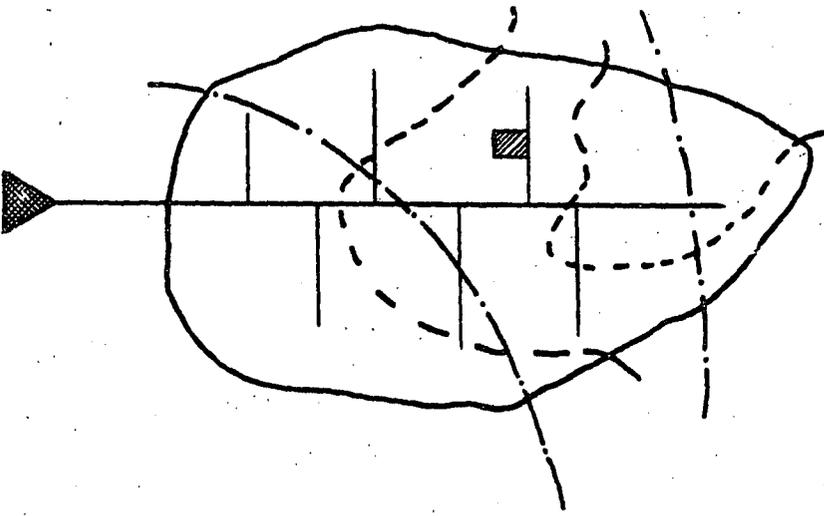
En un distrito de riego de regular tamaño es prácticamente imposible encontrar un solo tipo de suelo, lo que obliga a una clasificación de suelos en base a sus capacidades para retener humedad aprovechable por las plantas y por su localización dentro de la zona de riego.

La delimitación de las zonas de influencia de las diversas componentes de la demanda, adquiere una importancia especial en el caso de la precipitación, ya que una lluvia capaz de generalizar su contenido de humedad en una zona amplia del distrito de riego, puede tener como consecuencias una concentración de demandas que sea determinante en la selección de la capacidad de la red de canales. Los efectos de estas concentraciones serán mayores cuanto más extensa sea el área donde se producen, mayor sea la uniformidad de los suelos y del grado de desarrollo de los cultivos.

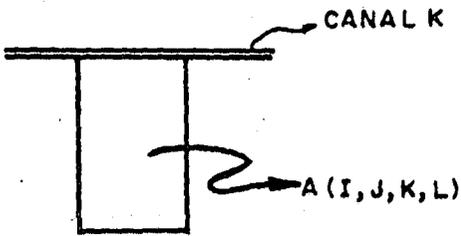
Para definir las características de la red de canales, se puede dividir la zona de riego en áreas unitarias e identificar a cada área por dos parámetros, uno determinista y el otro casual (Fig. A), el primero permanece constante durante la vida útil de la red y está compuesto por el tipo de suelo que la constituye, la zona de precipitación a que pertenece y el canal que le dá servicio; el parámetro casual está definido por el tipo de cultivo que desarrolla, el cual puede variar dentro de un mismo año si el plan de cultivos es muy intensivo.

La simulación consiste en el establecimiento de un modelo que representa a una red de canales trabajando con el criterio anterior, en forma tal, que al efectuar el funcionamiento del modelo a lo largo de un cierto número de años, para los cuales se tienen definidas las características del distrito de riego, se puedan conocer las demandas asociadas a cada tramo de la red en todos los intervalos de tiempo en que se dividió el período en estudio.

Lo anterior permite para cada tramo, elaborar un histograma de demandas, lo que a su vez fundamenta la selección de la capacidad de la red con una probabilidad dada de que resulte insuficiente.



- - - - - LIMITE ZONAS CLIMATOLÓGICAS  
 - - - - - LIMITE TIPO DE SUELO



A = AREA UNITARIA  
 I = Nº TIPO DE SUELO  
 J = Nº ZONA CL  
 K = CANAL QUE LE  
 L = CULTIVO

FIG. A

### I.3 Objetivos:

1. - Establecer un método para seleccionar la capacidad de una red de canales, que permita el análisis de sistemas ya sea con fines de rehabilitación o de nueva implantación.

2. - Definir qué tipo de información debe ser recabada con la mayor precisión posible, lo cual se puede lograr mediante la introducción de cambios en las diferentes componentes de la demanda y observar que efectos producen en el comportamiento del modelo, de tal suerte que se obtenga la respuesta de cada una de las siguientes preguntas:

- a) En qué grado influye el factor suelo?
- b) Es necesaria tanta precisión en la recolección de datos climatológicos?
- c) Qué cambios producen las variaciones del plan de -cultivos?

## II ANALISIS CRITICO DE CRITERIOS ACTUALMENTE EN USO.

El método normalmente empleado consiste en suponer un plan de cultivos para un ciclo agrícola y de acuerdo con las características medias de la zona de riego, así como con los promedios de la información climatológica, se determinan las demandas mensuales y la cantidad de agua que debe aportarse al distrito de riego en el ciclo agrícola.

El procedimiento anterior se efectúa un cierto número de veces con un plan de cultivos diferente en cada alternativa y se adopta como definitivo, el que produce los efectos más desfavorables.

Finalmente, en base al mes de máxima demanda se elaboran gráficas de coeficientes unitarios de gastos vs. hectáreas dominadas, estas gráficas definen la capacidad de cada tramo de la red en función del número de hectáreas que domina.

Este criterio tiende a definir capacidades de conducción excesivas, es decir, capacidades más que suficientes para satisfacer la totalidad de las demandas a que está sujeta la red durante su vida útil, sin tomar en cuenta la probabilidad de que se presente la combinación de componentes de la demanda que produjo la condición

de diseño, lo que tiene como consecuencia que los canales no lleguen a transportar los gastos para los que fueron diseñados y que su construcción implique una elevada inversión inicial, una conservación costosa y pérdidas considerables por evaporación y filtraciones, sin embargo, puede mejorarse dentro de los términos en que fue planteado si:

- a) Se considera la localización de los diversos tipos de cultivo dentro de la zona de riego.
- b) Se toman en cuenta los diversos tipos de suelo existentes en el distrito de riego.
- c) Se respeta la distribución de la lluvia dentro del distrito de riego, ya que al integrar la información climatológica en una sola, se definen lluvias generalizadas que tienden a producir concentraciones de demanda existentes.
- d) Se reducen los intervalos de tiempo en que se dividió el ciclo agrícola, dado que el total mensual de la precipitación no es indicativo de la variación de la misma durante el mes, pudiéndose presentar lluvias que sí aporten humedad aprovechable por las plantas, pero que al ser cuantificadas como total mensual, se consideren de efectos nulos.

### III. FORMULACION Y PROGRAMACION DEL MODELO.

#### III.1 Formulaci3n del Modelo.

El modelo tiene por objeto representar el funcionamiento de una red de canales cuya pol3tica de operaci3n es la demanda libre .

##### III.1.1 Especificaci3n de Componentes.

El modelo propuesto puede considerarse dividido en dos partes principales; en la primera parte obtiene la distribuci3n de los riegos en el tiempo y en la segunda, asocia la distribuci3n de los riegos a la red de distribuci3n.

##### III.1.2 Especificaci3n de Variables.

###### A) Variables de Entrada.

a) Informaci3n Climatol3gica, representada por las distribuciones de la lluvia, temperatura y evaporaci3n, a lo largo del per3odo por simular, correspondiente a las diversas zonas climatol3gicas definidas dentro del distrito de riego.

b) Tipos de Suelo, definidos por sus caracter3sticas f3sicas relativas a la capacidad para retener humedad aprovechable por las plantas.

c) Plan de Cultivos, representado por cada uno de los cultivos que lo integran, los cuales est3n definidos por sus re-

querimientos parciales de agua a lo largo de sus respectivos ci clos vegetativos, sus profundidades radicales y las extensiones en que van a ser desarrollados.

Para estimar los requerimientos parciales de agua de cada cultivo, existe una serie de criterios, la mayoría de ellos empíricos, que utilizan la información climatológica en un mayor o menor grado.

Con base en las fechas extremas del ciclo vegetativo y en la información climatológica, se puede determinar el uso consuntivo de una planta con una mayor o menor precisión, la cual depende del método empleado.

d) Características de la Red, definidas por el número de áreas unitarias que abastece cada tramo.

c) El avance de la Siembra de los Cultivos, esta variable depende de una serie de fenómenos casuales, los cuales van desde disponibilidad de créditos, hasta predicciones de condiciones de mercado hechas por los propios agricultores que calculan obtener un mejor precio para su producto si éste es tempranero o tardío. Para definir una ley de avances de siembra fue necesario efectuar observaciones directas, las cuales se llevaron a cabo en diferentes distritos de riego del Noroeste y en la Comarca Lagunera, en

contrándose que para extensiones mayores de 500 Ha. , la ley de avances de siembra se puede asimilar a una curva S.

#### B) Variables de Condición

Para un intervalo de tiempo cualquiera y para todas las áreas unitarias en que se dividió la zona de riego, se tienen las siguientes variables de condición:

- a) Estado del área unitaria en lo que se refiere a estar libre o estar ocupada por un cultivo.
- b) Contenido de humedad en el suelo al inicio o al final del intervalo de tiempo.
- c) Lámina de riego asociada al área unitaria en función de la capacidad del suelo en el intervalo de tiempo.

#### C) Variables Generadas.

Demandas de riego asociadas a todos los tramos de la red en todos los intervalos de tiempo.

### III.1.3 Especificación de Relaciones Funcionales.

#### A) Sistema Agua-Planta-Suelo.

Como se expuso anteriormente, se considera al suelo comportándose como un almacenamiento en el cual las demandas están representadas por la evapotranspiración, las aportaciones por los volúmenes llovidos o regados y el volumen alma-

cenado por el contenido de humedad aprovechable del suelo.

Las capacidades extremas de almacenamiento - del suelo, están definidas por el Punto de Marchitamiento para el contenido de humedad mínimo permisible y por la Capacidad de - Campo para el máximo.

El funcionamiento del sistema propuesto, para un intervalo de tiempo cualquiera (i), se ilustra en el siguiente diagrama:

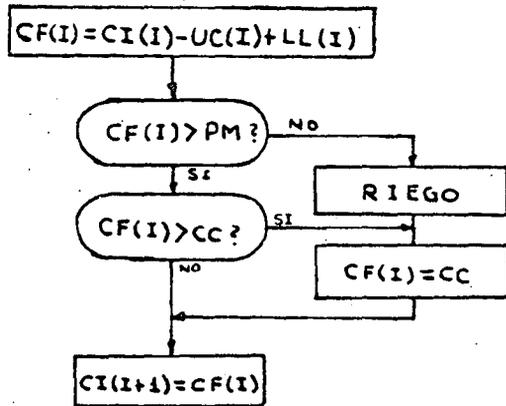


FIG-1

CI = Contenido de humedad al inicio del período

CF = Contenido de humedad al final del período

UC = Uso Consuntivo de la planta en el período

PM = Punto de Marchitamiento

CC = Capacidad de Campo

LL = Lluvia efectiva en el período

La lámina de riego necesaria para incrementar el contenido de humedad del suelo desde el punto de marchitamiento hasta la capacidad de campo, está definida por la siguiente relación:

$$L = DA \times (CC - PM) \times PR$$

Donde:

L = Lámina de Riego

DA = Densidad Aparente del Suelo

PR = Profundidad Radicular del cultivo en el período.

El efectuar el funcionamiento anterior para todos los cultivos en los diferentes tipos de suelo y zonas de precipitación, se obtienen las láminas de riego, en cada intervalo de tiempo del período de simulación, para todas las combinaciones posibles de cultivo, suelo y precipitación, lo que define la distribución de los riegos en el tiempo.

B) Establecimiento de Cultivos en la zona de riego.

La asignación de cultivos a las distintas áreas unitarias de la zona de riego se hace a través de un proceso casual, en el cual, para un intervalo de tiempo, todas las áreas unitarias desocupadas tienen la misma probabilidad de ser sembradas.

C) Cuantificación de Volúmenes de riego.

Si en un intervalo de tiempo cualquiera, se analizan todas las áreas unitarias en que se dividió la zona de riego, cada área ocupada tiene asociada, como resultado del funcionamiento del sistema agua-suelo-planta que le corresponde, la lámina de riego definida para el intervalo de tiempo, lo que permite una cuantificación del volumen de riego para cada área ocupada.

Dado que uno de los parámetros que identifican a las áreas unitarias es el tramo de la red que les dá servicio, se pueden asociar los volúmenes de riego correspondientes a cada área a los distintos tramos de la red, lo que define las demandas a que están sujetos todos los tramos en el intervalo de tiempo.

Quando un cultivo alcanza su intervalo de cosecha se desocupa el área en que se desarrolló y a ésta se le declara en condiciones de recibir a otro tipo de cultivo.

Al efectuar la distribución anterior tantas veces como sea necesario para cubrir el período de simulación, se obtienen las demandas a que están sujetos todos los tramos de la red en todos los intervalos en que se dividió el período. Las demandas así obtenidas permiten la elaboración de un histograma para cada tramo, lo cual a su vez permite la selección de la capacidad de los tramos en base a la probabilidad de que resulte insuficiente.

#### III. 1. 4 Evaluación del Modelo.

La evaluación del modelo se basa en el hecho de que tanto el espaciamento de los riegos como las láminas generadas, no tienen diferencias significativas con las obtenidas en la realidad bajo condiciones similares. La comprobación anterior fundamenta la aceptación del modelo.

#### III. 2 Programación del Modelo.

El modelo propuesto puede ser programado para un computador digital obedeciendo la misma secuencia conceptual descrita anteriormente.

El programa fue derivado del siguiente diagrama de bloques.

# PROGRAMA RIEGO

Nº DE ALTERNATIVAS  
Nº DE AÑOS  
Nº DE ESTACIONES PLUVIOMETRICAS  
Nº DE TIPOS DE SUELO  
Nº DE TIPOS DE CULTIVO  
PARAMETROS PARA GENERACION DE NUMEROS CASUALES

RANGO DE SIEMBRA EN DECENAS PARA CADA CULTIVO

LLAMA SUBROUTINA PLANTA

DETERMINA EL Nº TOTAL DE CULTIVOS Y EL Nº  
DE FUNCIONAMIENTOS DE SUELO POR EFECTUAR

AREA CORRESPONDIENTE A CADA CULTIVO

CARACTERISTICAS DE LA RED DE DISTRIBUCION

TIPO DE LLUVIA Y SUELO PARA CADA UNIDAD DE AREA

A  
1, Nº DE ALTERNATIVAS

ESTABLECE CONDICIONES INICIALES PARA LA ZONA DE RIEGO

2

2

ITERACION PARA CADA DECENA HASTA EL N° DE AÑOS

ESTABLECE CONDICIONES INICIALES PARA LA RED DE DISTRIBUCION

PARA CADA CULTIVO

SE RIEGA EN ESTA DECENA?

RIEGO PARA ESTA DECENA = 0

RIEGO PARA ESTA DECENA = AL LEIDO DE CINTA

ITERACION PARA CADA CULTIVO

SE SIEMBRA ESTE CULTIVO EN ESTA DECENA?

B

DETERMINA EL NUMERO DE UNIDADES DE AREA QUE SE SIEMBRAN

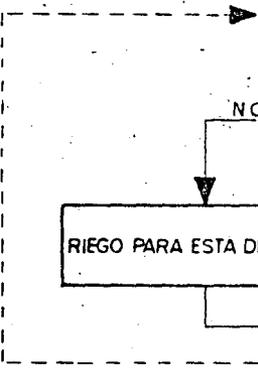
ITERACION PARA CADA UNIDAD POR SEMBRAR

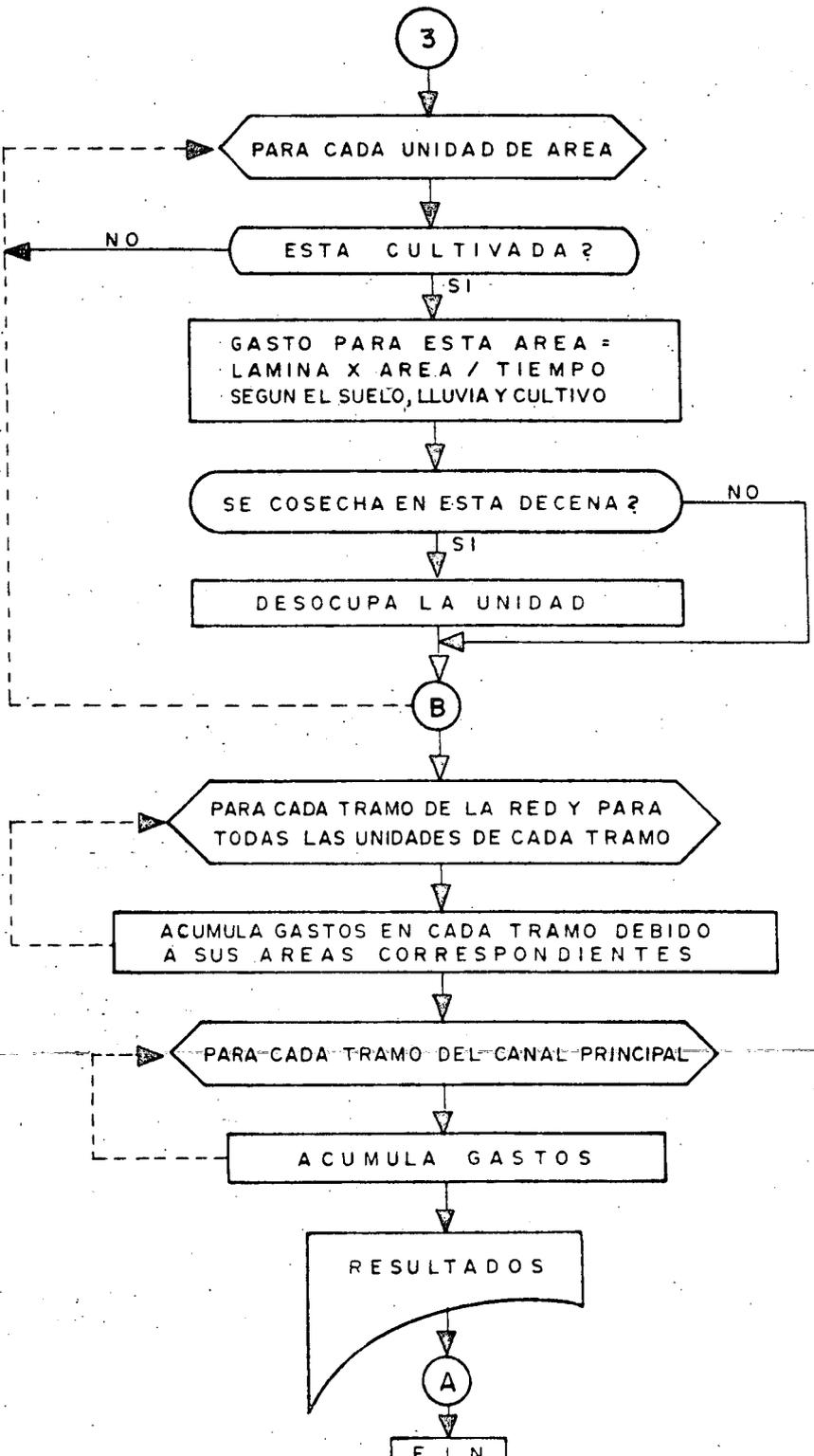
SELECCIONA UNA UNIDAD AL AZAR

ESTA SEMBRADA?

SE LE ASIGNA TIPO DE CULTIVO

3





SUBROUTINA PLANTA

DECENA DE SIEMBRA Y DE COSECHA,  
PROFUNDIDAD RADICULAR, USO CONSUNTIVO,  
PRECIPITACION, EVAPORACION, DENSIDAD  
APARENTE, HUMEDAD RELATIVA, PORCENTAJE  
DE MARCHITAMIENTO

DETERMINA CAPACIDAD DE CAMPO Y LAMINA INICIAL

ITERACION POR DECENA, TIPO DE LLUVIA,  
TIPO DE CAMPO, TIPO DE CULTIVO

SE CULTIVA EN ESTA DECENA? NO

SI

DETERMINA LLUVIA EFECTIVA  
Y LAMINA FINAL

LAMINA FINAL > CAPACIDAD DE CAMPO NO

SI

LAMINA FINAL = CAPACIDAD DE CAMPO

LAMINA FINAL < PORCENTAJE DE MARCHITAMIENTO NO

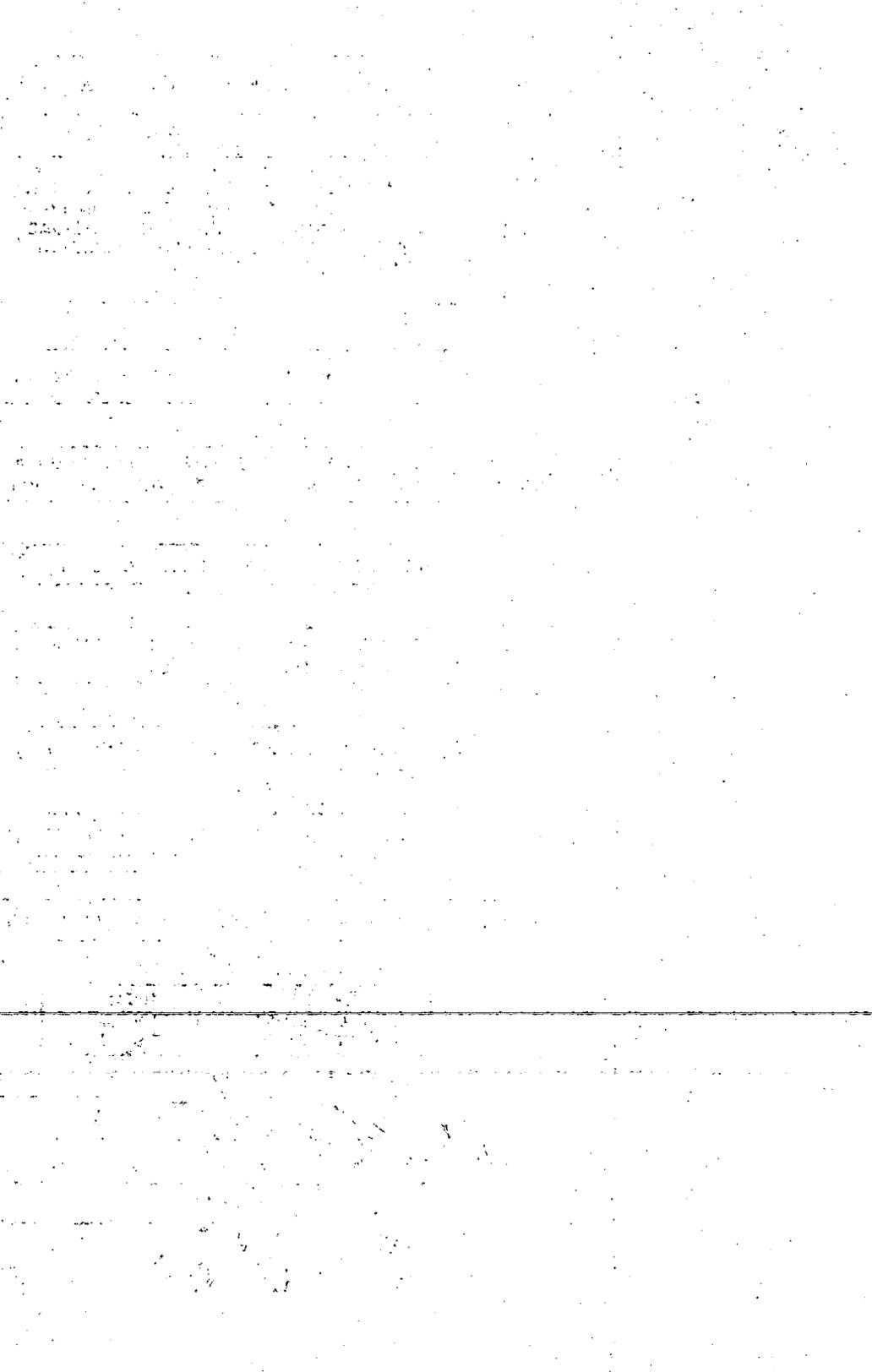
SI

DETERMINA EL RIEGO  
Y LO GRABA EN CINTA  
JUNTO CON EL TIPO DE CULTIVO

RIEGO = 0

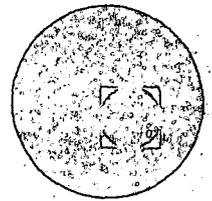
LAMINA INICIAL = LAMINA FINAL + RIEGO

FIN





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

EVAPOTRANSPIRACION

EL USO CONSUNTIVO

ING. JOSE ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA

AGOSTO, 1978



### .3 EL USO CONSUNTIVO

#### .3.1 Consideraciones generales

Una gran parte del agua aplicada a las tierras de regadío es consumida por la evaporación y la transpiración. Como en la práctica es difícil separar estos dos procesos, se les considera como uno solo y se denomina Evapotranspiración o bien, Uso Consuntivo.

Según la definición dada en el Apartado .1 de esta Norma, el uso consuntivo incluye todas las pérdidas por evaporación y transpiración de las plantas agrícolas y de la vegetación natural que medra en las parcelas, más la evaporación propia del suelo. Es por tanto, el mejor índice a emplear para determinar las Necesidades de Riego (NR).

La medición del uso consuntivo para cada una de las condiciones físicas y climáticas que pueden ocurrir en una zona de riego dada puede que, además de ser costosa, requiera de mucho tiempo para llevarla al cabo. En general, los resultados de las investigaciones, diferentes mediciones del uso consuntivo y los datos meteorológicos observados en una determinada zona, constituyen la información de base para estimar las necesidades de riego en aquellas otras zonas donde únicamente se dispone de datos climatológicos.

#### .3.2 Los factores que intervienen

En el Esquema de la Lámina .1.2.3-1 se han indicado algunos de los factores que tienen influencia en la cantidad de agua que consume el complejo suelo-planta. En un lugar determinado, algunos son constantes en sus efectos y varia-

bles otros, dentro del ciclo agrícola y de un año a otro.

Algunos de los factores que influyen en el uso consuntivo tienen que ver con los aspectos humanos y muchos otros - con el medio ambiente, tales como los climáticos, el abastecimiento del agua a las plantas, el tipo de suelo y las características topográficas del terreno. En seguida se describen algunos de los más destacados

a) Temperatura

De los factores climáticos posiblemente la temperatura sea la que mayor influencia tiene en el uso consuntivo, por ser la que principalmente determina en un lugar dado el tipo de cultivos más adecuados para lograr una producción remunerativa, y la rapidez con que esos cultivos consumen el agua.

Por otra parte, según la distribución que la temperatura tenga en el período en que la planta se desarrolla, el uso consuntivo puede variar entre límites muy amplios.

b) Humedad

En general, cuando la humedad tiene valores bajos, tanto la evaporación como la transpiración aumentan, y disminuyen cuando la humedad es alta.

c) Viento

Cuando, durante el período de desarrollo de las plantas, se presentan vientos calientes y secos, de ordinario afectan la cantidad de agua que aquéllas consumen; en términos generales puede decirse que, cuando hay movimiento de las masas de aire, la evaporación del agua por la superficie foliar de las plantas se efectúa con mayor rapidez.

d) Período de desarrollo de las plantas

En las cantidades de agua que consumen las plantas tiene mucha influencia la etapa y el período total de desarrollo de las mismas; estas dos características están íntimamente relacionadas con la temperatura del lugar. En general, tanto el período de desarrollo como el ciclo agrícola anual tienen mucha importancia en la determinación de las necesidades de agua que requiere el uso consuntivo de las plantas.

e) La Latitud del lugar

Aunque la Latitud apenas si puede considerarse como un factor climático, tiene mucha influencia en el valor

valor que pueda alcanzar el uso consuntivo de los diversos tipos de plantas. Durante el verano, el número de horas de luz solar es mayor en las latitudes al Norte del Ecuador que en éste; además, la transpiración aumenta cuando los días son de mayor duración. Lo anterior equivale a un aumento en el período de desarrollo de las plantas.

f) El abastecimiento del agua

En las regiones áridas y semiáridas, donde la irrigación es absolutamente necesaria, la cantidad de agua disponible y su distribución por riegos en general afectan al valor del uso consuntivo. Por ejemplo, si la superficie del suelo es humedecida con frecuencia y el valor de la evaporación es alto, entonces, aumentará la cuantía del uso consuntivo.

g) La calidad del agua

En algunos lugares, la calidad del agua influye también en las necesidades de agua para el riego. El agua que se necesita para el lavado de las sales nocivas en el suelo se considera como una cantidad adicional a la que requiere el complejo suelo-planta para satisfacer su uso consuntivo, como ya se dijo en el Apartado .2 de esta Norma, cuando se trató sobre las necesidades para la Irrigación ( $N_{ir}$ ). En términos muy generales, para el control de la salinidad en el suelo se necesita alrededor de un 20 por ciento más del agua necesitada por el uso consuntivo.

h) Fertilidad del suelo

Cuando se mejora la fertilidad del suelo con abonos químicos u otros medios, en general aumentan los rendimientos de las cosechas por hectárea y por consiguiente, hay un incremento en el consumo de agua; aunque ese aumento, por lo pequeño, rara vez se toma en cuenta en el cálculo del uso consuntivo.

i) Plagas y enfermedades de las plantas

En aquellos lugares donde las plagas y las enfermedades afectan seriamente el crecimiento natural de las plantas, de ordinario disminuye la cantidad de agua consumida por transpiración. En los años en que las pérdidas de las cosechas son muy fuertes, por los daños que las plagas ocasionan a los cultivos, el uso consuntivo se reduce notoriamente.

### .3.3 Los métodos más empleados

#### .3.3.1 Generalidades

Para determinar la cantidad de agua que consume el complejo suelo-planta se han empleado varios métodos; debiendo tener presente que tiene influencia en el método elegido, el agua utilizada por las plantas agrícolas, por lo que a su procedencia se refiere: precipitación solo o ésta y el riego artificial con agua de procedencia superficial o subterránea.

Puede decirse que es posible calcular los valores del uso consuntivo para diferentes tipos de cultivos, utilizando los resultados obtenidos en las determinaciones sobre la humedad del suelo o con los valores de la evaporación medida en lisímetros o tanques, mediante los datos obtenidos en los riegos y los climatológicos, o bien de alguna otra manera.

Para los cultivos en proceso de riego, se pueden usar los datos sobre láminas de riego aplicadas, número de riegos en el ciclo agrícola anual, eficiencia de riego, capacidad de campo de los suelos y duración del período de desarrollo, para hacer la estimación de los valores del uso consuntivo. Y esos valores observados en cierta región o zona, pueden utilizarse para hacer la estimación del U.C. en otras que tengan condiciones climáticas comparables, cuando se disponga de datos registrados sobre temperatura y precipitación en ambas localidades.

Por muchos años, los ingenieros en irrigación han determinado el uso consuntivo por medio de datos climatológicos. Algunos investigadores han ideado ciertos métodos para predecir la evapotranspiración por medio de datos climatológicos; entre otros, C. W. Thornthwaite en 1948 elaboró un procedimiento para determinar la evapotranspiración o uso consuntivo a partir de datos atmosféricos. Por otra parte, investigadores como J. L. Penman y otros, aplicando el principio de la conservación de la energía, correlacionaron los valores observados de la evapotranspiración en tanques con observaciones meteorológicas; de esa manera obtuvieron un índice para estimar la evapotranspiración.

En los E.U.A., los estudios llevados al cabo en 1942 por H. F. Blaney y otros, indicaron que los datos mensuales durante el período de desarrollo de las plantas, sobre evaporación, evapotranspiración, temperatura media y porcentaje de horas de insolación pueden utilizarse para obtener cuantitativamente las necesidades de agua del uso consuntivo.

Para ello, elaboraron ciertas fórmulas para calcular el uso consuntivo, a partir de los datos registrados sobre temperatura, humedad ambiente y horas de insolación diaria.

Por último, en 1945, H. F. Blaney y W. D. Criddle simplificaron una de las fórmulas antes mencionadas, eliminando el factor humedad ambiente y propusieron una nueva fórmula para determinar el uso consuntivo. Véanse 11/ y 15/.

A la hora de considerar los posibles métodos disponibles para calcular el uso consuntivo, es importante tener en cuenta que los diferentes factores indicados en términos generales en la Sección 3.2 de esta Norma y que intervienen en la determinación del uso consuntivo, no actúan de un modo independiente, pues unos influyen sobre los otros y todos determinan en conjunto la cantidad de agua que necesita el complejo planta-suelo para que las plantas logren su desarrollo y rindan una cosecha remunerativa. Como todos estos factores varían en forma notoria de uno a otro lugar, el valor del uso consuntivo también variará, aun tratándose de una misma clase o variedad de planta cultivada.

Por lo explicado antes resulta bastante difícil y a veces imposible, considerar a todas y cada una de las condiciones que en un futuro sistema de riego pueden presentarse. Las determinaciones prácticas del uso consuntivo, aun cuando éste pueda medirse en forma directa en los sistemas ya en operación, sólo dan valores medios; pero, no obstante, sirven de una muy buena orientación para valorar la cantidad de agua necesaria para el regadío.

Ya se ha dicho anteriormente que las determinaciones directas del uso consuntivo, ya sea por estudios de campo o vía experimental, generalmente son difíciles, costosas y requieren de cierto tiempo para llevarlas al cabo; por esto, también se han ideado varios métodos indirectos que permiten obtener el uso consuntivo en función de ciertos datos climatológicos registrados.

Los dos métodos indirectos que emplean fórmulas empíricas para la determinación del uso consuntivo en función de datos atmosféricos y que se emplean con más frecuencia, son el de Thornthwaite y el de Blaney y Criddle que en esta Norma se describirán con mayor detalle. Investigadores tales como C. R. Hedke, Lowry y Johnson, Penman y otros, han obtenido también fórmulas empíricas más o menos elaboradas para determinar el uso consuntivo; para mayores detalles sobre estos métodos se recomienda consultar la literatura especializada disponible, entre otras las siguientes: 1/, 2/, 3/, 4/, 5/, 6/, 7/, 8/ y 15/.

### 3.3.2 El Método de Thornthwaite

Este método se basa en el hecho que, según Thornthwaite, el desarrollo vegetativo de un cultivo cualquiera, que tiene lugar en un mes dado, no es función únicamente de la temperatura, aunque sea ésta uno de los factores climáticos más preponderantes, sino que también interviene la etapa de desarrollo en que se encuentre la o las plantas en el mes considerado. Por esa razón, un cultivo puede tener necesidades muy diferentes en dos meses distintos con igual temperatura media, y en un mismo mes, dos cultivos diferentes, por el simple hecho de no encontrarse cada uno en la misma etapa de desarrollo. Cuando se consideran las necesidades de agua para satisfacer el uso consuntivo en una zona dada, en la que haya cierta diversidad de cultivos, las diferentes necesidades de cada cultivo tienden a compensarse entre sí; esto permite obtener un valor medio para el uso consuntivo en función de la temperatura media.

Con apoyo en lo anterior y utilizando datos obtenidos en lisímetro, de California y Nuevo México, E.U.A., Thornthwaite concluyó que el uso consuntivo, para un conjunto de cultivos, era una función de la temperatura y obtuvo una ecuación que representa la relación entre ambos factores. Véase la ecuación (2).

Por las consideraciones hechas por Thornthwaite para establecer su ecuación, es por lo que los valores del uso consuntivo calculados con ésta, en zonas de cultivos diversificados, coinciden mucho con los valores observados en las mediciones directas en dichas zonas. Sin embargo, en aquellas zonas con monocultivo o con tendencia a éste, la coincidencia es ya mucho menor. Pero hay todavía otra circunstancia más, aun cuando se trate de una diversificación semejante en regiones o zonas con igual temperatura media en un mes dado, los valores calculados y los observados del uso consuntivo no resultan iguales.

Por todas las razones antes apuntadas, Thornthwaite introdujo en su fórmula un factor que denominó "eficiencia de la temperatura". El valor mensual de este factor se determina con la ecuación siguiente:

$$E_t = \left( \frac{t}{5} \right) 1.514 \quad (1)$$

La suma anual de las eficiencias de la temperatura correspondientes a cada mes ( $E_t$ ), es la Eficiencia Anual (**I**).

La fórmula de Thornthwaite para calcular la evapotranspi

ración o el uso consuntivo mensual, es entonces la siguiente:

$$u.c = 1.6 \left( \frac{10 t}{I} \right)^a \quad (2)$$

en la que:

u.c = Uso consuntivo mensual, en centímetros

t = Temperatura media mensual, en grados centígrados

I = Es la eficiencia anual de la temperatura. Es la suma de los valores de  $E_t$  para cada uno de los doce meses del año.

$$a = 0.000\ 000\ 675\ I^3 - 0.0000771\ I^2 + 0.01792\ I + 0.49239 \quad (3)$$

Para determinar el uso consuntivo para un grupo cualquiera de cultivos por el método de Thornthwaite, se necesitan conocer los siguientes datos básicos:

- a) El período de desarrollo de los cultivos considerados.
- b) La temperatura media mensual en la zona estudiada.

Con ayuda de la ecuación (1) se obtienen las eficiencias de la temperatura ( $E_t$ ) mensuales; con las ( $E_t$ ) se encuentra la eficiencia anual (I) y, con ésta el uso consuntivo mensual (u.c) por medio de la ecuación (2).

Finalmente, el uso consuntivo total (UC) resulta de la fórmula (4):

$$U.C = \sum_{j=1}^n u.c \quad (4)$$

en la que:

u.c = uso consuntivo mensual, fórmula (2)

n = número de meses en el período de desarrollo correspondiente a la planta.

Para facilitar la determinación del uso consuntivo por medio del Método de Thornthwaite, se dispone de una tabla con los valores de la eficiencia mensual de la temperatura ( $E_t$ ) en función de la media mensual, y de un nomograma que permite obtener el u.c en función de la temperatura mensual en el mes y de la eficiencia anual de la temperatura (I).

En seguida se hace una breve descripción del orden en que se hace el cálculo para obtener el uso consuntivo con el método de Thornthwaite.

- 1.- Se calculan las temperaturas medias mensuales para los meses que comprenda el período de desarrollo de los cultivos.
- 2.- Conocida la temperatura media mensual, en la Tabla 1 se obtiene la eficiencia de la temperatura para cada mes ( $E_t$ ).

Para valores de temperatura mayores de 26.5 grados centígrados, los de la evapotranspiración son prácticamente iguales para cualquier valor de la eficiencia anual de la temperatura (I); y los valores de la evapotranspiración pueden obtenerse directamente de la Tabla 1-A.

- 3.- Se suman las eficiencias de la temperatura ( $E_t$ ) para los doce meses del año y se obtiene la eficiencia anual de la temperatura (I).
- 4.- Conociendo el valor de I, se puede obtener el valor del exponente (a) con la fórmula (3) y resolviendo la ecuación (2), se obtiene el valor del uso consuntivo mensual (u.c). El nomograma dado por Thornthwaite en la publicación citada en la referencia bibliográfica 4/ y reproducido en 12/ permite resolver gráficamente la ecuación (2).
- 5.- Por último, con la suma de los valores de u.c para todos los meses del período de desarrollo de los cultivos en estudio, se obtiene el U.C total, con la fórmula (4).

El método de Thornthwaite tiene algunas desventajas derivadas del hecho que la fórmula básica es aplicable preferentemente al caso de una zona tomada en conjunto, con una cierta diversificación de cultivos; por consiguiente, los resultados que con la misma se obtengan pueden diferir del uso consuntivo de algunos cultivos en particular. Por otra parte, no obstante el haber introducido el factor de efi-



TABLA 1-A

VALORES DE LA EVAPOTRANSPIRACION CUANDO LA TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ES SUPERIOR A 26.5°C.

t										
en°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
26	-	-	-	-	-	13.50	13.59	13.68	13.77	13.86
27	13.95	14.03	14.12	14.20	14.29	14.37	14.45	14.53	14.62	14.70
28	14.78	14.86	14.94	15.01	15.09	15.17	15.24	15.32	15.39	15.47
29	15.54	15.61	15.68	15.75	15.82	15.89	15.95	16.02	16.08	16.15
30	16.21	16.27	16.33	16.40	16.46	16.52	16.58	16.63	16.69	16.74
31	16.80	16.85	16.91	16.96	17.02	17.07	17.12	17.17	17.21	17.26
32	17.31	17.35	17.40	17.44	17.49	17.53	17.57	17.61	17.64	17.68
33	17.72	17.76	17.79	17.83	17.86	17.90	17.93	17.96	17.99	18.02
34	18.05	18.08	18.10	18.13	18.15	18.18	18.20	18.22	18.25	18.27
35	18.29	18.31	18.32	18.34	18.35	18.37	18.38	18.39	18.41	18.42
36	18.43	18.44	18.45	18.45	18.46	18.47	18.47	18.48	18.48	18.49
37	18.49	18.49	18.49	18.50	18.50	18.50	-	-	-	-
38	18.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTA:

Los valores después de 26.5°C son prácticamente los mismos para cualquier valor de la eficiencia anual de la temperatura (1).

ciencia de la temperatura, con el cual se trata de tomar en cuenta la influencia de las diferencias en horas de insola-  
ción, la temperatura es el factor que mayor influencia tie-  
ne en los resultados obtenidos con dicha fórmula.

Por último, cabe advertir que con la fórmula elaborada -  
por Thornthwaite se obtiene la evapotranspiración potencial  
que, según Penman, es "el consumo de agua de un cultivo que  
cubre totalmente la superficie del suelo y que nunca tiene  
deficiencia de humedad". Por consiguiente, hay una cierta  
diferencia con el uso consuntivo según se ha definido en el  
Apartado .1 de esta Norma, en vista de que en muy pocas oca-  
siones los cultivos se encuentran bajo circunstancias tan -  
favorables. Véase 4/ y 10/.

## EJEMPLO 1 -

DETERMINACION DEL USO CONSUNTIVO  
APLICACION DEL METODO DE THORNTHWAITE

CULTIVO: ALGODONERO

PERIODO DE DESARROLLO: 6 meses - Abril a Septiembre

REGION LAGUNERA, COAH-DGO.

LATITUD: 25° 30' N

MES	t en °C	$E_t$ (a)	a (b)	I (c)	$\frac{10t}{I}$	$\left(\frac{10t}{I}\right)^a$	$1.6 \left(\frac{10t}{I}\right)^a = \text{u.c. en cm}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Enero	13.0	4.25	--	--	--	--	--
Febrero	15.8	5.71	--	--	--	--	--
Marzo	18.4	7.19	--	--	--	--	--
Abril	22.6	9.82	--	--	2.13	5.822	9.3
Mayo	25.4	11.71	--	--	2.40	7.689	12.3
Junio	27.0	12.85	--	--	2.55	8.855	14.2
Julio	26.7	12.63	--	--	2.52	8.615	13.8
Agosto	26.1	12.21	--	--	2.46	8.145	13.0
Septiembre	24.2	10.89	--	--	2.28	6.824	10.9
Octubre	21.0	8.78	--	--	--	--	--
Noviembre	16.2	5.93	--	--	--	--	--
Diciembre	12.6	4.05	--	--	--	--	--
Total	--	106.02	2.33	106.02	--	--	73.5

## NOTAS:

- Valores leídos en la Tabla 1, en función de la temperatura media mensual.
- Valor calculado con la ecuación (3):  

$$a = 0.000\ 000\ 675\ I^3 - 0.0000771\ I^2 + 0.01792\ I + 0.49239$$
- Es la suma de los valores de  $E_t$  para los doce meses del año, anotados en la columna (3).

### .3.3.3 El método de Blaney y Criddle

#### .3.3.3.1 Explicación del método

Este método es aplicable especialmente en aquellas zonas de riego en las que no se tienen datos obtenidos experimentalmente o por mediciones directas sobre la cantidad de agua que las plantas consumen, pero donde se cuenta con registros de datos climatológicos; pues esto permitirá relacionar los usos consuntivos así obtenidos, con los de otras zonas donde se hayan efectuado observaciones directas.

El método de Blaney y Criddle, como el de Thornthwaite, se basa también en las temperaturas medias mensuales, pero en los cálculos considera de un modo directo al porcentaje de horas de luz solar o insolación total en el año que corresponde a cada mes. De esta manera, la estimación del uso consuntivo está más acorde con la influencia que la temperatura y las horas de insolación tienen en el desarrollo de las plantas.

El método incluye el cálculo de lo que Blaney y Criddle denominan "factor mensual de uso consuntivo", expresado así:

$$f = \frac{t \cdot p}{100} \quad (1)$$

fórmula en la cual:

f = factor mensual de uso consuntivo, en pulgadas. Se considera que cuando se cuenta con agua suficiente, el uso consuntivo de los cultivos varía directamente con este factor.

t = temperatura media mensual, en grados Fahrenheit.

p = porcentaje en horas de insolación que corresponde al mes con relación a las del año. Los valores de (p) varían con la latitud del lugar en cuestión y, por consiguiente, aunque las temperaturas medias de un mes sean iguales en dos zonas distintas, los factores mensuales de uso consuntivo pueden ser diferentes.

La expresión matemática de la fórmula de Blaney y Criddle es la siguiente, en unidades inglesas:

$$u.c = k f = k \cdot p \left( \frac{t}{100} \right) \quad (2)$$

$$f = \frac{p \cdot t}{100} \quad (3)$$

$$U.C = \sum_{j=1}^n k \cdot f = K \cdot F \quad (4)$$

en las que:

- u.c = Uso consuntivo mensual, en pulgadas
- k = Coeficiente empírico mensual de uso consuntivo, para cada cultivo
- f = Factor mensual de uso consuntivo
- p = Porcentaje en horas de insolación en el mes con relación a las del año
- t = Temperatura media mensual, en grados Fahrenheit
- U.C = Uso Consuntivo o evapotranspiración total para el período de desarrollo del cultivo, en pulgadas.
- K = Coeficiente empírico global de uso consuntivo, correspondiente a un cultivo determinado en el período de desarrollo o ciclo agrícola; es el promedio de los valores mensuales de (k). El valor de (K) depende de cada cultivo y de su respectivo período de desarrollo.
- n = Número de meses que abarca el período de desarrollo del cultivo
- F = Factor global de uso consuntivo. Es la suma de los factores mensuales de uso consuntivo para el período considerado. Asimismo, es la suma de los productos de la temperatura media mensual y de los porcentajes de horas de insolación en el mes con relación a las del año.

Si la temperatura media mensual se indica en grados centígrados y el uso consuntivo en centímetros, las fórmulas anteriores se expresan de la siguiente manera:

$$u.c = k \cdot p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (2A)$$

$$f = p \left( \frac{4.57 t + 81.3}{100} \right) = p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (3A)$$

$$U.C = K \sum_{j=1}^n p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (4A)$$

15

El factor global de uso consuntivo (F) puede calcularse para aquellas zonas en las cuales se dispone de datos registrados sobre temperaturas ambientes y las horas de insolación diaria. El período diario de insolación depende de la latitud del lugar.

Por lo hasta aquí explicado, el uso consuntivo total (U.C) de un cultivo cualquiera, se obtiene multiplicando (F) por el coeficiente empírico global (K) aplicable a dicho cultivo; para lo cual pueden utilizarse los valores de (K) encontrados por Blaney y Criddle.

El coeficiente (K), que es igual a  $\frac{U.C}{F}$ , muestra algunas variaciones, debidas a lo difícil que es llevar al cabo las mediciones directas del uso consuntivo y a los errores a que éstas pueden estar sujetas por las muy diversas condiciones en que se ejecutan los estudios. Tales variaciones se deben, principalmente, a los cambios en el clima de un lugar a otro; la diferencia en los suelos; la mayor o menor disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades de los cultivos; los procedimientos seguidos en la medición del uso consuntivo; el rendimiento de las plantas y otros diversos factores que también influyen y cambian de un lugar a otro.

A pesar de lo indicado en la segunda parte del párrafo anterior, y con apoyo en el conocimiento personal de las condiciones físicas que privan en las zonas como en las que realizaron sus estudios Blaney y Criddle, lograron éstos obtener los coeficientes (K) aplicables, independientemente de la localidad, para ciertos cultivos, considerando que se desarrollan en condiciones normales. Hay que tomar en cuenta que estos coeficientes son globales, es decir, son valores medios correspondientes al período de desarrollo de los cultivos. Sus valores y cultivos a que se aplican, se dan en la Tabla 3, según los valores dados por Blaney y Criddle.

En aquellas zonas donde se tengan datos experimentales confiables, los coeficientes globales de uso consuntivo (K) de cada cultivo, deben ajustarse para que correspondan a las condiciones locales.

En cuanto a los coeficientes empíricos mensuales de uso consuntivo (k), éstos muestran diferencias todavía mayores que los coeficientes globales (K). Cuando se trata de períodos mensuales o más cortos, es necesario tomar en cuenta al conjunto de factores que pueden tener influencia en el crecimiento de los cultivos; por ejemplo: el clima, las plagas, etc.

De ordinario, no se tienen disponibles los valores del coeficiente empírico mensual (k), únicamente los valores globales de (K), dados por Blaney y Criddle, circunstancia ésta que muchas veces limita el empleo del método de Blaney-Criddle a la obtención únicamente del uso consuntivo total para el período de desarrollo de los diversos cultivos.

### 3.3.3.2 Aplicación de la fórmula de Blaney-Criddle

En general, cuando se tiene disponible suficiente información sobre los resultados obtenidos en el campo respecto al uso consuntivo del complejo suelo-planta en una cierta zona de riego, mayor es la aproximación que puede esperarse de las suposiciones y estimaciones que se hagan cuando se trate de aplicar esos resultados en otras zonas donde se carezca de esos datos pero en las que se tengan observaciones climatológicas.

De ordinario, no se cuenta con suficientes datos observados sobre el uso consuntivo, entonces, deben hacerse las siguientes consideraciones para la aplicación de la fórmula empírica de Blaney-Criddle para el uso consuntivo que aquí se trata.

- 1.- El uso consuntivo (U.C) para todo el período de desarrollo de cada cultivo, varía con el factor global de uso consuntivo (F).
- 2.- El crecimiento y rendimiento de los cultivos no están limitados, durante su período de desarrollo, por causas debidas a una aplicación inadecuada del agua.
- 3.- La fertilidad y productividad del suelo, se suponen iguales en las diversas partes de la zona de riego estudiada.
- 4.- El período de desarrollo de los cultivos como alfalfa, pastos, hortalizas y vegetación natural, se supone comprendido dentro del tiempo libre de heladas aunque, generalmente, se extiende más allá de éste. El rendimiento de los cultivos que dependen del crecimiento vegetativo, varía únicamente con la duración del período de su desarrollo.

Para la aplicación de la fórmula de Blaney-Criddle, en la determinación del uso consuntivo para el período de desarrollo de un cultivo cualquiera, se utilizan los si-

güentes datos:

- 1.- Tabla 2 - Porcentajes de horas de insolación en el mes (p) con relación a las del año, en función de la latitud del lugar.
- 2.- Tabla 3 - Coeficientes globales de uso consuntivo (K) para definir el cultivo.
- 3.- Tabla 4 - Valores de  $\frac{t + 17.8}{21.8}$ , en relación con las temperaturas medias mensuales, en grados centígrados.
- 4.- Fórmula (4A) - En caso de poder contar con los coeficientes empíricos mensuales (k) =  $\frac{u.c}{f}$ , determinados experimentalmente en otra zona con características climáticas semejantes comparable a la del Estudio, se pueden obtener los valores del uso consuntivo mensual aplicando la fórmula (2A), o bien, con el nomograma presentado en la referencia bibliográfica 11/.

Como comentarios finales sobre los métodos ya descritos, Thornthwaite y Blaney-Criddle, conviene hacer mención que cuando se trata de calcular el uso consuntivo para cultivos de verano (algodonero), el método de Thornthwaite da valores un poco mayores que el de Blaney-Criddle. Cuando de cultivos de invierno se trata (trigo), sucede lo contrario. En lo anterior tiene mucho que ver la influencia del período de insolación y su intervención en la fórmula de cada método.

Por último y como conclusión a los métodos antes descritos es de interés señalar que, mientras no se disponga de los datos necesarios obtenidos por determinaciones directas del uso consuntivo, los métodos indirectos constituyen una herramienta muy valiosa para obtener los valores del uso consuntivo en una zona de riego en operación o en proyecto.

Las ventajas que el método de Blaney-Criddle tiene sobre el de Thornthwaite, que se manifiestan en la facilidad de cálculo del uso consuntivo específico de cada cultivo, en las diversas zonas donde se cuente con disponibilidad de datos meteorológicos que permiten correlacionar los datos resultantes del uso consuntivo con los de otras zonas donde se cuente con observaciones experimentales directas, ha hecho que la SRH lo haya adoptado preferentemente en los es

TABLA 2

PORCENTAJE DE HORAS DE INSOLACION EN EL MES CON  
RELACION A LAS DEL AÑO (p), EN FUNCION DE LA LATITUD.

Lat. Nte.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
15°	7.94	7.37	8.44	8.45	8.98	8.80	9.03	8.83	8.27	8.26	7.75	7.88
16°	7.93	7.35	8.44	8.46	9.01	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17°	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18°	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	8.16	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19°	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20°	7.74	7.26	8.41	8.53	9.14	9.00	9.23	8.95	8.29	8.17	7.59	7.66
21°	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22°	7.66	7.21	8.40	8.56	9.92	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23°	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24°	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25°	7.53	7.13	8.39	8.61	9.32	9.22	9.43	9.08	8.30	8.08	7.40	7.41
26°	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.35
27°	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28°	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.22	7.27
29°	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30°	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14
31°	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32°	7.20	6.97	8.37	8.75	9.63	9.60	9.77	9.28	8.34	7.95	7.11	7.05

NOTA:

Tabla tomada de la Referencia 19/.

TABLA 3

COEFICIENTE EMPIRICO GLOBAL DEL USO CONSUNTIVO  
PARA DEFINIR EL CULTIVO (K).

CULTIVO	PERIODO DE DESARROLLO		COEFICIENTE K	
	(1)	(2)	(3)	
Alfalfa		Entre heladas	.80	a .90
Plátano		Año completo	.80	a 1.00
Haba, Frijol, etc.		3 meses	.60	a .70
Cacao		Año completo	.70	a .80
Café		Año completo	.70	a .80
Maíz		4 meses	.75	a .85
Algodonero		7 meses	.60	a .70
Dátil		Año completo	.65	a .80
Linaza		7 a 8 meses	.70	a .80
Cereales pequeños		3 meses	.75	a .85
Sorgo		4 a 5 meses	.70	a .80
Semillas oleaginosas		3 a 5 meses	.65	a .75
Frutales:				
Aguacate		Año completo	.50	a .55
Toronja		Año completo	.55	a .65
Naranja y limón		Año completo	.45	a .55
Nuez de nogal		Entre heladas	.60	a .70
De hojas caducas		Entre heladas	.60	a .70
Pasturas:				
Pastos		Entre heladas	.75	a .85
Trébol blanco		Entre heladas	.80	a .85
Papa		3 a 5 meses	.65	a .75
Arroz		3 a 5 meses	1.00	a 1.10
Henequén		Año completo	.65	a .70
Remolacha de azúcar		6 meses	.65	a .75
Caña de azúcar		Año completo	.80	a .90
Tabaco		4 meses	.70	a .80
Jitomate (tomate)		4 meses	.65	a .70
Hortalizas		2 a 4 meses	.60	a .70
Vid		5 a 7 meses	.50	a .60

NOTAS:

- 1) Los valores más pequeños de (K) son para regiones costeras y los mayores para las áridas.
- 2) Los valores de (K) dados en esta Tabla son los recomendados por Blaney y Criddle 19/.

TABLA 4

VALORES DE  $\frac{t + 17.8}{21.8}$ , EN RELACION CON LAS TEMPERATURAS

MEDIA MENSUALES EN GRADOS CENTIGRADOS.

t en °C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
3	0.954	0.959	0.963	0.968	0.972	0.977	0.982	0.986	0.991	0.995
4	1.000	1.005	1.009	1.014	1.018	1.023	1.028	1.032	1.037	1.041
5	1.046	1.051	1.055	1.060	1.064	1.069	1.074	1.078	1.083	1.087
6	1.092	1.097	1.101	1.106	1.110	1.115	1.120	1.124	1.129	1.133
7	1.138	1.143	1.147	1.152	1.156	1.161	1.165	1.170	1.174	1.179
8	1.183	1.188	1.193	1.197	1.202	1.206	1.211	1.216	1.220	1.225
9	1.229	1.234	1.238	1.243	1.247	1.252	1.257	1.261	1.266	1.270
10	1.275	1.280	1.284	1.289	1.293	1.298	1.303	1.307	1.312	1.316
11	1.321	1.326	1.330	1.335	1.339	1.344	1.349	1.353	1.358	1.362
12	1.367	1.372	1.376	1.381	1.385	1.390	1.394	1.399	1.404	1.408
13	1.413	1.418	1.422	1.427	1.431	1.436	1.441	1.445	1.450	1.454
14	1.459	1.464	1.468	1.473	1.477	1.482	1.487	1.491	1.496	1.500
15	1.505	1.510	1.514	1.519	1.523	1.528	1.532	1.537	1.541	1.546
16	1.550	1.555	1.559	1.564	1.568	1.573	1.578	1.582	1.587	1.591
17	1.596	1.601	1.605	1.610	1.614	1.619	1.624	1.628	1.633	1.637
18	1.642	1.647	1.651	1.656	1.660	1.665	1.670	1.674	1.679	1.683
19	1.688	1.693	1.697	1.702	1.706	1.711	1.716	1.720	1.725	1.729
20	1.734	1.739	1.743	1.748	1.752	1.757	1.762	1.766	1.771	1.775
21	1.780	1.785	1.789	1.794	1.798	1.803	1.808	1.812	1.817	1.821
22	1.826	1.831	1.835	1.840	1.844	1.849	1.854	1.858	1.863	1.867
23	1.872	1.867	1.881	1.886	1.890	1.895	1.899	1.904	1.908	1.913
24	1.917	1.922	1.926	1.931	1.935	1.940	1.945	1.949	1.954	1.958
25	1.963	1.968	1.972	1.977	1.981	1.986	1.991	1.995	2.000	2.004
26	2.009	2.014	2.018	2.023	2.027	2.032	2.037	2.041	2.046	2.050
27	2.055	2.060	2.064	2.069	2.073	2.078	2.083	2.087	2.092	2.096
28	2.101	2.106	2.110	2.115	2.119	2.124	2.129	2.133	2.138	2.142
29	2.147	2.152	2.156	2.161	2.165	2.170	2.175	2.179	2.184	2.188
30	2.193	2.198	2.202	2.207	2.211	2.216	2.221	2.225	2.230	2.234
31	2.239	2.244	2.248	2.253	2.257	2.262	2.266	2.271	2.275	2.280
32	2.284	2.289	2.293	2.298	2.302	2.307	2.312	2.316	2.321	2.325
33	2.330	2.335	2.339	2.344	2.348	2.353	2.358	2.362	2.367	2.371
34	2.376	2.381	2.385	2.390	2.394	2.399	2.404	2.408	2.413	2.417
35	2.422	2.427	2.431	2.436	2.440	2.445	2.450	2.454	2.459	2.463

**EJEMPLO 2 - CALCULO DEL USO CONSUNTIVO PARA EL PERIODO DE DESARROLLO.**

METODO BLANEY - CRIDDLE

CULTIVO: ALGODONERO  
REGION LAGUNERA, COAH-DGO.

LATITUD: 25° 30' N

PERIODO DE DESARROLLO: Abril a Septiembre = 6 meses

Fórmula de Blaney - Criddle  $U.C = K \cdot F = K \sum_{j=1}^n f$  (4)

$$f = p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (3A)$$

MES	t en °c	p (a)	$\frac{t + 17.8}{21.8}$ (b)	f	K <sub>(c)</sub>	U.C (cm) (d)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) (4)	(6)	(7)
Abril	22.6	8.63	1.853	16.0	- -	- -
Mayo	25.4	9.35	1.982	18.5	- -	- -
Junio	27.0	9.26	2.055	19.0	- -	- -
Julio	26.7	9.46	2.041	19.3	- -	- -
Agosto	26.1	9.09	2.014	18.3	- -	- -
Septiembre	24.2	8.31	1.927	16.0	- -	- -
<b>S u m a</b>		- -		107.1	0.65	69.6

**NOTAS:**

- a) Valores leídos de la Tabla 2
  - b) Valores leídos de la Tabla 4
  - c) Valor tomado de la Tabla 3
  - d) Valor calculado con la ecuación (4). Como sólo se conoce el valor global de K, únicamente se puede calcular el valor de U.C para el período de desarrollo del algodón.
- Para el cálculo de los valores mensuales de u.c, véase el ejemplo dado en el Inciso .3.5.2 de esta Norma.

tudios que se ejecutan para determinar el uso consuntivo de los cultivos en los diferentes distritos de riego que la Secretaría administra y opera. Véanse 6/ y 11/.

#### .3.3.4 El método gravimétrico

En el Inciso .3.3.1 de esta Norma, se dijo que entre los varios métodos utilizados para determinar la evapotranspiración o uso consuntivo figuraban los directos y los indirectos, estos últimos basados en fórmulas empíricas que correlacionan los valores del uso consuntivo y ciertos datos meteorológicos observados. Entre los métodos indirectos se describieron con mayor detalle los más usados: el de - - Thornthwaite y el de Blaney-Criddle.

Ahora y a continuación, se hará una breve descripción de dos métodos que sirven para determinar en forma directa el uso consuntivo: el gravimétrico y el del lisímetro.

El método gravimétrico consiste en determinar en el laboratorio, pesando en una báscula diferentes muestras de un suelo dado, las variaciones de humedad que ocurren en cada una de las diversas capas del perfil, hasta una cierta profundidad o la que alcancen las raíces del cultivo para el que se trata de obtener el consumo de agua del complejo planta-suelo.

En función de las características del suelo y de las variaciones de humedad es posible hacer la determinación de la cantidad de agua, expresada como lámina en centímetros, consumida en un período de tiempo dado por el conjunto - - suelo-planta.

La expresión matemática siguiente permite obtener la lámina:

$$L = \Delta P_s \cdot D_a \cdot P_r \quad (1)$$

en la que cada término significa lo siguiente:

L - Es igual a la lámina de agua, en cm, consumida por el complejo suelo-planta durante el período de tiempo considerado.

$\Delta P_s$  - Es la variación de la humedad en por ciento respecto al peso seco del suelo, en el mismo período de tiempo considerado.

$D_a$  - Es la densidad aparente del suelo, número abstracto.

P<sub>r</sub> - Es la profundidad del perfil de suelo o la profundidad radicular del cultivo, en metros.

El procedimiento para determinar la humedad del suelo - consiste en sacar varias muestras del mismo por medio de - una barrena (tipo Veihmeyer u otra similar), para cada espe- - sor de las capas del perfil estudiado; por ejemplo, cada - 30 cm. Estas muestras se guardan en botes de lámina cerra- - dos herméticamente que se pesan y secan en estufa a unos - 110°C hasta que adquieren un peso constante. Posteriormen- - te, por diferencia de pesos, se obtiene la humedad de la - muestra en por ciento del peso seco del suelo.

Varios días después de la operación anterior, se sacan - otras muestras del mismo suelo en lugares adyacentes y nue- - vamente se obtiene el porcentaje de humedad. La lámina de - agua consumida en el tiempo transcurrido se obtiene con las - diferencias de humedad que se hayan calculado, aplicando la - fórmula (1).

### .3.3.5 El método del lisímetro

El lisímetro es un aparato que sirve para medir en forma - directa y por medio de un procedimiento gravimétrico la can- - tidad de agua consumida por un cultivo y el suelo en que se - apoya y lo provee de agua y otras sustancias alimenticias.

El aparato diseñado por W.O. Pruitt es un tanque cilín- - drico de unos 6 metros en diámetro aproximadamente y 95 cm - de alto, donde se colocan el suelo y el cultivo que se estu- - dian.

El tanque se coloca sobre una báscula de precisión que - permite observar las variaciones de peso que pueda tener el - tanque, por el agua que pierda el suelo. El agua que consu- - me el cultivo se obtiene en función de las variaciones de - peso registradas.

Otros investigadores como Thornthwaite y Livingston han - diseñado evaporómetros parecidos al descrito anteriormente, - aunque con ligeras variantes.

Por último, debe indicarse la disponibilidad de otros - procedimientos que permiten determinar la humedad de un sue- - lo con objeto de calcular el agua que consume el complejo - planta-suelo; tales como el de la conductividad eléctrica y - los que requieren de los dispositivos conocidos como Tensió- - metros.

Para ver con mayor detalle estos métodos deben consultar

### .3.5 La distribución mensual del uso consuntivo

#### .3.5.1 Generalidades

La distribución mensual del uso consuntivo se obtiene mediante la aplicación del método de Blaney-Criddle ya expuesto en el Inciso .3.3.3 de esta Norma.

El método original de Blaney-Criddle hace intervenir al coeficiente empírico mensual ( $k$ ) para obtener el uso consuntivo mensual de un cierto cultivo y dada la dificultad de contar con los valores de ( $k$ ), problema que se menciona en .3.3.3.1 donde se explica el método en cuestión, se ha tratado de salvar la dificultad antes indicada mediante la introducción del concepto llamado "la curva de desarrollo específica del cultivo", o bien de otro concepto denominado: "la curva única", como a continuación se explicará:

#### .3.5.2 Con el método de Blaney-Criddle y la curva de desarrollo del cultivo

Este procedimiento, en esencia es el Método de Blaney y Criddle con las modificaciones necesarias para hacer intervenir en la fórmula del uso consuntivo mensual, obtenida por dichos autores, a un coeficiente climático mensual ( $k_t$ ) y a un coeficiente mensual que depende del desarrollo de cada cultivo ( $k_d$ ), en vez del coeficiente mensual de uso consuntivo ( $k$ ).

El coeficiente climático mensual ( $k_t$ ) permite lograr un mejor ajuste de la relación temperatura y evapotranspiración en cada uno de los meses que comprende el período de desarrollo en los cultivos que interesen. Para ello el factor de temperatura ( $t$ ) en la fórmula de Blaney-Criddle se corrige mediante ( $k_t$ ), según la siguiente expresión puesta en el sistema métrico decimal:

$$k_t = 0.03114 (t) + 0.2396 \quad (6)$$

en la que ( $t$ ) es la temperatura media mensual, en grados centígrados.

El coeficiente de desarrollo ( $k_d$ ) para un mes dado dentro del período total de desarrollo correspondiente a un cierto cultivo, no es más que el coeficiente mensual de uso consuntivo ( $k$ ) en la fórmula de Blaney-Criddle, resultante en la curva de desarrollo respectiva.

La curva de desarrollo relativo representa cómo evoluciona en el tiempo el crecimiento de la planta, con relación al que ésta alcanza en el período total de desarrollo.

El período total de desarrollo de un cultivo dado es el tiempo que en total requiere la planta para su completo crecimiento vegetativo, la floración y fructificación.

En la referencia bibliográfica 9/, el Proyectista puede consultar información muy útil sobre el coeficiente de desarrollo, ( $k_d$ ) y las curvas de desarrollo relativo para algunos cultivos.

Los valores mensuales de ( $k_d$ ) se determinan en el campo, en forma experimental para cada cultivo. La representación gráfica de los valores de este coeficiente, en función del porcentaje de desarrollo relativo es una curva en forma de campana, como se ilustra para el caso del algodón en la Lámina .1.2.3-2, que se presenta más adelante.

La fórmula para obtener el uso consuntivo mensual con el método de Blaney-Criddle y aplicando la curva de desarrollo de cada cultivo, es la siguiente:

$$u.c. = f \cdot k_t \cdot k_d \quad (7)$$

y el valor del uso consuntivo total para el período de desarrollo del cultivo, se obtiene con la siguiente expresión:

$$U.C. = \sum_{j=1}^n f \cdot k_t \cdot k_d \quad (8)$$

En ambas ecuaciones los términos tienen las siguientes acepciones:

$u.c.$  = uso consuntivo mensual, en centímetros.

$f$  = Factor mensual de uso consuntivo. Es igual a:  
 $p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right)$  ; según la fórmula (3A), dada en .3.3.3.1 de esta misma Norma.

$k_t$  = Coeficiente climático mensual, dado por la expresión (6).

$k_d$  = Coeficiente de desarrollo para cada cultivo, obtenido en forma experimental.

$U.C.$  = Uso consuntivo total para el período de desarrollo de cada cultivo, en centímetros.

$$\sum_{j=1}^n$$

Suma del primero al último mes en el período de desarrollo total del cultivo.

El procedimiento de cálculo a seguir para obtener la distribución mensual del uso consuntivo de un cierto cultivo con el método indicado en este Inciso .3.5.2 consiste en los siete pasos siguientes:

- 1.- Se calculan los valores de (f) con la expresión (3A), dada en .3.3.3.1 de esta Norma.
- 2.- Se calculan los valores de ( $k_t$ ) con la fórmula (6).
- 3.- Se calculan los valores de  $f \cdot k_t$
- 4.- Se obtienen los valores mensuales de ( $k_d$ ) por medio de la curva de desarrollo relativo del cultivo en cuestión.

Para esto, se divide la curva de desarrollo específica en tantas partes como número de meses abarque el período total de desarrollo. La ordenada media en cada intervalo, da el valor de ( $k_d$ ) mensual.

- 5.- Se calculan los valores del uso consuntivo mensual (u.c) por medio de la fórmula (7).
- 6.- Se obtiene el valor del uso consuntivo total (U.C) para el período total de desarrollo del cultivo, por medio de la fórmula (8).
- 7.- Se corrigen los valores mensuales y el total del uso consuntivo, obtenidos en los pasos 5 y 6, como a continuación se indica:

El ajuste se obtiene con la expresión siguiente:

$$(U.C)' = \frac{K}{K'} (U.C) \quad (9)$$

en la que:

$$K' = \frac{\sum_{j=1}^n f \cdot k_t \cdot k_d}{\sum_{j=1}^n} \quad (10)$$

(U.C)' = uso consuntivo total ajustado, en centímetros.

K = coeficiente empírico global dado por -  
Blaney y Criddle para cada cultivo. -  
(Tabla 3)

U.C = uso consuntivo total, obtenido con la  
ecuación (8), en centímetros.

La corrección anterior se debe a que, en general, es necesario ajustar el valor del uso consuntivo total que resulta cuando se utilizan los coeficientes mensuales climáticos ( $k_t$ ) y de desarrollo ( $k_d$ ), en vez de los valores del coeficiente empírico global (K) determinados por Blaney y Criddle.

Los cálculos para los diversos pasos antes indicados, se facilitan mucho cuando se tienen ya tabulados los valores de  $f$  y  $k_t$  para cada mes y además, las curvas de desarrollo relativo para cada cultivo que interese.

La Secretaría de Recursos Hidráulicos cuenta con diversas tablas y gráficas, tanto de esos valores como del uso consuntivo y su distribución mensual para algunos cultivos en los diversos distritos de riego que opera y administra. El Proyectista debe consultar la información disponible - - véanse entre otras, las referencias bibliográficas 9/, 10/ y 12/- o recabarla en la Oficina de Riego y Drenaje de la Dirección General de Distritos de Riego, en la SRH.

### 3.5.3 Ejemplo de aplicación

A continuación se presenta en forma tabular el Ejemplo número 3, para explicar el cálculo de la distribución mensual del uso consuntivo por medio del método de Blaney-Criddle modificado, aplicando la curva de desarrollo relativo para el algodónoro, presentada en la Lámina .1.2.3-2.

**EJEMPLO 3 - DISTRIBUCION MENSUAL DEL USO CONSUNTIVO  
 APLICACION DEL METODO DE BLANEY-CRIDDLE, Y LA CURVA  
 DE DESARROLLO DEL CULTIVO (Factor  $k_d$ )**

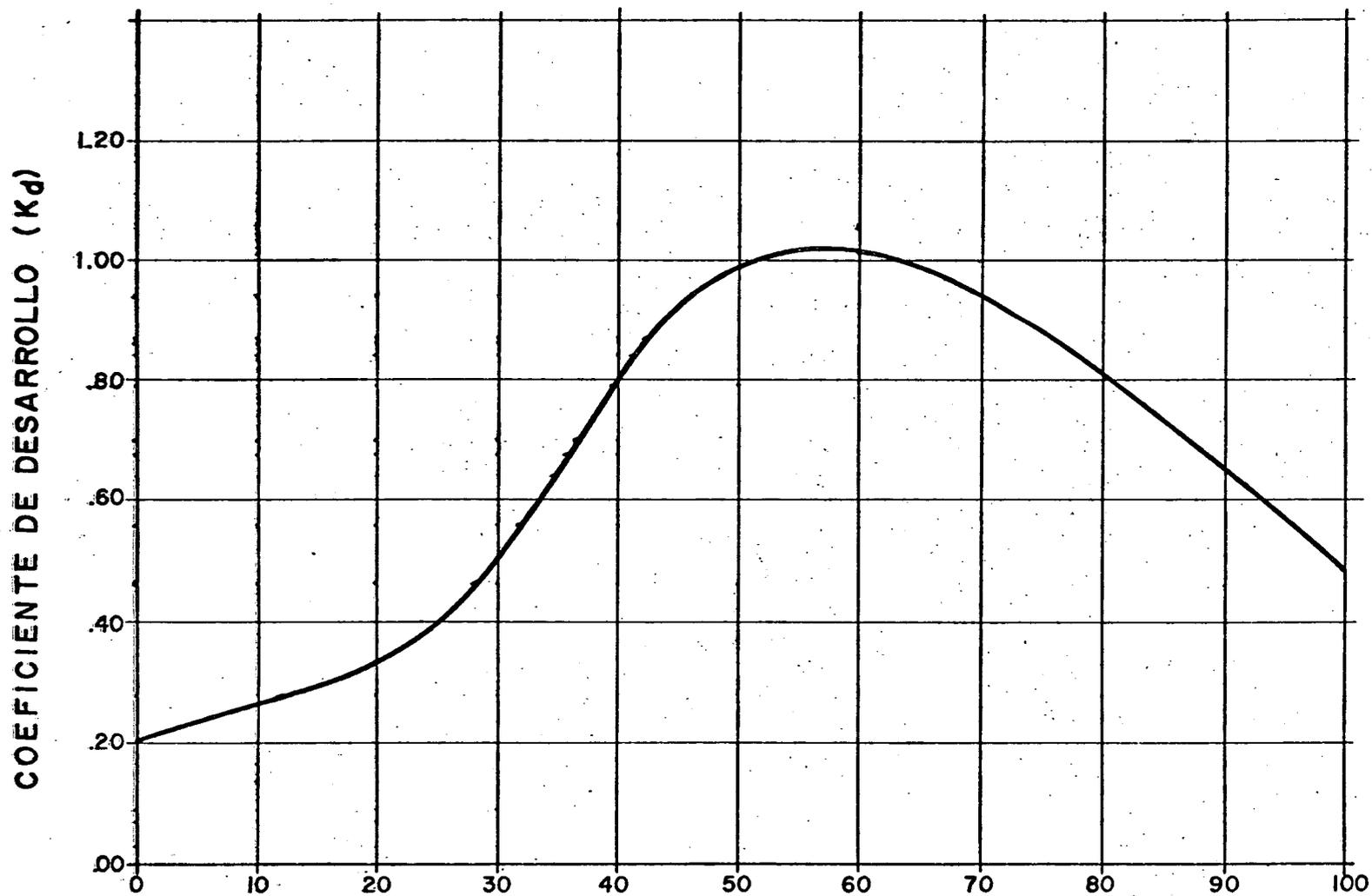
**CULTIVO:** Algodonero  
 Región Lagunera, Coah-Dgo.  
 latitud: 25° 30' N.  
 Período de desarrollo: Abril a Septiembre = 6 meses

MES	t en°C	p (a)	$\frac{t+17.8}{21.8}$ (b)	f	K t (c)	$f \cdot k_t$	$k_d$ (d)	U.C cm (e)	K (f)	K' (g)	$\frac{K}{K'}$	(U.C) cm (h)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)(4)	(6)	(7)=(5)(6)	(8)	(9)=(7)(8)	(10)	(11)	(12)=(10)÷(11)	(13)=(12)(9)
Abril	22.6	8.63	1.853	16.0	0.943	15.10	0.25	3.8	-	-	-	3.5
Mayo	25.4	9.35	1.982	18.5	1.031	19.10	0.40	7.6	-	-	-	7.0
Junio	27.0	9.26	2.055	19.0	1.080	20.52	0.82	16.8	-	-	-	15.4
Julio	26.7	9.46	2.041	19.3	1.071	20.67	1.02	21.1	-	-	-	19.3
Agosto	26.1	9.09	2.014	18.3	1.052	19.25	0.87	16.7	-	-	-	15.3
Sept.	24.2	8.31	1.927	16.0	0.993	15.89	0.62	9.9	-	-	-	9.1
Suma	-	-	-	107.1	-	-	-	75.9	0.65	0.71	0.916	69.6

**NOTAS:**

- a) Valores leídos de la Tabla 2.
- b) Valores leídos de la Tabla 4.
- c) Valores calculados con la ecuación:  $k_t = 0.03114 (t) + 0.2396$
- d) Valores obtenidos para cada mes, de la curva de desarrollo del algodón, Lámina .1.2.3-2
- e) Valores calculados con la ecuación:  $u.c = f \cdot k_t \cdot k_d$ ;  $U.C = \sum_{j=1}^n f \cdot k_t \cdot k_d$
- f) Valor tomado de la Tabla 3
- g) Valor calculado con la ecuación (10)
- h) Valor corregido del uso consuntivo. Se obtiene con la ecuación:  $(U.C)' = \frac{K}{K'} (U.C)$

# CURVA DE DESARROLLO DEL ALGODONERO



Tomada de la Ref. Bibl. 9/  
Edición 1971

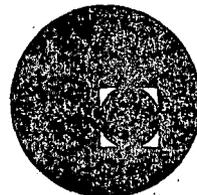
DESARROLLO RELATIVO EN POR CIENTO

LAMINA .1.2.3-2





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

EVAPOTRANSPIRACION (CURVAS DE DESARROLLO)

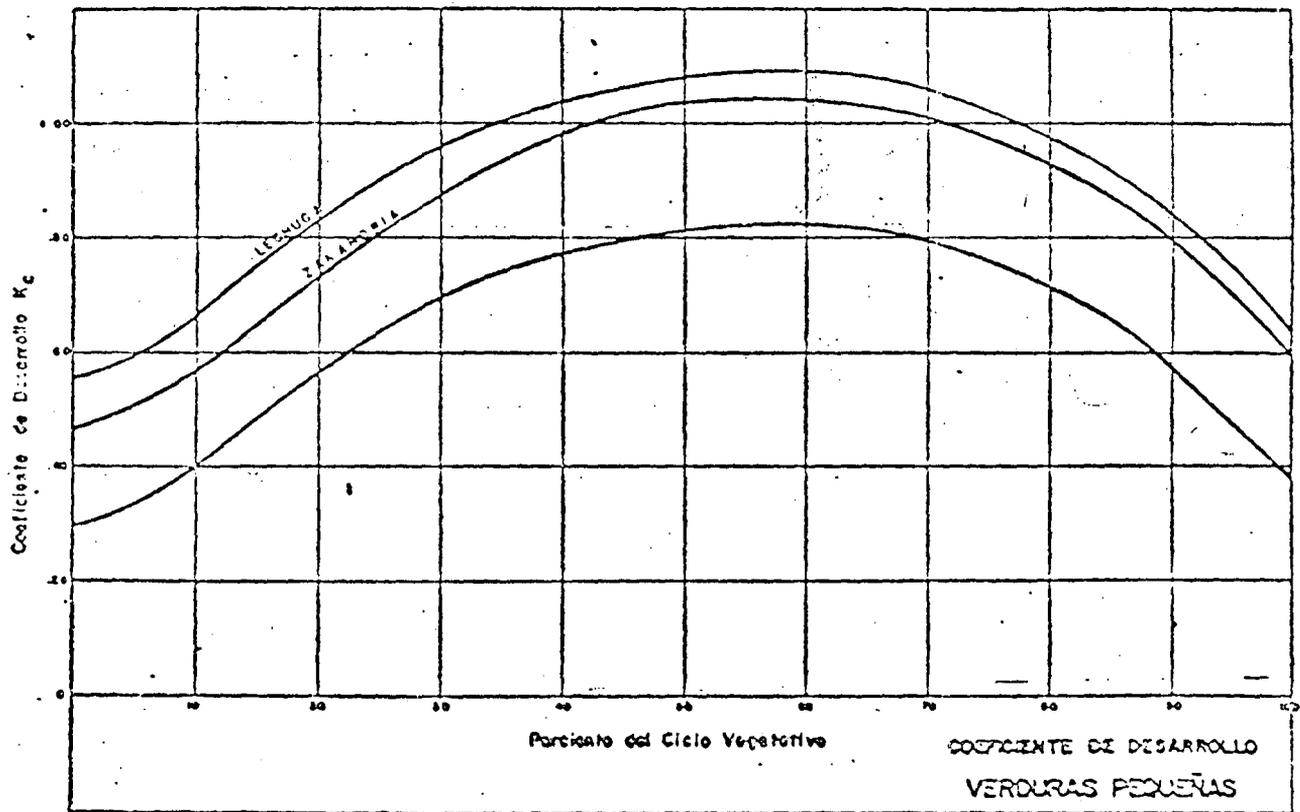
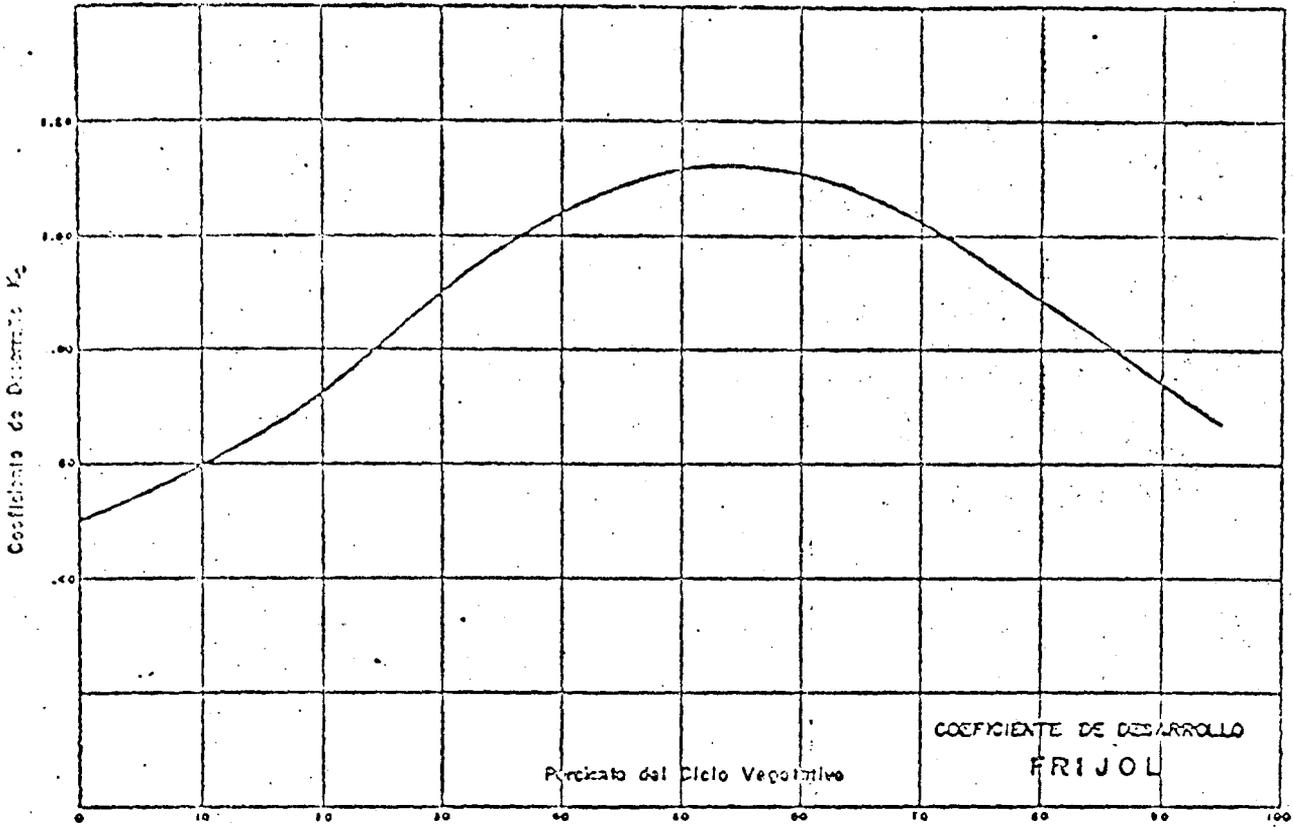
ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA

AGOSTO, 1978

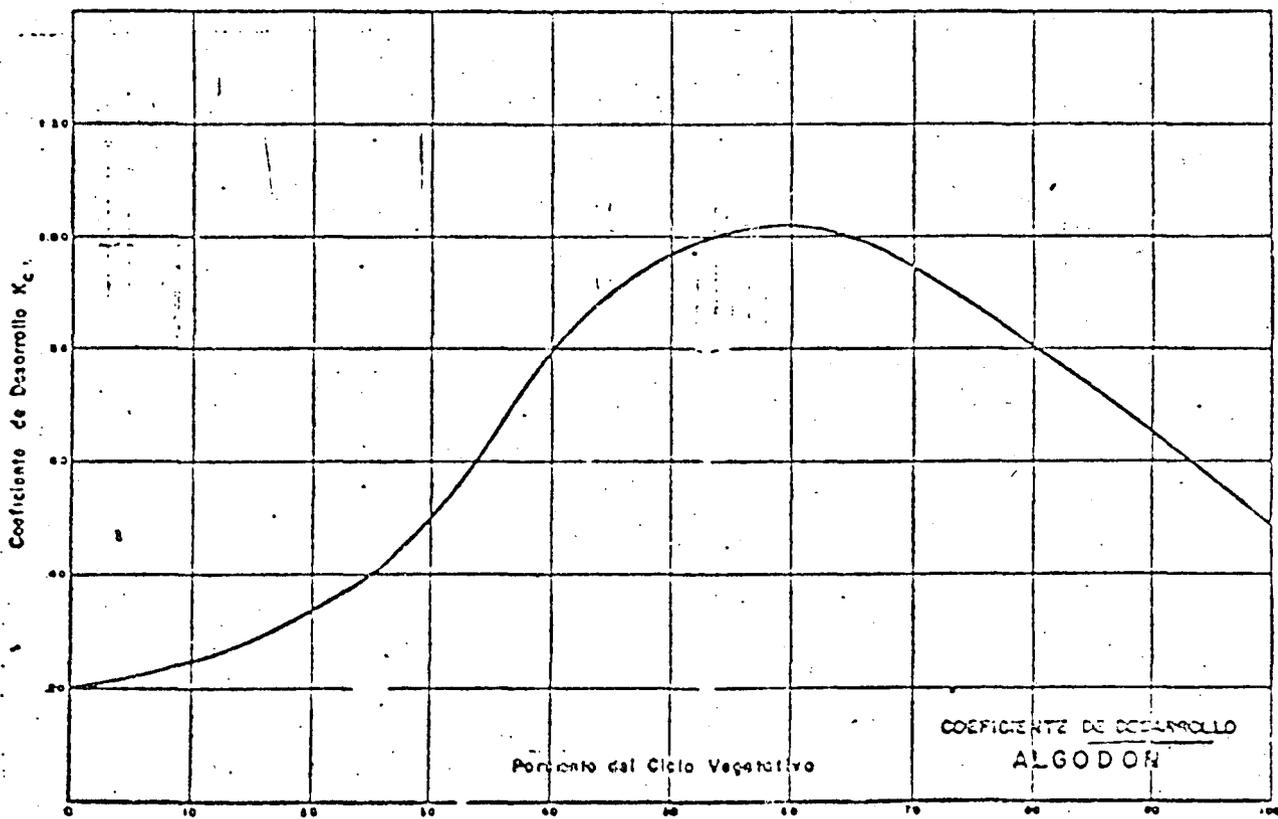
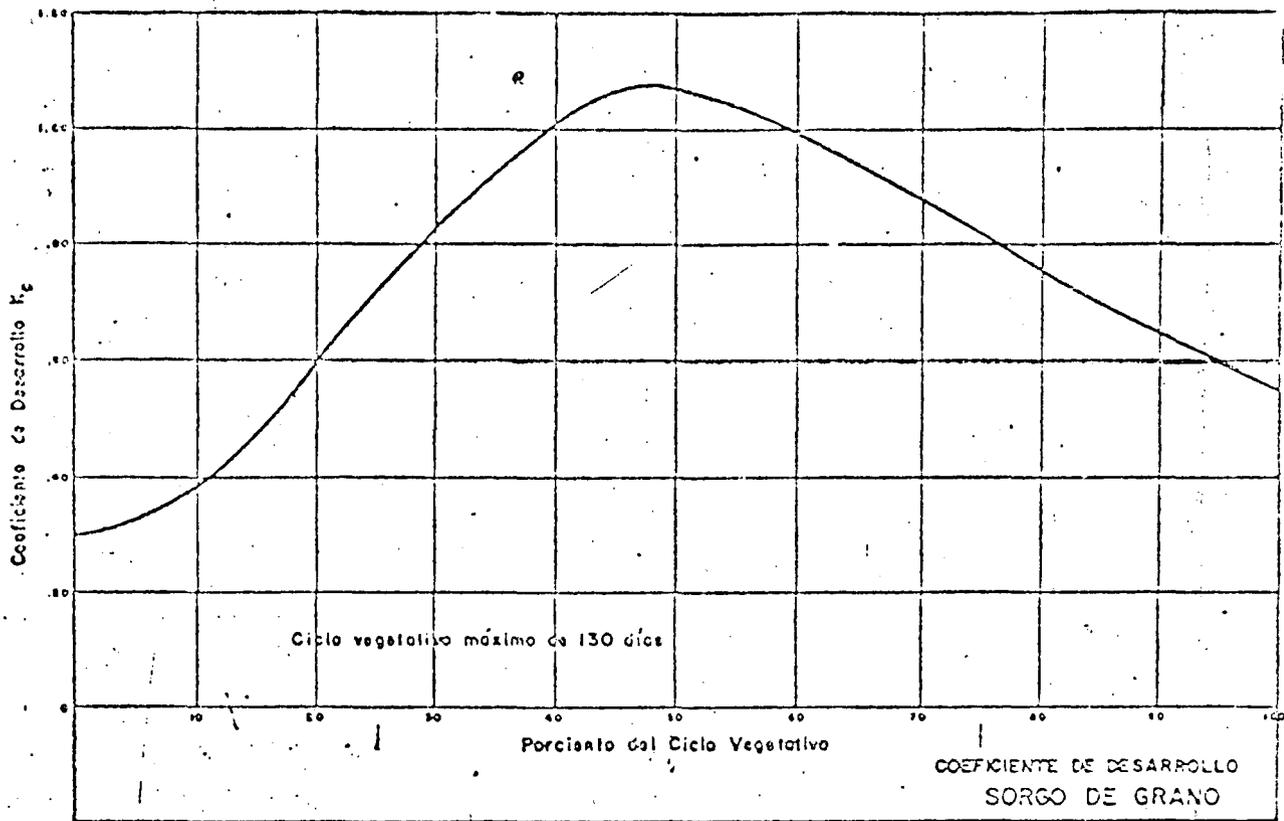


# CURVAS DE DESARROLLO

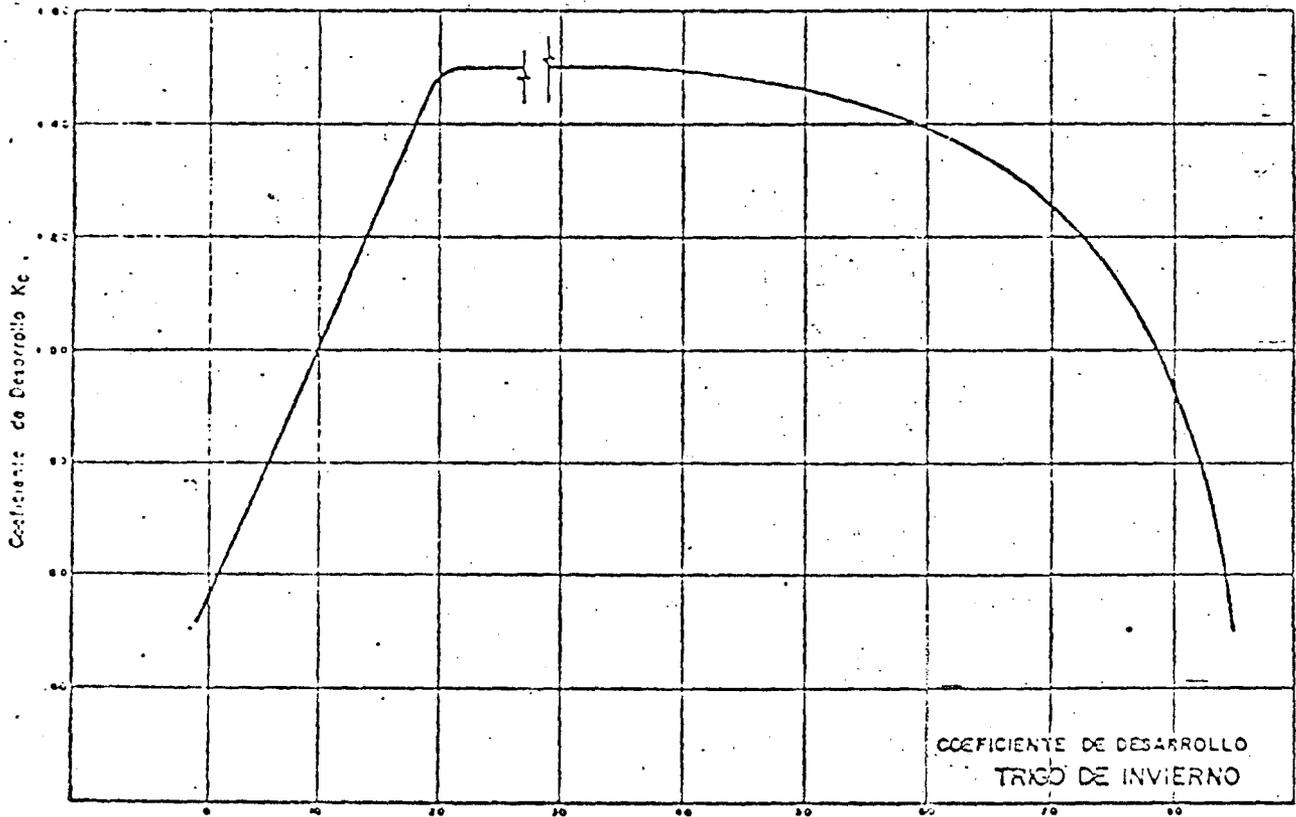
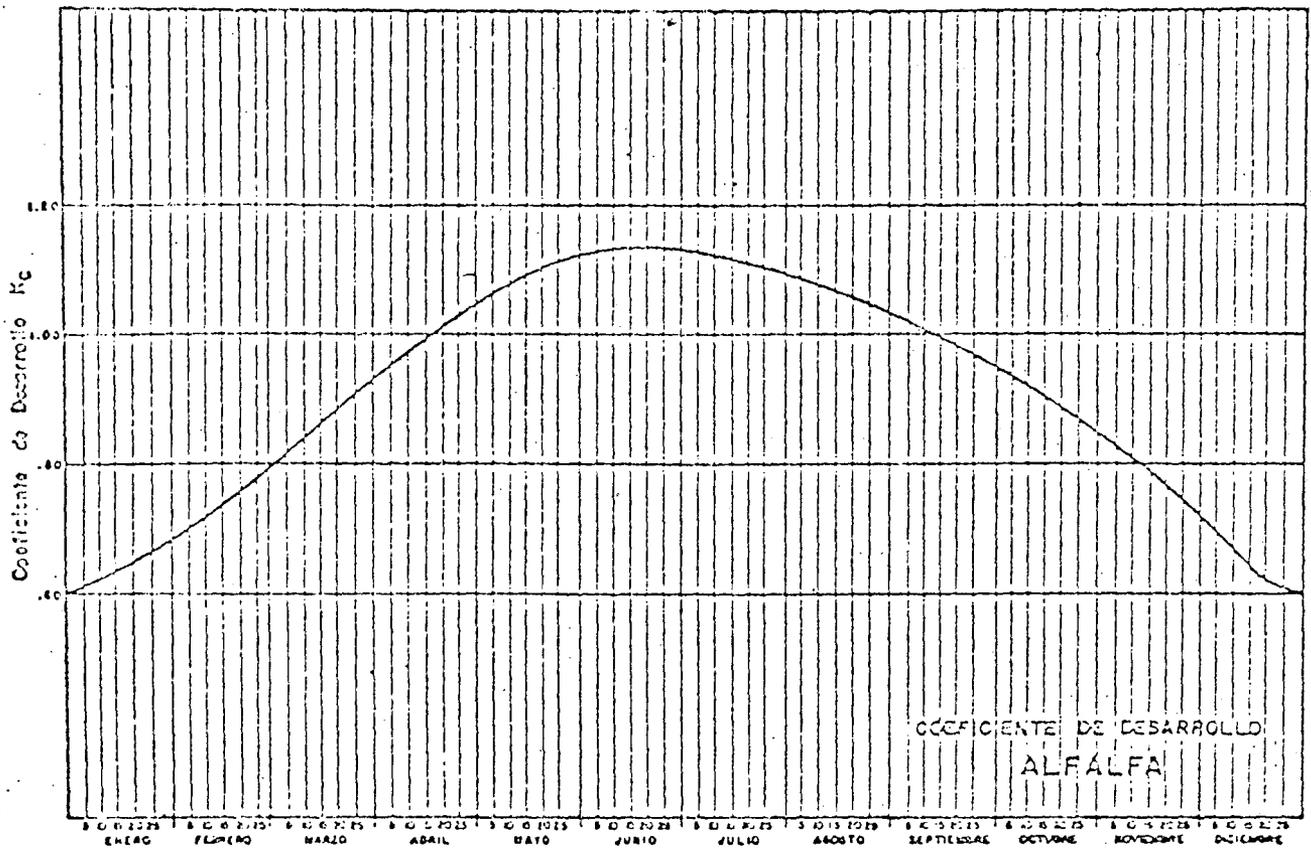
ANEXO NUM. 8



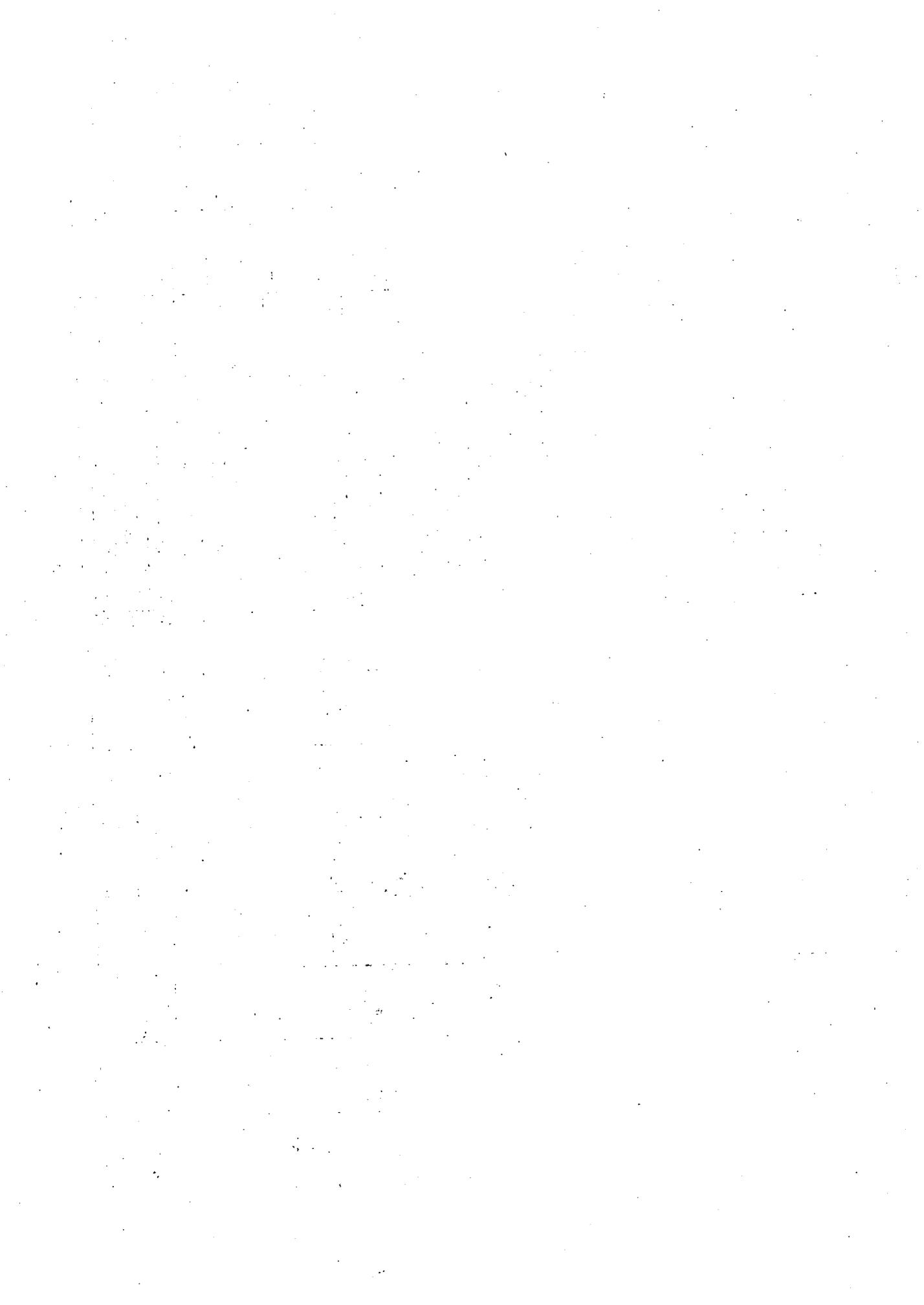


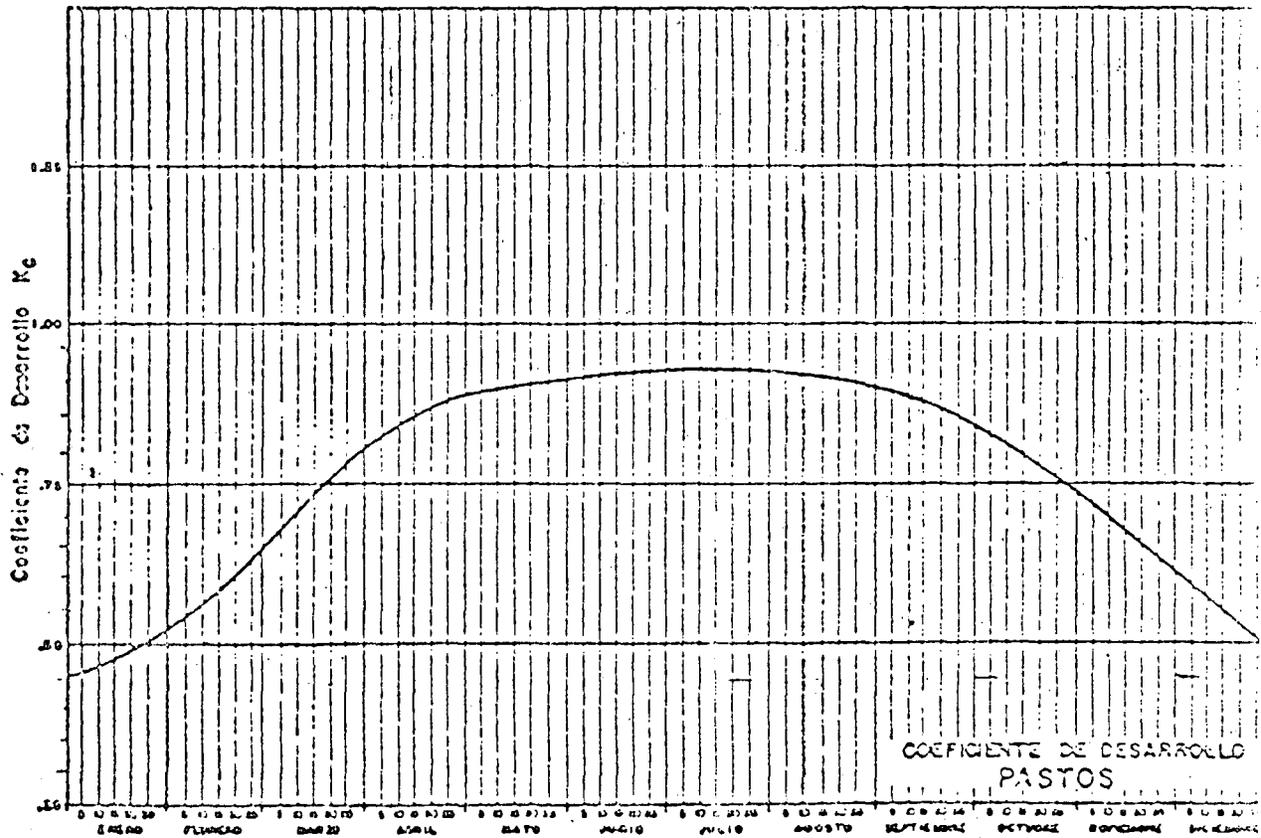
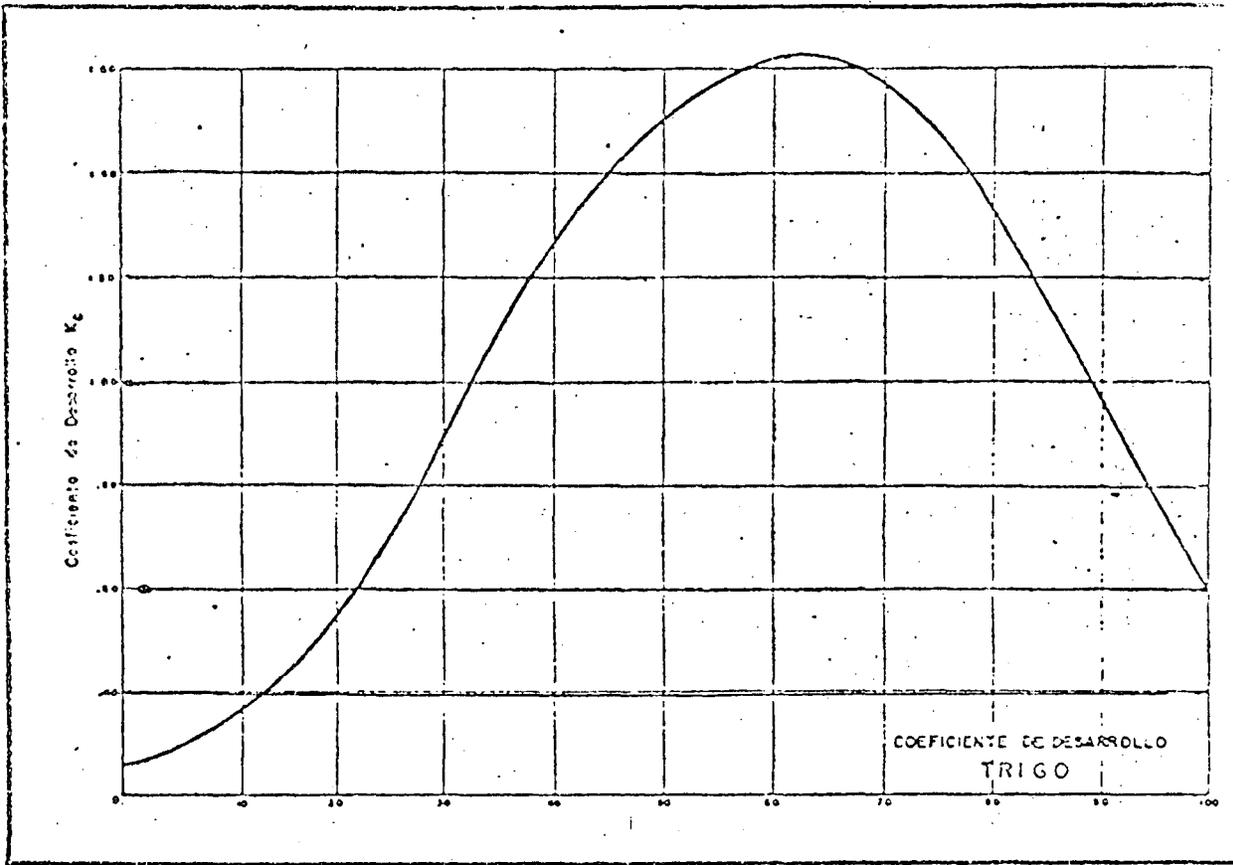






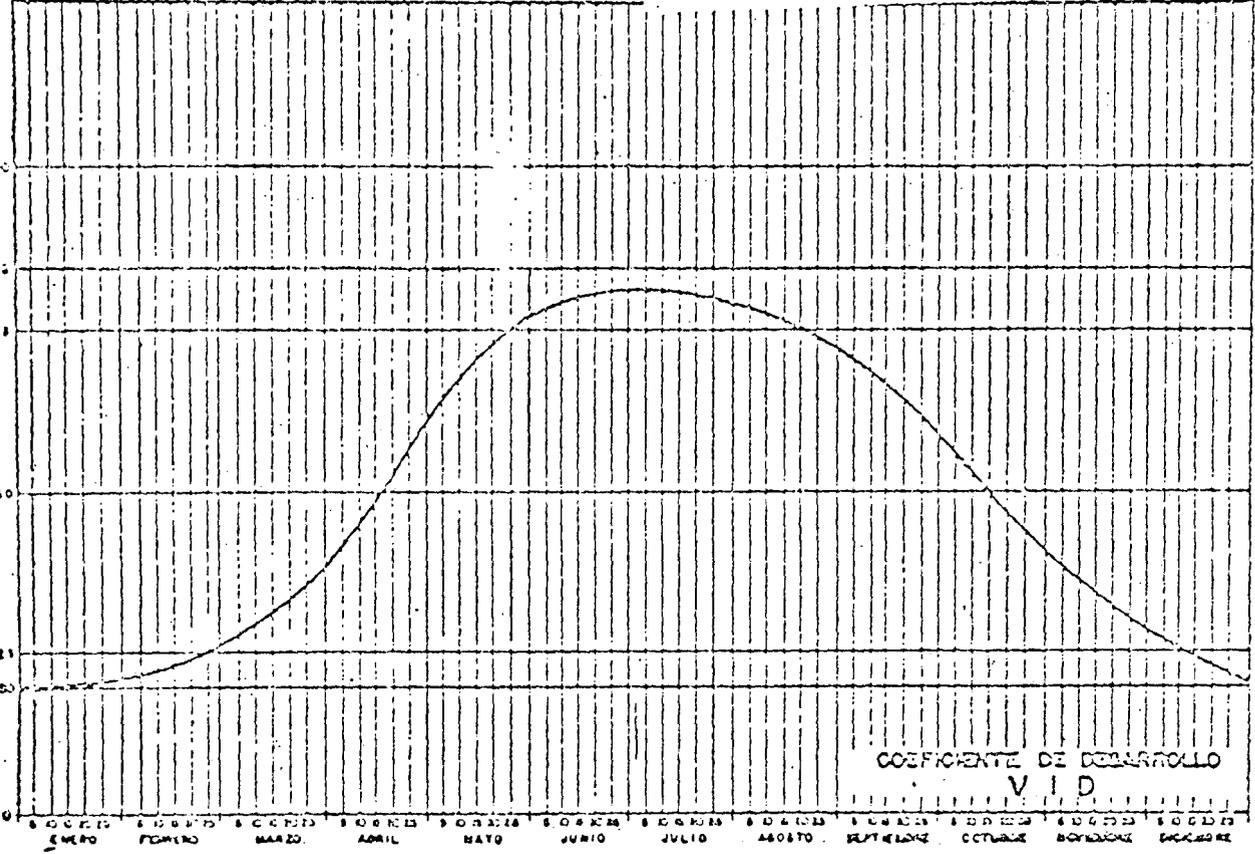
7





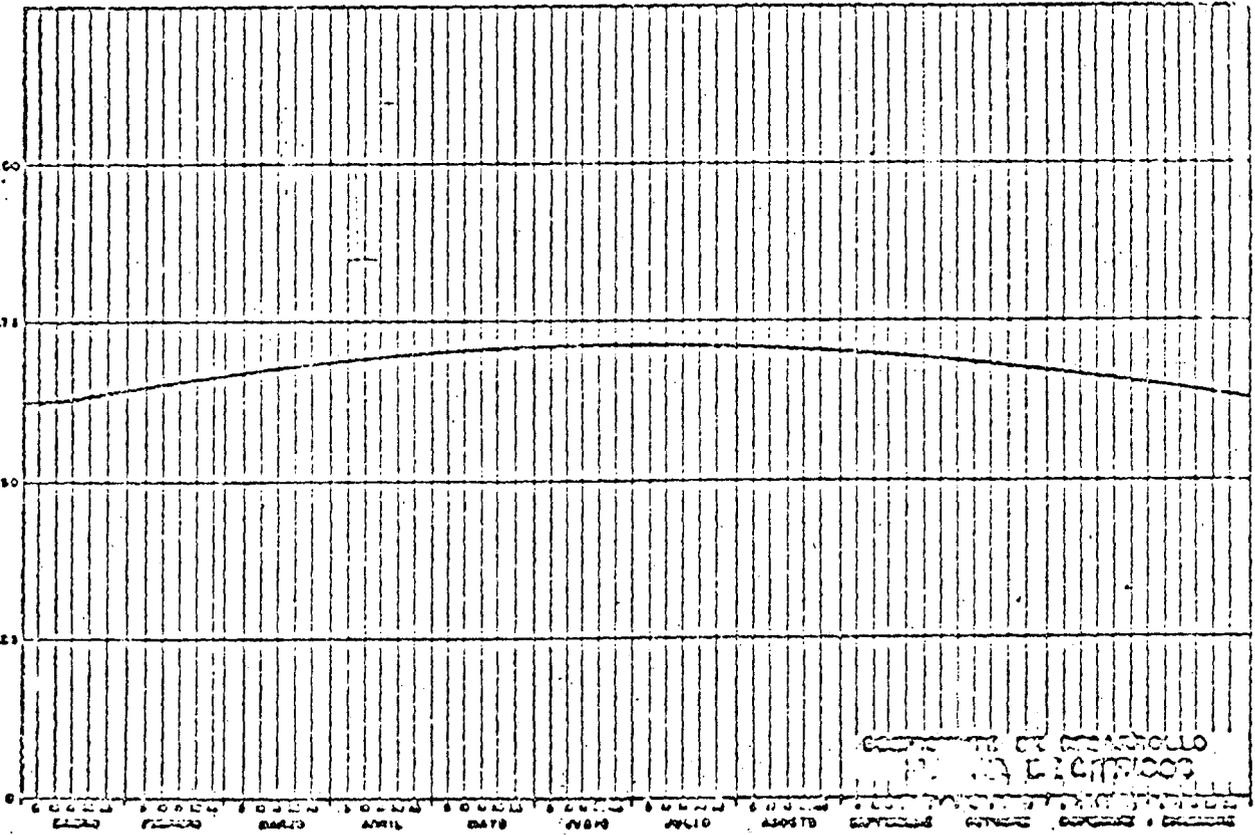


Coefficiente de Desarrollo Kc



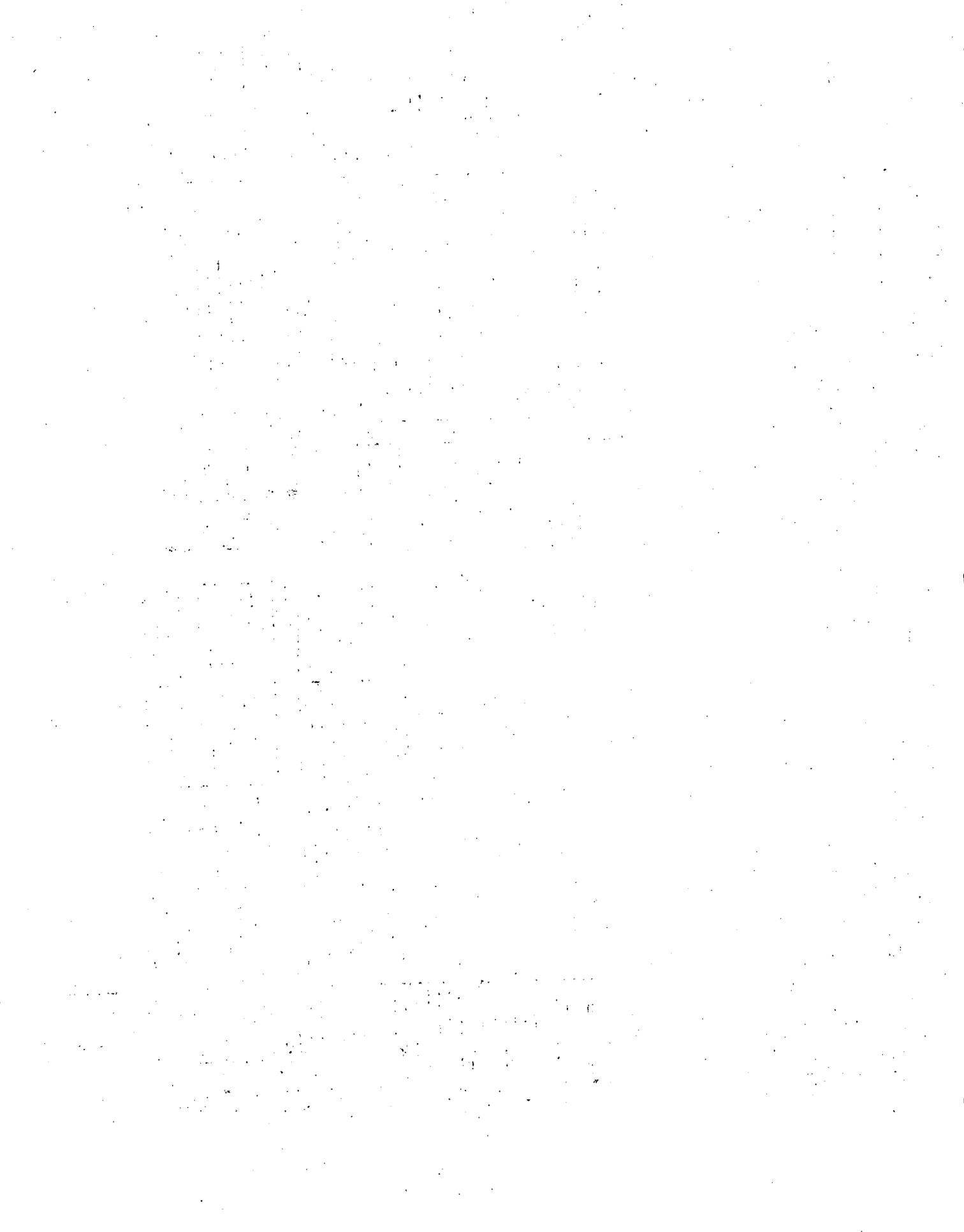
COEFICIENTE DE DESARROLLO  
VID

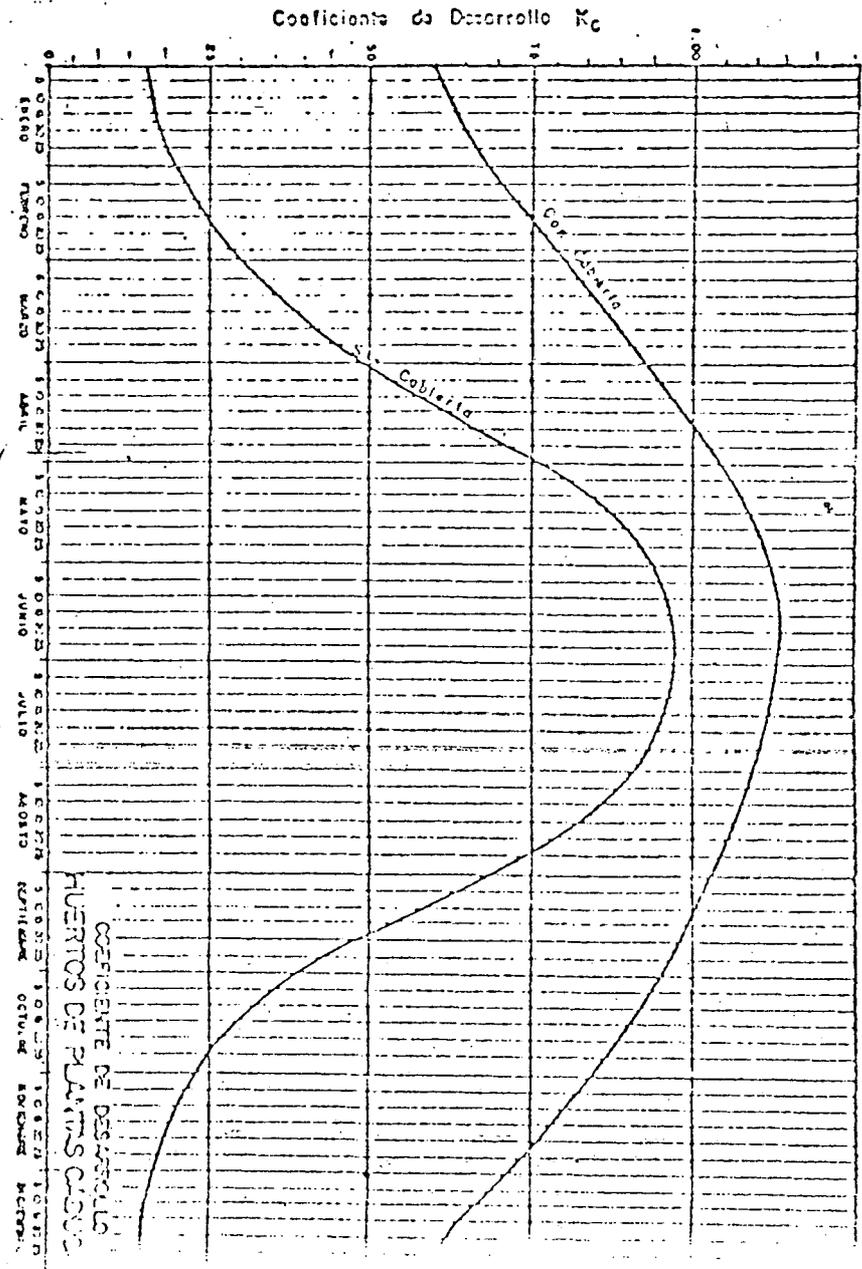
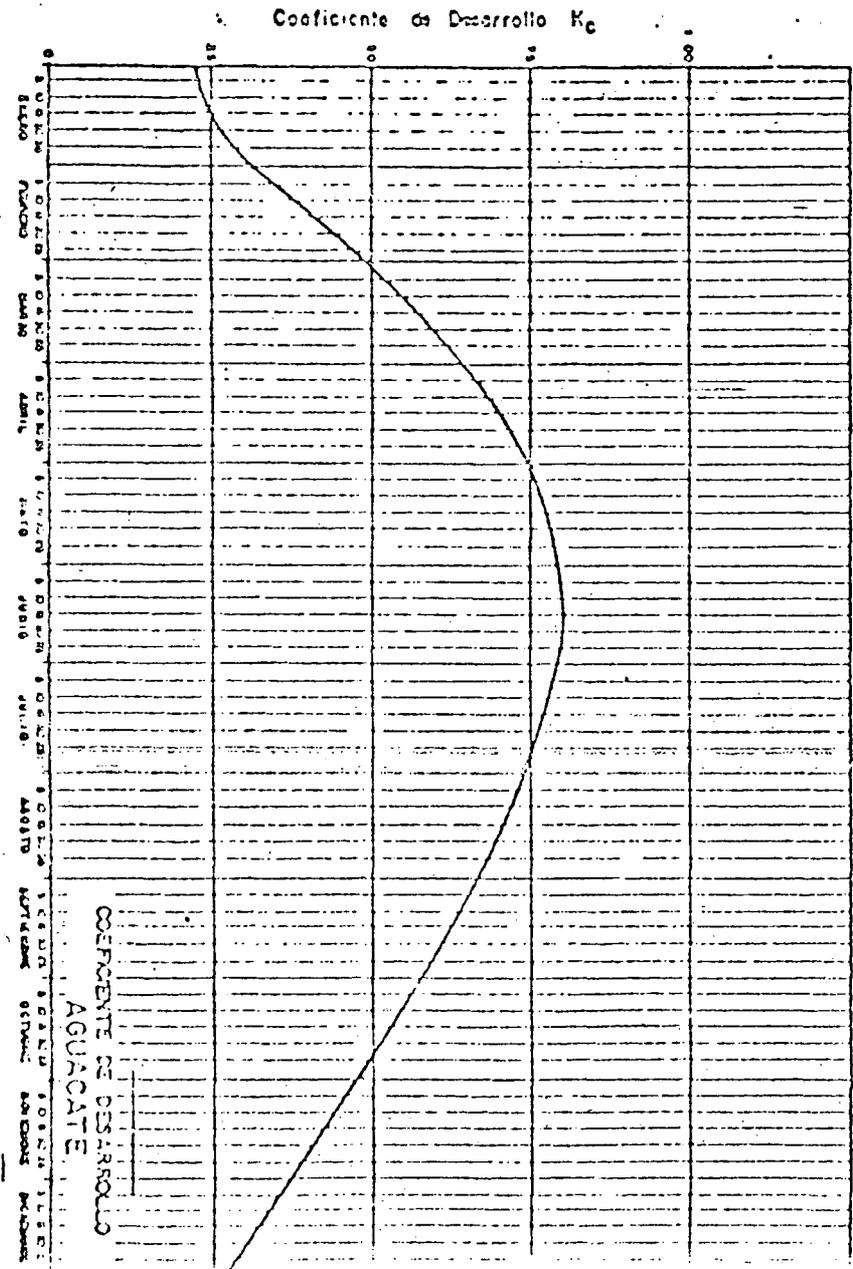
Coefficiente de Desarrollo Kg



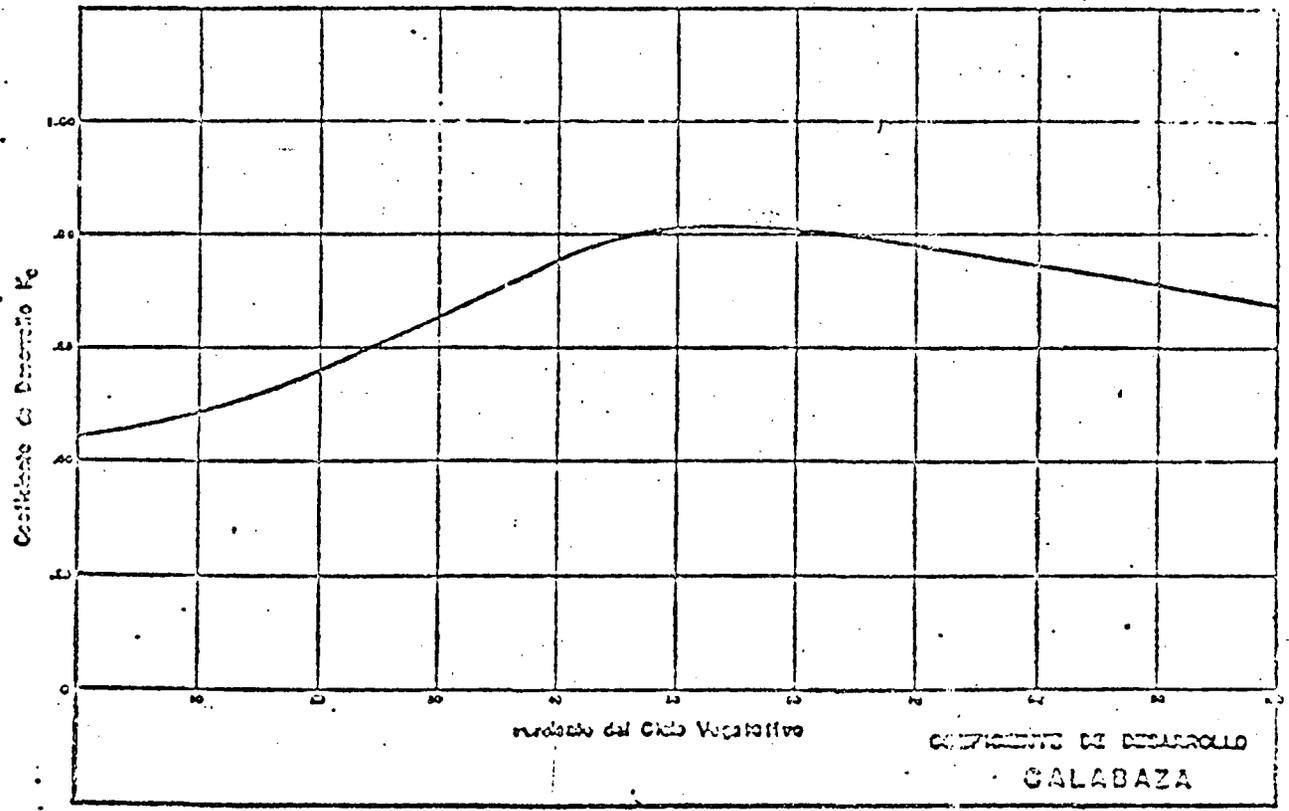
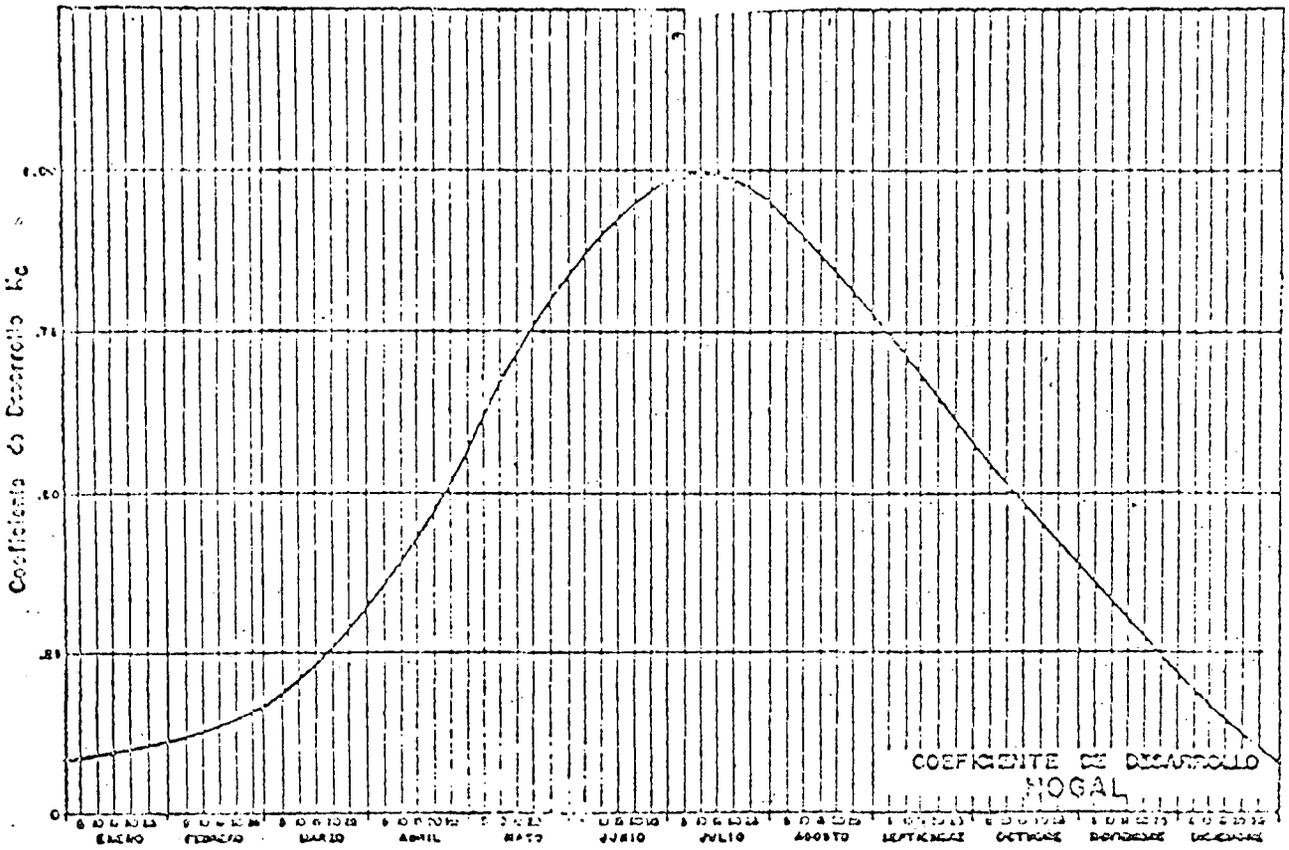
COEFICIENTE DE DESARROLLO  
LA ELECTRICOS

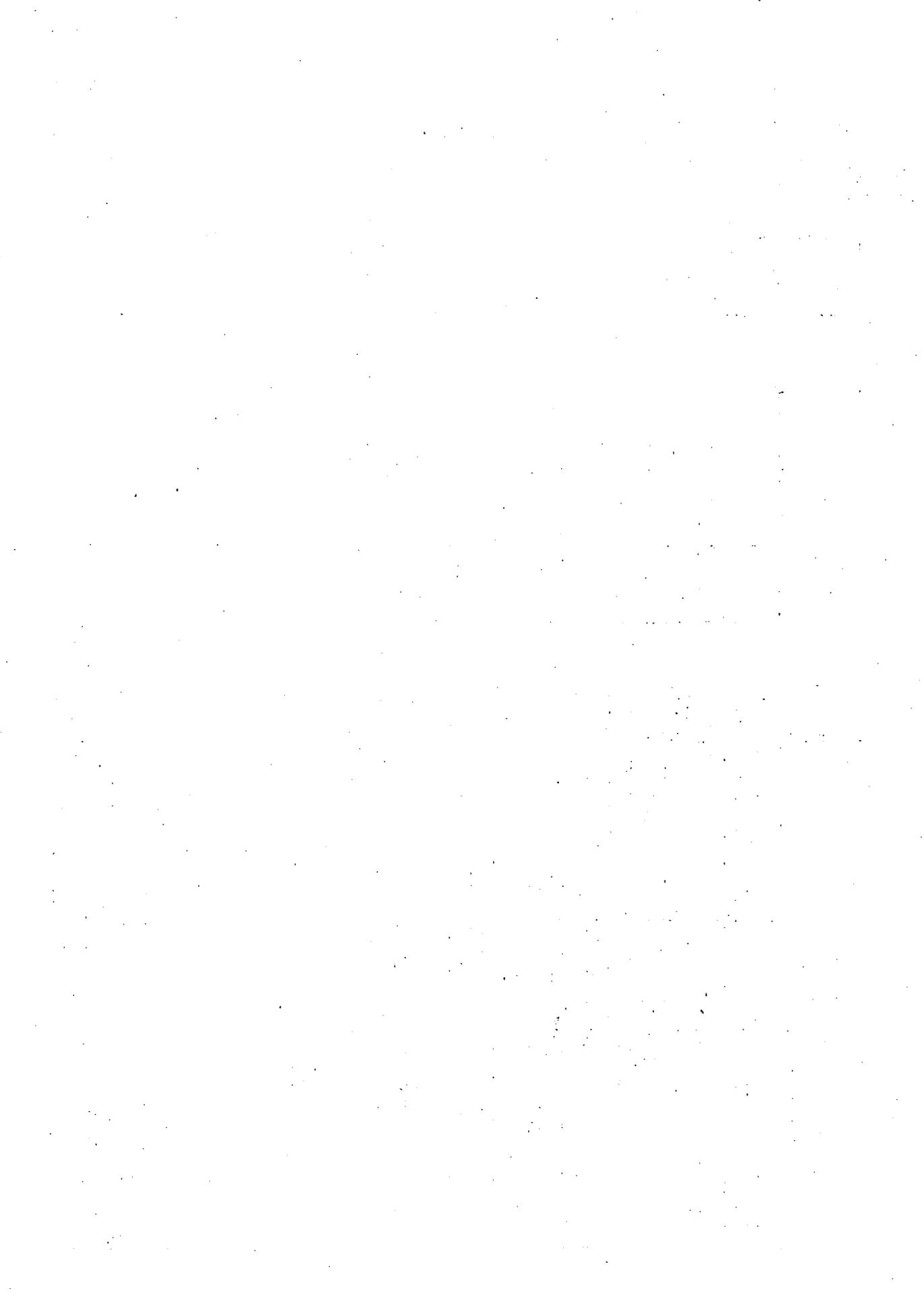
ENCLOSURE

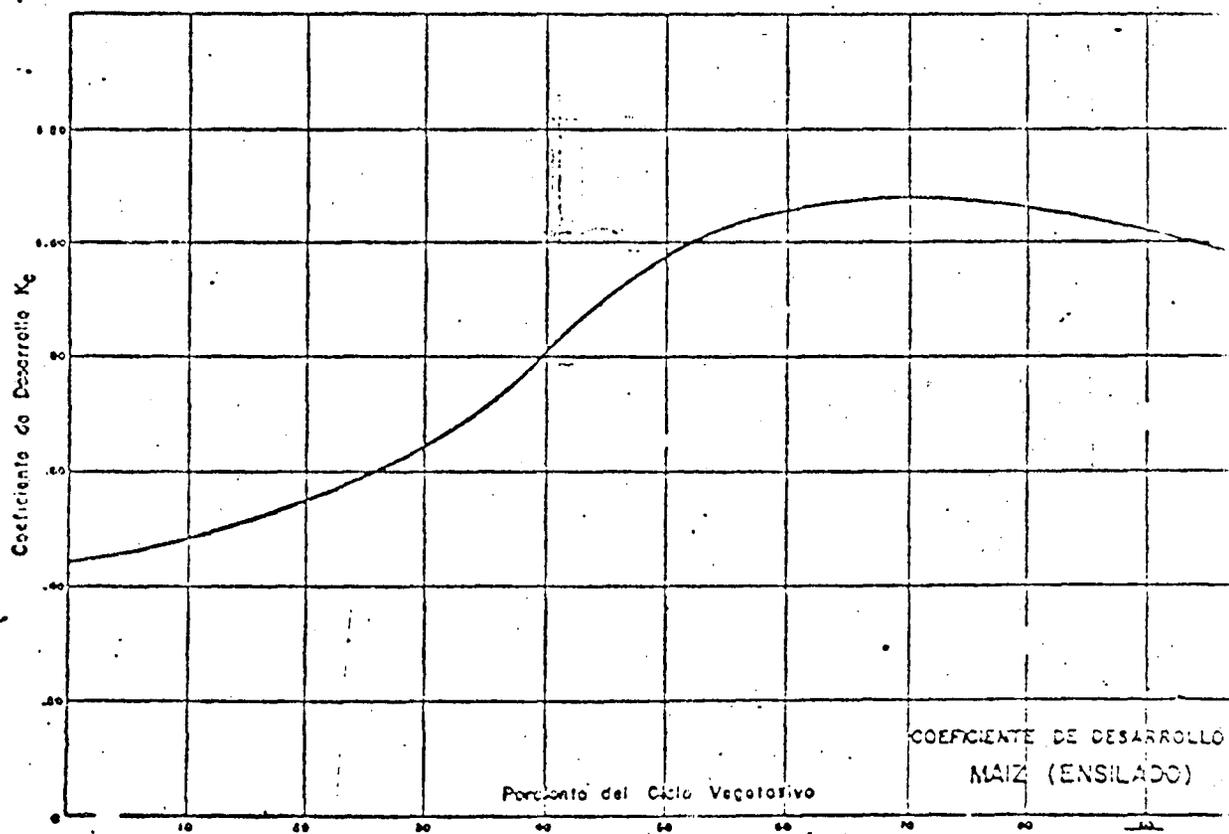
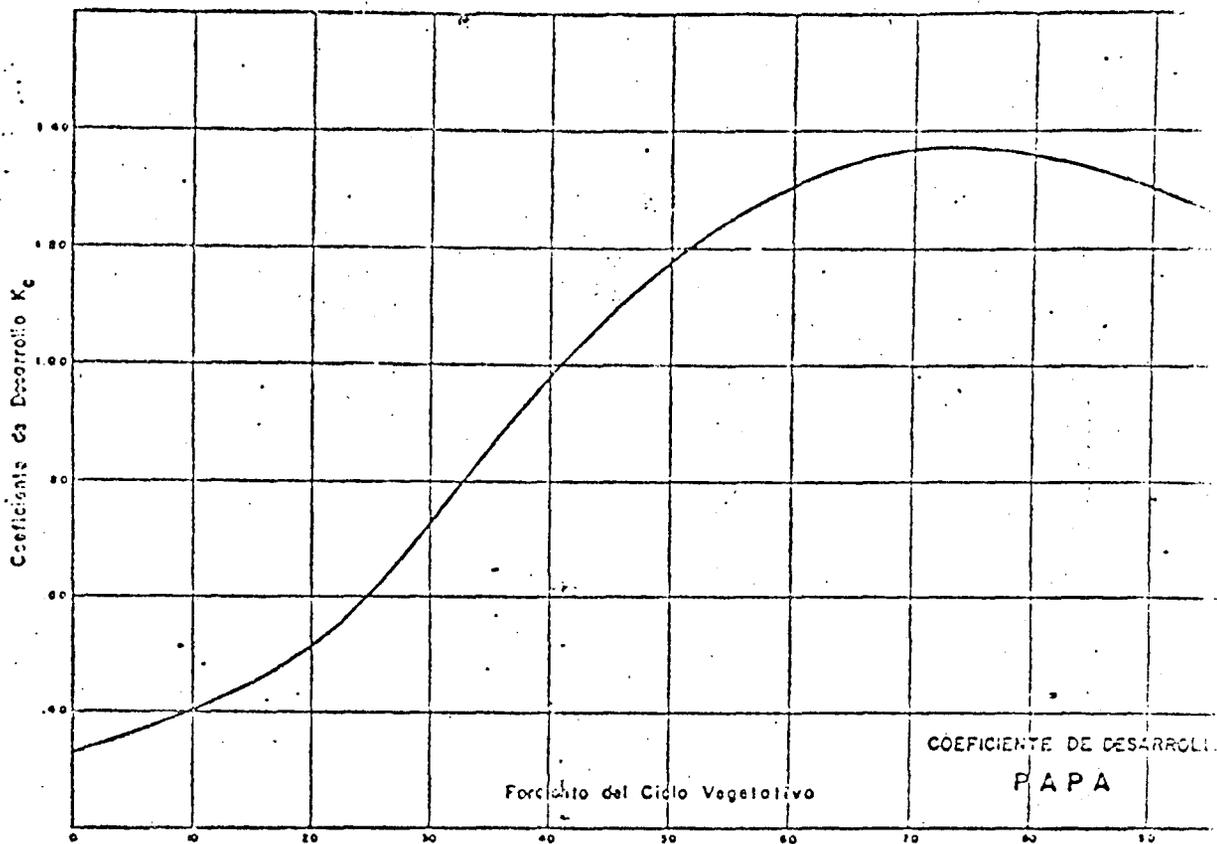




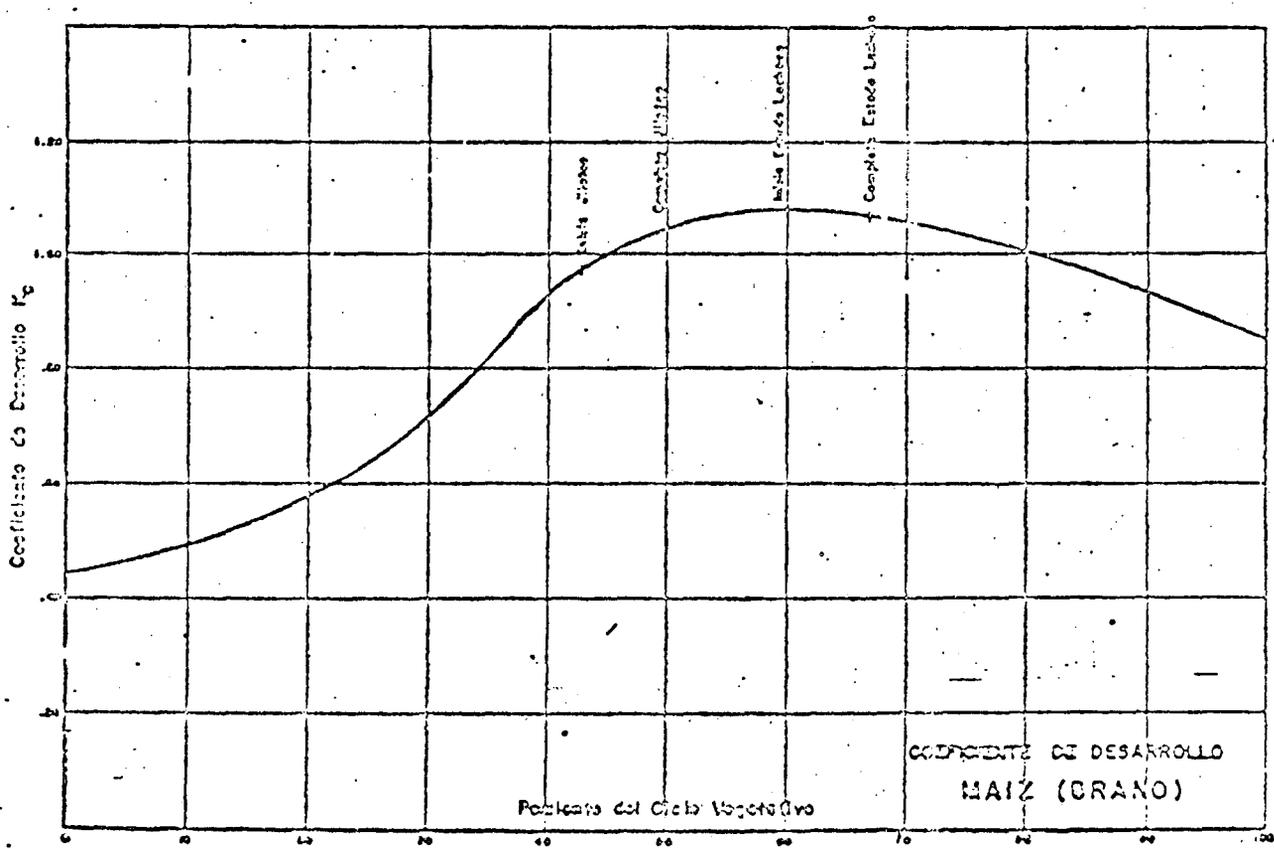
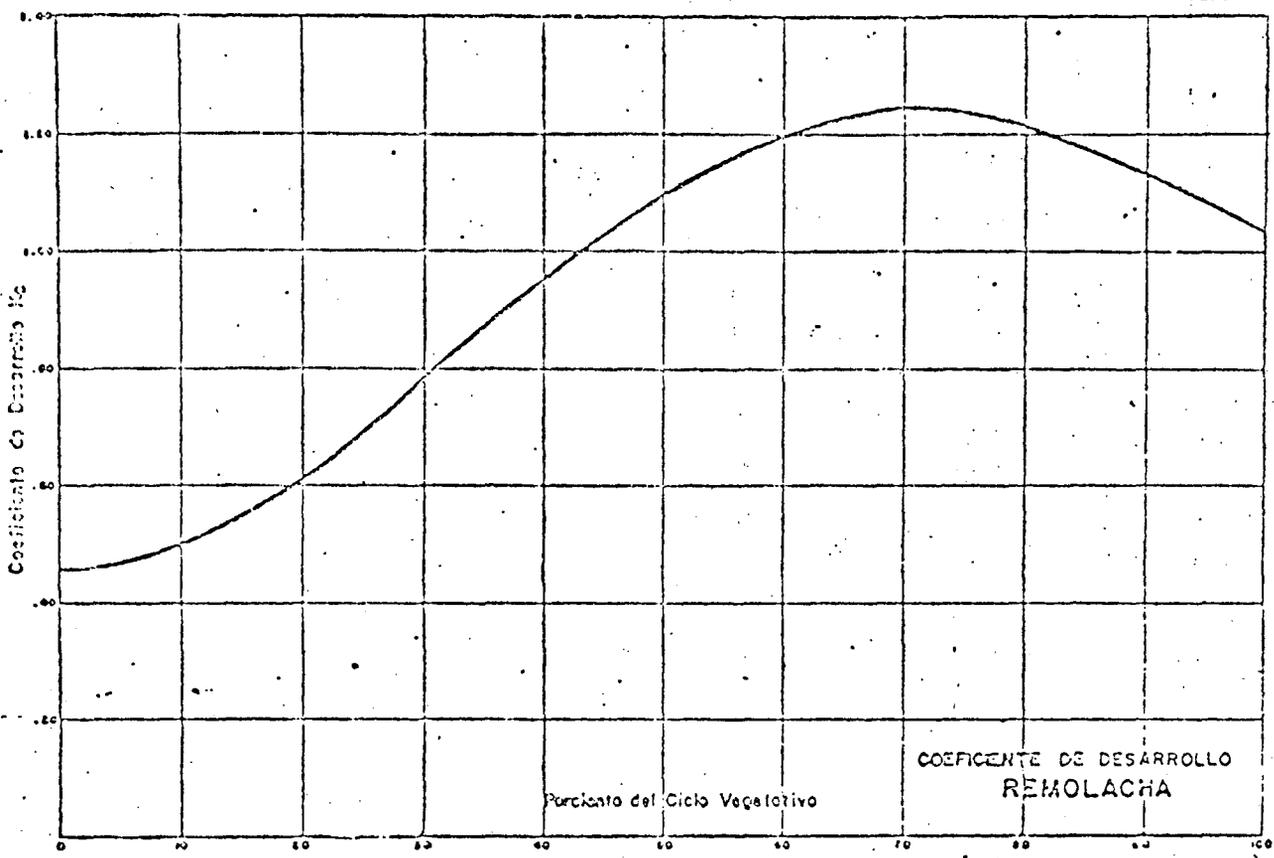


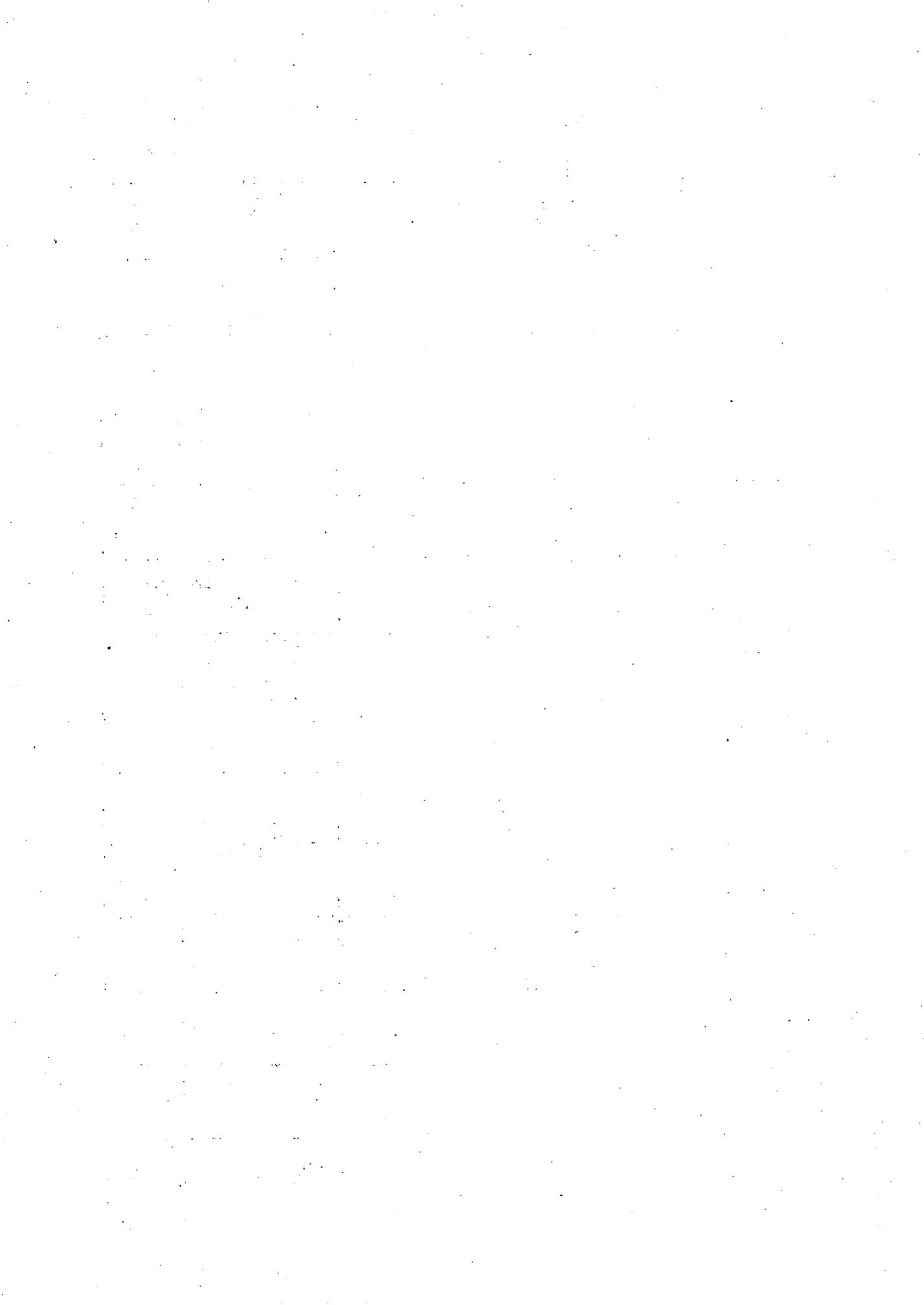


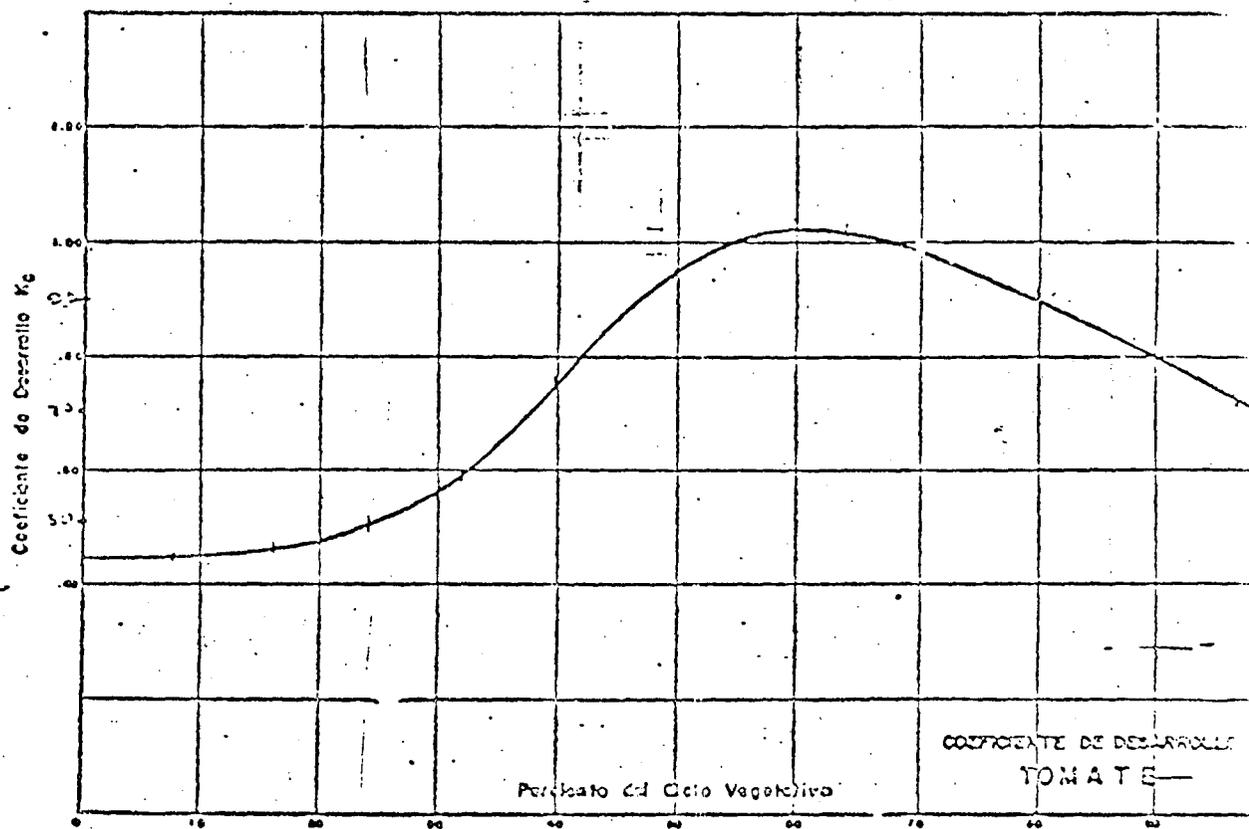
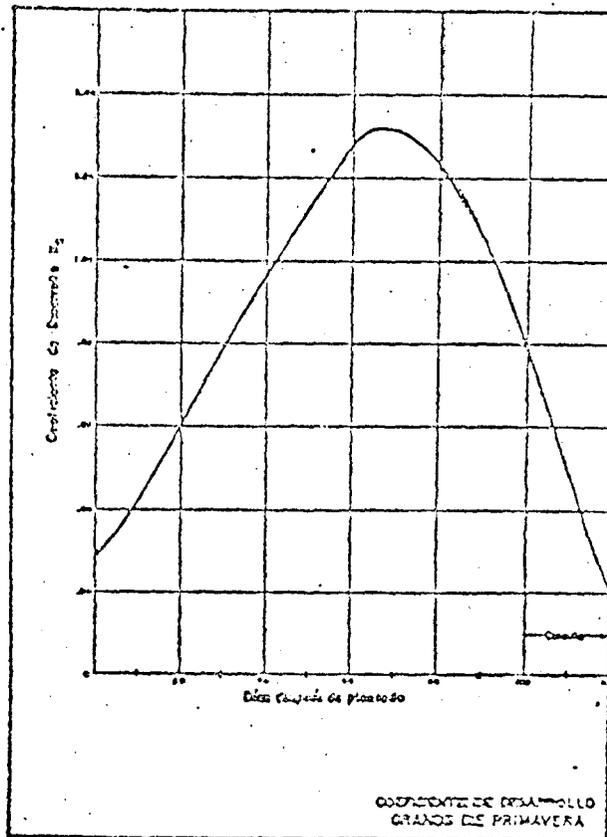








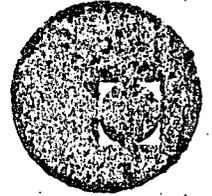








centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam

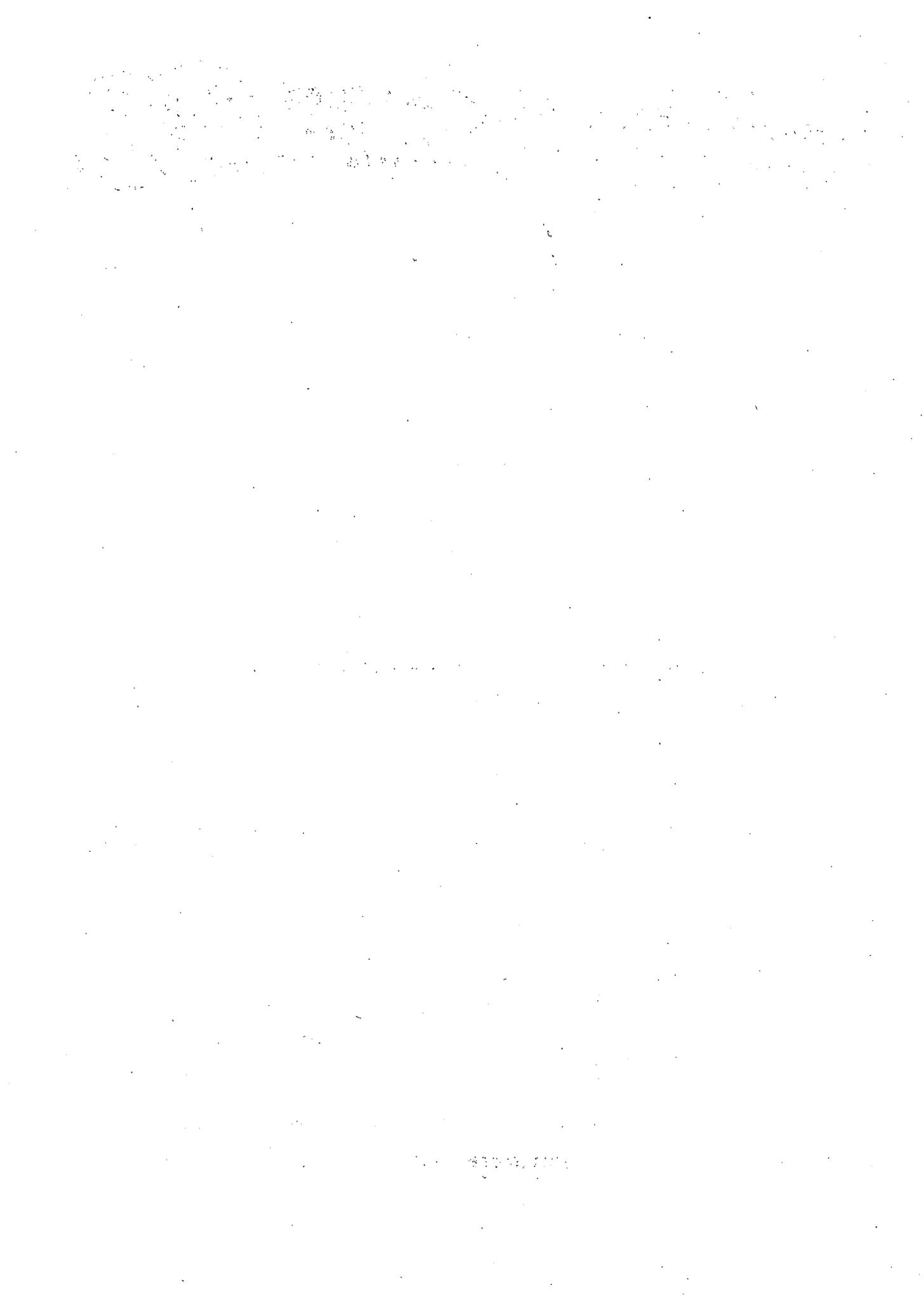


HIDROLOGIA SUPERFICIAL

PLANNING OF IRRIGATION SYSTEMS FOR AGRICULTURE WHITE  
THE AID OF A SIMULATION MODEL

DR. ROLANDO SPRINGALL.

SEPTIEMBRE, 1978



# Planning of Irrigation Systems for Agriculture with the Aid of a Simulation Model

J. L. SANCHEZ BRIBIESCA

Professor of Hydraulic Engineering

Universidad Nacional Autónoma de México (National University of Mexico), Mexico, D.F.

## SYNOPSIS

*When constructing irrigation works, their capacity should be based mainly on the water demands of the crops they are meant to serve, and on the relation between profits due to crop yield and costs due to irrigation expenses. The possibility is envisaged, by means of the proposed simulation model, of establishing an irrigated culture area where expected crop yields can be estimated beforehand, if a certain irrigation policy is followed.*

*The simulation model consists of three main parts:*

- (1) Crop growth and its water uptake, as imposed by different irrigating policies.*
- (2) Satisfaction of water requirements by the crop taking into account both conduction and application losses.*
- (3) Evaluation of profits (comparisons of crop yield with irrigation costs) for N simulated years.*

## Introduction

Irrigation water requirements depend on plant physiology, irrigation techniques and water distribution. The first item is perhaps the main one, and it includes a diversity of subjects such as soil Physics, climatological characteristics and basic Botany.

Several researchers have intended the planning of water supply to crops by means of simulation models<sup>(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)</sup>, but it is the author's opinion that the model proposed by J.C. Flinn<sup>(11)</sup> can, as to this writing, be considered the most complete.

It is the purpose of this paper to present a systematic approach to the computation of irrigation water needs, including several subjects not considered by the Canadian researcher. The model estimates the effects on final crop yield of soil moisture content, soil moisture tension, actual and potential evapotranspiration, rainfall, nitrogen fertilization, depth of water-table and

waterlogging. Some aspects of surface irrigation are also taken into account, as a means to estimating water losses. As to water distribution problems, Clement's criteria are used<sup>(2)</sup>, this allowing more realistic calculations of irrigation works.

The integrated model introduced in this paper appraises the relationship between expected benefit from crop yields according to a previously selected irrigation policy, and expected costs of required works.

Experimental support to certain assumptions has been attempted, and several screening tests have been performed at the University of Mexico, with more or less satisfactory results.

## Analysis of Data

Suppose an agricultural zone as exemplified in Figure 1 is to be irrigated, and the size of the serving channel has to be calculated. The zone has six farms

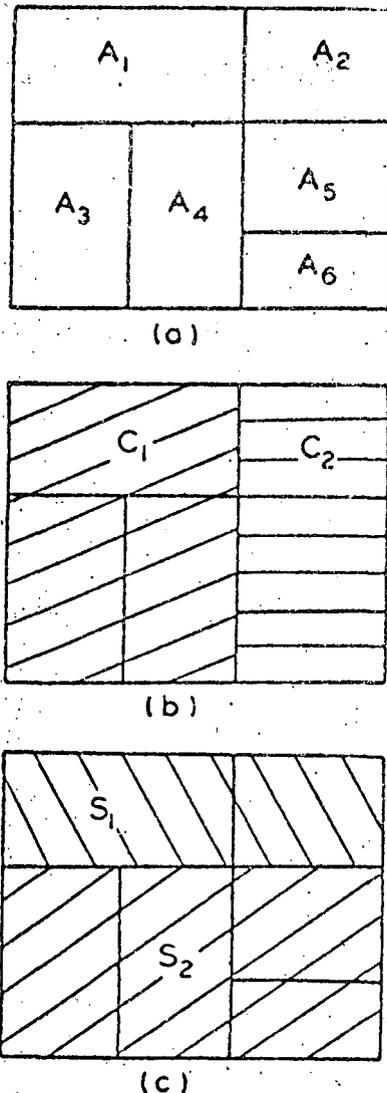


FIGURE 1: Hypothetical distribution of forms (A<sub>1-6</sub>), crops (C<sub>1-2</sub>) and soil types (S<sub>1-2</sub>) in the irrigated zone.

with areas A<sub>i</sub>, located on soil type S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub>, to be sown with crops C<sub>1</sub> and C<sub>2</sub>.

The following data are assumingly available :

- (a) Topography—land slopes
- (b) Agronomy —root depth of crops, soil constants, infiltration rate, 'soil water content versus soil water tension' graphs, depth of water-table, 'crop' factor according to Penman's formula, and maximum attainable yield for each crop.
- (c) Climate —daily pan evaporation and rainfall.

A graph similar to Figure 2 can be obtained for each considered crop.

The relation between percentage of yield,  $Y$ , and relative evapotranspiration,  $Ea/ET_p$ , varies according to nitrogen fertilization. Optimum yield is attained with maximum required nitrogen ( $F_n$ ), with either lower ( $F_1, F_2$ ) or higher ( $F_3, F_4$ ) quantities of added nitrogen, crops yield less than optimum. These graphs were obtained from the work of several researchers<sup>(1)(2)(4)(11)(14)(20)(23)(27)</sup>. Percentage yield refers here to the value for each state of the vegetative cycle, as shown in Figure 3.

The relationship between relative evapotranspiration,  $Ea/ET_p$ , and soil water tension,  $\psi$ , for several  $ET_p$  values is also shown in the graphs. Potential evapotranspiration  $ET_p$  is the amount of water required by climatological demand, under conditions of low soil water tension (near field capacity).  $ET_p$  is obtained daily from Penman's formula :

$$ET_p = E_a \times K_c$$

where,  $E_a$  is the daily atmospheric evaporation, and  $K_c$  is a 'crop factor', as shown in Figure 3.

The graphs described were compiled from several researcher's experiments<sup>(3)(9)(13)(17)(18)(22)(24)(25)</sup>.

Modifications to the  $Ea/ET_p$  ratio under conditions of excessive soil water ( $h$ ) are presented in the central part of the graphs in Figure 2. With raising water-table levels yield is reduced according to evaporative demand  $ET_p$ , and rainfall  $R$ , as stated in Hooghoudt's work<sup>(17)</sup>.

If the water-table is shallower than 15 cm, the crops are considered 'submerged', and the computation of damage due to submergence is made with the aid of graphs similar to Figure 5 [from a compilation by Salamin<sup>(28)</sup>].

Climatological data (Figure 4) are either recorded or simulated from prior information. The author experimentally confirmed the unreliability of temperature as an index of the crop's stage of development.

**The Model : Part One**

The goal of this part is to determine the amount and distribution time of water as required by a selected irrigation policy, and at the same time, to calculate expected crop yields. The irrigation policy is defined as the necessity to apply water when soil moisture reaches a selected value  $W_{pol} = K_p (FC - PWP)$ , for  $0 < K_p < 1$ , where,  $FC$  = field capacity

$PWP$  = permanent wilting percentage.

Computations are carried out in order to know the depth of the water-table  $d_t$ , soil moisture content  $W_t$ , and percentage yield  $Y_t$  on a daily basis, with the values for the previous day,  $d_{t-1}$  and  $W_{t-1}$ , and rainfall, evaporation, and fertilization data.

If  $d_{t-1}$  is less than  $d_{min}$ , which is about 15 cm the crop is submerged and unable to transpire ( $Ea \sim 0$ ); yield is reduced according to a submergence factor  $fD$  from Figure 5. When agricultural drainage is available, drained water can be calculated ( $D_t$ ).

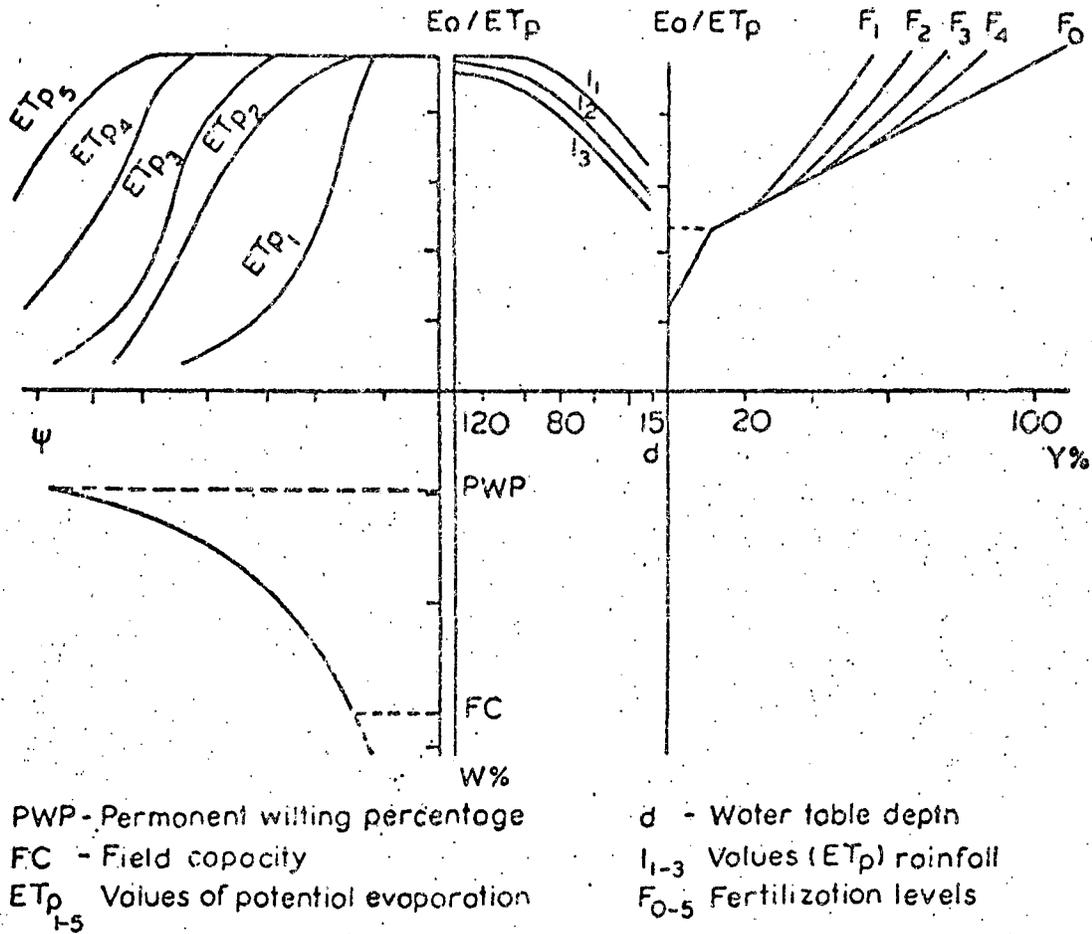


FIGURE 2 : Graphical representation of important relationships : soil water content versus tension (W versus  $\psi$ ); water tension versus relative evapotranspiration ( $\psi$  versus  $E_a/E_{T_p}$ ); and relative evapotranspiration versus yield ( $E_a/E_{T_p}$  versus Y).

In case of rainfall, infiltrable water is estimated as the difference between rain height and runoff :

$$\phi_i = (I - O)_i$$

(Graphs of the Soil Conservation Service)

Remaining soil moisture will be :

$$W_i = W_{i-1} + \phi - D_i$$

and crop yield will be :  $Y - f_d$

If  $d_{min} < d_{i-1} < d_{max}$ , the crop is 'logged', and actual evapotranspiration  $E_a$  is calculated taking into account potential evapotranspiration  $E_{T_{pi}} = K_{o_i} \times E_{o_i}$ ; excess water is then determined

$$I_i = \phi_i + W_{i-1} - E_{a_i} - D_i ;$$

finally,  $(E_a/E_{T_p})_i$  and then  $E_{a_i}$ .

These computations require several trials (Figure 2), and at last lead to the estimation of  $Y_i$ .

Soil moisture becomes :

$$W_i = W_{i-1} + \phi_i - E_{a_i} - D_i = I_i$$

When  $d_i > l_{max}$

and if  $W_i \geq FC$ , then  $W_i = FC$

and  $E_{a_i} = E_{T_{pi}}$

If, on the other hand

$W_{POL} < W_i < FC$ , then soil water tension and  $E_{T_{pi}} = K_{o_i} \times E_{o_i}$  must be known, and yield is determined following the graphs in Figure 2;  $W_i$  becomes  $W_{i-1} - E_{a_i} + \phi_i$ .

When  $W_i \leq W_{POL}$ , irrigation will be necessary by an amount  $FC - W_i$ ; computation continue as described so far.

In this way,  $y_i$  and applied water can be computed daily, and total final yield

$$Y_T = \sum_{i,j} \frac{Y_i}{N} y_j - \sum_{i,j} J_{D_i}$$

and its corresponding water requirement can be known.

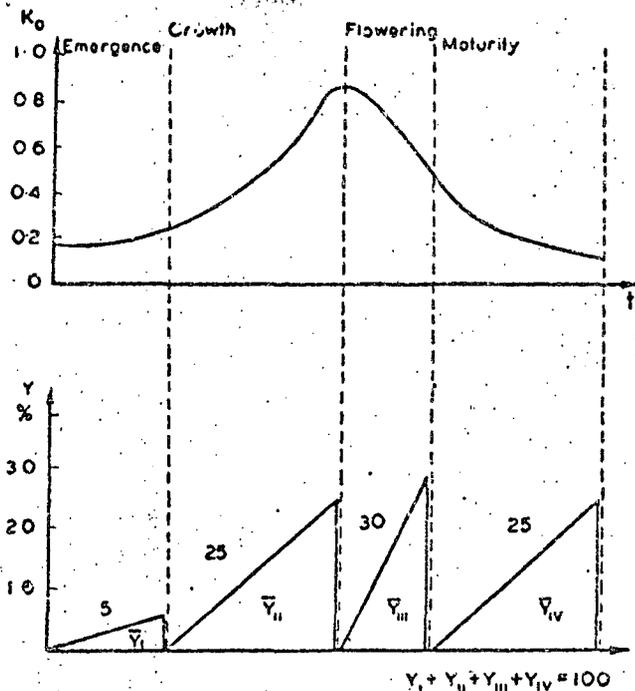


FIGURE 3 : Crop factor ( $K_0$ ) and percentage of final yield ( $Y$ ) attributed to each stage of growth.

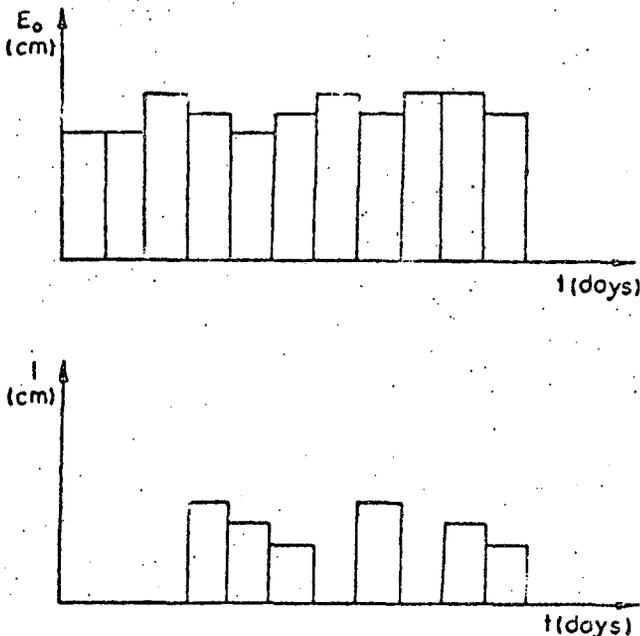


FIGURE 4 : Hypothetical daily evaporation ( $E_0$ ) and rainfall ( $i$ ) records.

Since, on the other hand, water needs are being recorded, the times of supply and the possibility of simultaneous demand can be known.

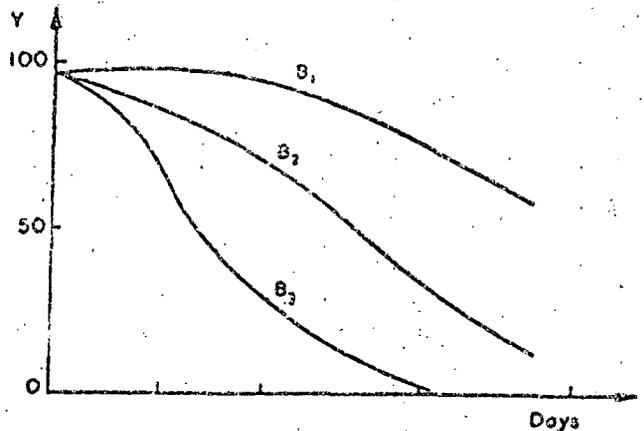


FIGURE 5 : Percentage yield  $Y$  according to duration of submergence for different stages of development ( $B_{1-3}$ ).

The Model : Part Two

According to the author's tests, it is difficult to relate, by means of simple formula, length, slope and permeability of irrigated land with water sheet depth or modulus (i.e., discharge to the farm). For each particular case, however, results show that a fixed relationship does exist, and can be described. Since irrigation is always given to the same land area, these parameters will not change, and the applied dose will, therefore, vary between short limits because of modified roughness. Because of the infiltration mechanisms, humidification of the soil profile is not a uniform process, and the actual water dose required will have to be checked in each particular case, with the aid of field tests.

The fact that plant water needs calculated as described in the previous chapter have to be modified by experimental doses, should not be disappointing ; in the first place, information on times of water application is important, and besides, actual plant requirements are useful as a guide when fixing the size of irrigated areas.

The time of water application depends on sheet depth and on the infiltration coefficient  $K$ ,  $\left( t = \frac{d}{K} \right)$

All through the application time, modular discharge  $Q = K \cdot A$  must be maintained.

On the basis of time of water demand, available time  $T$  can be known. According to Clement's ideas(?) the probability of service must be  $p = t/T$  for each farm considered. Then it is possible to estimate the discharge that the serving channel must supply to the  $N$  simultaneously demanding forms, with a specified probability of future :

$$Q = \sum_i^N Q_i (N_i p_i + \nu_i) \sqrt{n_i p_i (1 - p_i)}$$

where,  $Q$  = modular discharge

$p_i$  = probability of service

$n_i$  = number of farms in similar conditions

$\tau_f$  = probability coefficient for a predetermined failure.

Interested readers can look for more detailed explanations in Clement's original paper<sup>(8)</sup>.

With the described procedure, it is possible to know the discharge of every channel (and works to control them) that will serve the whole irrigated area.

If several channels are analyzed, irrigation-area-ratios for the zone, and a graph relating these ratios to served area can be built.

This allows for an easy and reliable way of computing all channels inside the irrigated zone.

It might appear that proposed criteria are useful only for one crop distribution. This limitation can be avoided by simulating for several crop distributions, simply by taking into account the percentage of land cultivated with each selected crop. A computer programme is available to allocate crops at random. In such a case, it would be necessary to repeat computations for several crop distributions, and to join the results in a single graph, as shown in Figure 6. (Irrigation coefficient versus served area).

### The Model : Part Three

As has been described in part one of the model, crop yield and benefits as a result of an irrigation policy can be estimated.

As a first step, the availability of required water has to be checked; the cost of structures for water application as described in part two can be determined next; the final step would be the estimation of the present value of the annualities of structure costs, leading to a decision taking.

### Conclusion

It might be thought that by pretending to include all the complicated phenomena in a simple formulation, very serious mistakes would be obtained. Actually, the proposed method gives the planner a more or less complete procedure for decision making based on consideration of many facts involved, even if some of them are roughly accounted for.

In fact, irrigation planning is generally based simply on the planner's experience, leading at times to absurd extrapolations.

It is the author's opinion that he has pointed out a procedure that can help the planning of irrigated lands. The paper also suggest future lines of research in agriculture. In fact, it is not reasonable simply to perform "factorial" experiments in order to check the influence of fertilizers or soil texture on yield, but rather realistic

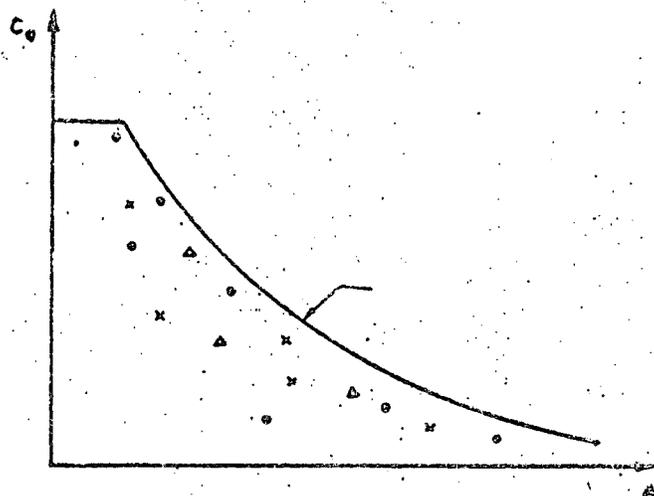


FIGURE 6: Relationship between irrigation coefficient  $C_o$  and served area  $A$ .

results by means of elaborate research should be aimed at.

### Acknowledgements

Research was carried out at the Institute of Engineering (Instituto de Ingeniería, UNAM), under the auspices of the Secretary of Hydraulic Resources (Secretaría de Recursos Hidráulicos). Author is indebted with all the members of his staff which made possible to realize this work, specially to the biologists Miss Riemann and Miss Sánchez.

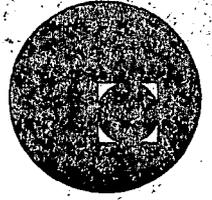
### Bibliographical References

- (1) BAUER, A.; YOUNG, R.A. and OZBUN, J.L. : "Effects of Moisture and Fertilizer on Yields of Spring Wheat." *Agron. J.*, Vol. 57, 1965, pp. 354-356.
- (2) CARLSON, C.W.; ALESSI, J. and MICKELSON, R.H. : "Evapotranspiration and Yield of Corn as Influenced by Moisture Level, Nitrogen Fertilization and Plant Density." *Soil Sci. Soc. Proc.*, Vol. 23, 1959, pp. 242-245.
- (3) CLEMENT, R. : "Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande." *Houille Blanche*. Vol. 5, 1966, pp. 533-575.
- (4) DALE, R. and SHAW, R. : "Effect on Corn Yields of Moisture Stress and Stand at two Fertility Levels." *Agron. J.*, Vol. 57, pp. 475-479.
- (5) DARLEY, P.R. and RYDZEWSKI, J.R. : "A Simulation Model for the Optimal Design and Operation of Irrigation Systems Based on Yield-Water Deficit Relationships." *Sym. Int. Con. Irr. and Drain.* 3, 1972, R-5, S 36.
- (6) DENMEAD, O.T. and SHAW, R.H. : "Evapotranspiration in Relation to the Development of the Corn Crop." *Agron. J.*, Vol. 51, 1959, pp. 725-726.
- (7) DENMEAD, O.T. and SHAW, R.H. : "The Effects of Soil Moisture Stress at Different Stages of Growth on the Development and Yield of Corn." *Agron. J.*, Vol. 52, 1960, pp. 272-274.

- (8) DENMEAD, O.T. and SHAW, R.H. : "Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions." *Agron. J.*, Vol. 54, 1962, pp. 385-390.
- (9) EDEN, A.; ALDERMAN, G.; BAKER, C.J.L.; NICHOLSON, H.H. and FIRTH, D.H. : "The Effect of Ground Water-level upon Productivity and Composition of Fenland Grass." *J. Agric. Sci.*, Vol. 41, 1951, pp. 191-202.
- (10) FAO/UNESCO : "Irrigation, Drainage and Salinity." Hutkinson, Paris, 1973, pp. 260-279.
- (11) FERNANDEZ, R. and LAIRD, R.J. : "Efecto de la Humedad del Suelo y de la Fertilizacion con Nitrogeno sobre la Calidad y el Rendimiento del Trigo." Folleto Técnico, S. A. 6., No. 27, 1958.
- (12) FLINN, J.C. and MUSGRAVE, W.F. : "Development and Analysis of Input-Output Relations for Irrigation Water." *Austr. J. Agric. Econ.*, Vol. 11, 1967, pp. 1-19.
- (13) FLINN, J.C. : "The Simulation of Crop-Irrigation Systems." In J.B. Dent, edo, "Systems Analysis in Agricultural Management." John Wiley and Sons, Australia, 1971, pp. 123-152.
- (14) GRIMES, D.W. and MUSICK, J.T. : "Effect of Plant Spacing, Fertility and Irrigation Management on Grain Sorghum Production." *Agron. J.*, Vol. 52, 1960, pp. 647-650.
- (15) HAGAN, R.M., ed. : "Irrigation of Agricultural Lands." *Am. Soc. Agron.*, Wisc., 1967.
- (16) HAGAN, R. M. and STEWART, J. I. : "Water Deficits, Irrigation Design and Programming." *J. Irrig. Drain. Div.*, Vol. 98, 1972, pp. 215-235.
- (17) HOOGHOUTD, S. B. : "Resultaten van het grondwaterstands proefuel te Nieuwbeerta." *Versl. Techn. Bijeenk. Hidrol. Comm. TNO*, Vol. 1-6, 1952, pp. 56-63.
- (18) JENSEN, M. E. : "Les besoins d'eau des Cultures." *Trans. Int. Comm. Irrig. and Drain*, 7th Congress Irrig. and Drain., Mexico, 2, 1969, F Q 23.
- (19) KOZLOWSKI, T. T., ed. : "Water Deficits and Plant Growth." Academic Press, N.Y., 1968.
- (20) LEGGETT, G. E. : "Relationships between Wheat Yield, Available Moisture and Available Nitrogen in Eastern Washington Dryland Areas." *Wash. Agr. Exp. Sta. Bull.* Nr. 609, 1959.
- (21) LEMBKE, W. D. and JONES JR., B. A. : "Selecting a Method for Scheduling Irrigation Using a Simulation Model." *Trans. A. S. A. E.*, 1972, pp. 284-286.
- (22) MUSICK, J. T.; GRIMES, D. W. and HERRON, G. M. : "Irrigation Water Management and Nitrogen Fertilization in Grain Sorghums." *Agron. J.*, Vol. 55, 1963, pp. 295-298.
- (23) NICHOLSON, H. H. and FIRTH, D. H. : "The Effect of Ground Water-Level on the Performance and Yield of Some Common Crops." *J. Agric. Sci.*, Vol. 43, 1953, pp. 95-104.
- (24) PENMAN, H. L. : "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass." *Proc. Royal Soc.*, Vol. 193A, 1948, pp. 120-145.
- (25) PIERRE, W. H.; KIRKHAM, D.; PESEK, J. and SHAW, R. : "Plant Environment and Efficient Water Use." *Amer. Soc. Agron. Soil Sci. Soc. Amer.*, 1966.
- (26) ROBINS, J. S. and DOMINGO, C. E. : "Some Effects of Severe Soil Moisture Deficits at Specific Growth Stages in Corn." *Agron. J.*, Vol. 45, 1953, pp. 618-621.
- (27) ROBINS, J. S. and DOMINGO, C. E. : "Moisture and Nitrogen Effects on Irrigated Spring Wheat." *Agron. J.*, Vol. 54, 1962, pp. 135-138.
- (28) SALAMIN III *Congres International des Irrigation et du Drainage (To sec Poiree and Olier "Assainissement" Agricole" Eyrolles, Paris 1969).*
- (29) SLATYER, R. O. : "Plant Water Relationships." Academic Press, N. Y., 1967.
- (30) STEWART, J. I. and HAGAN, R. M. : "Function to Predict Effects of Crop Water Deficits." *J. Irrig. Drain. Div.*, Dec. 1973, IR4, pp. 421-439.
- (31) TAYLOR, S. A. and ASHCROFT, G. L. : "Physical Edaphology." W. H. Freeman and Co., Sn. Foo., 1972.
- (32) WISER, E. H. : "Irrigation Planning Using Climatological Data." *Proc. A.S.A.E.*, Vol. 91, 1965, pp. 1-12.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE

DR. ROLANDO SPRINGALL

AGOSTO, 1978



## 6. LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE

### 6.1 Antecedentes

Para analizar los diversos criterios existentes para determinar la Avenida Maxima Probable que para una cierta frecuencia de incidencia se puede presentar en el sitio por analizar, se requiere conocer por una parte el tamaño de la cuenca y por otro la información hidrológica disponible. En la tabla 6.1 se muestra la forma de seleccionar el criterio mas adecuado para deducir la avenida de diseño, de acuerdo con los requerimientos antes mencionados.

Antes de analizar los criterios correspondientes a este capítulo de acuerdo con la tabla 6.1, es conveniente primero plantear la forma de seleccionar para una obra determinada el período de retorno que le corresponde al evento hidrológico para su diseño

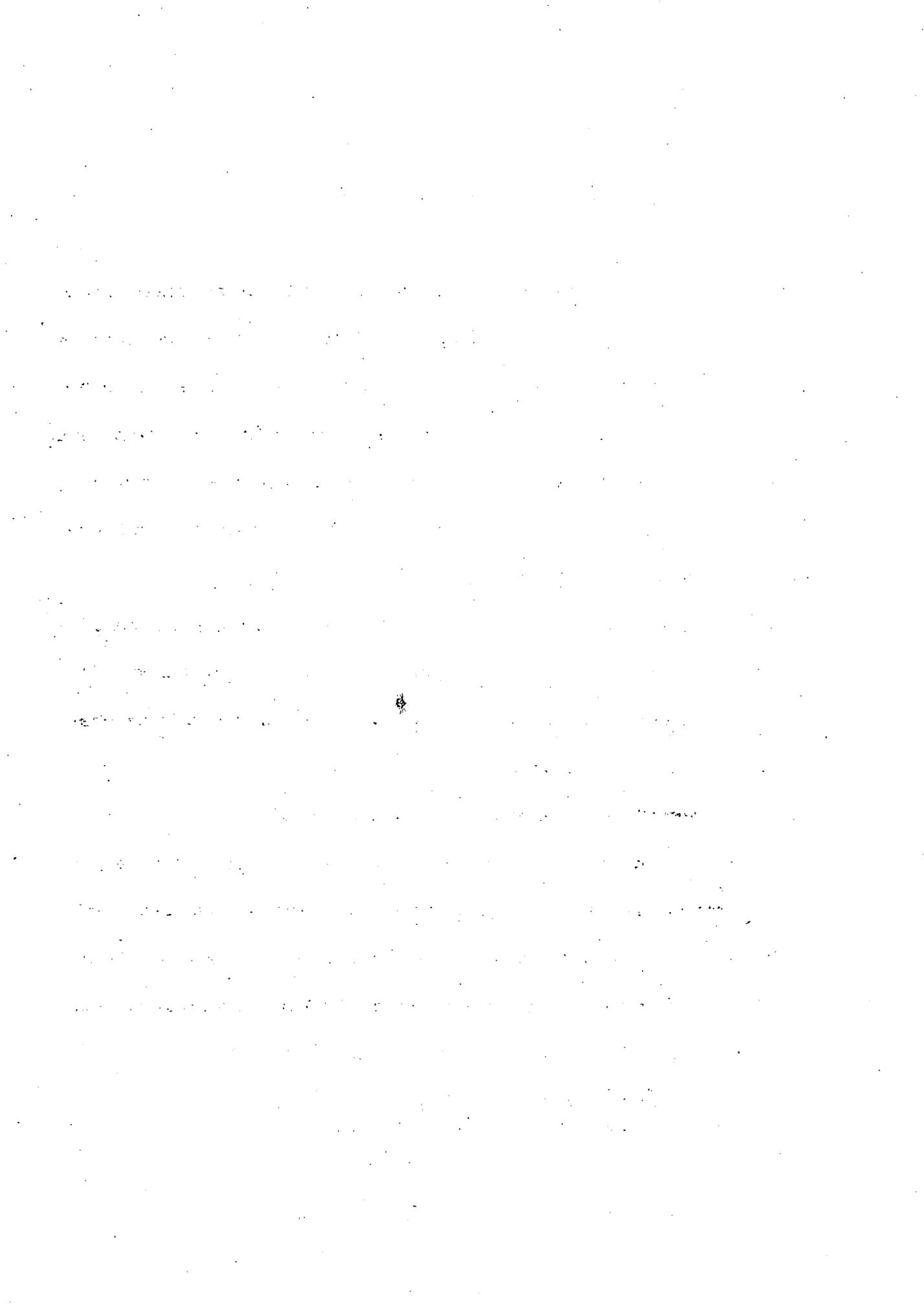
### 6.2 Período de retorno de los eventos hidrológicos\*

El período de retorno  $T$  de un evento hidrológico de magnitud dada  $Y$  se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. Si un evento igual o mayor a  $Y$  ocurre una vez en  $T$  años, su probabilidad de ocurrencia  $P(Y)$  es igual a  $1/T$  en  $T$  casos, o sea que

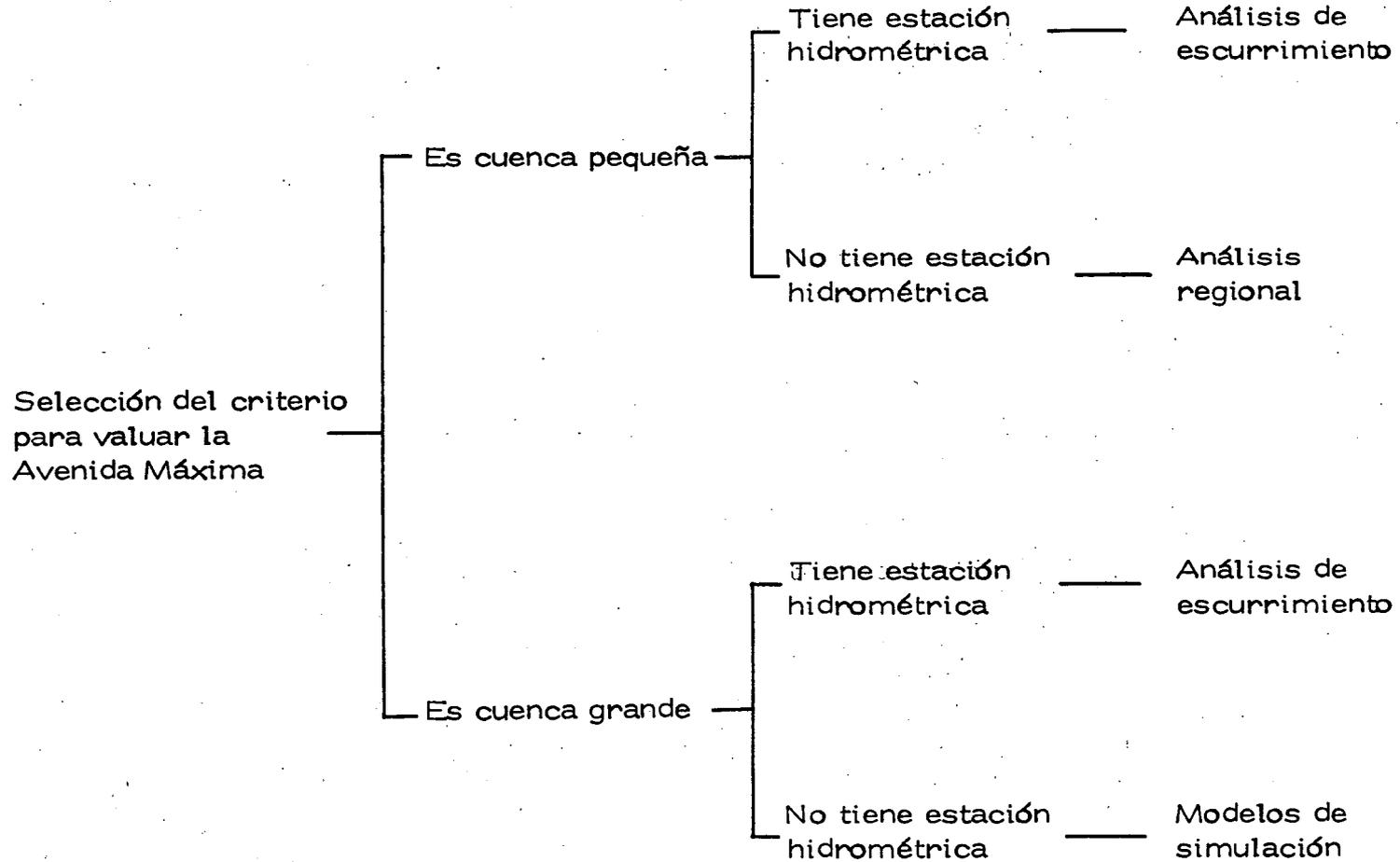
---

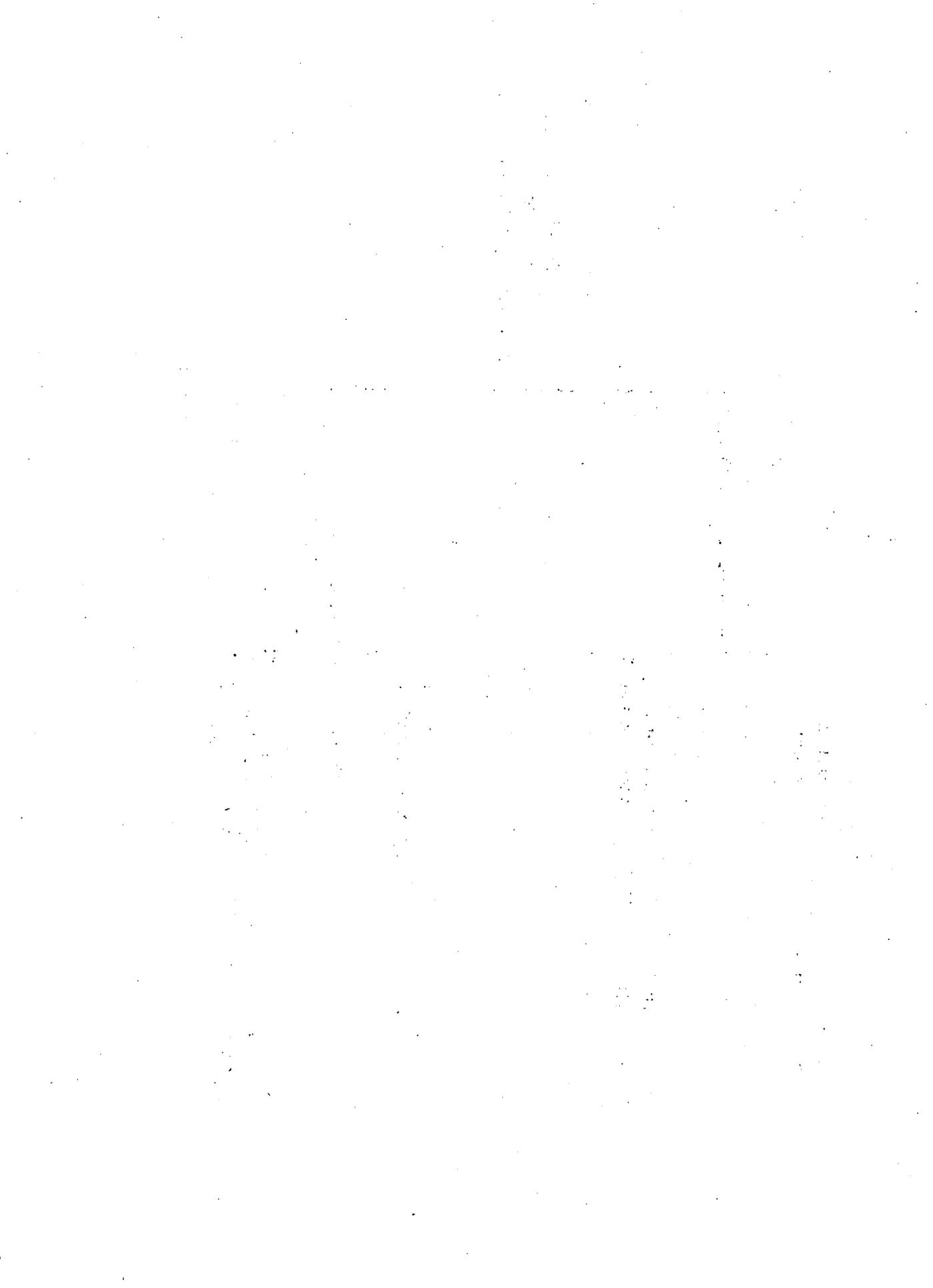
\*Notas complementarias al inciso 8.4 de la publicación:

R. Springall G "Análisis estadístico y probalístico de datos hidrológicos" Facultad de Ingeniería, UNAM, Cap. 8 (1975)



SELECCION DE LA METODOLOGIA





$$T = \frac{1}{P(Y)} \quad (6.1)$$

La definición anterior permite el siguiente desglose de relaciones de probabilidades:

- La probabilidad de que Y ocurra en cualquier año

$$P(Y) = \frac{1}{T} \quad (6.2)$$

- La probabilidad de que Y no ocurra en cualquier año

$$P(\bar{Y}) = 1 - P(Y) = 1 - \frac{1}{T} \quad (6.3)$$

- La probabilidad de que Y no ocurra en n años sucesivos

$$P(\bar{Y})^n = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (6.4)$$

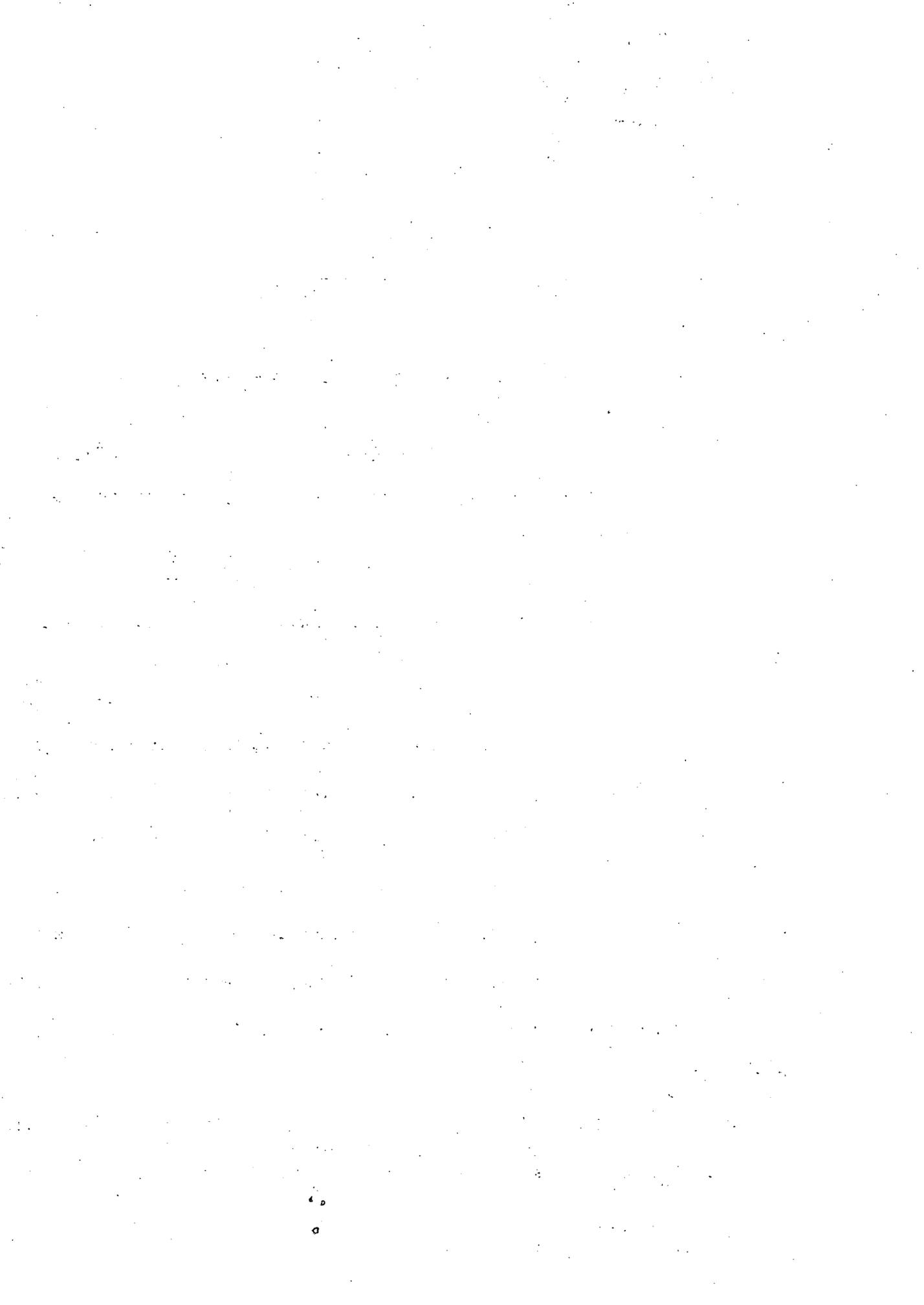
- La probabilidad conocida como de ocurrencia o riesgo

R, de que Y ocurra al menos una vez en n años sucesivos

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (6.5)$$

Si se considera que n sea la vida de diseño operacional de una obra, la ec 6.5 permite determinar a partir de la asignación de un cierto riesgo de que la obra falle, el período de retorno de la misma. En la tabla 6.2 se indican los períodos de retorno correspondientes a diversos niveles de riesgo y períodos de diseño.

De lo anterior se tiene que la asignación de un período de retorno a un evento hidrológico para realizar el diseño de una obra, si se acepta que la vida



de diseño es constante, es función directa del riesgo que se tenga durante su vida operacional, de que se presente un evento mayor al de diseño. Para cuantificar la probabilidad de ocurrencia o riesgo de que se presente en una obra hidráulica un evento mayor al de diseño requiere tener en cuenta:

- Costo de la obra
- Daños que se pueden tener al presentarse una falla
- Costo de mantenimiento
- Inconvenientes y perjuicios en el caso de falla
- Riesgos de vidas humanas

De ser factible cuantificar los daños que se pudieran ocasionar tanto humanos como materiales, el período de retorno asignado a un evento para el diseño de una obra hidráulica se puede realizar con apoyo de la ec 6.5, efectuando un análisis económico entre el costo de las obras y el costo de los daños por falla de la obra\*

Usualmente lo anterior es difícil de hacer, por lo que es común utilizar para la selección del evento de diseño, períodos de retorno ó criterios - preestablecidos. Así, en la tabla 6.3 se muestran los períodos de retorno recomendables para estructuras menores análogamente en las tablas 6.4 y 6.5 se muestran los períodos de retorno recomendables para la -

---

\*Navarro, J.L., Sánchez, J.L. y Téllez, J.F. "Un criterio para la selección del período de retorno para el diseño de obras de desvío" Pub. Tec. SRH, Vol. III, No. 1 (1974) pp 52-59

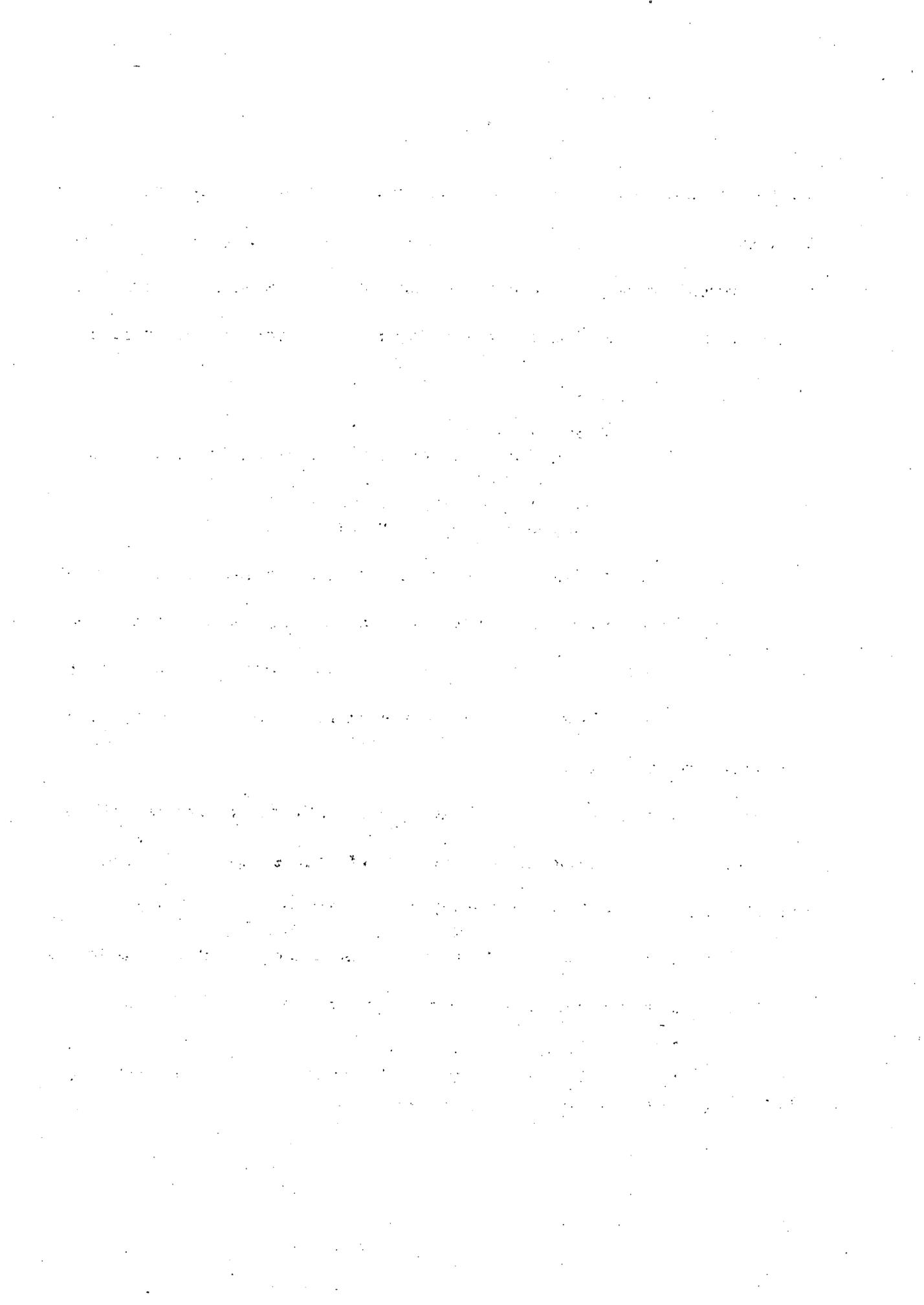


TABLA 6.3

PERIODOS DE RETORNO DE DISEÑO RECOMENDABLES  
PARA ESTRUCTURAS MENORES

Tipo de estructura	Período de retorno ( años )
Puente sobre carretera importante, donde el remanso puede causar daños excesivos por inundación u ocasionar la falla del puente	50 a 100
Puente sobre carreteras menos importantes o alcantarillas sobre carreteras importantes	25
Alcantarillas sobre caminos secundarios, drenaje de lluvia o contracunetas	5 a 10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde puede tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración	1 a 2
Drenaje de Aeropuertos	5
Drenajes urbanos	2 a 10
Bordos	2 a 50

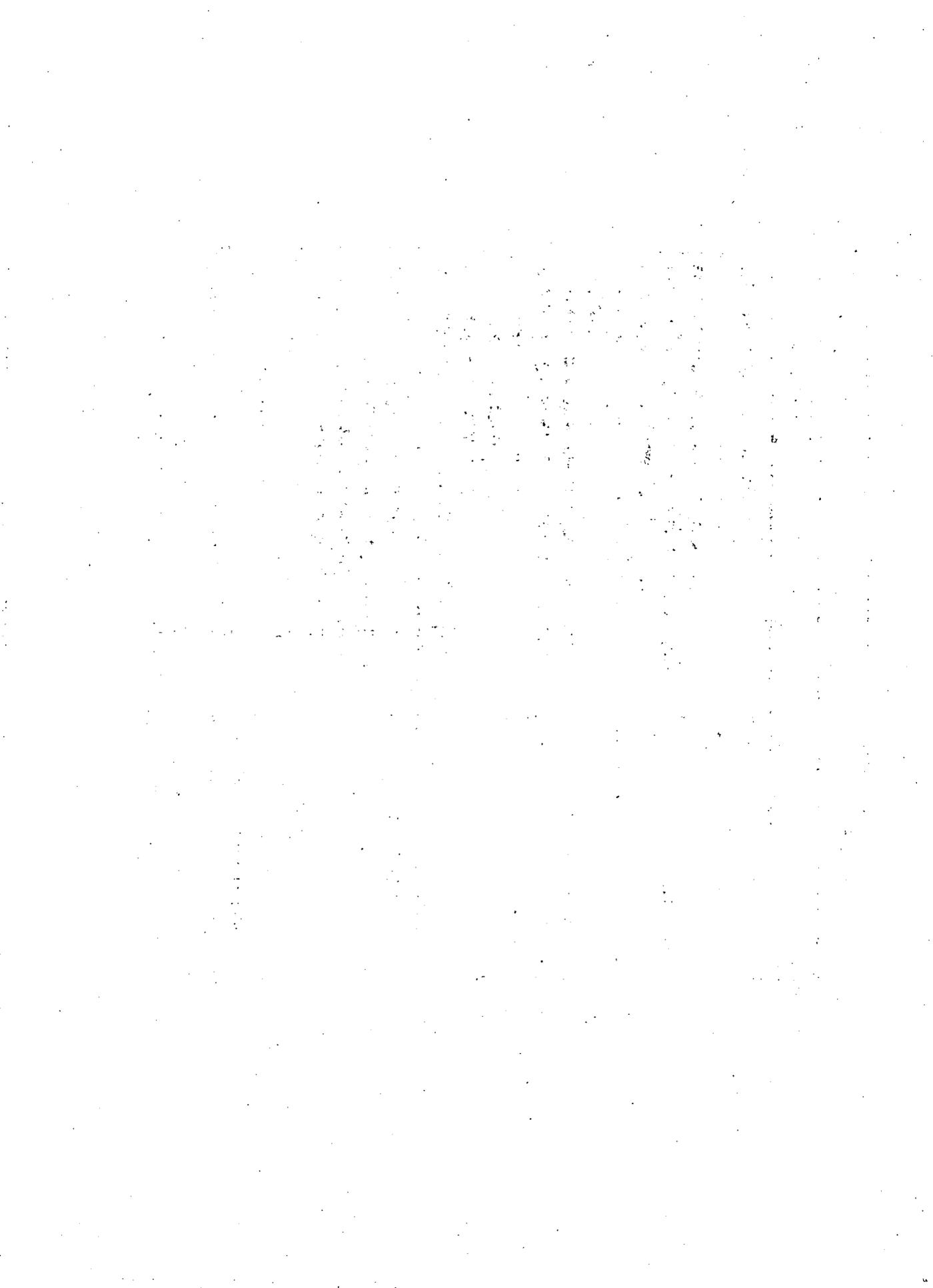
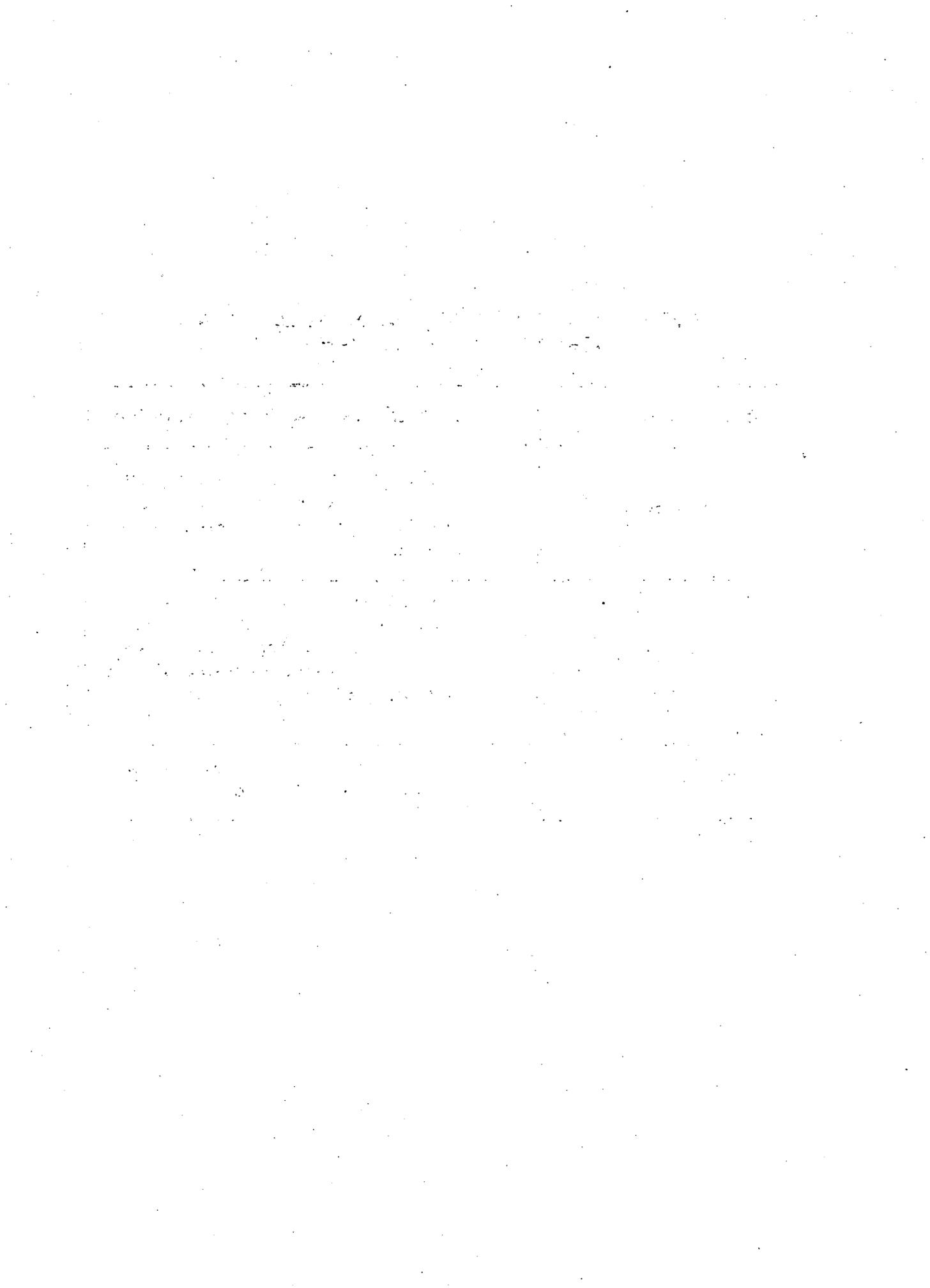


TABLA 6.5

EVENTO DE DISEÑO RECOMENDABLES PARA  
ESTRUCTURAS MAYORES

CATEGORIA	Avenida de Diseño del Vertedor
MAYOR	Máxima Probable : La avenida más severa considerada razonablemente posible sobre la cuenca
INTERMEDIA	Proyecto estándar : Basada en la más severa tormenta o condiciones metereológicas consideradas razonablemente representativas de la región (Ver tabla 6.4)
PEQUEÑA	Intervalo de recurrencia de 50 a 100 años ( Ver tabla 6.4)



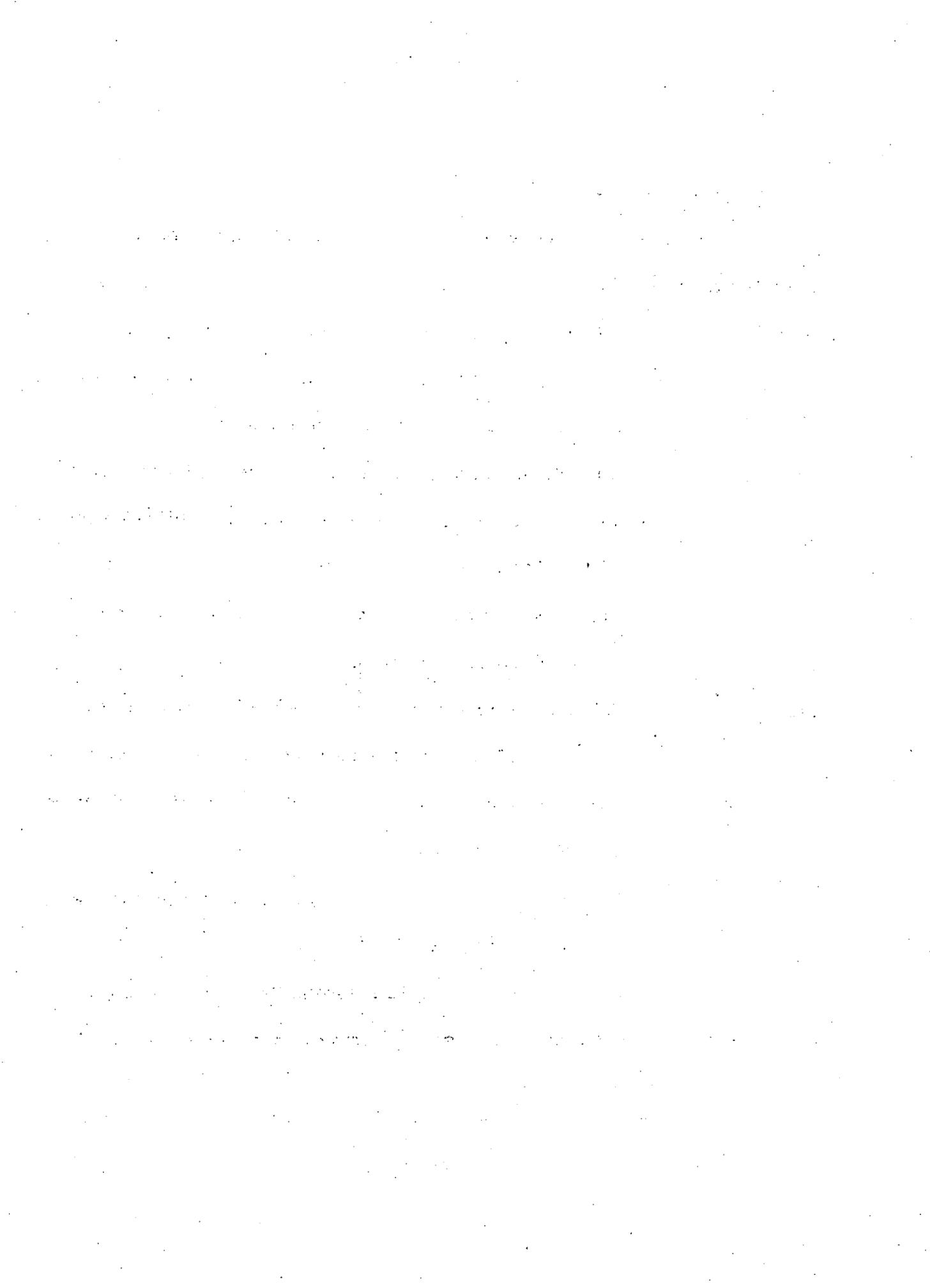
selección de los eventos de diseño.

La clasificación para las presas pequeñas ( tabla 6.4 ) corresponde a los siguientes tres grupos

- Clase ( a )            Estructura localizada en áreas rurales o agrícolas cu  
ya falla puede dañar rancherías, tierras dedicadas a  
la agricultura, caminos secundarios.
- Clase ( b )            Estructuras localizadas en áreas predominantemente  
rurales o agrícolas cuya falla pueda causar daños ais  
lando áreas habitables, caminos principales o vías de  
ferrocarril, o causar interrupción del uso de servi--  
cios de importancia pública.
- Clase ( c )            Estructuras localizadas donde su falla pueda causar -  
pérdidas definitivas, serios daños a zonas habitacio-  
nales , industriales y comerciales, servicios públicos,  
caminos ó ferrocarriles.

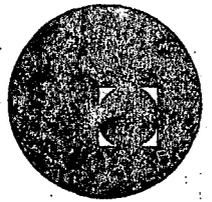
-            Para la continuación de estas notas ver incisos 8.5 a  
8.8 del artículo;

R. Springall G "Análisis estadístico y probalístico de  
datos hidrológicos" Facultad de Ingeniería, UNAM, -  
Cap. 8 ( 1975 )





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

---

MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA  
PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO

ING. CESAR HERRERA TOLEDO

AGOSTO, 1978



# MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO.

## INTRODUCCION

Entre los problemas que se le presentan al Hidrólogo con frecuencia destacan: estimar volúmenes de escurrimiento en sitios donde no hay estaciones de medición, o bien, extender registros de escurrimiento en estaciones con datos correspondientes a un periodo corto. La información de volúmenes de escurrimiento es necesaria para una serie de aplicaciones, como son: determinar el volumen de almacenamiento de una presa, definir la capacidad de un canal, definir la capacidad de un vertedor o definir la elevación de bordos de contención. Los usos de la información se multiplican si se considera a la vez aspectos de calidad del agua en adición a los volúmenes.

En este capítulo se describen algunos métodos que relacionan la precipitación con el escurrimiento. La importancia de los métodos reside en el hecho de que generalmente se dispone de datos de precipitación y no de escurrimiento; de manera que a través de estas relaciones es posible obtener los volúmenes de escurrimiento. Se hace referencia a métodos empíricos inicialmente, que solo requieren de datos de precipitación y características fisiográficas; posteriormente se describen métodos apoyados en precipitación y escurrimiento, y finalmente un modelo de simulación que pretende reproducir los elementos del ciclo hidrológico en la fase correspondiente a los procesos en tierra y canales.

## 2. Método Racional

La fórmula racional es una fórmula empírica que ha tenido amplia aceptación debido a que puede ser aplicada en forma muy simple.

Propuesta por Mulvaney en 1851 la fórmula racional puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q=CIA$$

donde

Q= descarga de pico

C= coeficiente de escurrimiento que depende de las características del área drenada

I= intensidad de lluvia

A= área de drenaje

El coeficiente de escurrimiento pretende tomar en cuenta las características de la superficie drenada, como son el tipo de suelo en áreas de drenaje natural, o tipos de construcciones y de revestimientos en áreas urbanas.

La intensidad de lluvia, corresponde a una lluvia con duración igual al periodo de concentración del escurrimiento en el sitio de interés ; es decir, al tiempo que tarda, el escurrimiento generado en el sitio más alejado de la descarga, en llegar al sitio de estudio.

La fórmula racional permite obtener el gasto máximo , por lo que a pesar de su simplicidad , su empleo está limitado a cuencas pequeñas o bien a problemas de drenaje urbano, donde no es necesario

conocer la forma del hidrograma.

Viessman <sup>1/</sup> presenta dos aplicaciones interesantes de la fórmula racional: una para calcular el drenaje en aeropuertos y otra para un área urbana.

Para el caso de un aeropuerto, el tiempo de concentración está definido por la expresión

$$T = \frac{1.8 (1.1 - C) \sqrt{D}}{\sqrt[3]{S}}$$

donde C= coeficiente de escurrimiento

D= distancia al punto más alejado de la descarga

S= pendiente del terreno

En la fig. 1 se reproduce una gráfica que permite realizar el cálculo directamente.

Conocido el tiempo de concentración, y con datos de precipitación, expresados en una curva de intensidad - duración - frecuencia, se calcula la intensidad correspondiente a esa duración. El valor del coeficiente de escurrimiento varía entre 0.90 para áreas pavimentadas y 0.30 para áreas naturales.

Reunidos esos elementos, la aplicación de la fórmula racional es inmediata.

---

<sup>1/</sup> referencia 1

En el caso de drenaje urbano, el cálculo del tiempo de concentración es más complicado. Generalmente se supone que el ciclo tiempo está compuesto por el tiempo que tarda en llegar el agua a la alcantarilla más cercana y el tiempo que transcurre mientras viaja el agua por la alcantarilla, hasta llegar al sitio de estudio (o al colector principal). La primera parte se calcula con apoyo en curvas como las de la fig. 1.1 aunque también depende del criterio del calculista; el tiempo en la alcantarilla, se calcula bajo la hipótesis de que la conducción está llena, es decir como conducto a presión, empleando hemogramas.

El coeficiente de escurrimiento parece drenaje urbano puede seleccionarse de la tabla 1.1 Los datos de precipitación conviene tenerlos en forma de curvas intensidad duración frecuencia. De esa manera, la aplicación de la fórmula es también inmediata.

El método racional debe ser usado con reservas debido a la generosidad de su alcance y al hecho de que los coeficientes de escurrimiento se han determinado en áreas particulares, por lo que su aplicación en otras zonas requiere de una calibración de los coeficientes.

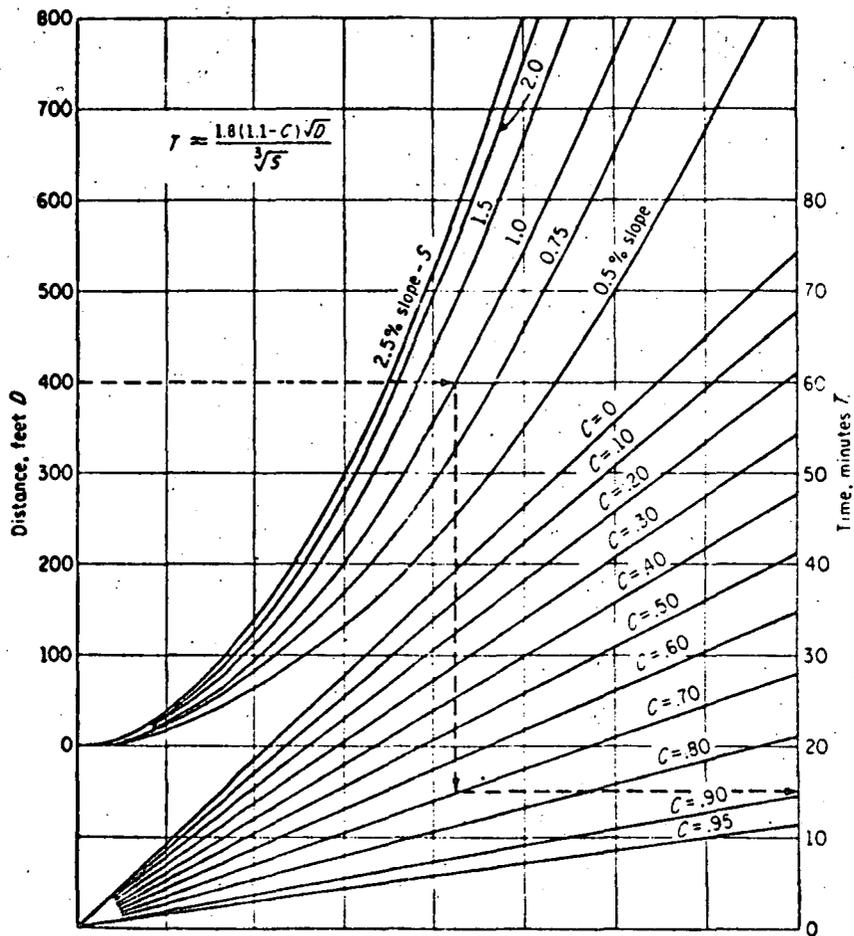


Fig.1.1 Curvas de tiempo de concentración. (Ref.1)

**Tabla.1. Valores típicos C para periodos de retorno de 5-10 años. (Ref.1)**

Description of area	Runoff coefficients
<b>Business</b>	
Downtown areas	0.70-0.95
Neighborhood areas	0.50-0.70
<b>Residential</b>	
Single-family areas	0.30-0.50
Multiunits, detached	0.40-0.60
Multiunits, attached	0.60-0.75
Residential (suburban)	0.25-0.40
Apartment dwelling areas	0.50-0.70
<b>Industrial</b>	
Light areas	0.50-0.80
Heavy areas	0.60-0.90
Parks, cemeteries	0.10-0.25
Playgrounds	0.20-0.35
Railroad yard areas	0.20-0.40
Unimproved areas	0.10-0.30
<b>Streets</b>	
Asphaltic	0.70-0.95
Concrete	0.80-0.95
Brick	0.70-0.85
Drives and walks	0.75-0.85
Roofs	0.75-0.95
<b>Lawns; Sandy Soil:</b>	
Flat, 2%	0.05-0.10
Average, 2 to 7%	0.10-0.15
Steep, 7%	0.15-0.20
<b>Lawns; Heavy Soil:</b>	
Flat, 2%	0.13-0.17
Average, 2 to 7%	0.18-0.22
Steep, 7%	0.25-0.35

### 3. Métodos de Chow y de I-Pai Wu.

Los métodos de Chow e I-Pai Wu representan un avance en la determinación de gastos máximos y forma del hidrograma. El método de Chow está basado en el concepto de hidrograma unitario e hidrograma unitario sintético; permite calcular el gasto de pico y toma en cuenta factores que afectan directamente la cantidad de lluvia en exceso, o de escurrimiento. El método de I-Pai-Wu define la forma del hidrograma además del gasto máximo. Está basado en un modelo lineal para obtener hidrogramas unitarios instantáneos. Los dos modelos han sido descritos ampliamente por Springall<sup>1/</sup> por lo que a continuación se reproduce el documento correspondiente elaborado por ese autor.

---

<sup>1/</sup> referencia 2

### 3. Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario se define como el hidrograma producido por un centímetro de lluvia en exceso (escurrimiento directo), generado por una lluvia distribuida uniformemente, con intensidad uniforme, dentro de un periodo específico.

El hidrograma unitario constituye una herramienta de gran utilidad en hidrología puesto que puede verse como un impulso unitario en un sistema lineal, de manera que se le aplica el principio de superposición.

Con objeto de facilitar la descripción del método, se presenta inicialmente una revisión breve de las componentes de un hidrograma.

#### A. Componentes del hidrograma.

Un hidrograma está formado por cuatro partes: 1) escurrimiento superficial directo; 2) interflujo, 3) flujo base o flujo subterráneo y 4) precipitación sobre el canal. En la figura 3.1 se ilustra esa composición. Se distinguen además tres zonas: una ascendente, otra denominada cresta y una última denominada recesión (Fig. 3.2)

Especial importancia para el análisis de hidrogramas unitarios reviste la componente de flujo o escurrimiento base, ya que por definición del hidrograma unitario, se refiere al escurrimiento directo. Linsley <sup>1/</sup> menciona que debido a que no existe una base real para distinguir

---

<sup>1/</sup> referencia 5.

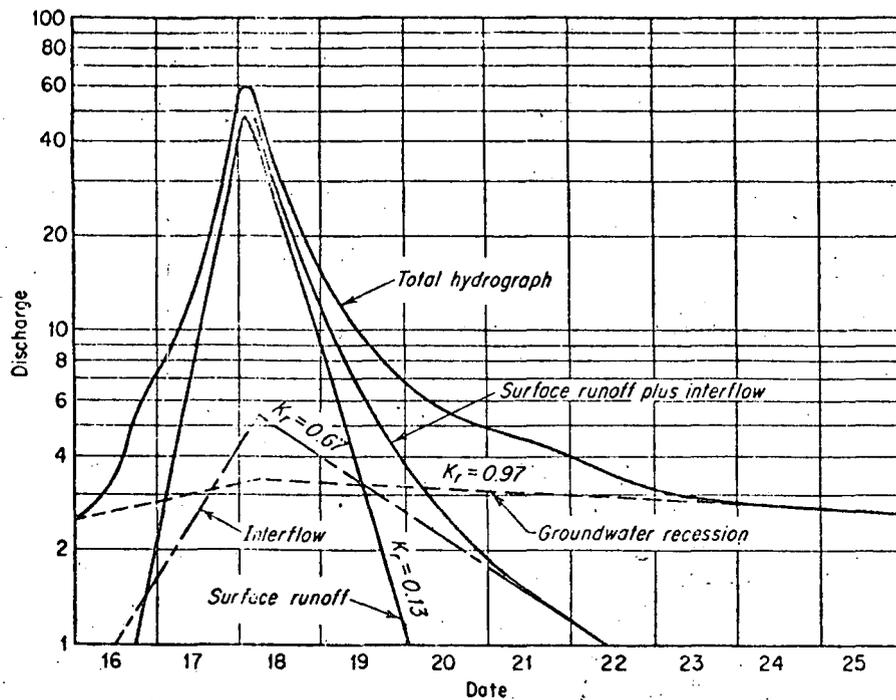


Fig. 3.1 Gráfica semilogarítmica de un hidrograma, mostrando el método de recesión de análisis.

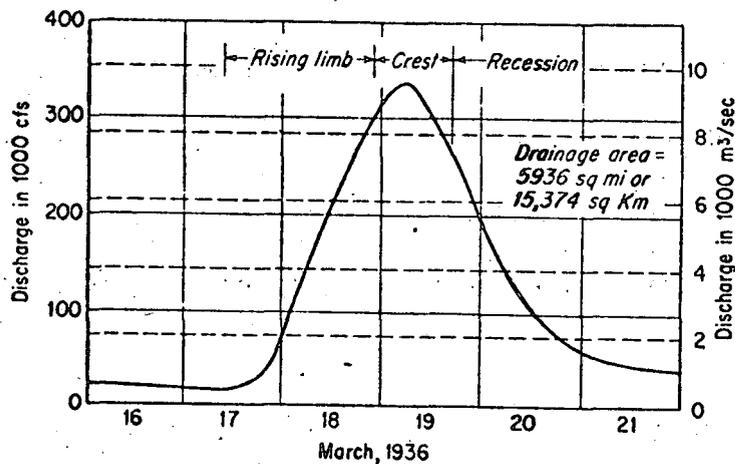


Fig. 3.2 Un hidrograma típico (Río Potomac en Shepherdstown, Virginia del Oeste).

el escurrimiento superficial del escurrimiento base, y dado que la definición de las dos componentes es arbitraria, los métodos de separación son también arbitrarios. Presenta ese autor tres procedimientos para separación que se describen en seguida.

- i) El escurrimiento directo termina N días después que ocurre el gasto máximo. El tiempo se calcula con la expresión (en días)

$$N = 0.8 A^{0.2}$$

donde A es el área de drenaje de la cuenca en kilómetros cuadrados.

- ii) El método más ampliamente utilizado consiste en extender la recesión que existía antes de la tormenta a un punto bajo el pico del hidrograma, y a partir de ese punto se traza una línea recta que lo una con el punto del hidrograma correspondiente al día N. (ver fig. 3.3, línea ABC).
- iii) Este método consiste en proyectar la línea de recesión a un punto debajo del de inflexión del limbo descendente. A continuación se traza un limbo ascendente desde el punto de inicio de subida del hidrograma, hasta conectar con la línea de recesión proyectada.

En la fig. 3.3, la línea ADE se obtuvo de esta manera.

Cualquiera que sea el método, en general se complicará porque los hidrogramas no suelen ser aislados. Para esos casos se dictan recomendaciones en la referencia de Linsley mencionada.

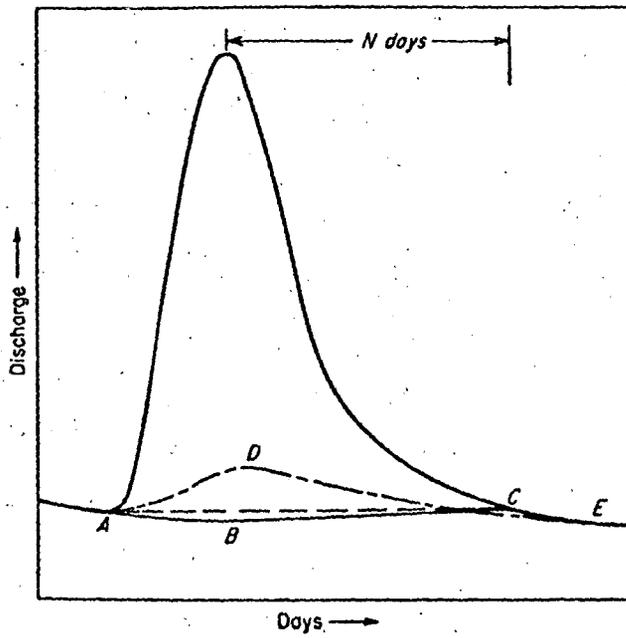


Fig.3.3 Algunos procedimientos simples de separación flujo - base

## B. Determinación del Hidrograma unitario

Para obtener el hidrograma unitario es recomendable contar con varios registros de tormentas para verificar que la lluvia se distribuye uniformemente. Viessman <sup>1/</sup> sugiere para seleccionar las tormentas las siguientes indicaciones

- i) La duración de la tormenta debe ser aproximadamente igual al 10 a 30% del tiempo de ascenso del escurrimiento
- ii) El escurrimiento directo para la tormenta seleccionada debe ser 1 a 5 cm.
- iii) Deben analizarse varias tormentas para obtener un promedio de ordenadas para una duración de hidrograma seleccionada.
- iv) Las ordenadas de escurrimiento directo para cada tormenta deben reducirse para que representen 1 cm. de escurrimiento directo
- v) El hidrograma unitario final para una duración específica se obtiene ajustando las ordenadas para obtener 1 cm de escurrimiento directo.

## C. Hidrogramas unitarios para diferentes duraciones

Al sumar un hidrograma unitario para duración de tormenta  $t$ , a otro igual pero defasado un tiempo  $t$ , el hidrograma resultante es un hidrograma para 2 cm de escurrimiento directo y con duración  $2 t$ .

Al dividir las ordenadas entre 2, el resultado es un hidrograma unitario producido por una tormenta de duración  $2 t$ . (fig. 3.4) Esto no es mas que la aplicación del principio de superposición mencionado

---

<sup>1/</sup> referencia 1

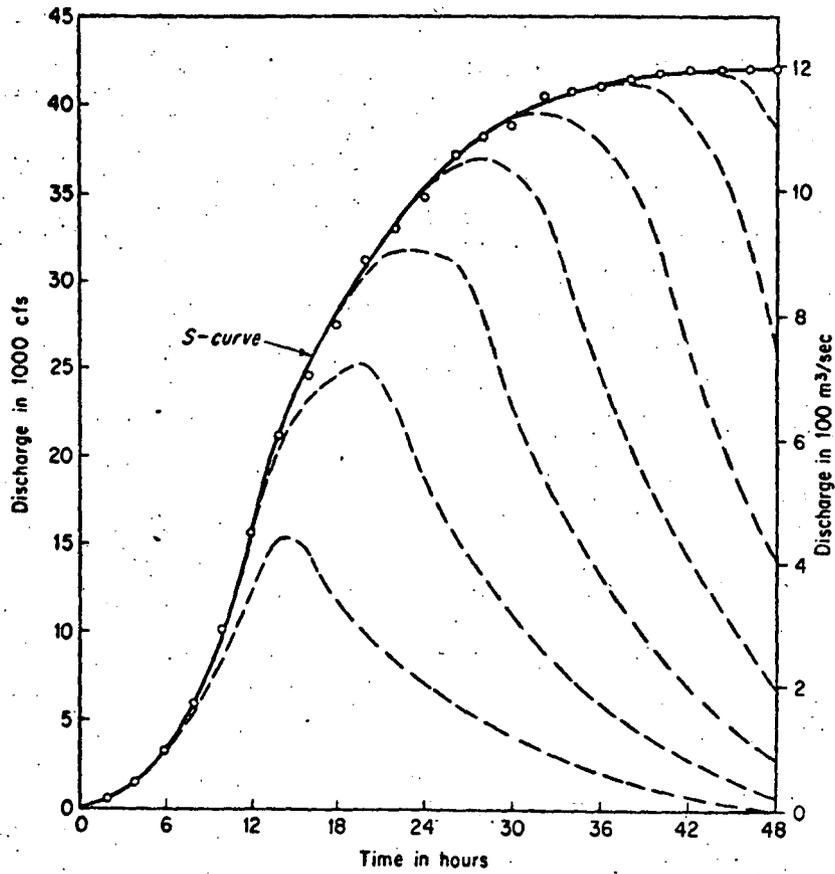


Fig. 3.4 Ilustración grafical de la Curva S.

antes. Si se suma una serie de hidrogramas unitarios, cada uno de-  
fasado un tiempo  $t$ , se obtiene la curva denominada curva S que re-  
presenta la suma de los hidrogramas. A partir de la curva S es  
posible obtener hidrogramas unitarios para duraciones diferentes  
(múltiples de  $t$ ). En la figura 3.5 se muestra esquemáticamente el  
procedimiento.

#### D. Hidrograma Unitario Instantáneo <sup>1/</sup>

Si la duración de la lluvia tiende a cero, el hidrograma unitario  
resultante se le llama hidrograma unitario instantáneo. De esta  
manera, el hidrograma es independiente de la duración de la  
lluvia en exceso.

Si se tiene una lluvia en exceso  $I(z)$ , de duración  $t_0$  y el hidrogra-  
ma unitario instantáneo se expresa como  $u(t-z)$ , la ordenada del  
hidrograma para tiempo  $t$  es:

$$Q(t) = \int_0^{t' \leq t_0} u(t-z) I(z) dz$$

donde la integral se denomina integral de convolución,  $u(t-z)$  es  
una función del núcleo,  $I(z)$  es la función de entrada y  $t'=t$  cuando  
 $t \leq t_0$  y  $t' = t_0$  cuando  $t > t_0$  Fig. 3.6

Para resolver la ecuación integral se utilizan diversos métodos,  
como transformarla a un sistema de ecuaciones lineales considerando  
incrementos finitos de tiempo.

---

<sup>1/</sup> ref. 6

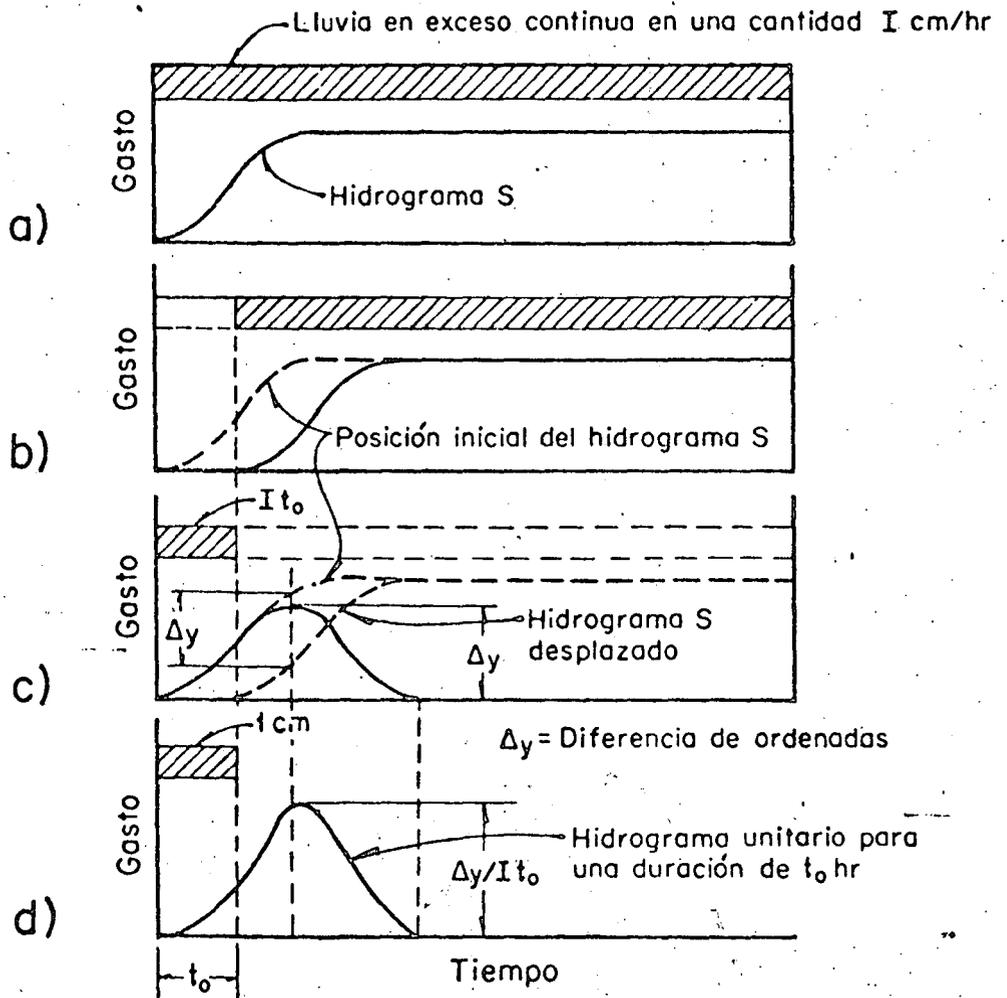
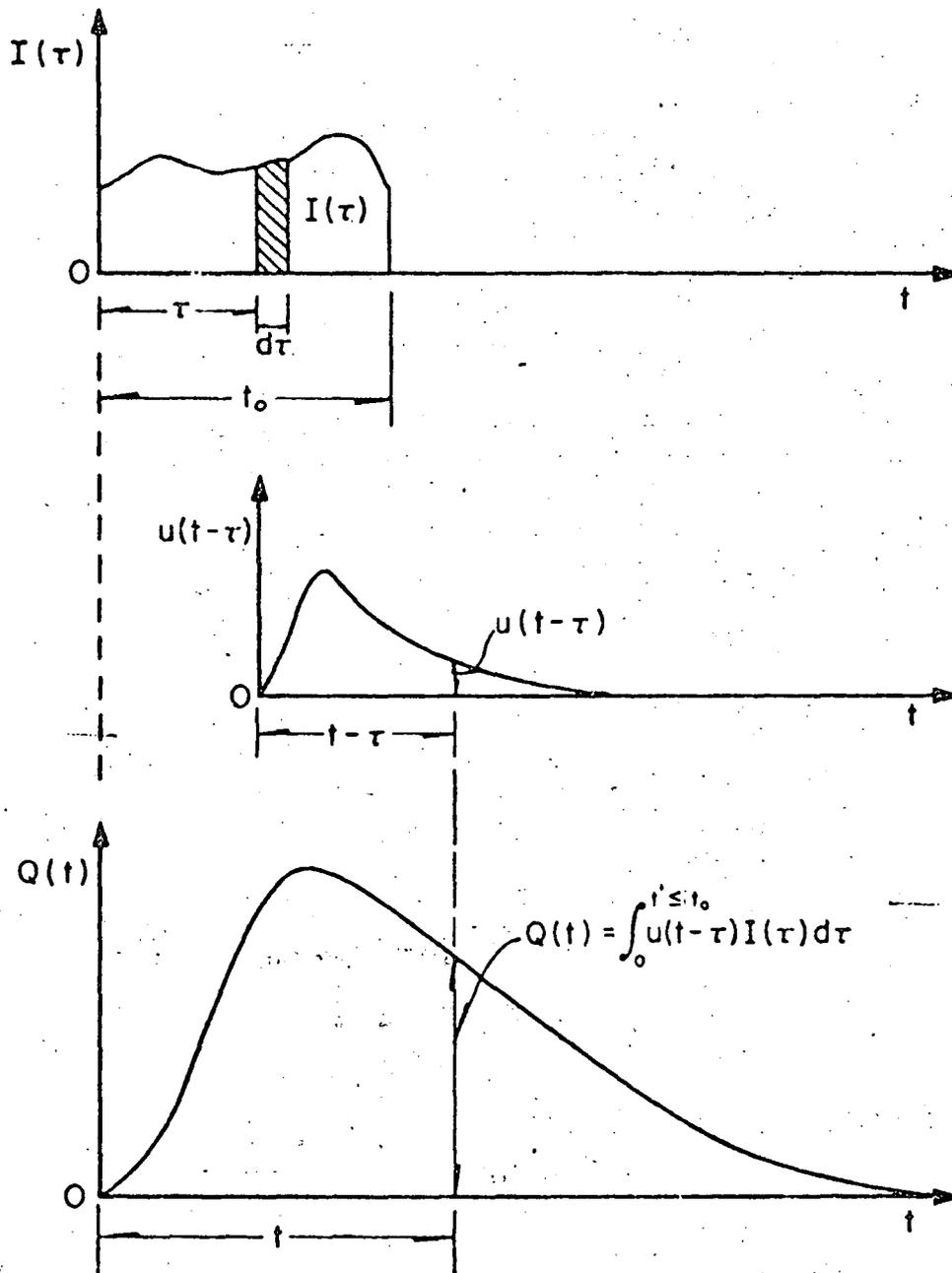


Fig. 3.5. Deducción de un hidrograma unitario por medio del método del hidrograma S



3.6 Relación de  $I(\tau)$  y el hidrograma unitario instantáneo

#### 4. Métodos de Simulación. El Modelo de Stanford.

El Modelo de Stanford fue el primer modelo de simulación hidrológica; apareció por primera vez en 1960 y desde entonces ha sido modificado en diversas ocasiones hasta llegar a la versión SWM IV, a la cual se hará referencia en los siguientes párrafos.

La información que requiere el modelo es de suma importancia por lo que se hace referencia en primer lugar al manejo de los datos, tanto climatológicos, como físicos de la cuenca.

La descripción del modelo se inicia haciendo referencia al ciclo hidrológico en el sentido físico, para relacionar posteriormente las funciones del modelo a éste:

##### A. Manejo de datos para simulación

Los datos de entrada para el modelo son de tres tipos: parámetros hidrometeorológicos; b) parámetros de proceso y; c) parámetros físicos. Los primeros son básicamente precipitación y evaporación; a los segundos corresponde la información sobre el orden de magnitud de los procesos que afectan el movimiento y la distribución del agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico. La información del tercer grupo representa las características físicas de la cuenca que pueden ser expresadas en términos geométricos. En la tabla 4.1 se muestran diferentes parámetros que corresponden a los tres tipos mencionados.

Tabla.4.) Clasificación de datos para modelos determinísticos.  
(Ref.4)

. DATA CLASSIFICATION

HYDROMETEOROLOGIC PARAMETERS	PROCESS PARAMETERS	PHYSICAL PARAMETERS
<b>PRECIPITATION</b> snow, rain, hail, dew <b>EVAPORATION</b>	<b>Interception Storage</b> <b>MOISTURE STORAGE</b> Surface and lower zones	<u>LAND SURFACE</u> ELEVATION AREA ZONES OVERLAND FLOW LENGTH GEOLOGIC TYPE VEGETATION COVER (AREAS) SOIL TYPE AND SIZE CLASSIFICATION LAND-USE TYPES LAND FORMATION CLASSIFICATION IMPERVIOUS AREAS
<b>RADIATION</b> short and long wave <b>TEMPERATURE</b> air, water and earth <b>WIND SPEED AND DIRECTION</b> <b>HUMIDITY, VAPOR PRESSURE</b> <b>CLOUD</b>	<b>INFILTRATION</b> <b>INTERFLOW</b> <b>TRANSPIRATION</b>	<u>NATURAL CHANNEL NETWORK</u> CONTRIBUTING AREA LENGTH, SLOPE, CROSS-SECTION AND ROUGHNESS OF CHANNEL
<b>RIVER STAGE</b> <b>STREAMFLOW VOLUME AND VELOCITY</b> <b>GROUNDWATER LEVEL</b> <b>DIVERSIONS</b>	<b>CONSUMPTIVE WATER USED BY VEGETATION</b>	<u>URBAN CHANNEL NETWORK</u> LENGTH, SLOPE, DRAINAGE AREA CULVERT DIAMETER ROUGHNESS
<b>TIDE</b> <b>SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION</b> <b>BED SEDIMENT LOAD</b>	<b>OVERLAND FLOW ROUGHNESS</b> <b>TIME DELAY HISTOGRAMS</b> <b>UNIT HYDROGRAPH RESPONSE</b> <b>MUSKINGHAM COEFFICIENTS</b> <b>RECESSION RATES</b> interflow, groundwater	<b>RESERVOIRS</b> CONTRIBUTING AREA MAXIMUM ELEVATION AND STORAGE MINIMUM ELEVATION AND STORAGE SPILLWAY CREST
	<b>GROUNDWATER FLOW</b> <b>INACTIVE GROUNDWATER</b>	<b>AREA-ELEVATION-CAPACITY-DISCHARGE</b> relationship OPERATING RULES
	<b>SNOWMELT PARAMETERS</b> melt rates due to radiation, condensation convection, ground <b>SNOW DENSITY</b>	
	<b>SNOW PACK WATER CONTENT</b> maximum volume equivalent <b>EROSION RATE PARAMETERS</b>	

19

i) Parámetros hidrometeorológicos

Se hace referencia solamente a los parámetros de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento, indicadores en la tabla 5.1

La precipitación es el dato más importante para el modelo de simulación. Dentro de este concepto se incluye agua, nieve y rocío. Para los fines de este escrito, se utiliza solamente lluvia. La precipitación presenta variaciones temporal y espacial. Existen instrumentos que permiten registrar la variación temporal en un punto; generalmente se trata de estimar la variación espacial usando los datos de estaciones de medición en diferentes sitios. Para esto último pueden usarse los siguientes métodos: media aritmética, polígonos de Thiessen y método de isoyetas.

La evapotranspiración se define como la transferencia de agua del estado líquido al estado gaseoso. Para fines del modelo de Stanford, se requiere conocer la evapotranspiración potencial; esta se define como la máxima rapidez con que se lleva a cabo la transferencia de agua, si se supone una fuente de abastecimiento limitada. Se mide, observando la pérdida de agua de una superficie de agua, generalmente de un evaporómetro

Los registros de escurrimiento representan una medida de la respuesta de una cuenca a las variaciones temporales y a los procesos hidrológicos internos. Estos registros son de parti-

cular importancia para el modelo de simulación pues se usan durante la calibración para verificar la reproducción de los procesos del ciclo. Existen diversos métodos para medir el escurrimiento; el más común consiste en medir la velocidad del agua en distintos tramos de una sección transversal e integrarlos para obtener un valor medio.

La importancia de la información es evidente para el modelo de simulación, puesto que la respuesta dependerá de su veracidad. Es por ello necesario contar con aplicar este tipo de metodología.

## ii) Parámetros Físicos

Los parámetros físicos se requieren para definir las características de retención y repulsión del agua en una cuenca; pueden ser agrupados en:

- a) superficie del terreno
- b) red de canales de drenaje natural
- c) red de canales de drenaje urbano
- d) almacenamiento
- Superficie del terreno

En relación a los parámetros de superficie existen dos enfoques: uno que divide la superficie en áreas regulares (retícula) para proceder a cálculos por elemento ; el otro, que emplea el Modelo de Stanford se denomina sistemas de parámetros globales

y considera cada unidad de una cuenca (segmento) como un área homogénea con características uniformes. Las características físicas del escurrimiento superficial se representan por una serie de almacenamientos lineales o como escurrimiento en planos, con pendiente media, longitud media, etc. También se le representa como un conjunto de unidades cada una con características uniformes. Estos tipos de enfoque se ilustran en la fig. 4.1

La mayoría de los modelos determinísticos tiende a favorecer el empleo de los modelos de parámetros globales; el de Stanford entre ellos.

Para representar adecuadamente las condiciones físicas del terreno, deben considerarse los procesos que componen el ciclo hidrológico y las condiciones físicas que afectan dichos procesos. Así, los primeros son: escurrimiento superficial y detención, infiltración, evapotranspiración, intercepción, área impermeable y escurrimiento. Las condiciones físicas son: área, elevación, pendiente, longitud de escurrimiento superficial, cubierta vegetal y densidad, tipo de suelo, geología y uso del suelo. El Modelo de Stanford define la forma en que cada una de estas condiciones define la forma en que cada una de estas condiciones entra como

Data Management for Simulation—The Occurrence

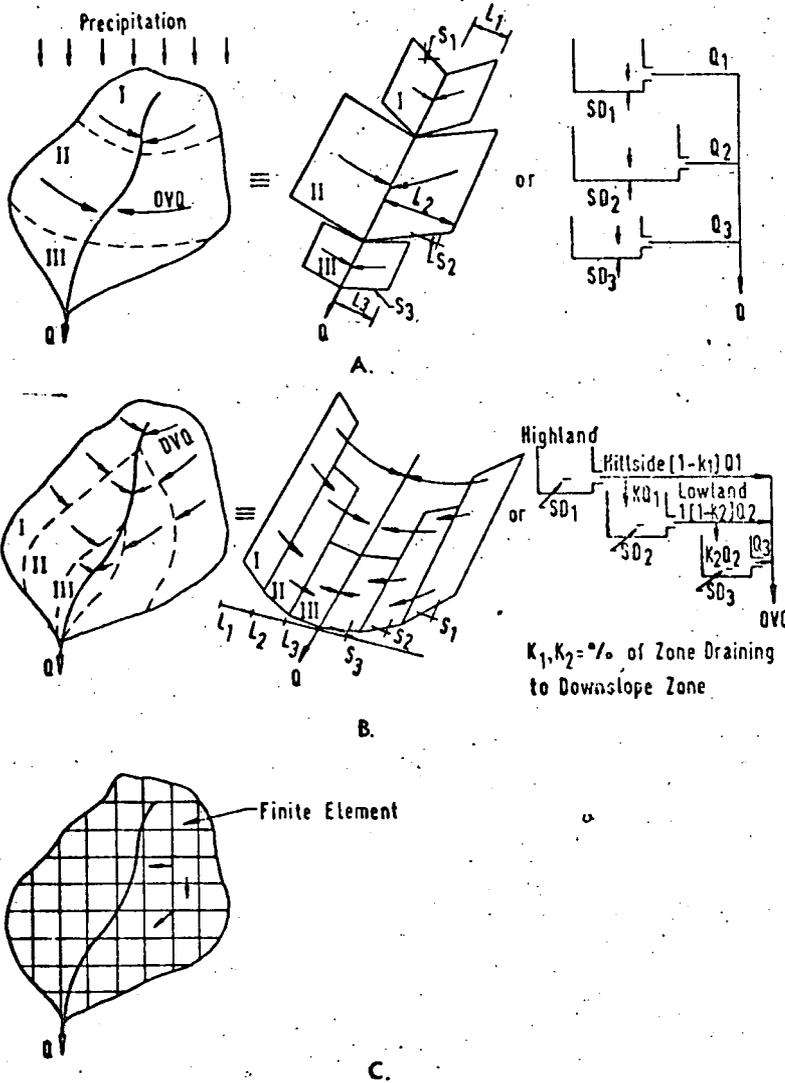


Fig.4.1 Area de representación de una cuenca (A) y (B) Parámetro de sistemas global;(C) Sistema distribuido.

23  
dato para la simulación.

- Red de canales de drenaje natural.

El escurrimiento superficial de una cuenca entra a la red de canales. La contribución a los canales varía dependiendo de las características del terreno y de la tormenta. Los primeros se han mencionado con anterioridad.

El sistema de canales actúa como un almacenamiento largo y angosto; recibe agua superficial y subsuperficial, la almacena temporalmente en los canales y la descarga finalmente. El sistema de canales tiene pendientes variables y secciones transversales diferentes, recibe agua en forma acuática, por lo que tanto el escurrimiento como el almacenamiento en el canal varían a lo largo del sistema.

El sistema de canales puede dividirse en una serie de tramos y para cada uno se determinan secciones transversales, pendiente, área tributaria, almacenamiento en áreas planas y rugosidad, esto mediante mapas, fotografías y recorridos de campo.

La división por tramos requiere de un proceso cuidadoso. Considerese una cuenca a la que se tiene que dividir por segmento.

Primero se divide la cuenca en segmentos de terreno, cuyas fronteras pueden ser poligonos de Thiessen, isoyetas o división topológicas, y que representan áreas con precipitación "sensiblemente" uniforme. A continuación, dividase la cuenca en segmentos

representan áreas del terreno con suelos uniformes o cobertura vegetal uniforme, etc.

La superposición de los mapas así formados define posibles segmentos que pueden ser usados en el modelo.

El sistema de canales se divide en tramos definiendo "puntos de flujo" (flow points), sobre el río en varios lugares. Estos puntos definen tramos y son los sitios que pueden obtenerse hidrogramas. Cada tramo deberá asignarse a un solo segmento.

#### - Redes de canales de Drenaje Urbano

Difiere de la red de canales de drenaje natural en dos aspectos. Primeramente, drenar áreas tributarias compuestas de superficies permeables e impermeables, pero con mayor proporción de estas últimas; en segundo lugar, el sistema de conducción puede estar formado por una combinación de conductos creados y abiertos.

La simulación de áreas urbanas por tanto debe contemplar la respuesta de las áreas impermeables directamente conectadas y la respuesta de áreas permeables con su escurrimiento subsuperficial asociado. Para esto, debe medirse el área de superficies impermeables, así como la red de drenaje definida por tramos, especificando longitud, pendiente, rugosidad y sección transversal.

## - Almacenamientos

En la simulación es importante conocer las características fijas de un almacenamiento, como son la relación volumen - elevación área-elevación y elevación-descarga. Asimismo, importantes son las reglas de operación del almacenamiento, que varían en el tiempo. Toda la información debe conocerse para simular sistemas de canales que contienen almacenamientos.

### iii) Parámetros de Proceso

Al considerar el ciclo hidrológico como un proceso determinista, se supone que las relaciones entre muchos factores que interactúan. Los valores numéricos empleados para cuantificar los factores que afectan la distribución y movimiento del agua se denominan parámetros. Estos parámetros incluyen infiltración, almacenamiento de humedad del suelo, percolación y flujo subterráneo.

Para entender la función de los parámetros de proceso, supóngase una cuenca y un parámetro físico, como la longitud de un tramo de canal, constante en un periodo determinado. La entrada y salida de agua a la cuenca puede definirse mediante la medición de parámetros hidrometeorológicos. La respuesta de la cuenca varía durante el periodo debido a las relaciones cambiantes y a los valores de los parámetros. La evaluación de los parámetros de proceso que reproducen la respuesta de la cuenca es el objetivo de la calibración del modelo.

En un modelo conceptual, como es el de Stanford, los parámetros de proceso se determinan combinando mediciones directas y evaluaciones indirectas durante la etapa de calibración. Esta diferencia surge por la dificultad que presenta la medición directa de todos los procesos en campo.

Finalmente, es importante que el número de parámetros de proceso que se evalúan por calibración sea mínimo puesto que el grado de dificultad para calibrar está en razón directa del número de parámetros.

B. El Ciclo Hidrológico.

El ciclo se visualiza considerando que se inicia en la evaporación de agua de los océanos (Fig. 4.2). El vapor resultante es transportado por masas de aire en movimiento. Bajo condiciones adecuadas, el vapor se condensa para formar nubes que se convierten en precipitación posteriormente. La precipitación que llega a la superficie de la tierra se dispersa de diversas maneras la mayor parte es retenida temporalmente en el suelo, cerca del lugar en donde cae, y regresa a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Una parte del agua se dirige hacia los cauces, sobre y a través de la capa superficial para convertirse en almacenamiento subterráneo. Bajo la influencia de la gravedad, tanto el agua superficial como la subterránea se mueven

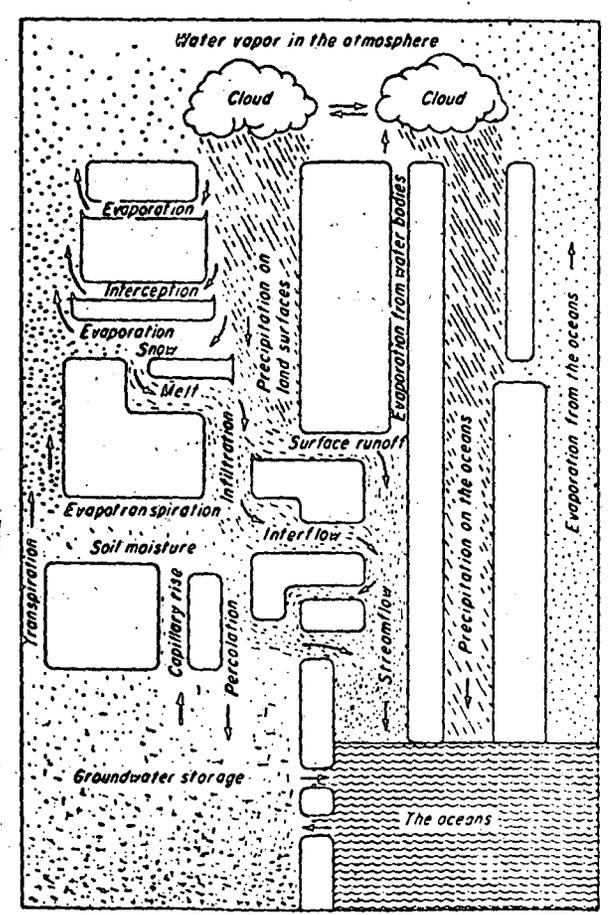
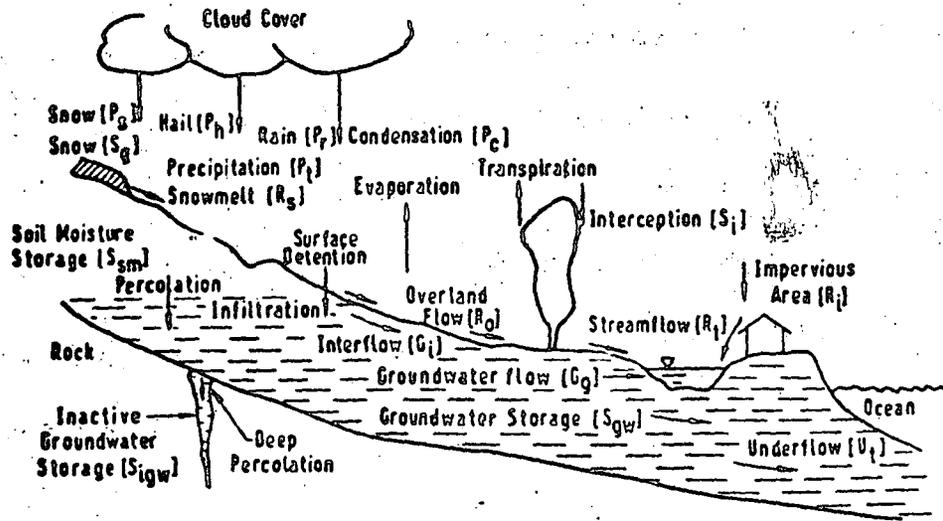


Fig.4.2 Representación del ciclo hidrológico.  
 (Refs.4 y 5)

hacia menores elevaciones y eventualmente pueden descargar al océano. Una parte del agua superficial y subterránea regresan a la atmósfera por evaporación directa.

El ciclo hidrológico es un medio conveniente de delinear en forma aproximada el alcance de la hidrología como la porción entre la precipitación sobre la tierra y el regreso de esa agua a la atmósfera o al océano.

El movimiento del agua en las varias fases del ciclo hidrológico es errático tanto en tiempo como en área.

La variación temporal es relativamente fácil de seguir si se usan intervalos de tiempo suficientemente cortos para el análisis; la variación espacial, en cambio, es compleja. Para salvar este problema se divide el área de la cuenca en varias subcuencas o segmentos pero, esto da lugar a un aumento notable en el tiempo de computación. El modelo de Stanford se utiliza en cuencas divididas por segmentos como se describirá mas adelante.

## Descripción del Modelo de Stanford.

Apoyados en la lámina 43, se describen brevemente las principales funciones del modelo a continuación:

- a) Ajuste de la Precipitación. Se utiliza un factor  $K_1$  que ajusta la precipitación medida en la estación de cada segmento a la precipitación media del mismo.
- b) Intercepción. Se define como el proceso por el cual la precipitación es retenida en hojas, ramas y tallos de la vegetación, así como los desechos vegetales que cubren el suelo. Desde ahí es evaporada sin incrementar el almacenamiento de humedad del suelo.

La pérdida por intercepción es simulada con un parámetro  $EP_{XM}$ , que representa el volumen máximo de almacenamiento de intercepción en el segmento, expresado en milímetros. La capacidad de almacenamiento de intercepción generalmente es reducida, de 2 a 3 mm, por lo que su influencia en tormentas importantes es muy reducida, sin embargo en el balance anual puede ser de consideración.

- c) Esguerrimiento en áreas impermeables. El área impermeable se define como la superficie del terreno con capacidad de infiltración nula. Se distinguen dos tipos de áreas: aquellas que están conectadas directamente y aquellas que lo están indirectamente. A las primeras corresponden áreas que están en la vecindad del sistema de canales y las segundas, son áreas que drenan a superficies donde la capacidad de infiltración es mayor que cero.

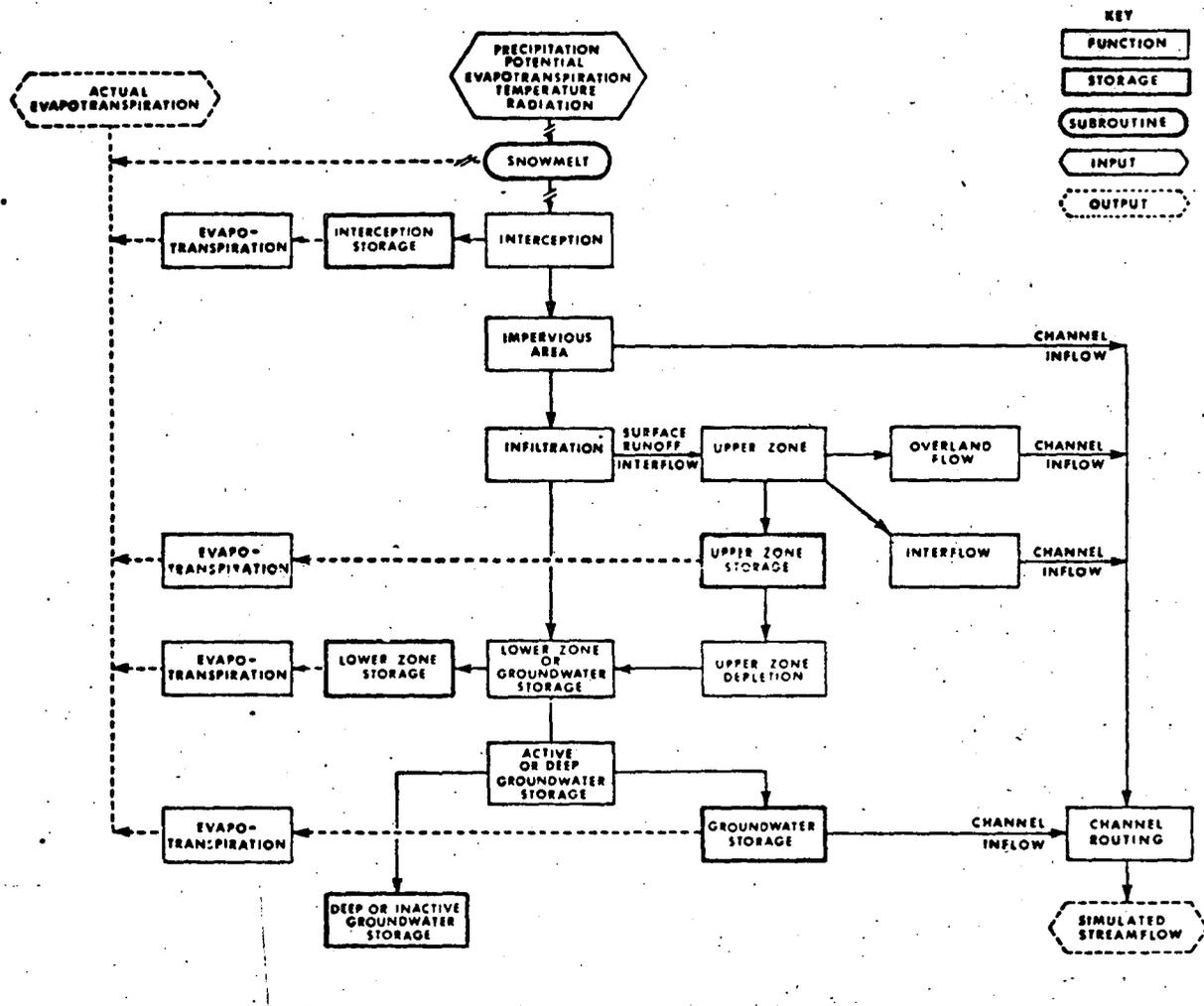


Fig.4.3 Diagrama de flujo para el modelo de Simulación de Stanford. (Ref.3)

El factor de área impermeable A representa el porcentaje de dicha área. El área que se asigne al factor A debe ser precisamente la que esté directamente conectada al sistema de canales. En general, una cuenca tiene del orden del 3% de área impermeable, por lo que este parámetro es poco significativo en el caso de avenidas.

En el modelo, parte del volumen que se precipita sobre el área impermeable (descontando el volumen de intercepción), pasa a ser aportación a los canales.

d) Infiltración.- Se define como el movimiento de agua hacia el perfil del suelo, a través de la superficie del suelo. La rapidez de infiltración es la rapidez con la que el agua entra al perfil del suelo por unidad de tiempo. Cuando el suministro de humedad a la superficie del suelo (precipitación), supera la rapidez de infiltración, entonces esta infiltración es la máxima que ocurre y se le denomina "capacidad de infiltración". Esta capacidad varía en el tiempo debido a cambios en la humedad del suelo y a las características del suelo.

Crawford y Linsley desarrollaron una función de infiltración que es usada en el modelo de Stanford y pretende satisfacer dos criterios:

- a) representar la rapidez de infiltración media continuamente
- y
- b) representar la variación espacial de la infiltración.

La expresión propuesta es:

$$f_t = \frac{INF}{(LZS_{t-1}/LZSN)^b}$$

donde:

$\bar{f}_t$  : capacidad de infiltración media, sobre el segmento,,  
en el instante t.

INF : parámetro que representa un índice de nivel de in-  
filtración, relacionado físicamente a las caracter-  
rísticas de la cuenca.

LZS<sub>t-1</sub> : valor real del almacenamiento de humedad del suelo,  
al tiempo t-1.

LZSN: valor nominal del almacenamiento de humedad del sue-  
lo en la zona baja, equivalente a la capacidad de  
campo.

b: exponente.usualmente con valor 2.

INF y LZSN son parámetros fijos en la expresión mencionada.  
Se obtienen al calibrar el modelo.

La condicipon de variación temporal se cumple con la expre-  
sión anterior; para la de variación superficial se requiere  
conocer la distribución de frecuencias de la infiltración en  
el terreno, y su función acumulada correspondiente. Como eso es  
difícil de determinar, se aproxima con una distribución acu-  
mulada lineal (Fig.44). Se observa que de esa manera se toman  
en cuenta áreas con capacidad de infiltración menor que la  
humedad suministrada  $\bar{p}$ . La posición de la línea XY varía con-  
tinuamente y está determinada por el valor de  $\bar{f}$ , calculado con  
la expresión dada anteriormente, que corresponde a la capacidad  
de infiltración media, por lo que se mide al 50% de área. Con

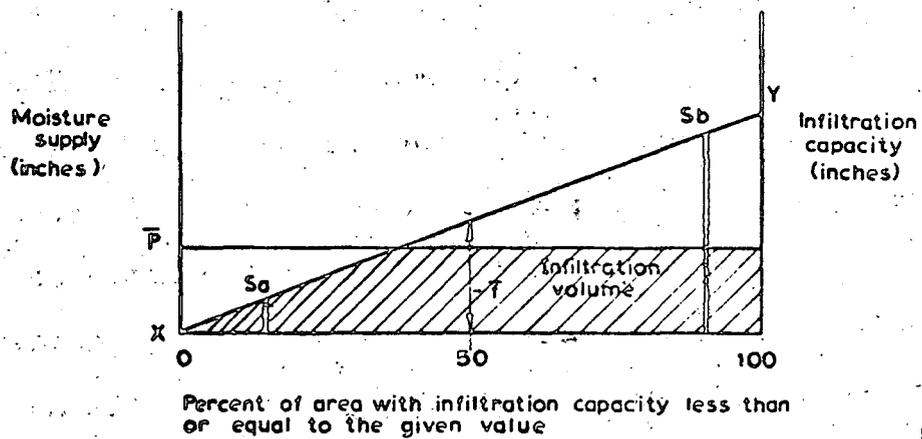


Fig.4.4 Distribución acumulada de frecuencias de la capacidad de infiltración.(Ref.4)

fines ilustrativos obsérvese la Fig.4, donde se muestra una secuencia que corresponde a la ocurrencia sucesiva de distintas alturas de precipitación.

e) Almacenamiento de Humedad del Suelo. Constituye el corazón del modelo de balance. Si la capacidad de almacenamiento se define en términos de una capacidad absoluta que no puede ser excedida, entonces, cuando se excede, ocurre un cambio en las características de escurrimiento del segmento; por esa razón, en el modelo de Stanford la humedad del suelo o almacenamiento de la zona baja se define con una capacidad nominal LZSN. La zona baja representa el almacenamiento en la zona de aereación, desde cerca de la superficie del suelo hasta la parte inferior de la zona de raíces de las plantas del segmento. La humedad contenida en el suelo debajo de esa zona no entra al proceso hidrológico en forma importante; la que se encuentra en la superficie del suelo puede ser removida por evaporación y transpiración. Para ello, se simula una zona superior UZS. La capacidad nominal de esa zona (UZSN) es tratada en forma similar a la zona baja (Fig.4.5)

f) Interflujo.- También conocido como flujo subsuperficial, es el agua que se mueve lateralmente, a través de los estratos superficiales del suelo; depende, en parte, de la geología de la cuenca. Por ejemplo, en el caso de áreas cársticas, donde el suelo limoso da lugar a muchos canales subsuperficiales, la componente de interflujo puede ser importante. En el modelo de Stanford, el volumen de escurrimiento descontando la infiltración, incluye el interflujo y el escurrimiento super-

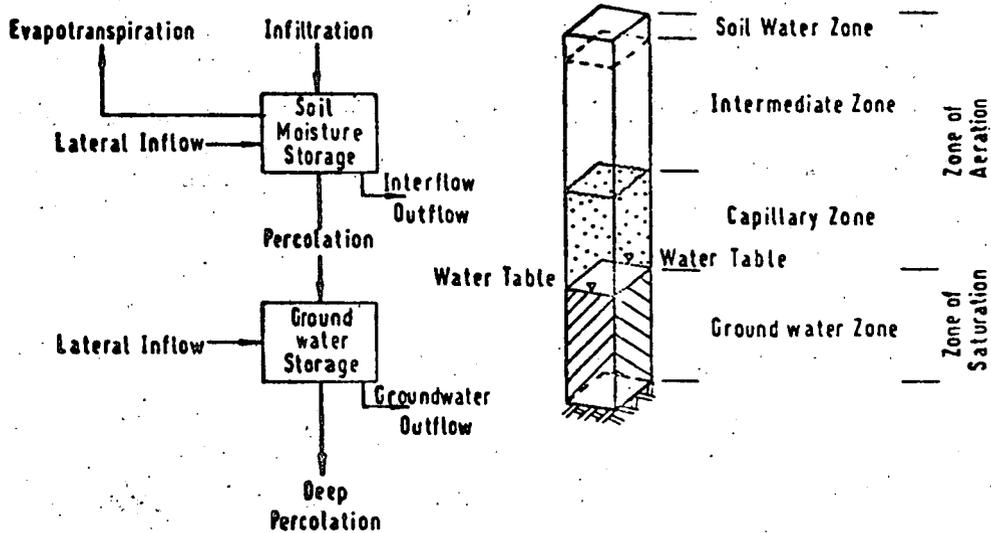


Fig.4.5 Zonas generales de agua subsuperficial. (Ref.4)

ficial. El agua disponible para interflujo está basada en la humedad del suelo y la rapidez de infiltración local. La expresión que rige el proceso es una función del cociente de humedad de la zona baja (LZS/LZSN). Como en el caso de la infiltración, el nivel de la función se ajusta por medio de un parámetro INTERFLOW. Se define una variable C, en adición, que fija la posición de la línea mostrada en la Fig. 4.6

$$C = \text{INTERFLOW} \cdot 2 \left( \frac{\text{LZS}}{\text{LZSN}} \right)$$

Esta línea divide el triángulo de detención superficial en dos porciones: detención del escurrimiento superficial y detención por interflujo.

La salida del volumen de interflujo a la corriente (INTF) se lleva a cabo de acuerdo con la función :

$$\text{INTF} = \alpha \cdot \text{SRGX}$$

donde SRGX es el volumen de agua en el almacenamiento del interflujo. Para el caso particular de incremento de tiempo de una hora, en la simulación, la expresión para  $\alpha$  es:

$$\alpha = (1 - \text{IRC})^{1/24}$$

donde IRC es la rapidez de recesión de interflujo diaria, constante.

- g) Almacenamiento en la zona superior. El volumen de detención definido por el interflujo y el escurrimiento superficial avanzan hacia capas inferiores de suelo; al hacerlo, están sujetos a una detención en la zona superior. La cantidad retenida es una función de UZS/UZSN. La fracción retenida es alta

cuando el cociente es bajo, y es cero cuando el cociente es 3. Esta función representa la infiltración retardada del agua que escurre en los canales.

h) Escurrimiento Superficial. Se define como el movimiento de agua, hacia los canales, que ocurre sobre la superficie del terreno. En términos del modelo, corresponde al escurrimiento superficial aquella parte del volumen detenido que escapa de la zona de almacenamiento superior. El escurrimiento superficial simula el retraso que ocurre al escurrir el agua hacia la red de canales. Permite a la vez infiltración en caso de que supere la capacidad de infiltración. El modelo realiza dos tipos de cálculo: uno es básicamente la ecuación de continuidad que determina la cantidad de agua detenida al final de un incremento de tiempo; el otro está dirigido a simular la infiltración retrasada. La salida del proceso de escurrimiento superficial Q se almacena para transitarlo posteriormente en el canal.

i) Vaciado de la Zona Superior. - El agua retenida temporalmente en la zona superior puede moverse eventualmente hacia la zona inferior por medio del proceso de infiltración. El volumen de percolación depende de los cocientes de los almacenamientos superior e inferior.

$$PERC = 0.003 \text{ INFILTRATION} \cdot UZSN \left( \frac{UZS}{UZSN} - \frac{LZS}{LZSN} \right)^3$$

donde INFILTRATION es el parámetro del nivel de infiltración.

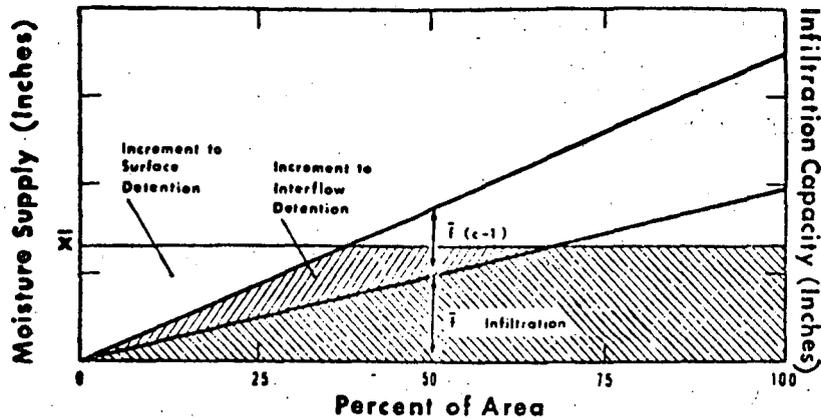


Fig. 4.6 Gráfica de la función que define la posición de la línea de interflujo. (Ref.3)

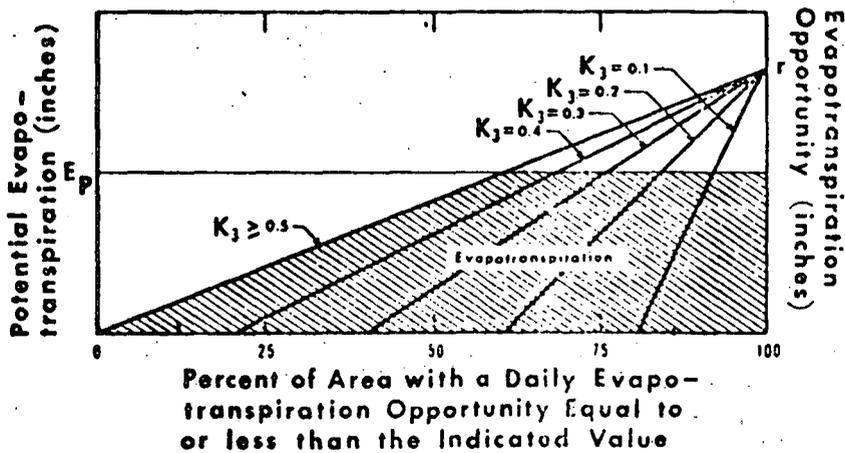


Fig. 4.7 Gráfica que ilustra la variación supuesta en la oportunidad de evapotranspiración en un segmento de cuenca. Se ilustra además el método para calcular la evapotranspiración real. (Ref.3)

j) **Función de la Zona Baja.**- La Zona baja recibe a la infiltración y percolación de la zona superior en cada intervalo y divide ese volumen entre el almacenamiento de la zona baja y el almacenamiento de agua subterránea. Esta es una función del cociente  $LZS/LZSN$ . Cuando el cociente es muy pequeño, prácticamente toda el agua se retiene en la zona baja; cuando el cociente aumenta hasta uno, el volumen se divide entre los dos almacenamientos; con valores del cociente mayores que uno, mayor proporción pasa al almacenamiento de agua subterráneo.

k) **Agua Subterránea.**-El almacenamiento de agua subterránea y flujo subterráneo se refieren a la acumulación de agua en la zona de almacenamiento subterráneo y a su descarga. En algunas cuencas, sucede que parte del agua subterránea pasa a niveles inferiores a los más bajos de la corriente del canal, entrando a la zona de almacenamiento subterráneo inactivo.

El agua que se encuentra en el almacenamiento subterráneo activo contribuye al sistema de canales vaciando el almacenamiento de acuerdo con la relación:

$$GWF = \beta (1 + KV \cdot GWS) \cdot SGW.$$

donde

GWF: incremento de flujo de agua subterránea.

SGW: almacenamiento de agua subterránea.

$\beta$ : una constante de vaciado.

$KV \cdot GWS$ : este producto determina la rapidez de la recesión.

l) **Evapotranspiración.**-Es la pérdida de agua desde el terreno y superficies de agua de una cuenca debido a procesos combi-

nados de evaporación y transpiración.

El modelo de Stanford calcula la evapotranspiración total contabilizando los siguientes componentes:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{intercepción}} + E_{\text{superficies de agua}} + E_{\text{zona superior}} + E_{\text{zona inferior}} + E_{\text{agua subterránea.}}$$

La evapotranspiración simulada es la real. Se definen dos conceptos:

- Evapotranspiración potencial: que corresponde a la máxima rapidez con que las hojas y superficie del terreno sueltan el agua considerando un suministro ilimitado de agua.
- Oportunidad de Evapotranspiración: Es un índice de la humedad disponible para evapotranspiración.

La forma en que ocurre la evapotranspiración en las diferentes etapas es la siguiente:

- i) Evapotranspiración del almacenamiento de intercepción: Ocurre como rapidez de evapotranspiración potencial, mientras existe almacenamiento de interflujo.
- ii) Evapotranspiración de la superficie de detención: Se calcula en forma indirecta mediante la adición del almacenamiento de retención superficial restante, al suministro de humedad del suelo.
- iii) Evapotranspiración de la zona superior: Se calcula con la rapidez potencial cuando el almacenamiento de humedad

en la zona superior excede el valor nominal UZSN; de lo contrario, si es menor, las pérdidas por evapotranspiración ocurren con una rapidez menor que la potencial.

iv) Evapotranspiración desde el almacenamiento de la zona inferior. Está basada en el concepto de oportunidad de evapotranspiración y está determinado por la densidad vegetal y la variación superficial de suministro de humedad.

La variación superficial de la oportunidad de evapotranspiración está representada por una función lineal y el proceso de evapotranspiración ocurre de la siguiente manera: una vez que se satisface la evapotranspiración potencial de los almacenamientos de intercepción y zona superior, la evapotranspiración remanente se aplica a la zona inferior. Como se muestra en la Fig. 4.7 la localización de la recta indicada está dada por la expresión:

$$r = \left( \frac{0.25}{1-K_3} \right) \left( \frac{LZS}{LZSM} \right)$$

donde  $r$ : oportunidad de evapotranspiración máxima.  
 $K_3$ : índice de extracción de humedad de la vegetación desde la zona baja.

v) Evapotranspiración del almacenamiento de agua subterránea. Ocurren con una rapidez constante especificada por el parámetro  $K_{24EL}$  siempre que no haya sido satisfecha la evapotranspiración desde otras fuentes.

m) Esguerrimiento en canales. El modelo de Stanford utiliza un método de Muskingum: modificado para transitar avenidas.

Esto requiere de un hidrograma de tiempos de retraso, que se obtiene determinando las áreas tributarias de cada tramo, estimando las velocidades en los canales en puntos sucesivos del sistema de canales y finalmente calculando el tiempo de flujo hasta la salida de la cuenca. Los gastos trasladados se transitan mediante la expresión:

$$O_2 = \bar{I}_1 - KSI (I - O_1)$$

El empleo de esta expresión permite determinar finalmente los volúmenes de escurrimiento a la salida de la cuenca.

Comentarios acerca de la calibración.-

El proceso de calibración requiere de considerar valores iniciales para los parámetros, a partir de la información básica. Se requiere hacer algunas corridas y comparar los resultados generados respecto a los datos, es decir, comparar el hidrograma simulado respecto al real.

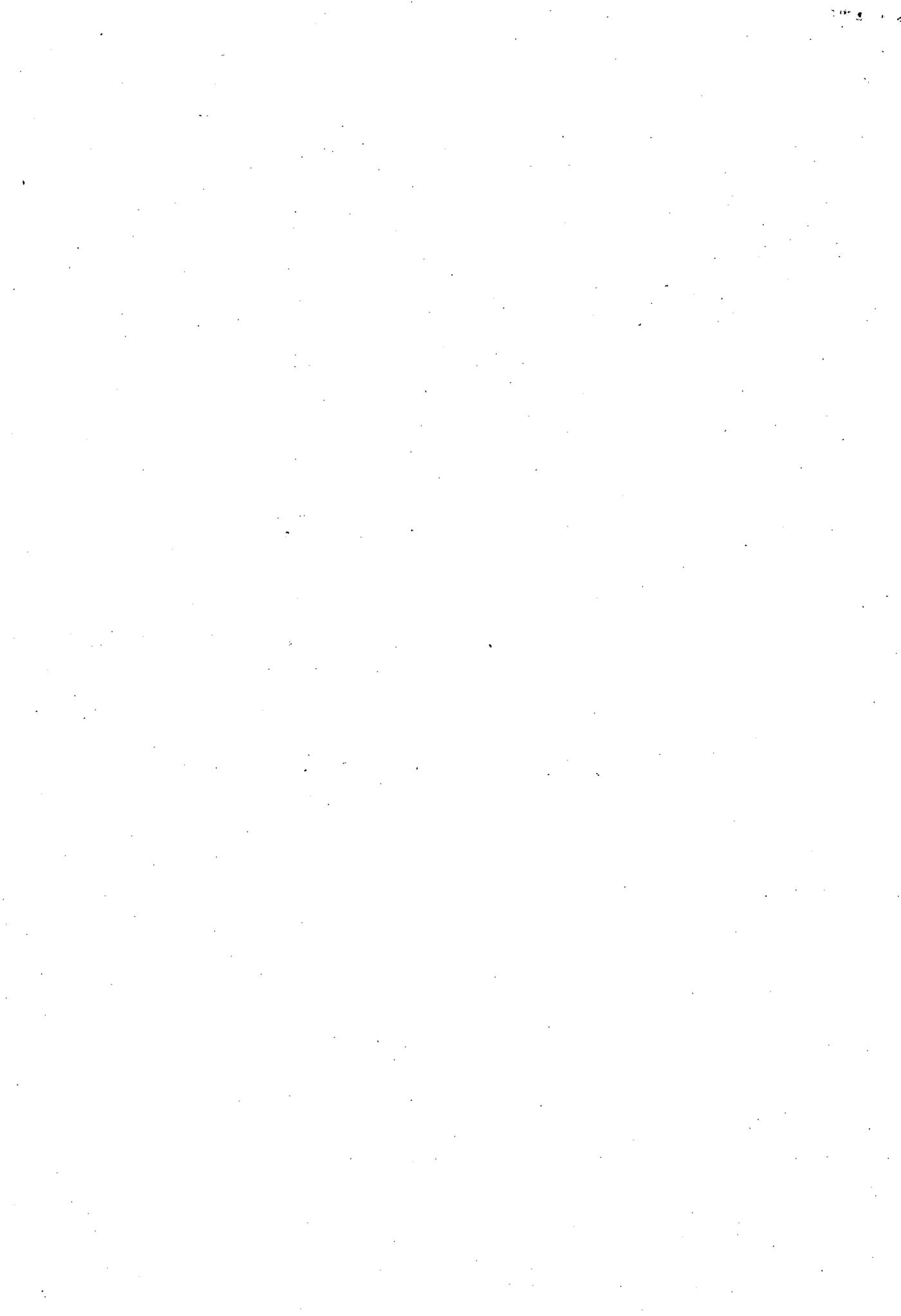
Actualmente se cuenta con rutinas de optimización que permiten variar los parámetros automáticamente, buscando, por ejemplo minimizar las diferencias entre los volúmenes mensuales simulados y los históricos.

## REFERENCIAS

1. Viessman, W.Jr, Terence E. Harbaugh and John W. Knapp. "Introduction to Hydrology". Intext Educational Publishers. New York. 1972.
2. Springall, Rolando. "Drenaje en Cuencas Pequeñas". Instituto de Ingeniería, UNAM. 1969.
3. Linsley, R.K.Jr. "Rainfall -Runoff Models" en Systems Approach to Water Management, Asit K. Biswas Ed. Mc. Graw Hill. 1976. pp. 16-53
4. Fleming, George. "Computer Simulation Techniques in Hydrology". Elsevier, New York, 1975.
5. Linsley, R.K. Jr., Max A. Hohler and Joseph L.H. Paulhus. "Hydrology for Engineers", Second Ed. Mc Graw. New York. 1975.
6. Springall, Rolando. "Escummiento en Cuencas Grandes" Instituto de Ingeniería, UNAM. 1967.

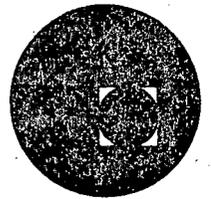
## BIBLIOGRAFIA

1. Chow, Ven Te. (ed.)., "Handbook of Applied Hydrology. New York: Mc Graw Hill Co. 1964.
2. Overton, Donald and Michael E. Meadows. "Stormwater Modeling" Academic Press. New York. 1976.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam

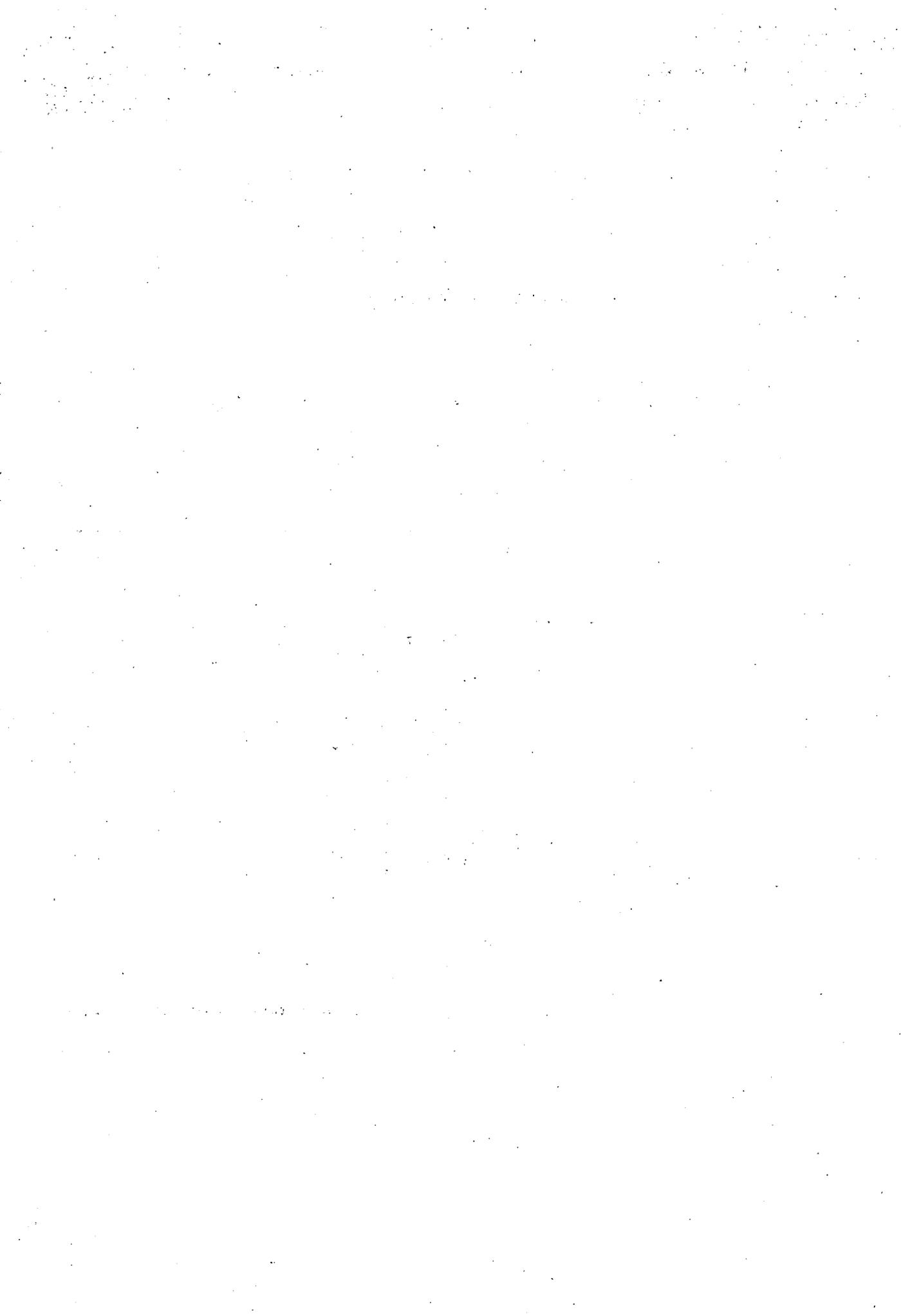


HIDROLOGIA SUPERFICIAL

HIDROLOGIA OPERACIONAL

ING. RAMON DOMINGUEZ MORA

AGOSTO, 1978



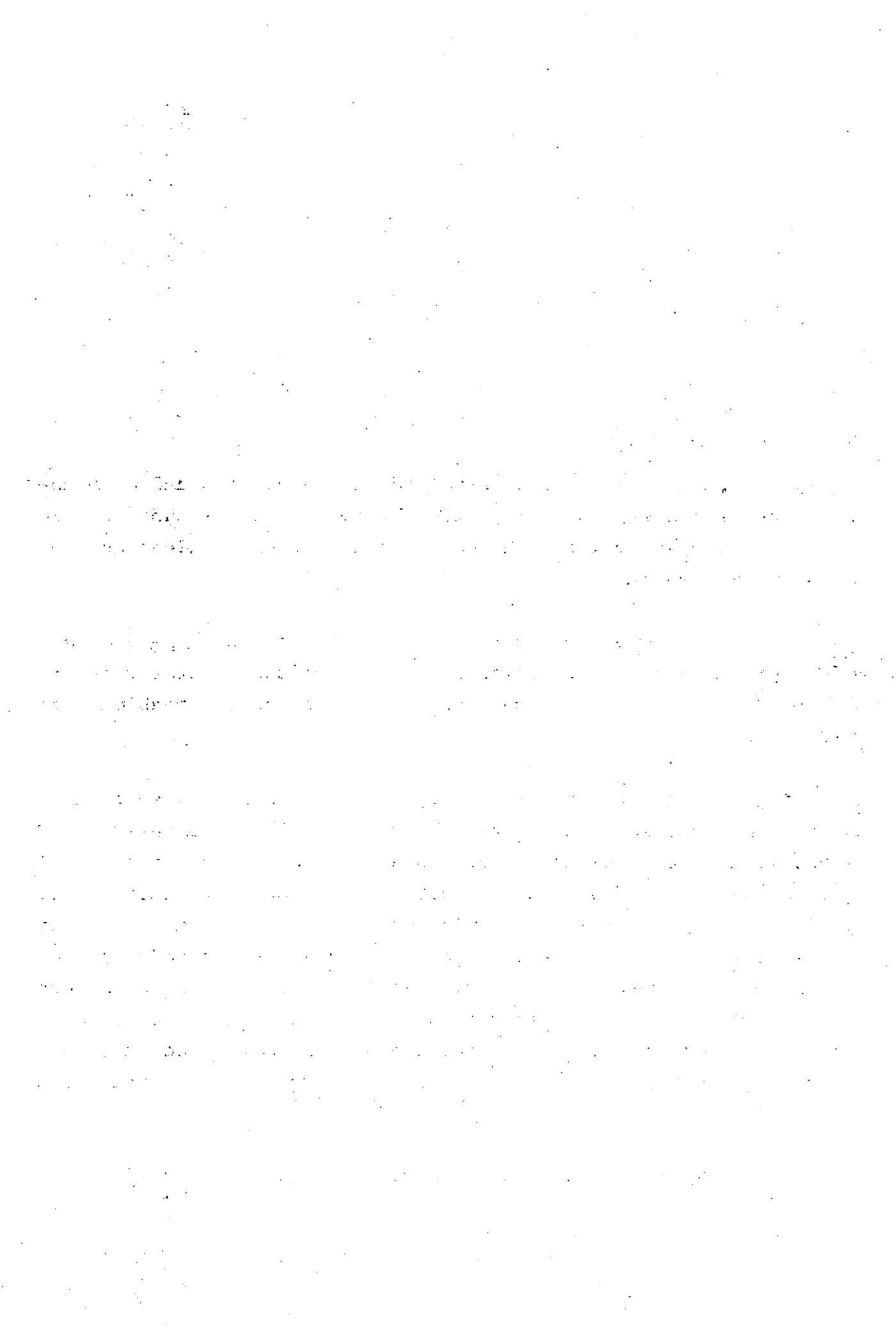
## 1. INTRODUCCION

En épocas recientes se ha desarrollado una gran cantidad de métodos para la generación de registros hidrológicos. Muchos de estos métodos están inclusive programados para su fácil aplicación mediante computadoras.

Dado el estado actual de la técnica relativa al tema, parece ser más importante que el desarrollo de nuevos métodos, tratar de ordenar lo hecho hasta la fecha, para facilitar su comprensión y con ello su uso.

Con la generación de registros hidrológicos simulados, se pretende mejorar el estudio de las alternativas de diseño de obras de aprovechamiento y control del agua. Para ello, se busca que los registros simulados, sin ser una reproducción de los históricos, si reproduzcan las características más importantes de los mismos, a los que se considera como una muestra de los valores que podrían presentarse. Una manera útil de diferenciar a los diferentes métodos es a través de saber cuales son las características estadísticas que mejor reproducen, de tal manera que la selección del método más adecuado a cada problema, pueda realizarse de manera lógica, según se muestra en la fig 1.

Lo primero que debe destacarse es, que es lo que se pretende dise-



nar, para que fin se destinará, cuales son los eventos que pueden influir de manera decisiva en el funcionamiento de la obra. Teniendo claras estas ideas, es posible seleccionar adecuadamente a la variable o las variables que deben simularse, si es correcto generarlas aisladamente, o bien, es necesario generarlas en conjunto respetando la correlación entre ellas, definir el intervalo de tiempo adecuado para la simulación, etc.

Para aclarar ideas, se puede pensar en los siguientes ejemplos:

1. Se busca conocer la posible evolución de los niveles en la presa La Angostura para determinar la frecuencia con la que se sobrepasa el nivel máximo de operación o bien se baja del nivel mínimo de operación.

Las descargas de la presa son conocidas y se cuenta con registros diarios durante 12 años, de lluvias, escurrimientos y evaporaciones.

La curva Elevaciones-Capacidades es tal que 1 m de desnivel corresponde a  $420 \times 10^6 \text{ m}^3$  de almacenamiento.

Si se considera la gran capacidad de la presa, se concluye que la generación de registros simulados puede hacerse con intervalos mensuales, debido a que los eventos que pudieran presentarse en intervalos menores no pueden provocar un cambio importante en los niveles de la presa. Por otro lado, si se tiene un registro de escurrimientos, no tiene objeto simular registros de lluvia, de tal manera que las variables por simular son los volúmenes de escurrimientos y evaporación, con intervalos mensuales. Por otro lado, la lámina de evaporación en el mes en que esta es máxima, a fluctuado desde un valor mínimo de 0.19 m en 1966, hasta un máximo de 0.23 m en 1972, de tal manera que los volúmenes evaporados serán mucho menores que los escurridos y su variación de un año a otro es muy pequeña. Estas úl



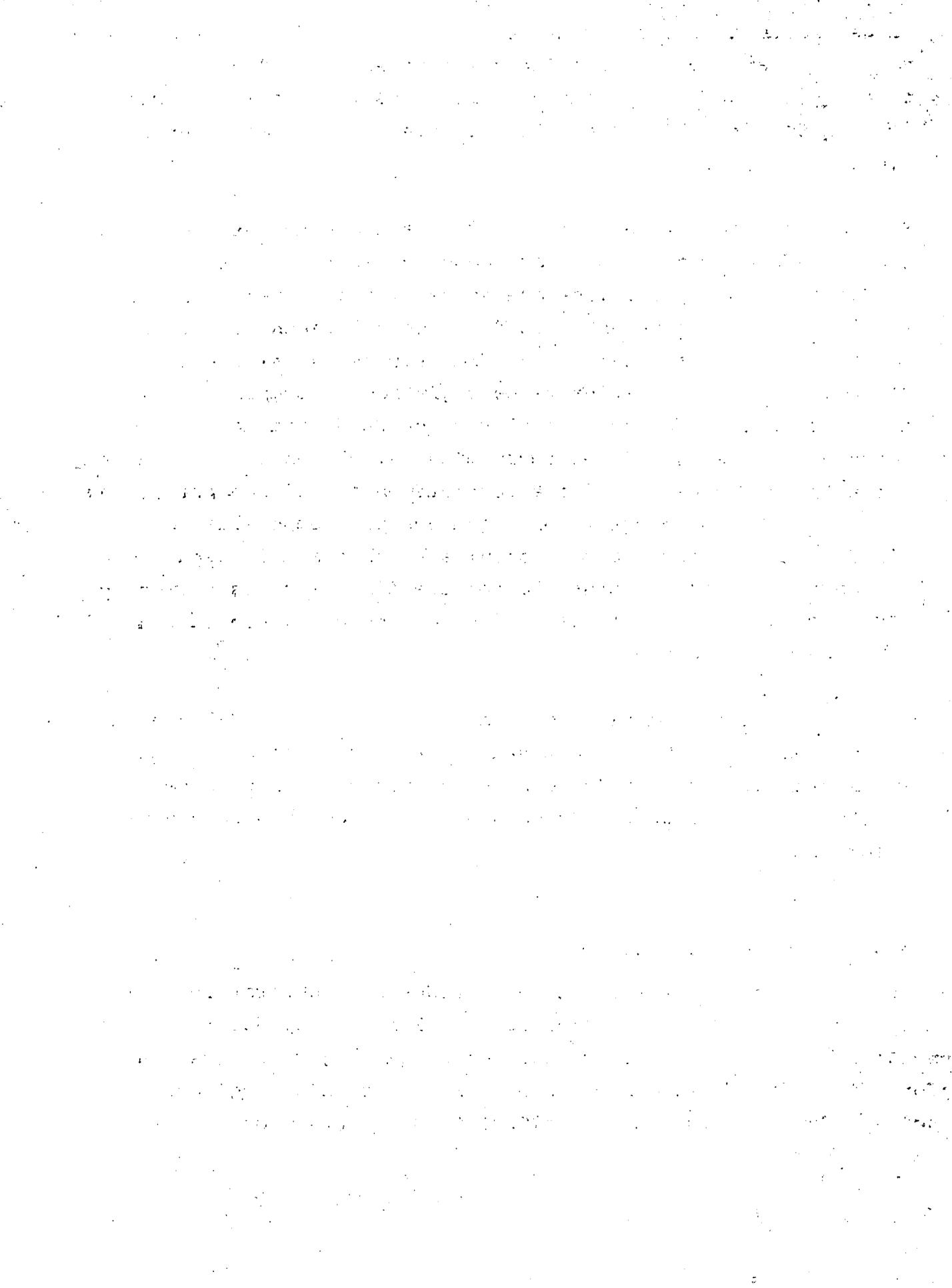
timas consideraciones hacen ver que el problema puede resolverse generando independientemente los volúmenes de escurrimiento y los de evaporación y que inclusive si estos últimos no se generan, sino que se supone que tomarán los valores medios mensuales del registro histórico, los errores que se cometan no influirán en el resultado.

2. Se requiere conocer la capacidad de los lagos de Texcoco, para que satisfagan requisitos prefijados en cuanto a la frecuencia de déficit. El agua almacenada se destinará a riego y la demanda correspondiente es conocida. Nuevamente, en este problema el orden de magnitud de las dimensiones es tal que no se requiere generar simultáneamente registros de evaporación y de escurrimiento. Además, como el regimen de demanda es precisamente el contrario del de escurrimientos, el mes en que podrían presentarse los déficits está completamente definido, por lo que es suficiente con generar los volúmenes por temporadas, dividiendo estos en temporada de avenida y temporada de secas, con la ventaja adicional de que la correlación entre los volúmenes escurridos en una y otra es nula y por lo tanto, pueden generarse independientemente.

En el siguiente capítulo se hará una descripción de los principios generales en que se basan diferentes métodos, haciendo énfasis en las características estadísticas que reproducen. Existen programas de computadora de todos los métodos que se describen.

## 2. DESCRIPCION DE LOS METODOS

En este capítulo se describen cinco métodos para generar registros hidrológicos. Cada uno de ellos debe utilizar en su desarrollo la función de distribución de probabilidades que mejor se ajuste a la información histórica. En el caso de registros hidrológicos las funciones de distribución más comúnmente utilizadas son:



a) Función de distribución normal.

Esta función es muy utilizada debido a que según ella se distribuyen muchas variables y a que numéricamente es muy sencilla de manejar. Sin embargo, en los fenómenos hidrológicos, las variables más comunes tienen una función de distribución asimétrica y con límite inferior acotado por lo que las distribución normal pocas veces se ajusta a los datos históricos. Otra ventaja de esta función de distribución es que el resultado de cualquier combinación lineal de variables independientes con distribución normal, resulta en otra distribución del mismo tipo.

b) Función de distribución log Normal.

Si los logaritmos de una variable tienen distribución normal, entonces la variable tiene distribución Log Normal. Esta función es también fácil de manejar numéricamente y, además es asimétrica y acotada inferiormente, por lo que se ajusta a muchas variables asociadas a fenómenos hidrológicos. La principal desventaja en su utilización es que la suma de variables aleatorias con distribución Log Normal tiene una función de distribución que no es Log Normal.

c) Función de distribución Gamma.

Esta función de distribución depende de tres parámetros. Su utilización en estadística es más reciente que las otras dos debido a que es más difícil de manejar numéricamente. Sin embargo, está acotada inferiormente y puede adoptar cualquier asímetría variando sus parámetros. Aun cuando en general la suma de dos variables Gamma no tiene distribución Gamma, en casos particulares en que su segundo parámetro vale 1; sí lo es.

Los cinco métodos que se describen a continuación pueden utilizarse con cualquiera de las tres funciones de distribución descritas.



## 2.1 Método de Tomas-Fiering<sup>1</sup>.

En este método la generación del registro hidrológico es secuencial, de manera que el valor generado de un mes cualquiera  $j$ , correspondiente al año  $i$ , es función de:

- La media de los valores históricos del mes  $j$ .
- Una desviación, proporcional a la desviación del mes anterior  $j-1$ , respecto a su media y al coeficiente de correlación entre ambos meses.
- Un número aleatorio  $\delta_{ij}$  con media cero y cuya función de distribución puede ser cualquiera de las descritas.

La expresión general para la generación es.

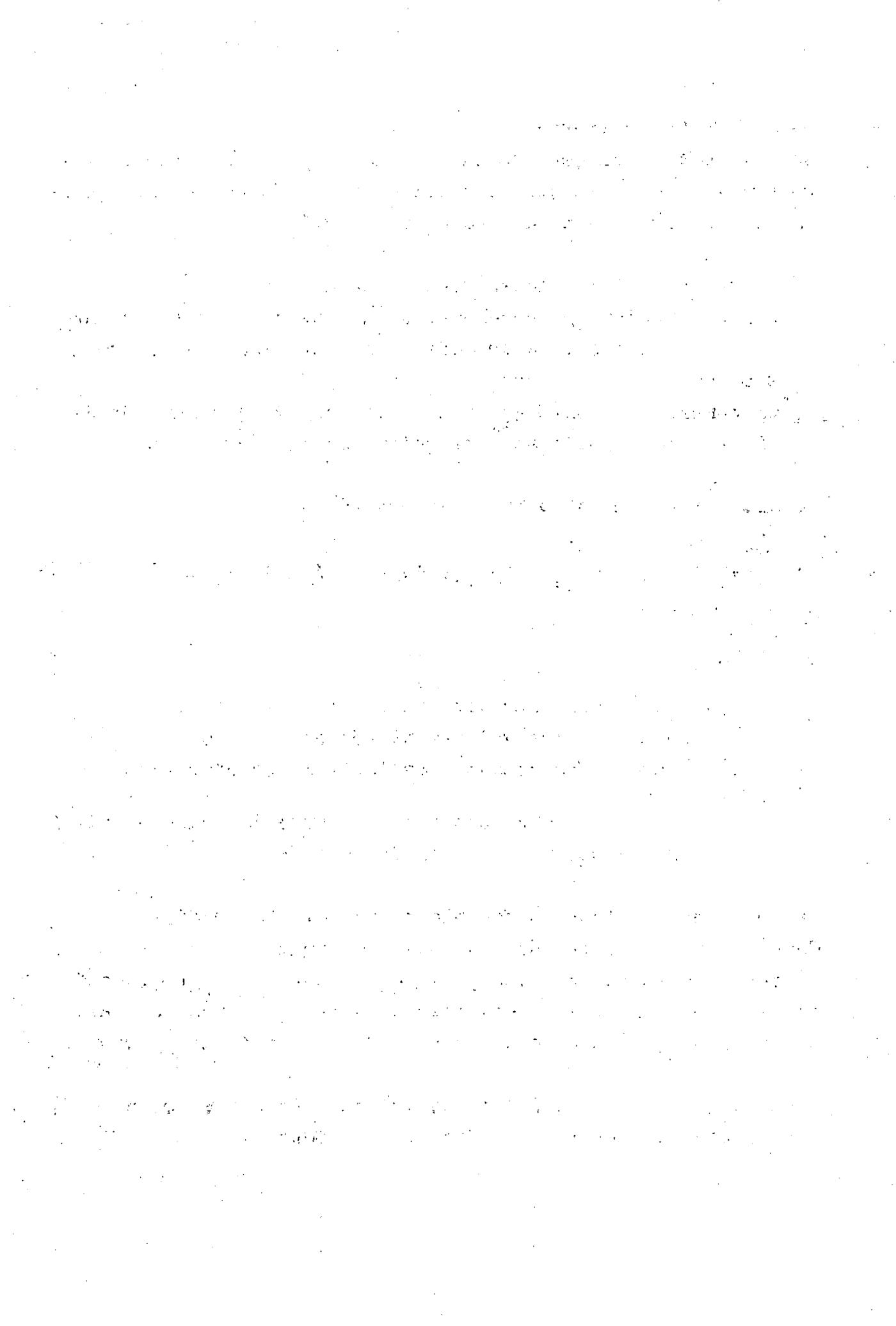
$$X_{ij} = \bar{X}_j + \frac{\rho_j S_j}{S_{j-1}} (X_{i,j-1} - \bar{X}_{j-1}) + \delta_{ij} (1 - \rho_j^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

En donde

- $X_{ij}$  valor generado para el año  $i$  y el mes  $j$ .
- $\bar{X}_j$  media de los valores históricos del mes  $j$ .
- $S_j$  desviación estándar de los valores históricos del mes  $j$ .
- $\rho_j$  coeficiente de correlación entre los valores históricos del mes  $j$  y los del mes  $j-1$ .

Mediante este método es posible reproducir las medias y las desviaciones estándar de cada mes, así como el coeficiente de correlación entre cada mes y el que le antecede. La función de distribución de las desviaciones históricas respecto a la media sólo se reproduce si estas tienen distribución normal.

En la fig 2 se comparan los coeficientes de correlación histórica con los generados mediante este método.



## 2.2 Método de González V-Domínguez<sup>2</sup>

En este método la generación de los valores es simultánea. Ha sido desarrollado sobre todo para variables con función de distribución Gamma, pero puede extenderse a variables con distribución Normal o Log Normal, con la restricción de que en el último caso, no se reproduce la función de distribución de los valores históricos. La descripción que sigue se refiere a su aplicación para la función de distribución Gamma.

Las propiedades de la función de distribución Gamma que se aprovechan son:

- Si  $Z$  es una variable aleatoria con distribución Gamma, parámetros  $(\alpha, \beta, \delta)$ , entonces la variable  $\frac{Z-\delta}{\beta}$  tiene distribución Gamma con parámetros  $(\alpha, 1, 0)$ . A esta última función se le llama Gamma de 1 parámetro. Esta propiedad es válida también en el sentido inverso.
- Si dos variables aleatorias  $X$  y  $Y$  independientes, están distribuidas según funciones Gamma con parámetros  $(x, 1, 0)$  y  $(y, 1, 0)$  respectivamente, entonces la variable  $Z = X + Y$  estará distribuida según una función Gamma con parámetros  $(x + y, 1, 0)$ .

La idea del método es generar para cada mes un número aleatorio con distribución Gamma de un parámetro; aprovechando la primera propiedad, se puede transformar a este en un valor con función de distribución Gamma de tres parámetros y, aprovechando la segunda se le puede hacer igual a la suma de tres valores aleatorios, uno de ellos es común con el del mes anterior, otro con el correspondiente al mes siguiente y el tercero corresponde únicamente al mes en cuestión.

Si la función de distribución de los valores históricos del mes  $i$  es Gamma con parámetros  $(A_i, B_i, D_i)$ , para que en la ge-



neración se conserve la función de distribución, se requiere que:

$$A_i = \alpha_{i-1} + \alpha_i + \gamma_i \quad i = 2, 3, \dots, 11, 12 \quad (2.2)$$

$$A_1 = \alpha_{12} + \alpha_1 + \gamma_1$$

Para que la correlación entre el mes  $j$  y el  $j-1$  se conserven:

$$\rho_{j, j-1} = \frac{\alpha_{j-1}}{\sqrt{A_j \cdot A_{j-1}}} \quad (2.3)$$

Mediante las ecuaciones (2.2) y (2.3) se encuentran los valores de  $\alpha_j$ ,  $j=1, 2, \dots, 12$  y  $\gamma_j$ ,  $J = 1, 2, \dots, 12$ .

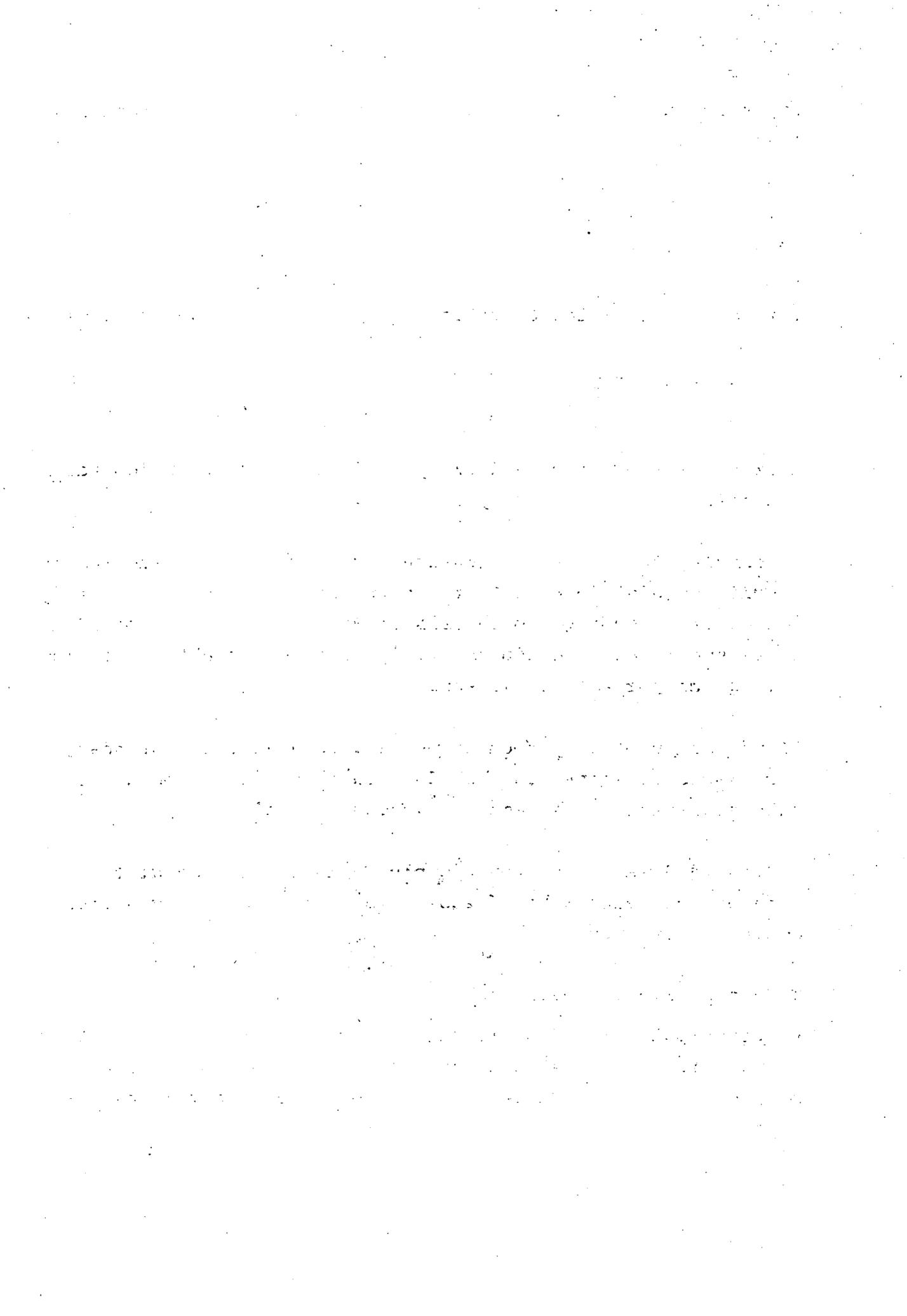
La simulación se realiza generando 24 variables aleatorias con función de distribución Gamma de un parámetro ( $\alpha_j$ ,  $\gamma_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 12$ ). Cada grupo de tres variables se suma siguiendo la secuencia establecida en (2.2), al valor resultante se le multiplica por  $B_i$  y se le suma  $D_i$ .

El método permite reproducir medias, desviaciones estandar, correlaciones mensuales y la función de distribución de los valores históricos si esta es Gamma o Normal.

En la fig 3 se muestra un ejemplo de la función de distribución de los valores históricos y la de los valores generados mediante este método.

### 2.3 Modelo de líneas quebradas<sup>3, 4</sup>.

La principal característica de este modelo es conservar el correlograma del registro histórico. Esta programado para valores mensuales pero la teoría puede extenderse a valores diarios.



El modelo consiste básicamente en obtener cada valor generado como la suma de las ordenadas correspondientes a varias líneas rectas con quiebres a diferentes frecuencias (fig 4a). Las ordenadas sobre cada línea se obtienen interpolando linealmente valores aleatorios independientes con distribución normal. Se aplica a los valores residuales (los valores históricos originales transformados para tener media cero y desviación estandar uno). Se han hecho algunas generaciones de valores mensuales mediante dos líneas quebradas. En este caso, se requiere conocer cuatro parámetros que pueden obtenerse a partir de dos puntos del correlograma histórico. El modelo se aplicó a los datos de evaporaciones mensuales registrados en la estación climatológica San Fernando, Tamaulipas. En la fig 4b se puede observar la comparación entre el correlograma de los datos históricos y el obtenido a partir del registro simulado.

#### 2.4 Modelo análisis de componentes <sup>5, 6.</sup>

En este método se considera al registro histórico como una serie cronológica formada por la suma de los siguientes componentes

1. Tendencia de la media ( $\bar{X}(t)$ )
2. Componente cíclica ( $Y(t)$ )
3. Componente autorregresiva ( $Z(t)$ )
4. Ruido o componente aleatoria ( $r(t)$ )

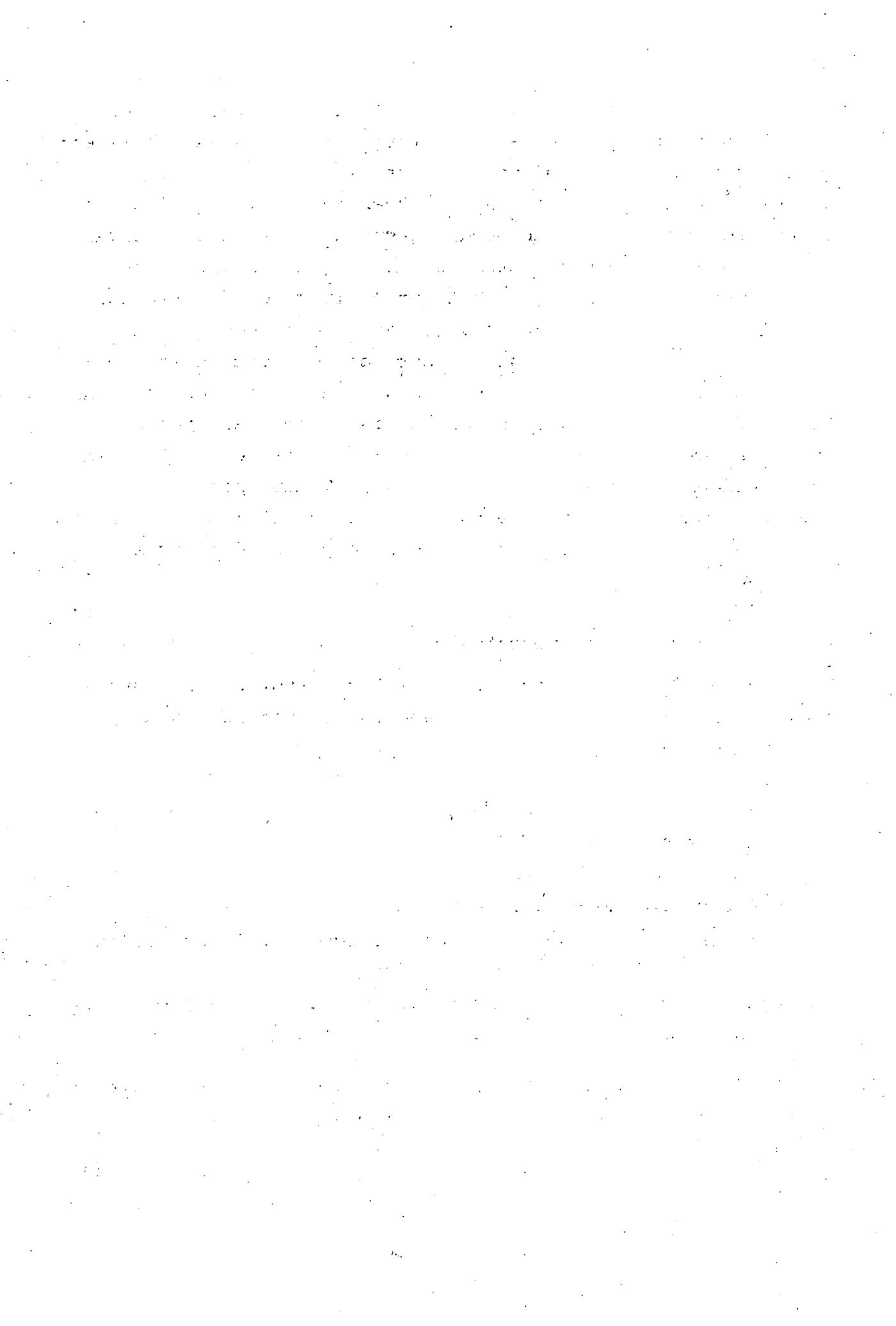
Los valores generados están dados entonces por la expresión

$$x(t) = \bar{X}(t) + y(t) + z(t) + r(t)$$

La determinación de cada componente se hace con base en el registro histórico como se muestra enseguida:

- 1) Tendencia. El valor de la tendencia se obtiene ajustando al registro histórico un polinomio de la forma

$$\bar{X}(t) = \bar{X} + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n \quad (A)$$



No existe evidencia de que los registros hidrológicos provocados por fenómenos naturales tengan una tendencia a crecer o decrecer a largo plazo, por lo que normalmente sólo se considera en la ecuación (A) el primer término del segundo miembro.

Componente cíclica. Si del registro histórico se remueve la tendencia, el resultado es una nueva serie, a la que se le puede ajustar una suma de senoides con diversas amplitudes y períodos, es decir, se puede tener:

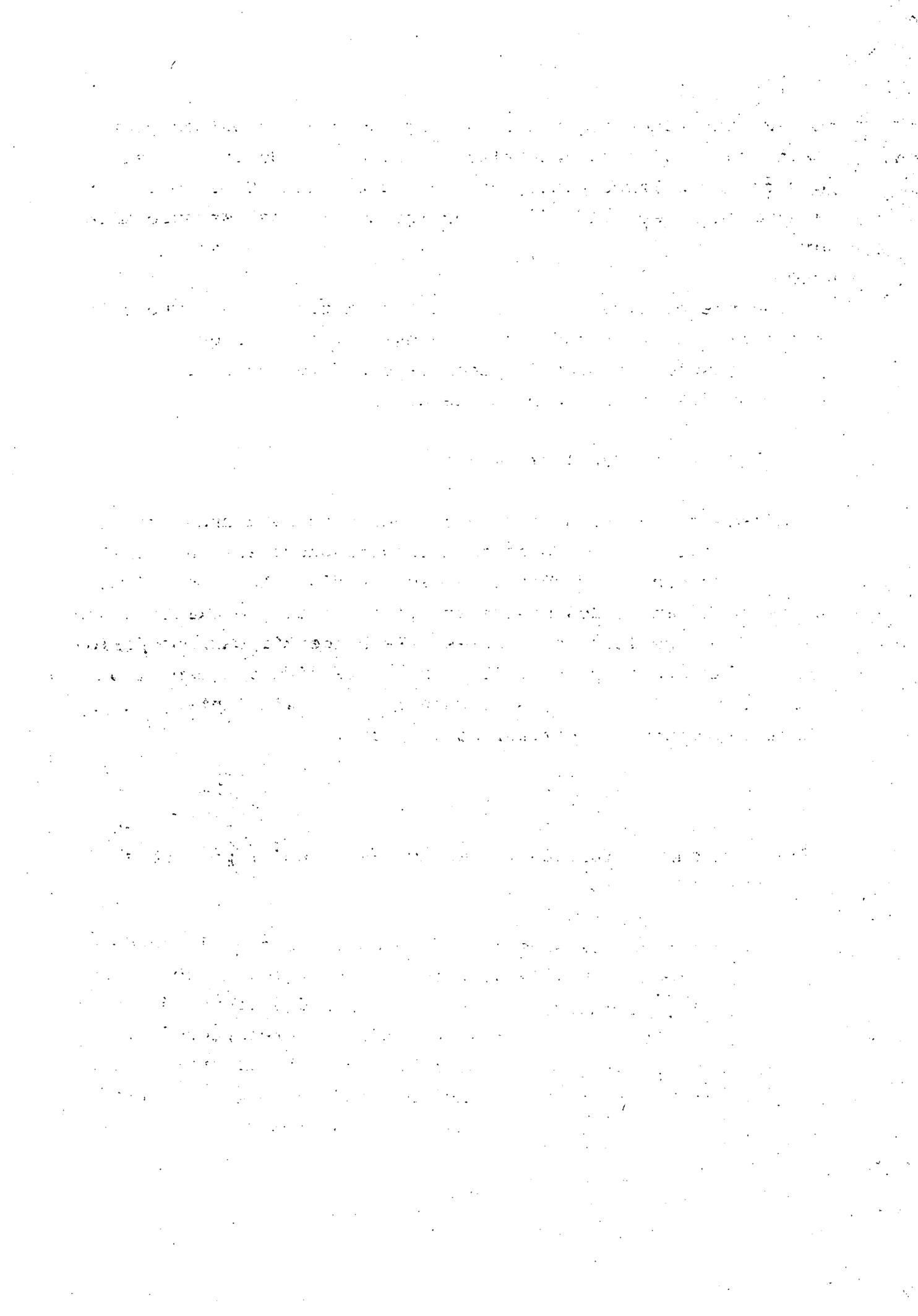
$$Y(t) = \sum A_n \text{ Sen } (2\pi f_n t + \phi_n)$$

El ajuste de la nueva serie deberá hacerse para una  $n$  finita, de modo que el período de cada senoide pueda ser interpretado en términos del fenómeno que se estudia. Así, por ejemplo, si se analizan series mensuales, es evidente que existirá una senoide con período de 12 meses. Para identificar los períodos fundamentales puede utilizarse la técnica del espectro. Una vez identificadas las frecuencias más importantes, el problema se reduce a encontrar los valores.

$$A_n, \phi_n \quad n = 1, 2, \dots$$

que hacen que la función  $Y_n$  sea lo más parecida posible a  $x(t) = \bar{X}(t)$

Las desviaciones que subsisten después de remover la tendencia y la componente cíclica, pueden presentar un fenómeno de persistencia, es decir, que a valores grandes tiende a seguirle valores grandes y a valores pequeños valores pequeños. Este fenómeno de persistencia se debe a que existe una correlación entre lo que pasa en un momento dado y lo que ha pasado previamente. Esto último puede representarse por:



$$Z(t) = b_1 Z(t-1) + b_2 Z(t-2) + \dots$$

Nuevamente el número de coeficientes debe ser finito y si no existe evidencia de lo contrario es preferible considerar que vale 1, o sea que

$$Z(t) = b_1 A(t-1)$$

y debe encontrarse de tal manera que el ajuste entre

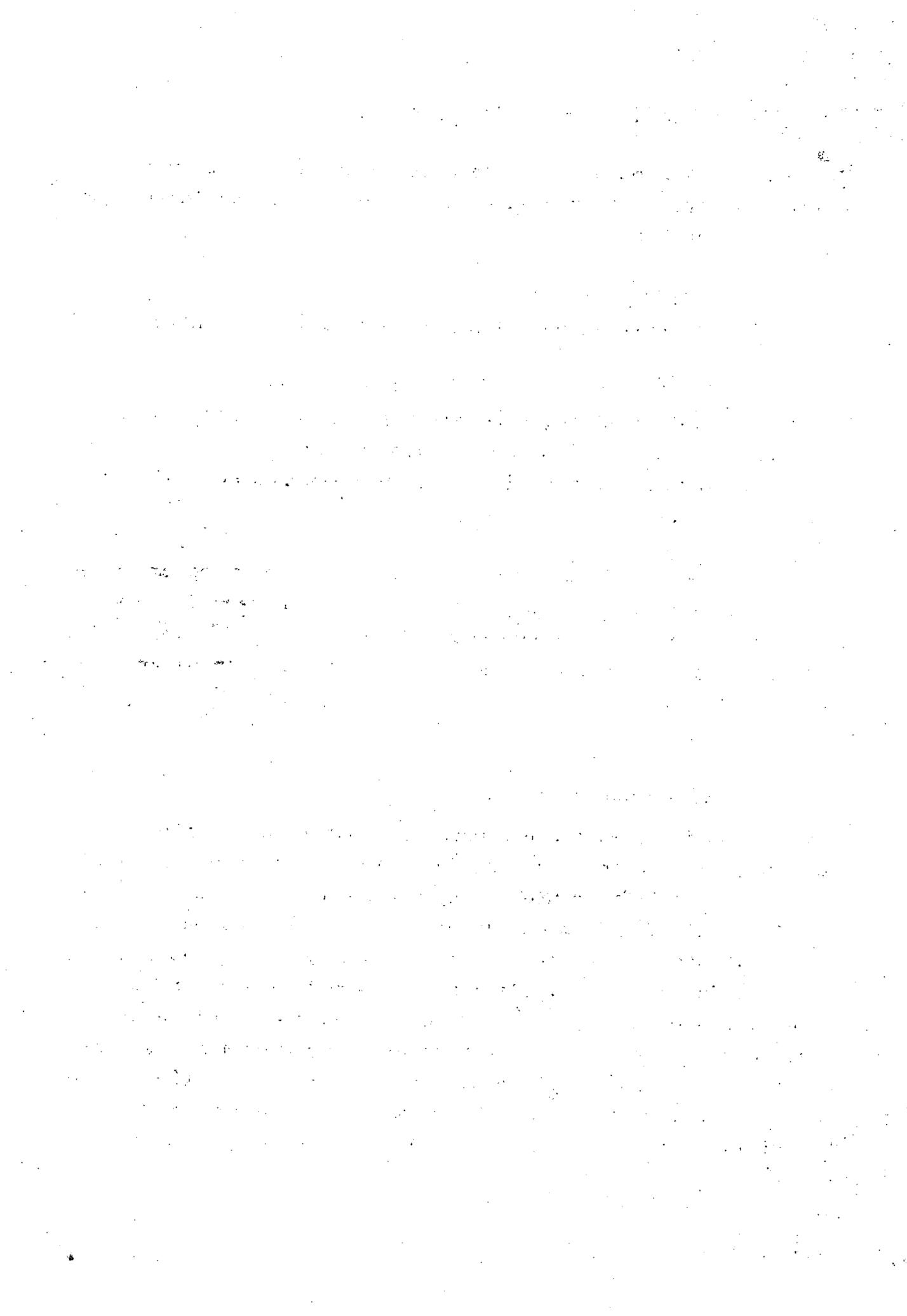
$$Z(t) \text{ y } x(t) - \bar{X}(t) - y(t) \text{ sea el mejor posible}$$

Después de quitar al registro original la tendencia, la componente cíclica y la componente autorregresiva, a lo que queda se le llama ruido y se le ajusta una función de distribución cualquiera.

Como puede verse, de la exposición anterior, el problema principal del método radica en la selección del número de términos que debe tener cada componente. Por otro lado, los ciclos que se presentan en los registros históricos no son siempre de tipo senoidal.

## 2.5 Método de componentes principales<sup>7</sup>

Como ya se dijo, en algunos casos puede ser importante generar los registros de dos o más estaciones o bien de dos o más variables simultáneamente. Esto genera un problema adicional en el cálculo debido a que además de respetar las características estadísticas de cada variable, es necesario conservar la correlación entre las variables. El método de componentes principales puede operarse en conjunto con cualquiera de los anteriores. Consiste básicamente en conocer primero, la correlación cruzada entre las diferentes variables. Una vez conocida la correlación, se remueve mediante una matriz de transformaciones lineales, dando lugar a nuevas variables



auxiliares independientes entre sí. Las variables auxiliares pueden generarse independientemente una de la otra, con cualquiera de los métodos descritos anteriormente y, una vez generados, se aplica la transformación lineal inversa.

Matalás<sup>8</sup>, propuso un método alternativo en donde la generación se hace de manera directa pero tiene la desventaja de que sólo puede ser utilizado, sí para cada una de las variables la correlación entre meses es función únicamente del de fasamiento en el tiempo y no del tiempo mismo.

En cualquier caso, los métodos implican el uso de transformaciones lineales, con las que la forma de la función de distribución se pierde (con excepción del caso en que la función sea normal).

En la tabla 1 se presenta un resumen de las características estadísticas que se conservan con cada uno de los métodos.

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes the need for transparency and accountability in financial reporting.

2. The second part of the document outlines the various methods and techniques used to collect and analyze data. It includes a detailed description of the experimental procedures and the statistical tools employed.

3. The third part of the document presents the results of the study, including a comparison of the different methods and a discussion of the implications of the findings. It also includes a section on the limitations of the study and suggestions for future research.

4. The fourth part of the document provides a summary of the key findings and conclusions. It highlights the main points of the study and offers a final perspective on the overall results.

## REFERENCIAS

- 1) FIERING y JACKSON, 1971. "Synthetic Streamflows", American Geophysical Union, Washington, D.C.
- 2) GONZALEZ, V.F. y DOMINGUEZ, M.R., 1972. "Un método para generación de registros operacionales de volúmenes mensuales en un río". Quinto Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- 3) GARCIA, L.E., Dawdu. D.R. y MEJIA, J.M., agosto 1972. "Long Memory Monthly Streamflow Simulation by a Broken Line Model", Water Resources Research, Vol. 8, N° 4.
- 4) MEJIA, J.M., RODRIGUEZ-ITURBE, I. y DAWDY, D.R., agosto 1972. "Streamflow Simulation, 2. The Broken Line Process as a Potential Model for Hydrologic Simulation", Water Resources Research, Vol. 8, N° 4.
- 5) QUIMPO, R.G., enero 1972. "Stochastic Analysis of Daily River Flows", Journal of the Hydraulics Division.
- 6) KOTTEGODA, N.T., 1970. "Statistical Methods of River Flow Synthesis for Water Resources Assessment", The Institution of Civil Engineers, Proceedings, Supplement, Paper 7339 S.
- 7) CAPELLA, V.A. y SANCHEZ, B. J.L., 1967, "Elaboración de un modelo matemático para el estudio de la cuenca del Bajo río Bravo, Tamps.", Informe de trabajo del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- 8) MATALAS, N.C., 1967, "Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology", Water Resources Research, Vol. 3, N° 4.

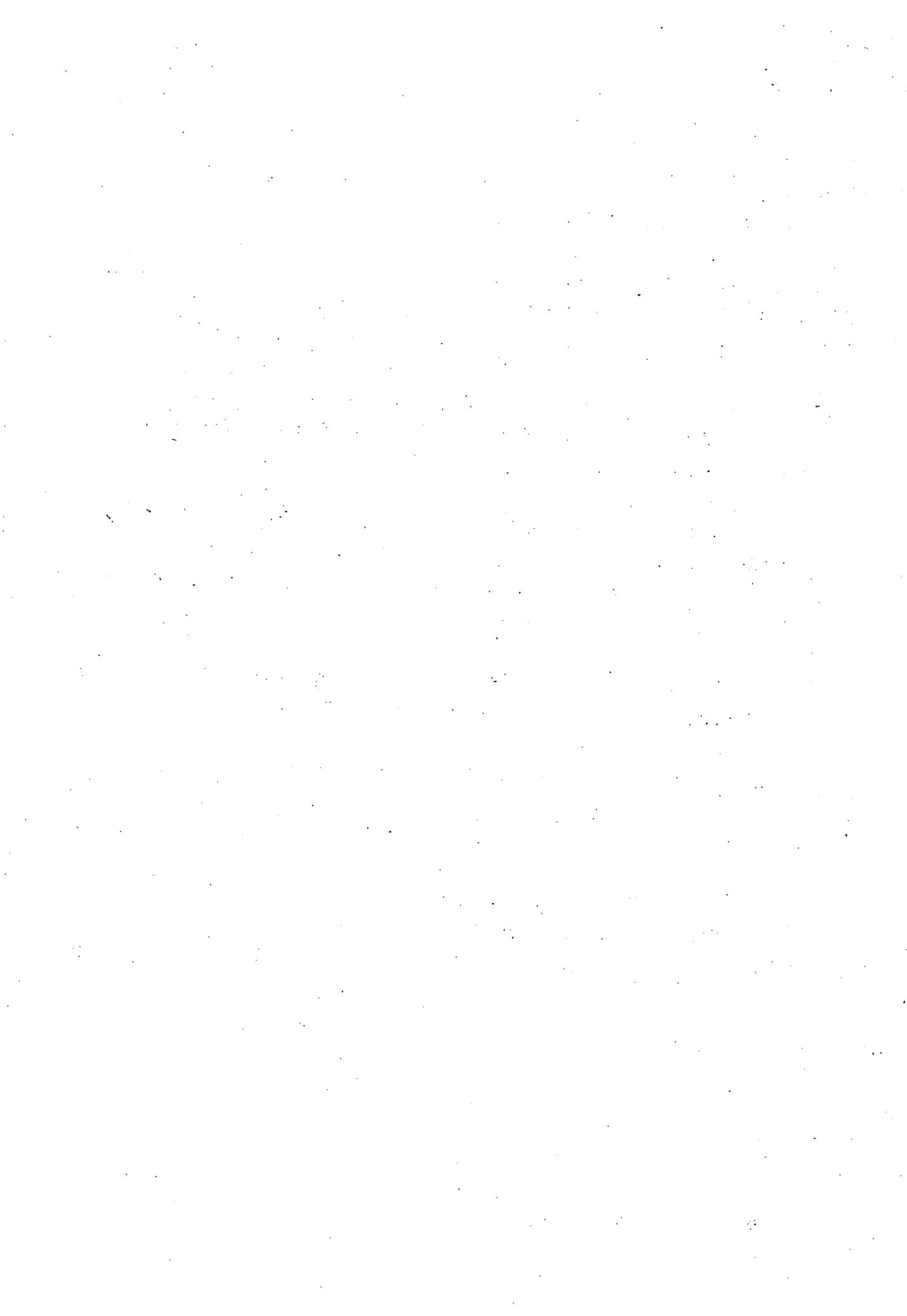
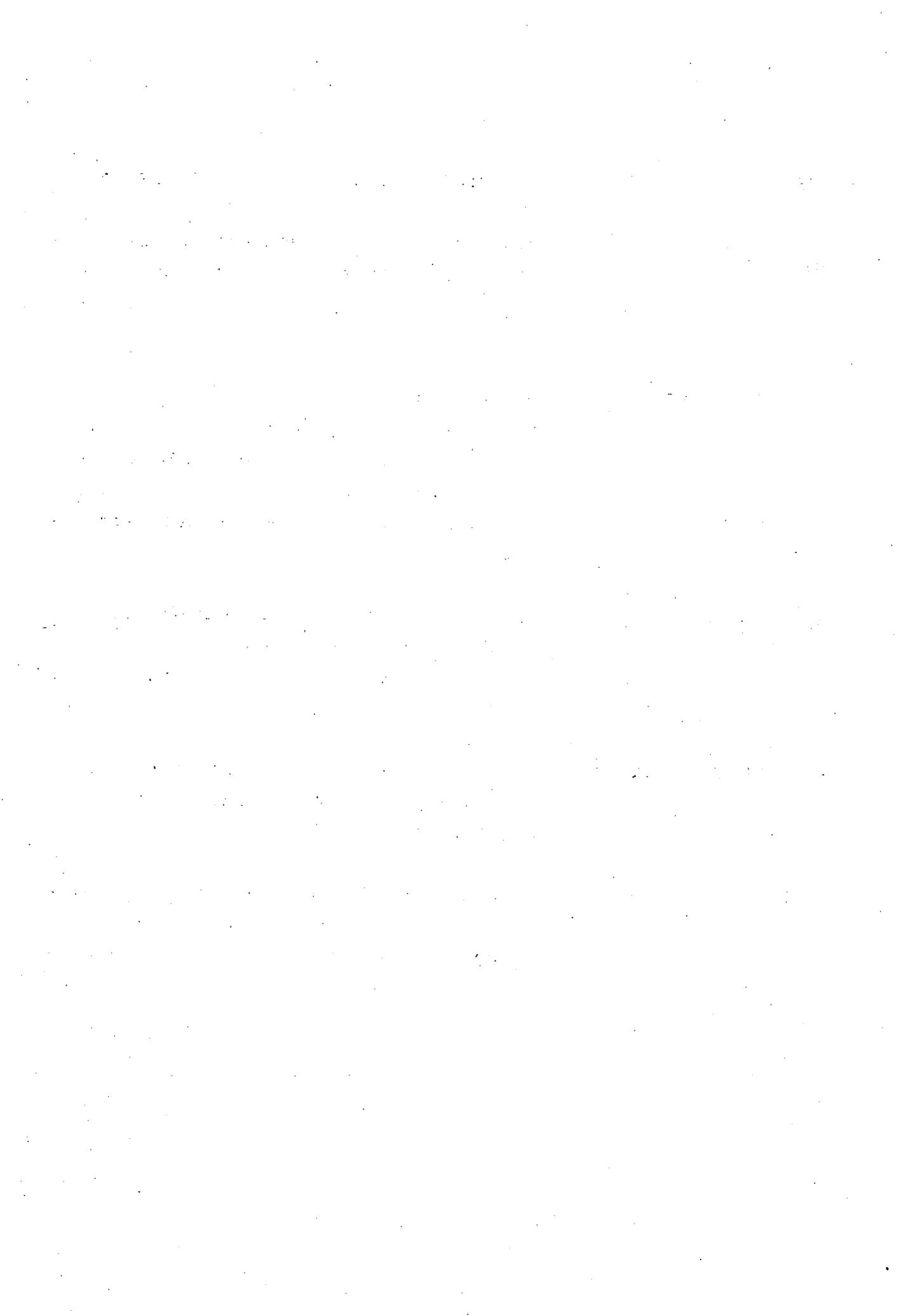


TABLA 1

MODELOS	CARACTERISTICAS ESTADISTICAS QUE SE CONSERVAN.
THOMAS-FIERING (Markov orden uno)	Media y desviación estandar de cada temporada y el coeficiente de correlación cruzada de orden uno entre las temporadas.
GONZALEZ V-DOMINGUEZ	Media, desviación estandar de cada temporada y la distribución de probabilidad de los datos de cada temporada, como también el coeficiente de correlación cruzada de orden uno entre las temporadas.
LINEAS QUEBRADAS	Media y desviación estandar de cada temporada. El autocorrelograma de todos los datos que componen el registro histórico.
ANALISIS DE COMPONENTES	Media, componentes cíclica, autorregresiva y aleatoria del conjunto de datos del registro histórico.
COMPONENTES PRINCIPALES	Para la generación simultánea de registros sintéticos conservando el coeficiente de correlación cruzada entre ellos.



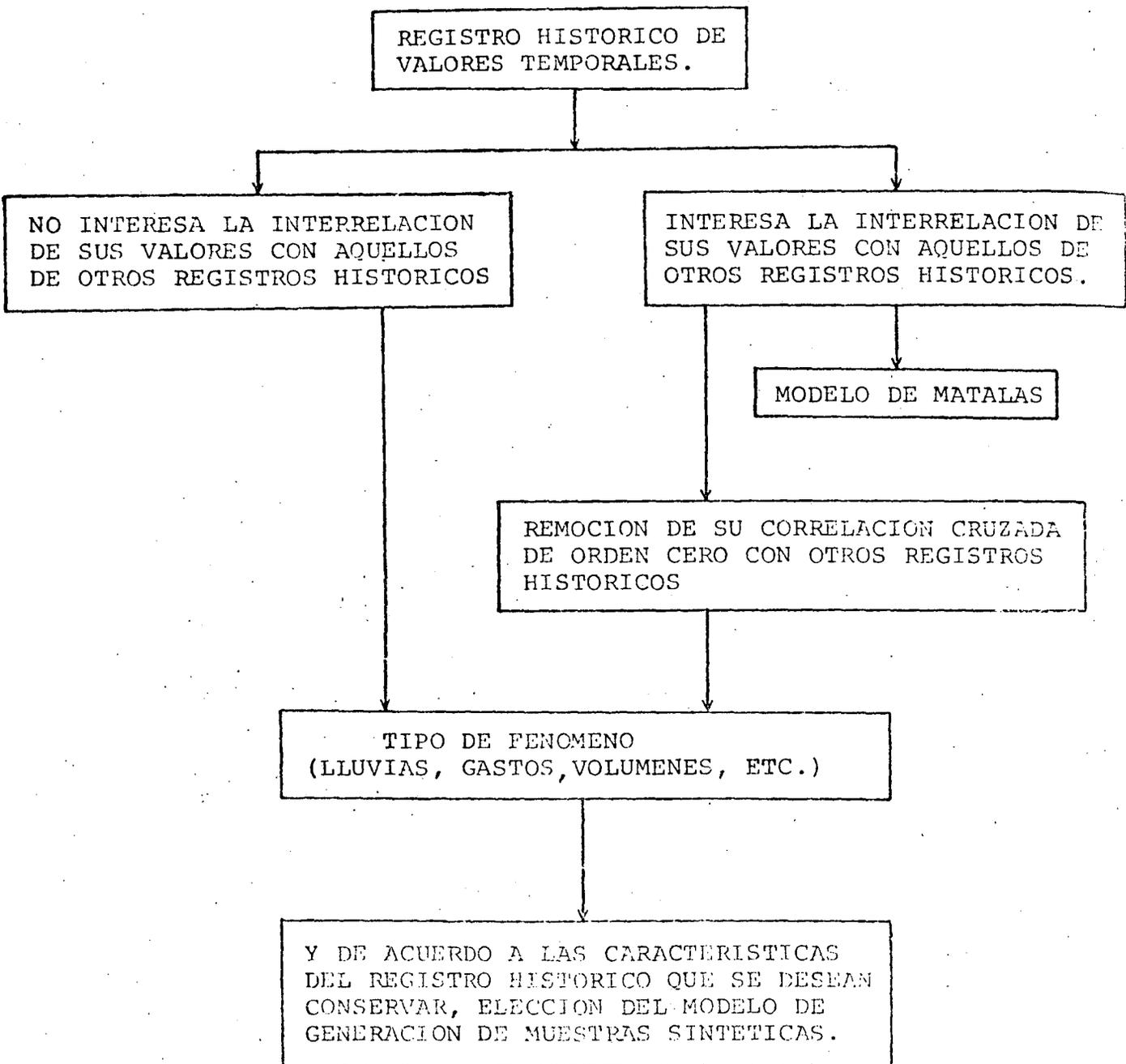


Fig 1 Esquema para la elección del modelo de generación de muestras sintéticas.



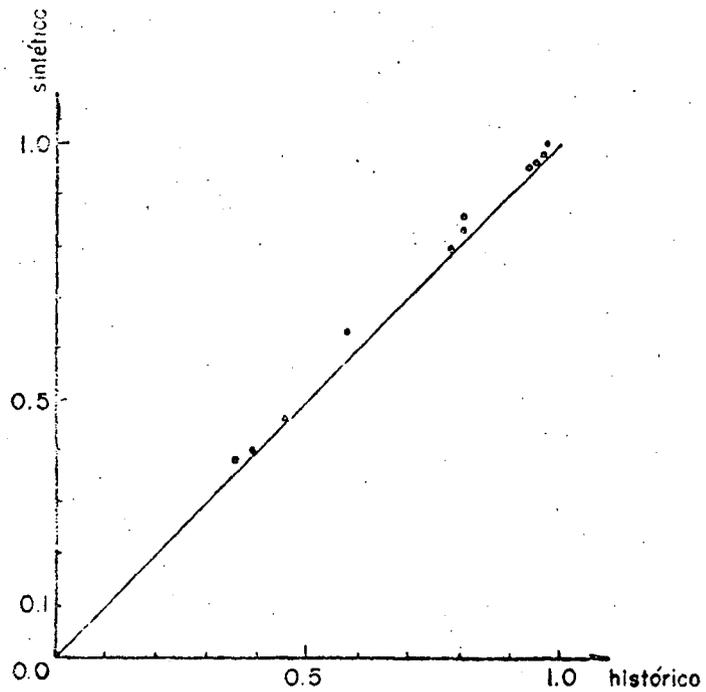


Fig. 2 Comparación de los valores de correlaciones cruzadas de cada temporada.

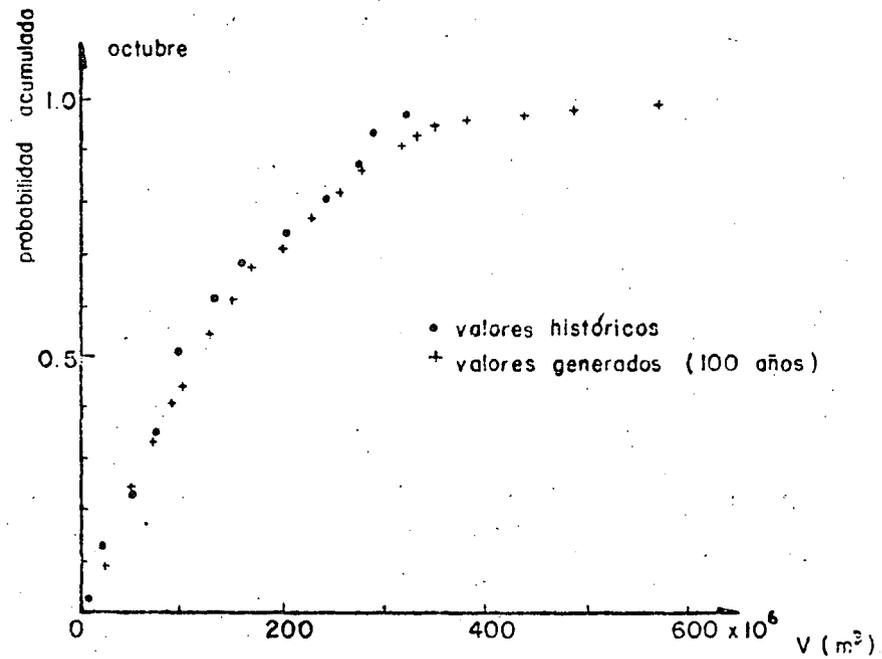
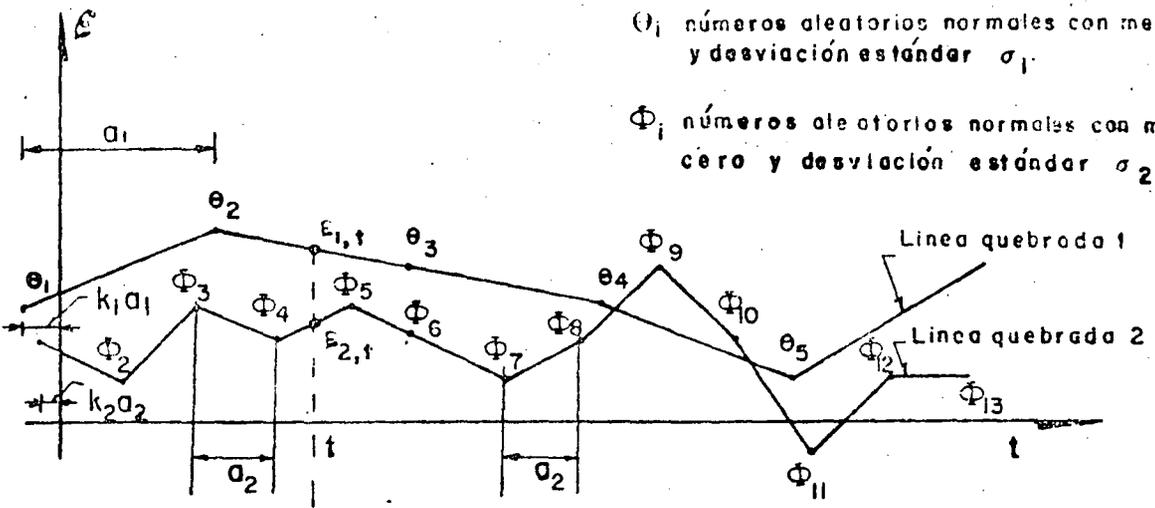


Fig. 3 Función de distribución de frecuencia





$\theta_i$  números aleatorios normales con media cero y desviación estándar  $\sigma_1$ .

$\Phi_i$  números aleatorios normales con media cero y desviación estándar  $\sigma_2$ .

$a_1, a_2$  espaciamiento constante.  
 $k_1, k_2$  números aleatorios uniformes.

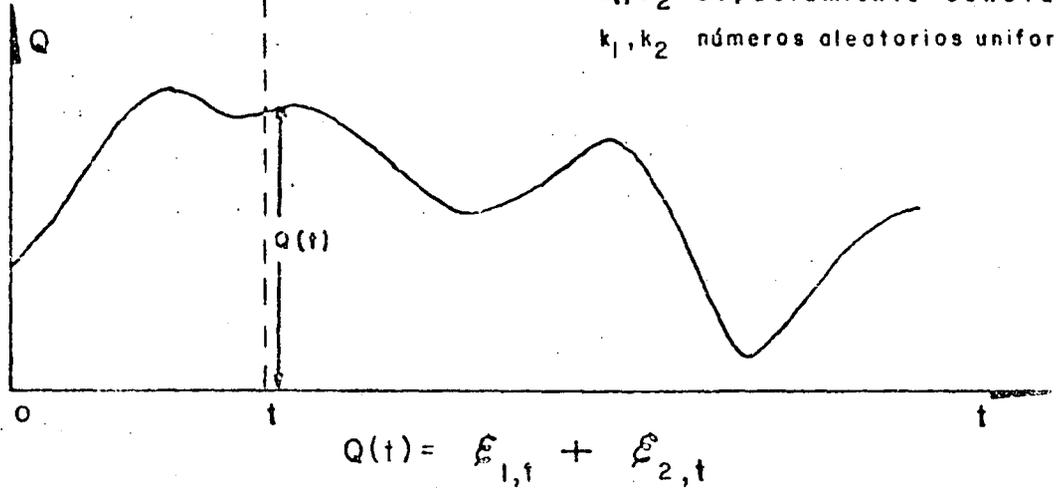


Fig. 4a. Proceso de líneas quebradas.

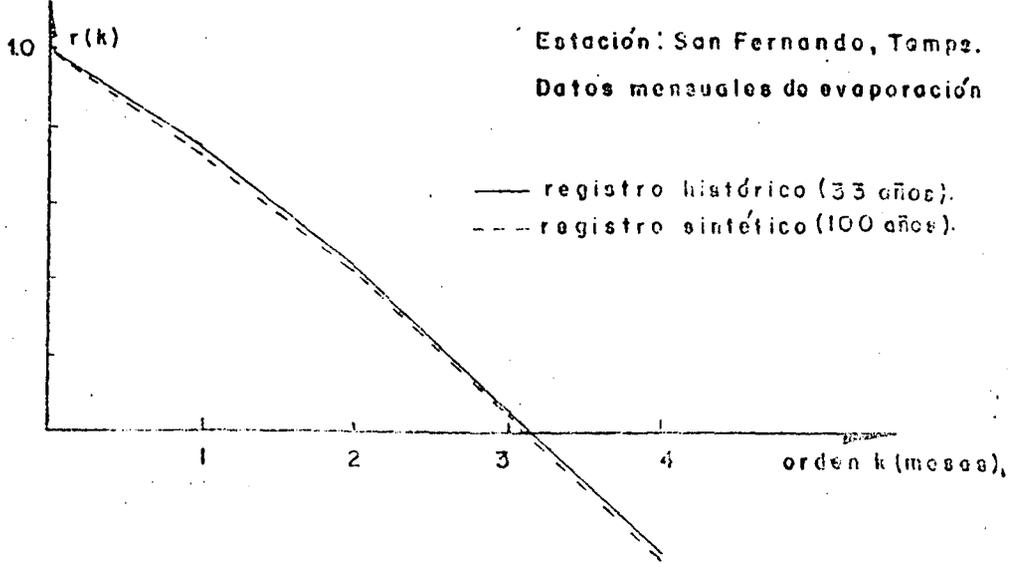
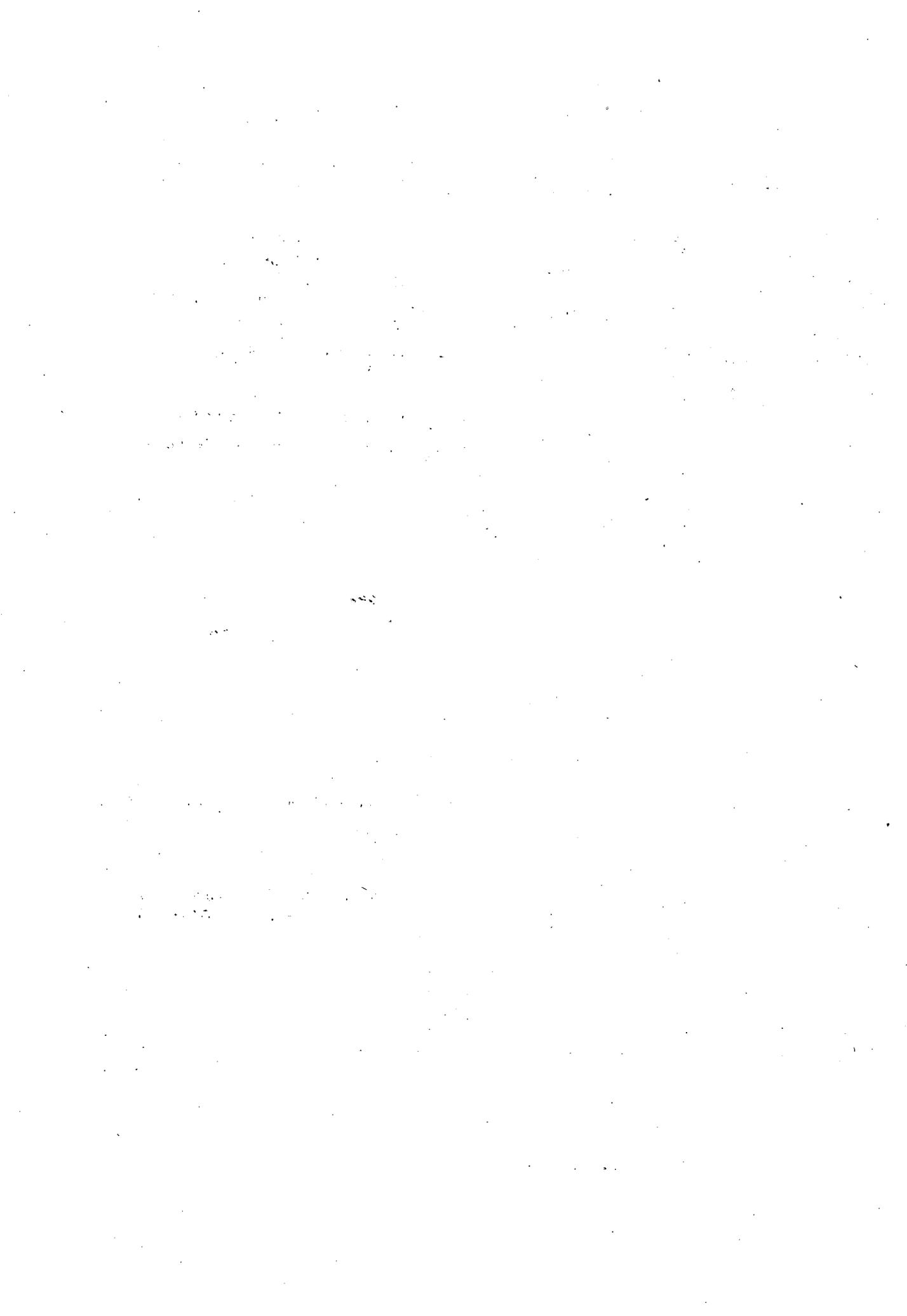
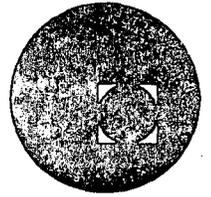


Fig. 4b. Correlogramo.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

HIDROLOGIA OPERACIONAL

ING. RAMON DOMINGUEZ M.

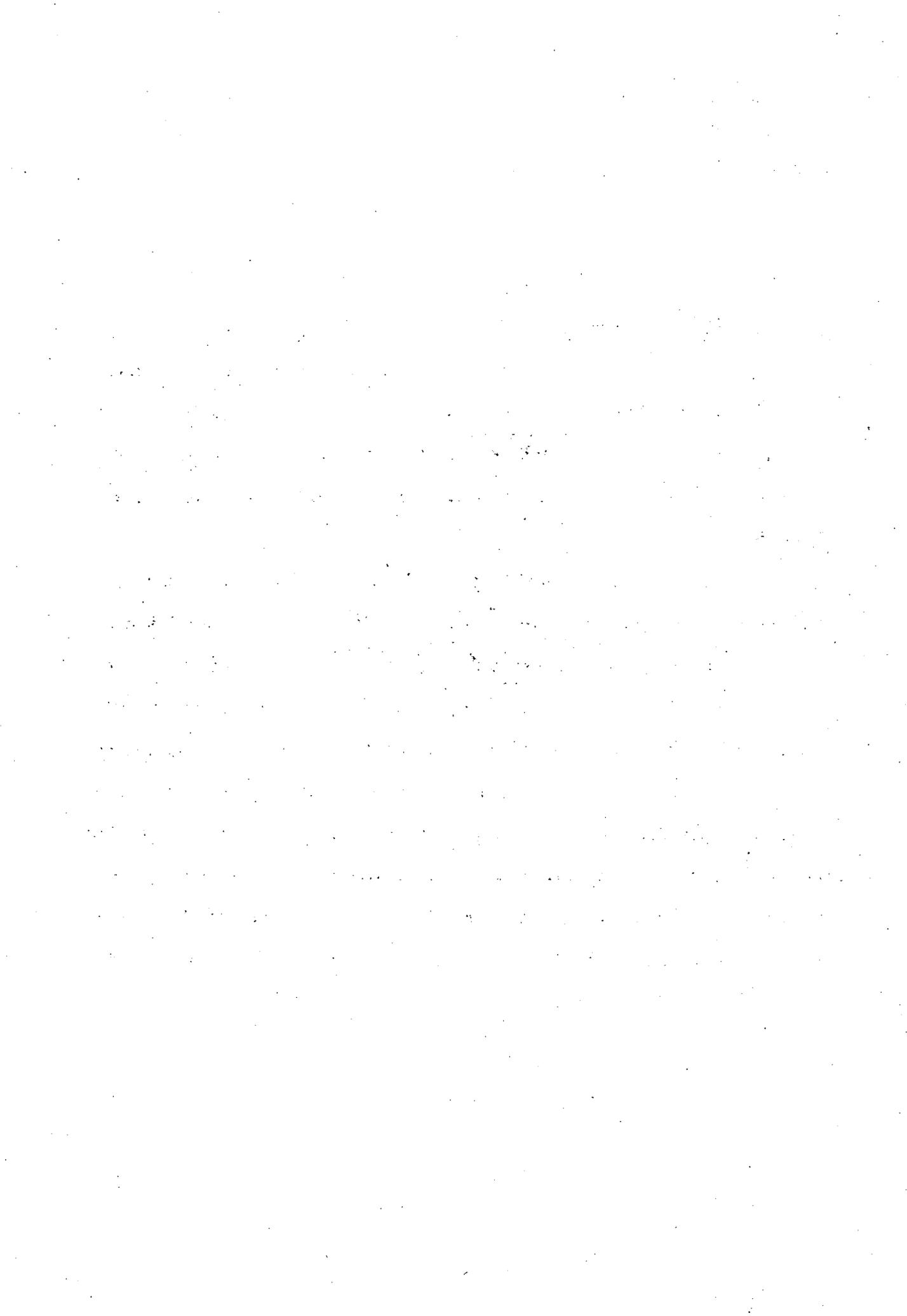
AGOSTO, 1978



### 3.2.1.1 Población y Muestra.

En estadística se habla de población como la totalidad de los posibles resultados de un experimento cualesquiera : así por ejemplo, si el experimento consiste en rodar un dado y observar el número que aparece en la cara superior, la población será : 1, 2, 3, 4, 5, 6 .

Muchos problemas en ingeniería involucran poblaciones mucho más complicadas que las del ejemplo anterior, y en los que lo más que se puede pretender es inferir algunas características típicas ( estadísticas ) de la población, a través de una serie de experimentos; a los resultados de estos experimentos o mediciones se les denomina muestra. En términos generales se puede decir que : la estadística se preocupa por identificar las características típicas de la población y ordenar los resultados que forman la muestra, y que, la teoría de probabilidad, busca proporcionar métodos que permitan inferir las características típicas de la población y ordenar los resulta



dos que forman la muestra, y que, la teoría de probabilidad, busca proporcionar métodos que permitan inferir las características de la población a partir de la muestra.

### 3.2.1.2 Función de Distribución

Se define la función de distribución de una variable aleatoria sobre el campo de los números reales, como la probabilidad de que dicha variable tome valores menores o iguales a un valor fijo  $X$ , para toda  $X$  comprendida en los reales, estos son :

$$F_U(x) = \text{Prob} \{ u \leq x ; x \in \mathbb{R} \}$$

La función de densidad de la variable aleatoria se puede definir a partir de la función de distribución como :

$$f_U(x) = \frac{\partial F_U(x)}{\partial x}$$

### 3.2.1.3 Valor Esperado

Si se tiene una función continua, se define el valor esperado o media de esa función  $g(x)$  como :

$$E \{ g(x) \} = \int g(x) f(x) dx$$

En caso de que la función  $g(x)$  sea discreta se tiene :

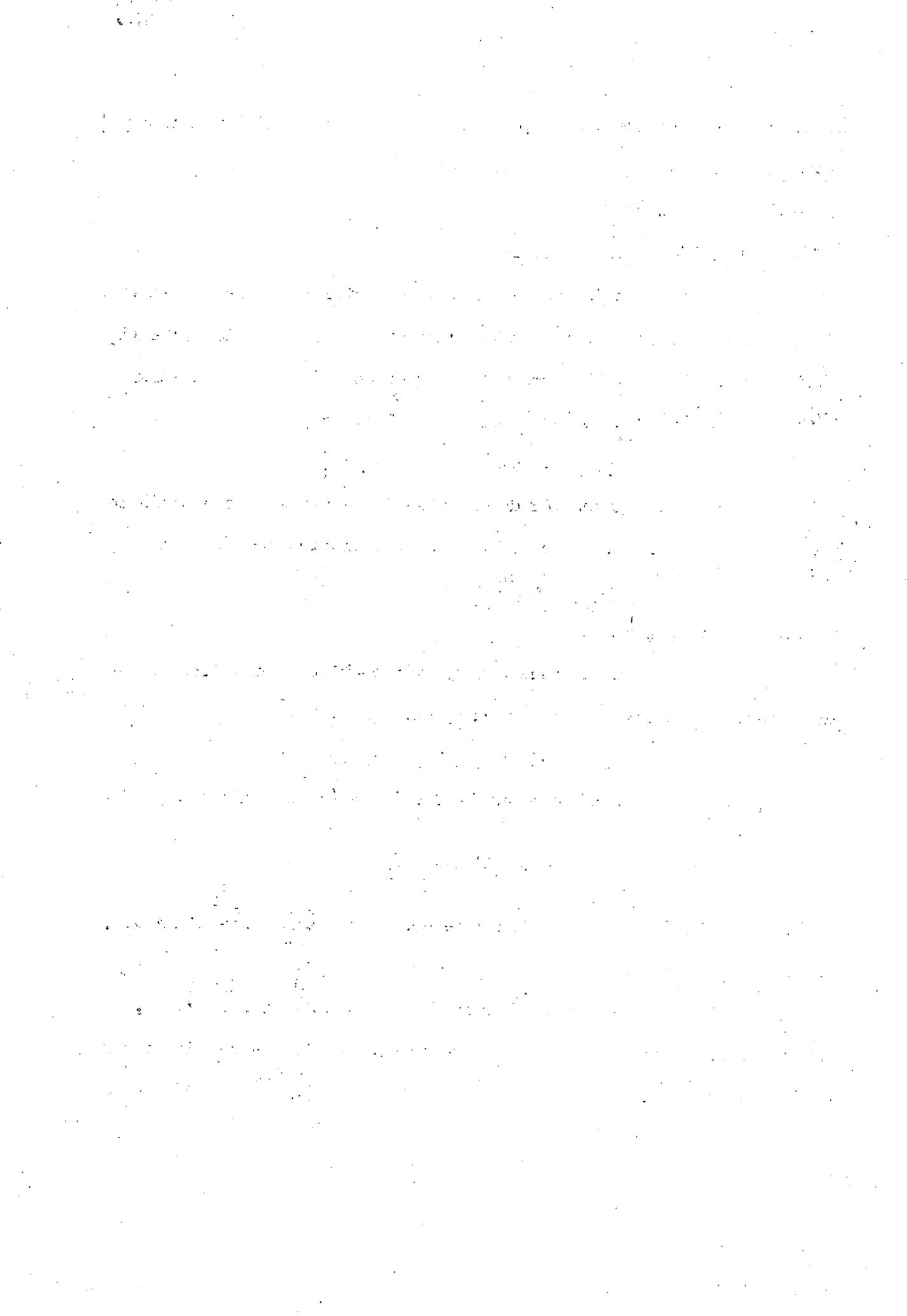
$$E \{ g(x) \} = \sum g(x) p(x)$$

en donde,  $p(x)$  es la probabilidad de que la variable tome el valor  $(x)$ .

### 3.2.1.4 Covariancia

Se denomina covariancia de las variables  $x, y$ , al valor esperado del producto de los valores correspondientes de dichas variables, esto es :

$$C(x, y) = E \{ (x - \eta_x)(y - \eta_y) \}$$



Siendo  $\eta_x$  y  $\eta_y$  las medias de  $X$ ,  $y$ , respectivamente; si estos valen cero

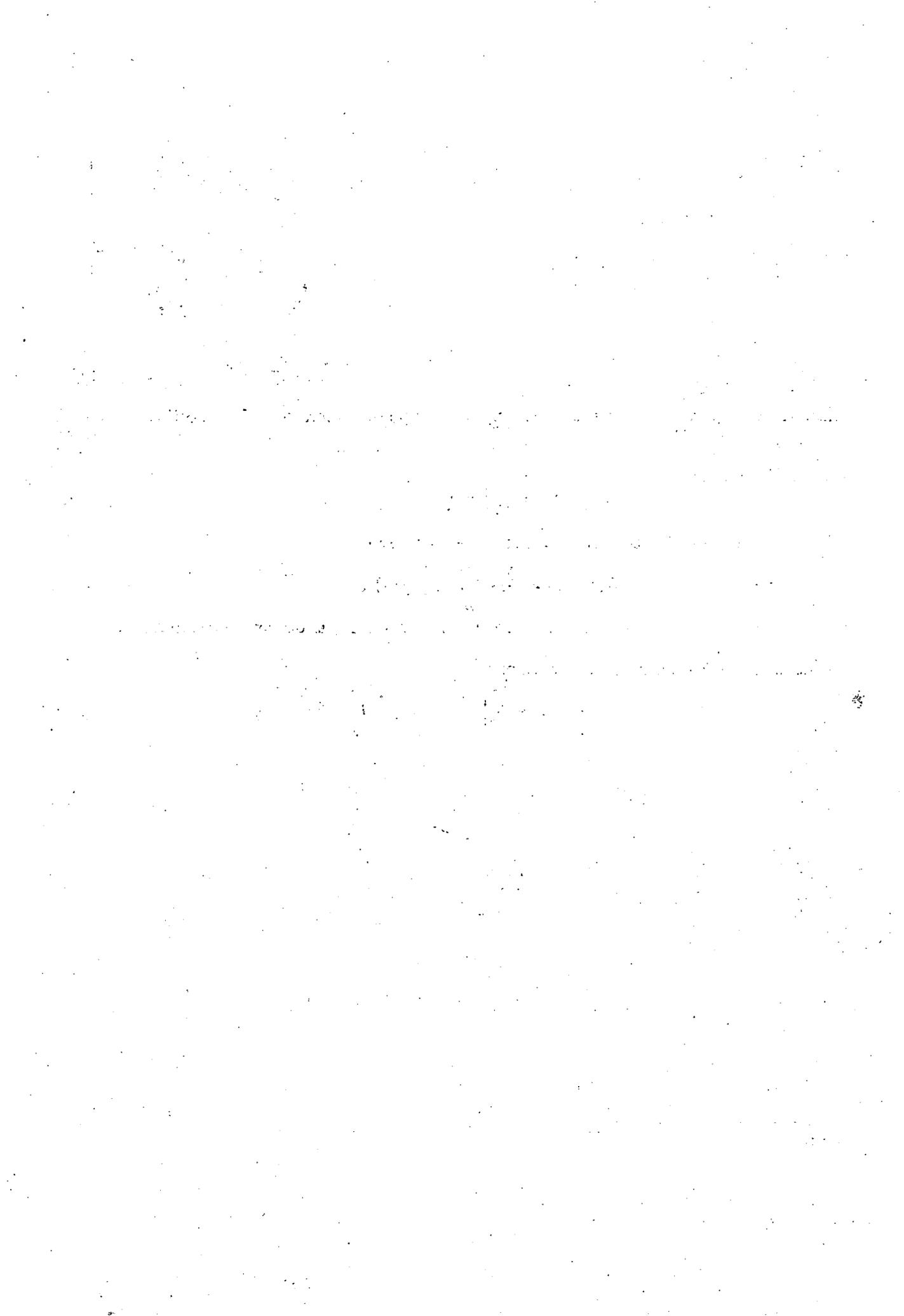
$$C(x, y) = E\{x \cdot y\}$$

Si  $x$ ,  $y$ , son variables continuas en el tiempo.

$$C(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t) dt$$

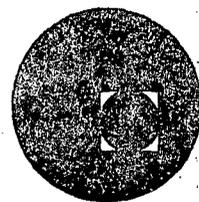
En particular a la covariancia de una variable con sí misma se le denomina variancia.

$$\text{Var}(x) = E\{x \cdot x\} = E\{x^2\} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam

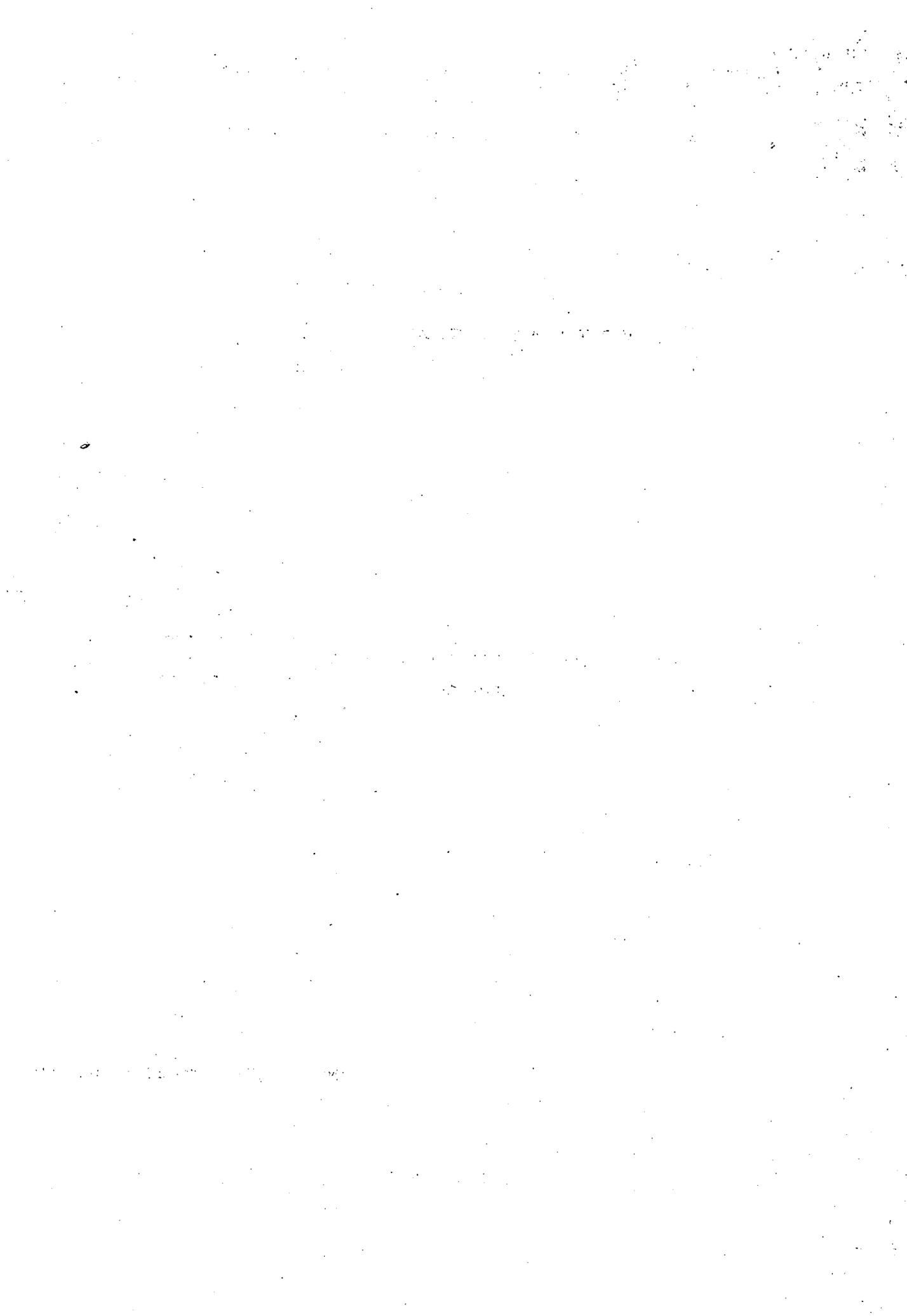


HIDROLOGIA SUPERFICIAL

INTRODUCCION A LOS APROVECHAMIENTOS  
HIDRAULICOS

ING. JAVIER GONZALEZ VILLARREAL

AGOSTO, 1978



## INTRODUCCION A LA MATERIA DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

El panorama del desarrollo de los aprovechamientos hidráulicos en México hace ver la ingente necesidad de preparar recursos humanos suficientes y calificados para llevar a cabo el adecuado desarrollo del sector hidráulico a nivel nacional.

En efecto, las metas establecidas por la Comisión del Plan Nacional Hidráulico revelan que es necesario por ejemplo, duplicar el servicio de agua potable, cuadruplicar el servicio de alcantarillado y efectuar una intensa labor en los usos del agua, de control de la contaminación, turismo y control de avenidas. En cuanto a la hidroelectricidad es necesario quintuplicar de aquí al año 2000 la capacidad instalada actual a nivel nacional, lo que también significa un reto para la ingeniería mexicana.

En la tarea de estudiar el desarrollo de los aprovechamientos hidráulicos superficiales de México es de suma utilización la técnica de la simulación hidráulica para establecer cuales son los mejores esquemas de aprovechamiento de los distintos proyectos identificados, tanto a nivel de cada uno de ellos, como en un contexto regional.

Se anexa la descripción general de los programas de computadora que han sido desarrollados para el estudio de los aprovechamientos hidráulicos, especificando en cada caso el diagrama de bloques de los programas principales y subrutinas, la lista de variables y restricciones.

## ANALISIS DE FRECUENCIA

## CONTENIDO

- I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- II SOLUCION
- III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROBLEMA
- IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS  
A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL  
PROCESO
- V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

## CONTENIDO

- I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
  - II SOLUCION
  - III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROBLEMA
  - IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS  
A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL PROCESO
  - V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA
  - VI EJEMPLO DE APLICACION \*
  - VII LISTADO DEL PROGRAMA \*
- ANEXOS

## I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al realizar la construcción de una obra hidráulica, es menes ter conocer, con cierto grado de incertidumbre, las fechas óptimas para el cierre del río en cuestión.

Con el fin de tener el mínimo de problemas en la etapa de construcción y consecuentemente realizarla a un costo menor, es necesario hacer uos de la información hidrológica del lugar. Al asociar probabilidades de ocurrencia a los gastos que se presenten, se puede determinar, con un determinado nivel de riesgo, cuál es la fecha en la cual es mejor empezar los tra bajos de construcción necesarios en el sitio.

Esta información permite elaborar la planeación de la obra desde su comienzo, y considerar las fechas para el cálculo del programa de obras.

## II SOLUCION

Para resolver el problema planteado, se optó por hacer uso de la información hidrológica de un sitio determinado, espe- cíficamente los gastos instantáneos mínimos presentados en cada mes del año.

A la muestra estadística formada con los valores extremos mencionados se le aplicó la ecuación general de Chebyshev que establece:

$$Y_i = \bar{Y} \pm K \sigma_y$$

donde:

$Y_i$  = variable por estimar

$\bar{Y}$  = media aritmética de la muestra

- $\sigma_y$  = desviación estándar de la muestra  
 $K$  = factor de frecuencia

Si la muestra es el conjunto de  $n$  valores correspondientes a los gastos mínimos que se han presentado a la largo de  $n$  años en un mismo mes, y a estos valores les llamamos  $Y_i$ , tenemos:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum Y_i \quad ; \quad \sigma_y = \left( \frac{1}{n-1} \sum (Y_i - \bar{y})^2 \right)^{1/2}$$

La ecuación general de CHOW establece que una variable aleatoria por estimar se puede calcular como la media de la misma más una componente aleatoria que es función de la desviación estándar de la variable original y el factor de frecuencia. El signo más o menos en la ecuación anterior depende del análisis de frecuencia que se haga. Si se quiere hacer el análisis de frecuencia de flujos máximos, el signo es positivo.

Según la distribución de probabilidades, a la que se suponga que el gasto máximo o mínimo se ajuste como variable aleatoria, el factor de frecuencia tiene un valor en función del período de retorno que corresponda al valor del gasto calculado. Si se considera a la distribución es GUMBEL I;

$$K = - \frac{\sqrt{6}}{\gamma} \left( \gamma + L_n L_n \frac{T_r}{T_r - 1} \right)$$

donde:

- $\gamma$  = constante de EULER = 0.5722  
 $T_r$  = período de retorno

Por lo anterior, la ecuación para estimar un gasto correspondiente a un período de retorno determinado, considerando la distribución de GUMBEL I, es:

$$Y_i = \bar{Y} \pm \left( \frac{\sqrt{C}}{\pi} \right) \left[ 0.5722 + L_n L_n \frac{T_r}{T_r - 1} \right]$$

Para realizar el análisis de frecuencia de valores extremos máximos o mínimos, se hizo el programa para computadora digital "GUMBEL"

### III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

En el anexo 1 se muestra el diagrama de bloques del programa.

### IV. LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL PROCESO

<u>TARJETA</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
1	NSERI (NSERI = Número de series a procesar)	1 5
2	ISER (ISER = Tipo de serie a estudiar) (ISER = 1 Valores máximos) (ISER = 2 Valores mínimos)	1 5
3	N (N = Número de datos que componen la muestra en estudio)	1 5
4	(LEC(i), i = 1,20) (LEC(i) = Variable para identificar la muestra en estudio)	20 A4

TARJETACONCEPTOFORMATO

5

 $(X(i), i = 1, N)$ 

8X, 12 F 6.2.

$(X(i) = \text{Valores que componen la muestra})$

V. RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

La única restricción del programa corresponde a las localidades de memoria reservadas. El número máximo posible de elementos que constituyen una muestra es de 200.

VI EJEMPLO DE APLICACION

Como ejemplo de aplicación se realizó el análisis de frecuencia de flujos bajos correspondiente a las observaciones que abajo se listan. El período de retorno y la variable  $Y_i$  estimada también se pueden observar.

<u>OBSERVACIONES</u>	<u>PERIODO DE RETORNO</u>	<u>VARIABLE <math>Y_i</math> ESTIMADA</u>
1.3	22.0	0.7
1.3	11.0	1.0
1.3	7.3	1.2
1.3	5.5	1.4
1.4	4.4	1.5
1.5	3.7	1.6
1.5	3.1	1.7
1.5	2.8	1.7
1.5	2.4	1.8
1.5	2.2	1.9
1.6	2.0	1.9
1.8	1.8	2.0
1.8	1.7	2.1
1.8	1.6	2.1
1.9	1.5	2.2
1.9	1.4	2.2.

<u>OBSERVACIONES</u>	<u>PERIODO DE RETORNO</u>	<u>VARIABLE Y<sub>i</sub> ESTIMADA</u>
2.0	1.3	2.3
2.5	1.2	2.4
2.8	1.2	2.4
3.1	1.1	2.5
3.3	1.0	2.6

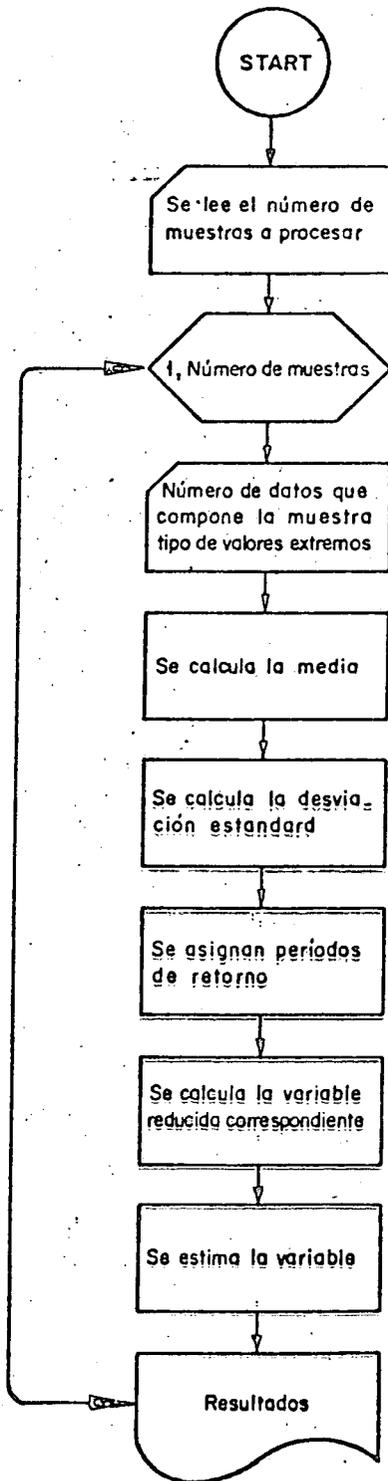
VII LISTADO DEL PROGRAMA

El listado del programa se presenta en el anexo 2

ANEXO 1

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

# DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA



MEMORIA DEL PROGRAMA

MAXGA

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
- II SOLUCION
- III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA
- IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA  
INFORMACION NECESARIA PARA EL PROCESO
- V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
  - II SOLUCION
  - III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA
  - IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL PROCESO
  - V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA
  - VI EJEMPLO DE APLICACION \*
  - VII LISTADO DEL PROGRAMA \*
  - ANEXOS \*
- 

## I. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El problema consiste en determinar el gasto medio que es posible aprovechar de una corriente, cumpliendo con ciertas políticas deficitarias.

## II. SOLUCION

Mediante la solución de la ecuación de continuidad con datos diarios y partiendo de un gasto medio inicial, el programa analiza si el gasto propuesto (inicial) cumple con las restricciones deficitarias impuestas. Las restricciones pueden ser para uno o varios días consecutivos.

Si se cumplen las restricciones impuestas se efectúa una serie de iteraciones hasta llegar a un gasto medio máximo que cumpla con la tolerancia deseada.

Si no se cumple con las restricciones, se disminuye el gasto inicial propuesto hasta lograr que se cumplan las restricciones impuestas y esté dentro de la tolerancia deseada.

Para cada mes se acumulan déficits y derrames que se presentan al hacer el funcionamiento diario.

## III. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

En el anexo 1 se presenta el diagrama de bloques del programa.

## IV. LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL PROCESO

<u>VARIABLE</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
MPR	Número de proyectos a considerar	1 5
NZ(I), I=1,3	Nombre del proyecto en 12 caracteres	3 A 4

<u>VARIABLE</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
NUAN	Número de años a considerar	1 5
IANC	Año inicial	1 5
IAP1	Máximo número de déficits permisibles en un año	1 5
IAP2	Máximo número de déficits permisibles en el período	1 5
NCD	Número de días consecutivos a analizar con déficits	1 5
P(I)	Deficiencia permisible en el día I	F 5.0
ESPI	Tolerancia requerida	F 10.2
CAPT $\phi$	Capacidad total	F 10.2
CAPMU	Capacidad muerta	F 10.2
CAPINC	Capacidad inicial	F 10.2
GEN $T(I,k)$	Q de entrada año I, día K (8 columnas al principio para identificación)	F 6.0

#### V. RESTRICCIONES

Puede trabajar hasta 30 años dependiendo del equipo disponible.

#### VI. EJEMPLO DE APLICACION

En el anexo 2 se muestra la codificación de la información necesaria para el programa. En el anexo 3 se presentan los resultados obtenidos en una corrida de prueba.

## VII LISTADO DEL PROGRAMA

En el anexo 4 se presenta el listado del programa.

ANEXO 1

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

# D I A G R A M A D E B L O Q U E

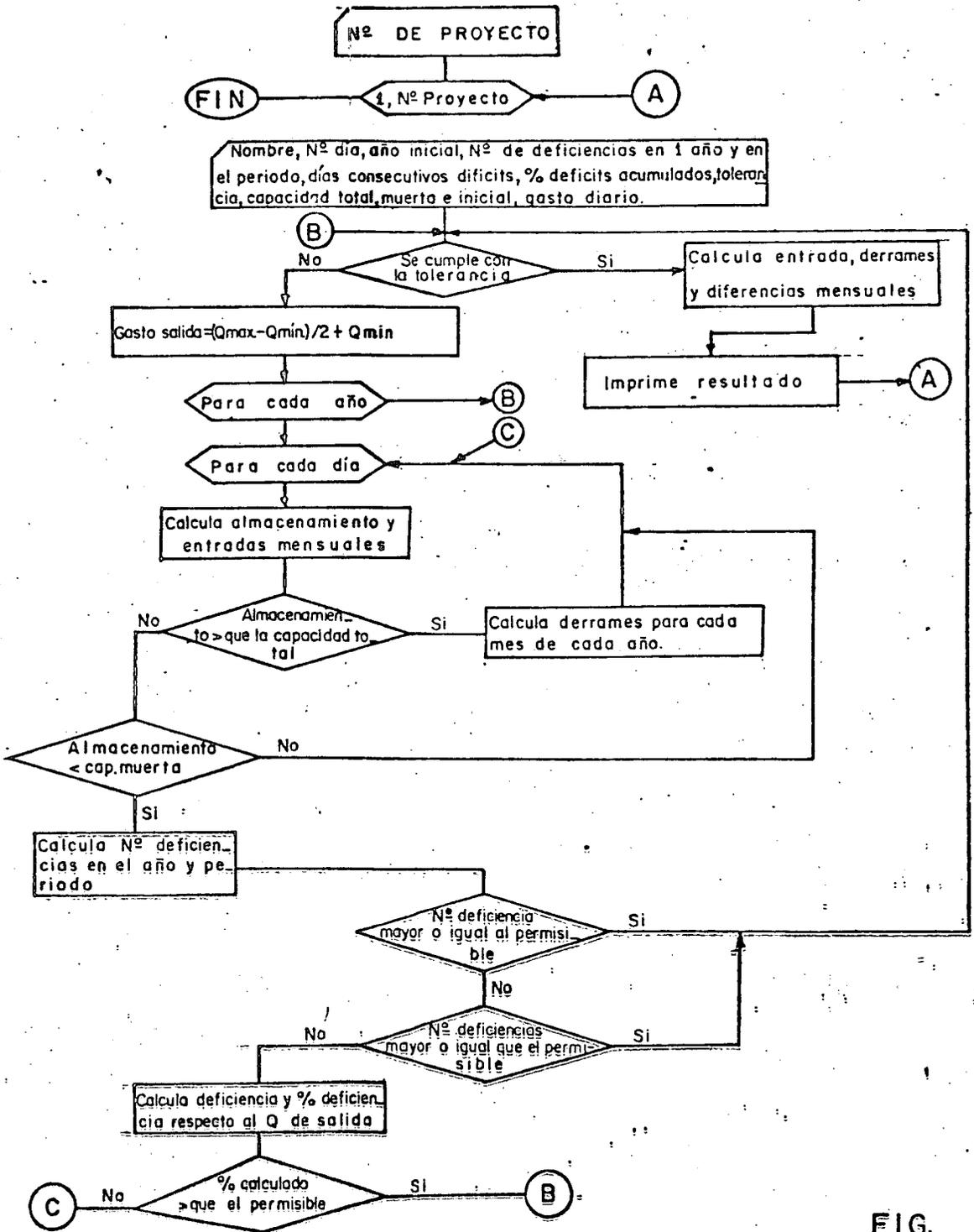


FIG.

MEMORIA DEL PROGRAMA

SISIST

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
- II SOLUCION
- III DIAGRAMA DE BLOQUES
- IV DEFINICION DE VARIABLES Y FORMATOS PARA LA  
LECTURA DE LA INFORMACION REQUERIDA
- V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
  - II SOLUCION
  - III DIAGRAMA DE BLOQUES
  - IV DEFINICION DE VARIABLES Y FORMATOS PARA LA  
LECTURA DE LA INFORMACION REQUERIDA  
MEMORIA DEL PROGRAMA
  - V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA  
SISIST
  - VI EJEMPLO DE APLICACION \*
  - VII LISTADO DEL PROGRAMA \*
- ANEXOS \*

## I DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Para juzgar la bondad de una política de extracción de agua de un sistema de vasos, es conveniente hacer la simulación del funcionamiento de los vasos en un período de tiempo suficientemente largo. Dado que no se conocen las condiciones hidrológicas en el futuro, se puede hacer la simulación con los datos del registro histórico y considerar que las dichas condiciones son persistentes en el tiempo.

El registro histórico puede no ser representativo de las condiciones futuras, sobre todo si no se tiene un registro grande. Otra forma de resolver el problema es hacer la simulación con un registro sintético que puede ser tan grande como se quiera; sin embargo, cuando se trata de sistemas con varios vasos, como son el sistema Necaxa o el sistema Miguel Alemán, la generación de registros sintéticos no se puede hacer en forma independiente para cada vaso y por consiguiente la cantidad de hipótesis que se tienen que hacer, le resta confiabilidad a la predicción.

## II SOLUCION

Para hacer la simulación de los sistemas por analizar (Necaxa, Miguel Alemán, Balsas y Tecolutla,) se preparó un programa de computadora. Este programa se hizo en forma modular, de tal forma que con pequeños cambios se pueda utilizar para cada uno de los sistemas mencionados. Por otra parte, el programa es capaz de considerar dos demandas de agua en cada aprovechamiento hidráulico, la demanda de mayor prioridad se considera la de agua potable, la segunda demanda se refiere a la generación de energía eléctrica, si el vaso actualmente sirve a una planta hidroeléctrica. De esta manera, el mecanismo del programa trata de satisfacer la demanda de mayor prioridad y posteriormente, si tiene agua el vaso, trata de satisfacer la segunda demanda.

Los resultados del programa de computadora son los estados de las variables del funcionamiento de los vasos en un cierto tiempo.

#### CONTENIDO

El intervalo de tiempo que se considera en el programa es de un mes, así, con datos conocidos como el almacenamiento inicial de los vasos, los volúmenes de agua aportados a los mismos y las demandas de agua, los resultados del programa para cada mes y para cada vaso son: almacenamiento final de los vasos, déficit en las demandas, derrames, volúmenes evaporados; y si el vaso sirve a una planta hidroeléctrica, la energía entregada, la potencia disponible, etc.

Además de imprimirse los resultados mensuales, al finalizar cada año se hace un resumen anual de cada variable, en donde se pueden anotar los valores promedios de éstas o bien una suma de las mismas.

#### III DIAGRAMA DE BLOQUES DE APLICACIÓN

El programa consta de un principal, cinco subrutinas y dos funciones.

En el programa principal se leen los datos del sistema, se inicializan las variables, se forman los ciclos de tiempo para llamar en cada caso a las subrutinas; finalmente, se imprimen los resultados. El diagrama de bloques del programa principal se observa en el anexo 1.

Las cinco subrutinas del programa son las siguientes:

a) PCLITI

Se establecen los volúmenes mensuales de demanda para agua potable y los gastos máximos de las tomas.

b) GENERA

Cálculo del volumen turbinado y la energía que se puede entregar de acuerdo con los niveles del vaso.

c) ENTRA

Se calculan los aportes por cuenca propia a cada

vaso del sistema

d) SIMUL

Se hace el arreglo físico de los vasos que componen el sistema y se determinan las conexiones existentes entre vasos, ríos y conducciones artificiales. El diagrama de bloques que se muestra en el anexo 2 re presenta el mecanismo de la subrutina SIMUL para un vaso sólomente, ya que el procedimiento es similar para todo un sistema.

e) VASO

Se establece la ecuación de continuidad para cada vaso con los datos que le alimenta la subrutina SIMUL y determina el valor de cada variable como volumen derramado, volumen evaporado, déficits en las demandas, etc. El anexo 3 muestra el diagrama de bloques de la subrutina VASO.

Las funciones del programa son las siguientes:

a) Función ARPRO

Cálculo del área del espejo de agua dado el almacenamiento en el vaso.

b) Función FCAR

Cálculo de la carga hidráulica en función del almacenamiento del vaso y de la elevación del desfogue.

Los cambios que se deben hacer al programa para analizar cada uno de los sistemas son, además de los datos, las subrutinas PCLITI, SIMUL y ENTRA, y las funciones ARPRO y FCAR.

IV DEFINICION DE VARIABLES Y FORMATOS PARA LA LECTURA DE  
 Los resultados del programa de computadora son los estados  
 de LA INFORMACION REQUERIDA.  
 de las variables del funcionamiento de los vasos en un ciclo  
 de tiempo.

No. de Tarjetas	Variable	Significado	Formato
1	TIT(K)	Nombre del sistema	20 A 4
1	NVASOS	Número de vasos del sistema	
	NUANOS	Número de años del análisis	
	IANC	Año inicial del análisis	
	MHIST	Indicador =1 si se consideran evaporaciones medias; 0 si son históricas.	
	NUALT	Indicador para tomar en cuenta varias alternativas.	
	NEST	Número de estaciones aforo	15 I 5
1	IPLAN(J)	Indicador para cada vaso (J) 0 si no tiene planta de generación	
		1 si tiene planta	15 I 5
una para cada vaso	CAPTOT(J)	Capacidad total del vaso J (Al NAVO) en $m^3 \times 10^6$	
	CAPMUE(J)	Capacidad muerta (Al NAMIN) en $m^3 \times 10^6$	
	CAPRES(J)	Capacidad de reserva del vaso, abajo de la cual sólo se puede satisfacer la demanda de mayor prioridad	
	ALM(1;J)	Almacenamiento del vaso J al inicio del análisis	8 F 10.0
una para cada vaso	DEMGEN(J)	Demanda media mensual de energía de la planta l (se lee sólo si IPLAN (J) = 1)	12 F6.0
una para cada vaso	POTINS(J)	Potencia instalada en MW	
	PMIN(J)	Carga mínima de operación en m.	
	PDIF(J)	Carga de diseño en m.	
	PMAX(J)	Carga máxima de operación en m.	
	EFIS(J)	Eficiencia total del sistema	8 F10.0

<u>No. de Tarjetas</u>	<u>Variable</u>	<u>Significado</u>	<u>Formato</u>
1	EVAPI(k,L)	Lámina de evaporación neta en el mes L (si WHIST = 0) en el vaso k	12 F 6.0
una estación año	QEST(K,J)	Volumen escurrido en la estación K en el mes j.	12 F6.0
una vaso año	CEVAP(k,J)	Lámina de evaporación neta en el vaso k, en el mes J (si WHIST = 1)	12 F6.0

#### V. RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

El programa es aplicable a cualquier sistema de vasos, en este caso se ha restringido a 9 vasos para no ocupar demasiada memoria, sin embargo, se pueden aumentar con algunas modificaciones.

En cada corrida del programa para un sistema diferente, se debe modificar las subrutinas POLITI y SIMUL; las demás subrutinas no se modifican.

#### VI. EJEMPLO DE APLICACION

El anexo 4 muestra un ejemplo de aplicación. En este caso se trata del sistema Chaucingo-Garzas para el cual se muestran algunos de los resultados arrojados por el programa.

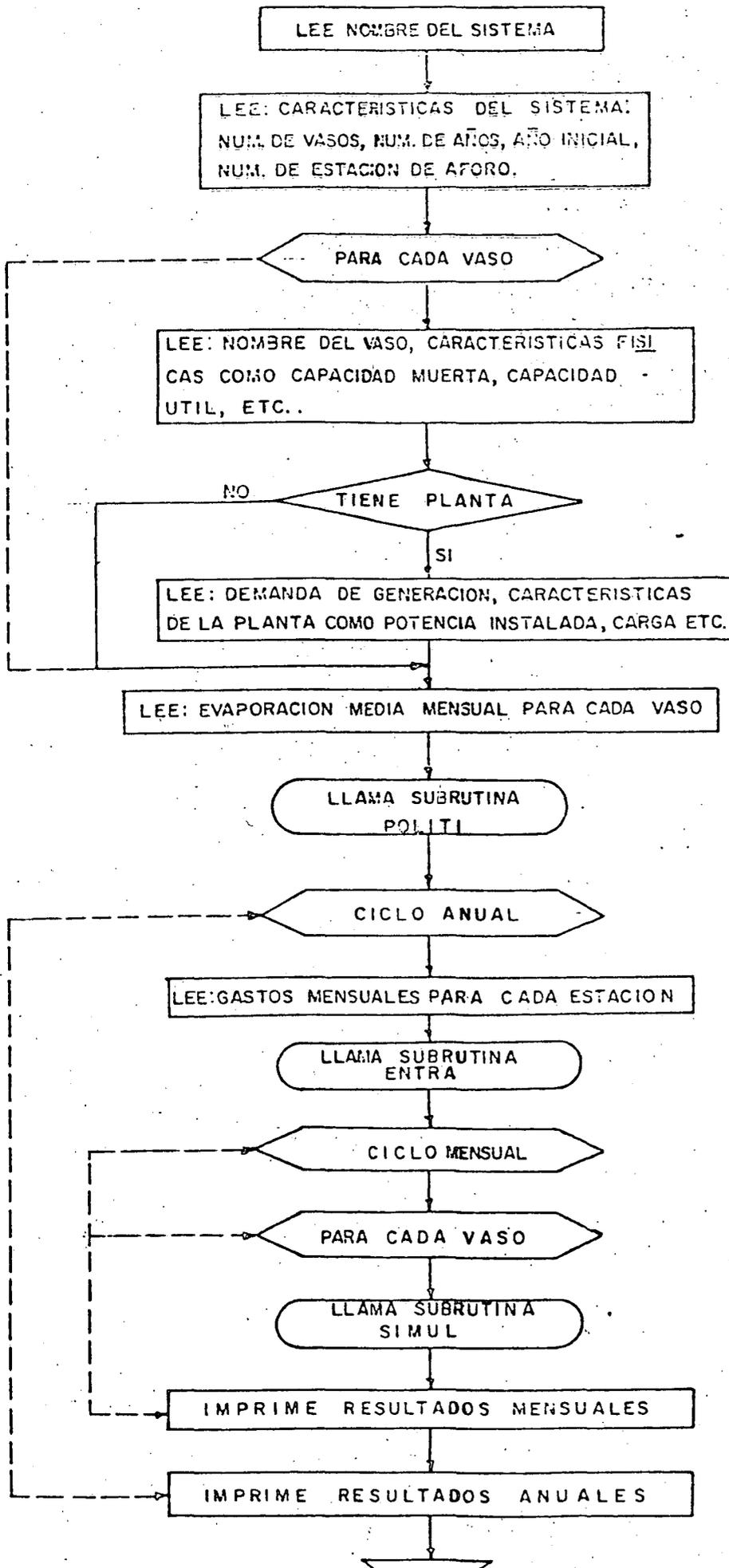
En la figura 1 se muestra en forma esquemática el sistema Chaucingo-Garzas por analizar.

En este caso se han supuesto tres alternativas, la primera consiste en considerar sólo el vaso de Las Garzas con una demanda de 21 m<sup>3</sup>/seg.; la segunda alternativa toma en cuenta sólo el vaso de Chaucingo con una demanda de 21 m<sup>3</sup>/seg.; finalmente, la tercera alternativa toma en cuenta los dos vasos

ANEXO 1

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

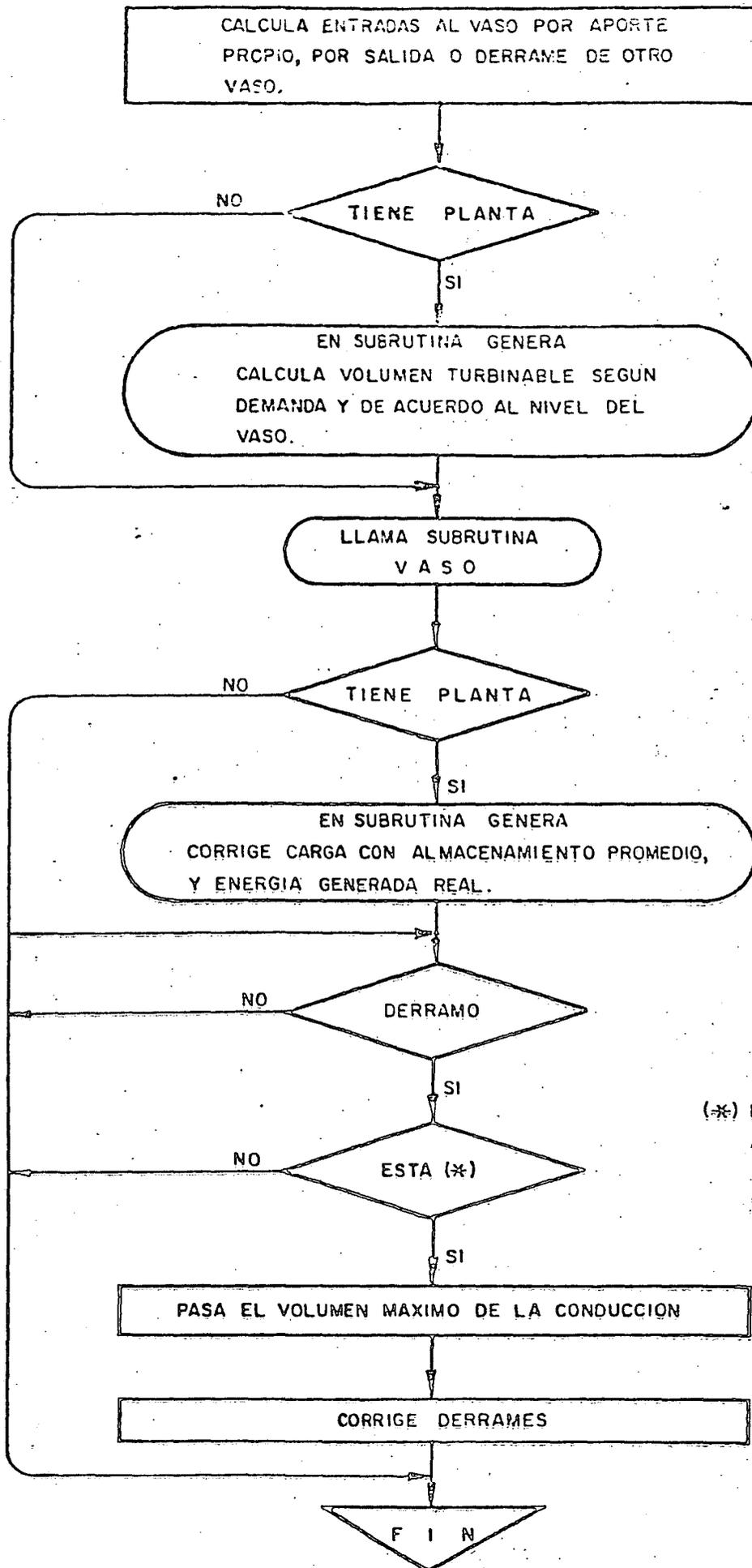
# DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA PRINCIPAL



ANEXO 2

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA SUBROUTINA SIMUL

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA SUBROUTINA SIMUL



(\*) ESTA PASANDO UN VOLUMEN MENO AL VOLUMEN MAXIMO DE LA TOMA.

FIG.

ANEXO 3

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA SUBROUTINA VASO.

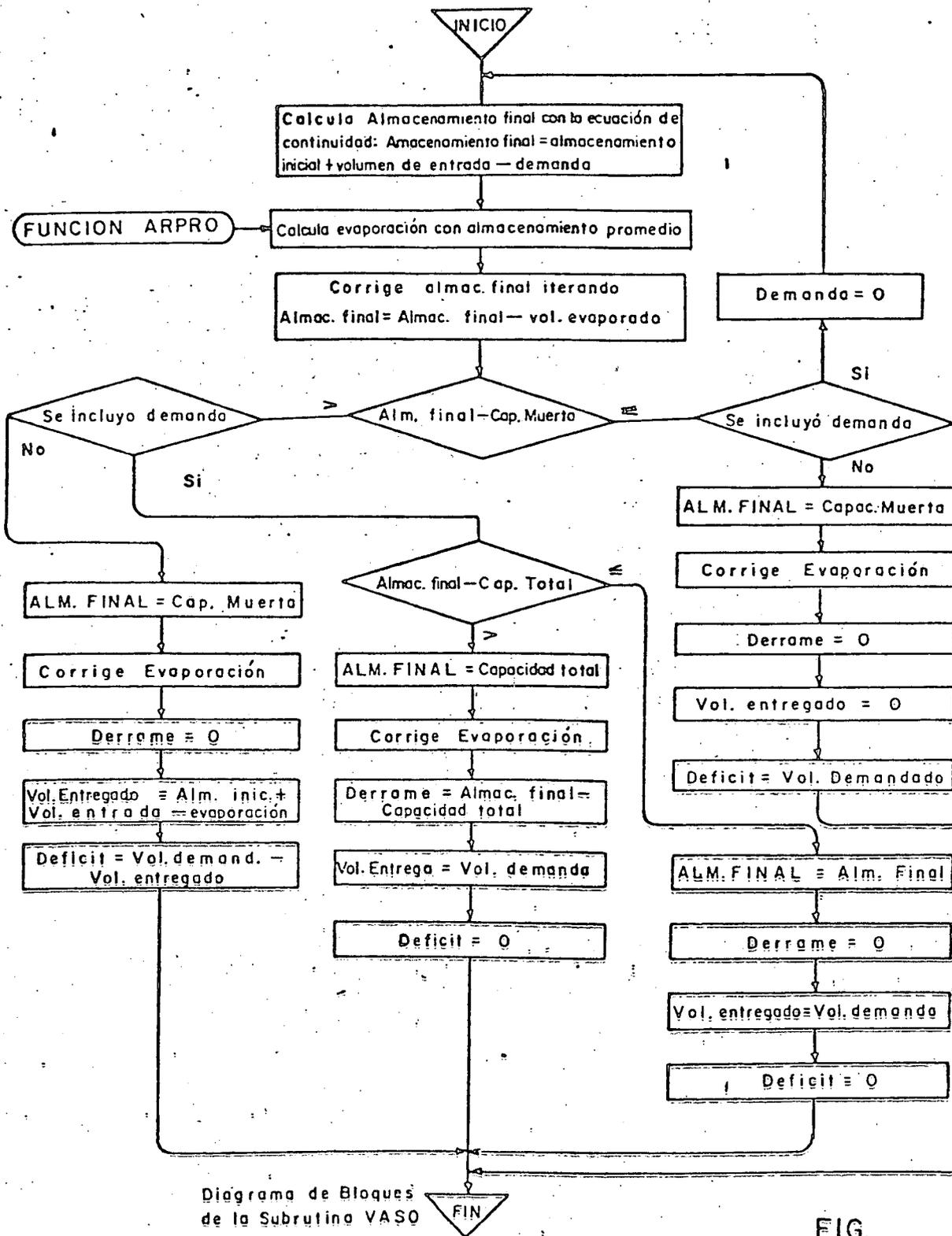


FIG.

MEMORIA DEL PROGRAMA

FUNCI

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
- II SOLUCION
- III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA  
PRINCIPAL Y DE LA SUBROUTINA AIZ3G
- IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS  
A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL  
PROCESO
- V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
  - II SOLUCION
  - III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA PRINCIPAL Y DE LA SUBROUTINA AIZ3G
  - IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA INFORMACION NECESARIA PARA EL PROCESO
  - V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA
  - VI EJEMPLO DE APLICACION \*
  - VII LISTADO DEL PROGRAMA \*
- ANEXOS \*

## I DESCRIPCION DEL PROBLEMA

En general se pueden distinguir dos clases de problemas relativos a la cuantificación del volumen aprovechable anual que una presa de almacenamiento es capaz de suministrar

El primero es el correspondiente a revisar el volumen de agua que un almacenamiento existente puede surtir, la revisión puede ser hecha porque una o varias de las variables, de las cuales es función el volumen anual aprovechable, es modificada (por ejemplo, la política de operación de la presa).

El segundo es el problema de diseño, es decir, se requiere saber para un proyecto de aprovechamiento hidráulico cuál es la capacidad total indicada para poder hacer uso del volumen anual aprovechable correspondiente.

En cualquiera de los dos casos es necesario tener una herramienta de cálculo, mediante la cual se pueda conocer en forma rápida el volumen del cual se puede disponer anualmente para satisfacer las demandas existentes.

## II SOLUCION

Con el fin de tener el instrumento de análisis antes citado, se procedió a elaborar el programa para computadora digital cuyo listado se encuentra anexo.

Básicamente, el objetivo del programa es calcular para un volumen anual aprovechable supuesto, el funcionamiento del vaso revisando y calculando las deficiencias que mensualmente se presenten con respecto a las demandas requeridas. Si las deficiencias que se presenten exceden en número o valor a una política deficitaria previamente supuesta, el volumen anual aprovechable supuesto se rectifica haciéndole igual a la mitad del anterior y se reanuda otra vez el cálculo. El proceso se repite hasta encontrar el máximo volumen aprovechable sujeto a la política deficitaria propuesta.

## III DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

En el anexo 1 se muestra el diagrama de bloques del programa y de la subrutina AIZOC cuyo objetivo es hacer el funcionamiento mensual de vaso.

IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA INFORMACION  
NECESARIA PARA EL PROCESO.

A continuación se listan las variables utilizadas en el programa, estipulando su significado, y cuando son variables a leer se dá el formato correspondiente.

<u>VARIABLE</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
NOP	Número de proyectos a estudiar	1 5
(T(i), i=1, 12)	Tres primeras siglas de cada mes	12 A 3
(PD1(i), i=1, 12)	Ordenadas de la curva de distribución mensual de la demanda en el año. La suma de las 12 es igual a 1.0	12 F 6.0
UNIDA	Unidad en que se van a leer los volúmenes de entrada al vaso (ej. UNIDAD = 1,000,000 si se van a leer en millones de m <sup>3</sup> )	6 F10.0
DEFA1, DEFA2, DEFA3, SDEMI, SDFM2, SDFM3, DFLIM		
DEFA1	Deficiencia máxima permisible en un mes cualquiera en porcentaje	F 6.0
DEFA2	Deficiencia máxima permisible en dos meses consecutivos en %	F 6.0
DEFA3	Deficiencia máxima permisible en tres meses consecutivos en %	F 6.0
SDEMI	Porcentaje de la demanda que realmente fue suministrada en el mes 1	F 6.0
SDFM2	Porcentaje acumulado de la demanda que realmente fue suministrada en el mes 2	F 6.0

I DESCRIPCION DEL PROGRAMA

<u>VARIABLE</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
SDFM3	Porcentaje acumulado de la demanda que realmente fue suministrada en el mes 3	F 6.0
DFLIM	Deficiencia a partir de la cual se toma como tal, en unidades según UNIDA	F 6.0
INDEF	Número de deficiencias permitidas en el período	1 5
A1, A2, A3		
A1	Término independiente en la ecuación para estimar el área en el embalse	F 10.0
A2	Coefficiente término primer grado en la ecuación para estimar área del embalse	F 10.0
A3	Coefficiente término de segundo grado en la ecuación para estimar el área del embalse	F 10.0
NUAN, MESI, IANZI, NUALT, ISS1, NDEMI		
NUAN	Número de años del período en estudio	1 5
MESI	Primer mes a estudiar	1 5
IANZI	Año inicial del período en estudio	1 5
NUALT	Número de capacidades a estudiar en el proyecto	1 5
ISS1	Indice de impresión (ISS1 = 0 imprime resultados mensuales ISS1 = 1 imprime resumen anual)	1 5

<u>VARIABLE</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
NDEM	Número de demandas a considerar	1 5
CEVAP(1, J, i)	Evaporación media en el mes J (J = 1, 12)	8X, 12 F 6.0
TIT	Título que se desee poner	20 A 4
CENT (1, J, K)	Volumenes de entrada al vaso en el mes J, año K (J = 1,12)	8X, 12 F 6.1
NPRI	Número de presas aguas arriba de alguna considerada, a la cual le pueden llegar derrames de las demás	1 5
CAPMUE, CAPIN		
CAPMUE	Capacidad muerta del vaso	F 10.0
CAPIN	Capacidad inicial considerada	F 10.0
INPRI(JKL)	Prioridad considerada en la presa JKL	16 1 5
CAPUC	Capacidad útil de la presa en la alternativa NUALT	F 10.0

## V RESTRICCIONES DEL PROGRAMA

Sólo admite una demanda prioritaria. Admite hasta 12 proyectos con un período hasta de 40 años.

## VI EJEMPLO DE APLICACION

En el anexo 2 se muestra la codificación de los datos de un ejemplo de aplicación. Los resultados que arroja el programa se muestran en el anexo 3.

## VII LISTADO DEL PROGRAMA

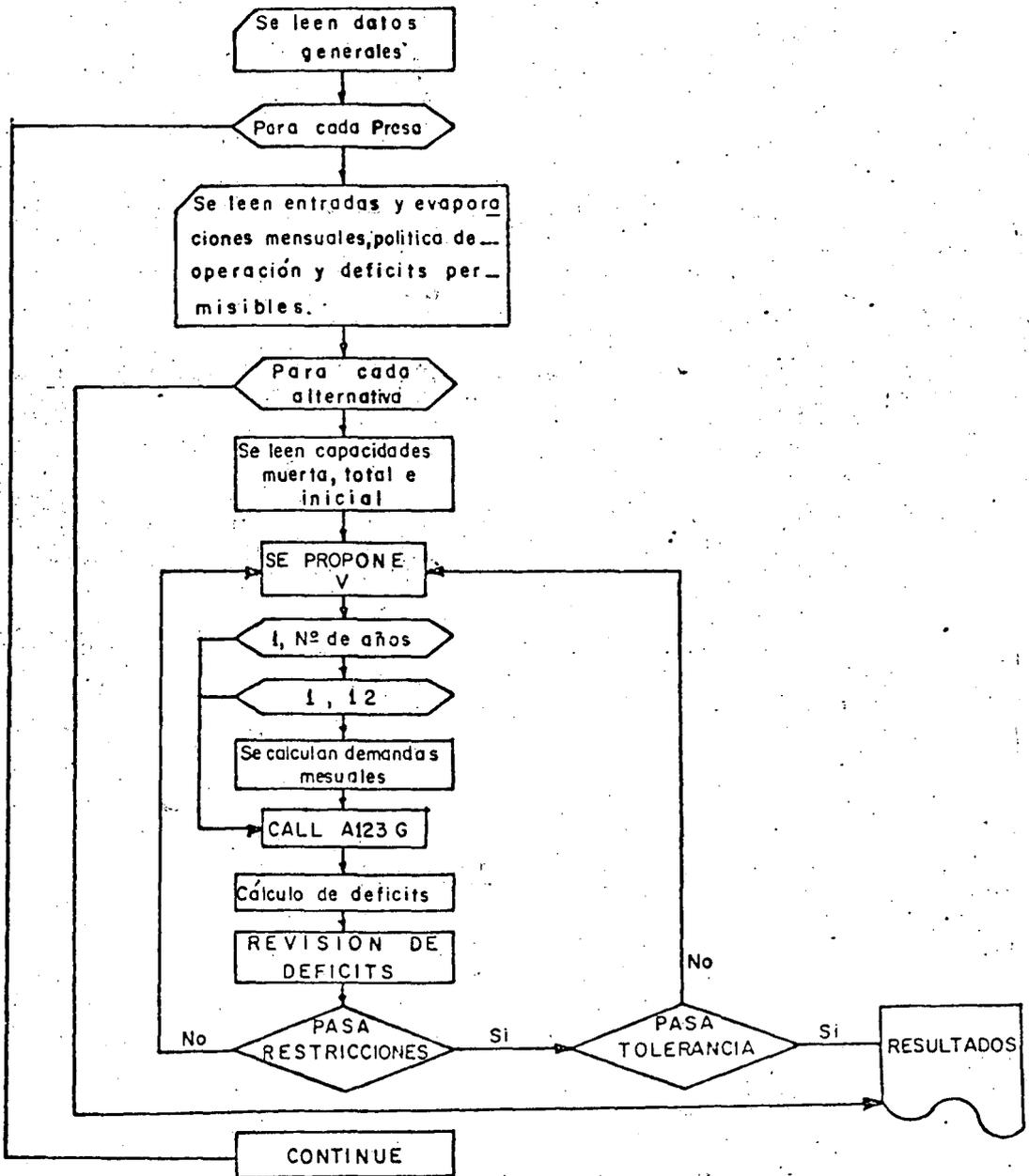
El anexo 4 muestra el listado del programa

ANEXO 1

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA

III.- A CONTINUACION SE PRESENTAN LOS DIAGRAMAS DE BLOQUES DEL PROGRAMA PRINCIPAL Y LA SUBROUTINA "A123 G"

III.-1.- PROGRAMA PRINCIPAL



# SUBROUTINA "AIZ 3 G"

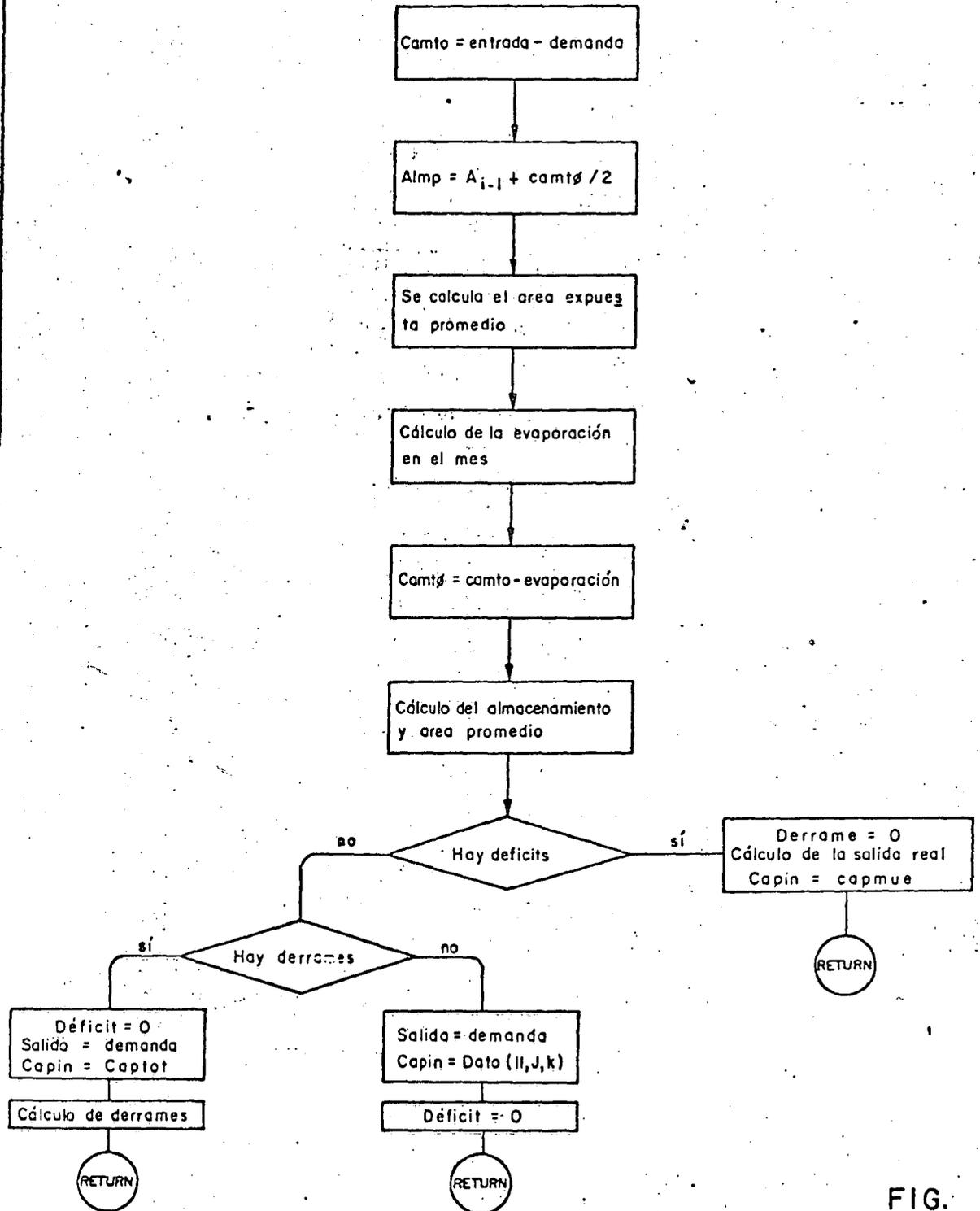


FIG.

MEMORIA DEL PROGRAMA

FUN01

## CONTENIDO

- I DESCRIPCION DEL PROBLEMA
- II SOLUCION
- III DIAGRAMA DE BLOQUES
- IV LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS  
RELATIVOS A LA INFORMACION  
NECESARIA
- V RESTRICCIONES

## CONTENIDO.-

- I.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA
- II.- SOLUCION
- III.- DIAGRAMA DE BLOQUES.
- IV.- LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVOS A LA INFORMACION NECESARIA.
- V.- RESTRICCIONES.
- VI.- EJEMPLO DE APLICACION. \*
- VII.- LISTADO DEL PROGRAMA \*

I.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA.-

El problema consiste en estudiar si es posible derivar, mediante una presa con o sin capacidad de almacenamiento, un gasto determinado pudiéndose tener derrames o déficits. Se trata pues, de un problema de revisión en el que conocidos los gastos diarios en una corriente se analiza si el gasto que se quiere derivar ha sido determinado correctamente desde el punto de vista hidráulico.

II.- SOLUCION.

El problema se resuelve efectuando el funcionamiento diario de la derivadora para un período determinado de años. El funcionamiento consiste en resolver la ecuación de continuidad para lo cual se ha elaborado un programa para computadora digital que en términos generales consiste en lo siguiente:

Para cada derivadora que se deseé analizar, el programa lee: el número de años a analizar, el nombre, la capacidad máxima, la capacidad mínima, la capacidad inicial, el gasto propuesto, el año inicial y los gastos diarios para cada año. Con la información anterior, se resuelve la siguiente ecuación:

$$\text{ALMACENAMIENTO DIARIO} = \text{CAPACIDAD INICIAL} + \text{GASTO DIARIO} - \text{GASTO PROPUESTO.}$$

Calculado el almacenamiento diario, se compara con la capacidad máxima de la derivadora pudiendo suceder lo siguiente:

Si es mayor, se calculan y acumulan los derrames para cada año, hace la capacidad inicial igual a la capacidad máxima y en este caso es posible derivar el gasto propuesto.

Si es menor, lo compara con la capacidad mínima y si el almacenamiento calculado resulta menor, se calculan y acumulan las defi-

ciencias para cada mes de cada año. Se calcula y acumulan también para cada mes de cada año, los gastos que pueden ser derivados; - se contabiliza el número de déficits que se presentan en cada mes de cada año y se hace la capacidad inicial igual a la capacidad mínima. Si el almacenamiento es mayor que la capacidad mínima, se hace la capacidad inicial igual al almacenamiento y en este caso es posible derivar el gasto propuesto.

Finalmente, se calculan las entradas, salidas, derrames, deficiencias y número de deficiencias anuales.

IV.- LISTA DE VARIABLES Y FORMATOS RELATIVA A LA INFORMACION NECESARIA.

<u>VARIABLES</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>FORMATO</u>
NPR	NUMERO DE PROYECTOS CONSIDERADOS	I 5
NUAN(I)	NUMERO DE AÑOS PARA EL PROYECTO I	I 5 (para cada proyecto I).
INOM(I)	NOMBRE DEL PROYECTO (I=1,4 palabras)	4 A 4
CAPMAX	CAPACIDAD MAXIMA (Millones de m <sup>3</sup> )	F 10.2
CAPMIN	CAPACIDAD MINIMA (Millones de m <sup>3</sup> )	F 10.2
CINI	CAPACIDAD INICIAL (Millones de m <sup>3</sup> )	F 10.2
QSAL	GASTO PROPUESTO (en miles de m <sup>3</sup> al día)	F 10.2
IANI	AÑO INICIAL CONSIDERADO	I
QENT (K)	GASTO DE ENTRADA PARA EL DIA K (8 columnas para identificación y 12 valores en cada tarjeta).	8X, 12 F 6.0

V.- RESTRICCIONES.-

El programa se hizo para que admita 10 proyectos con 30 años de registros cada uno. Esto puede ser modificado si así se desea y se cuenta con el equipo adecuado.

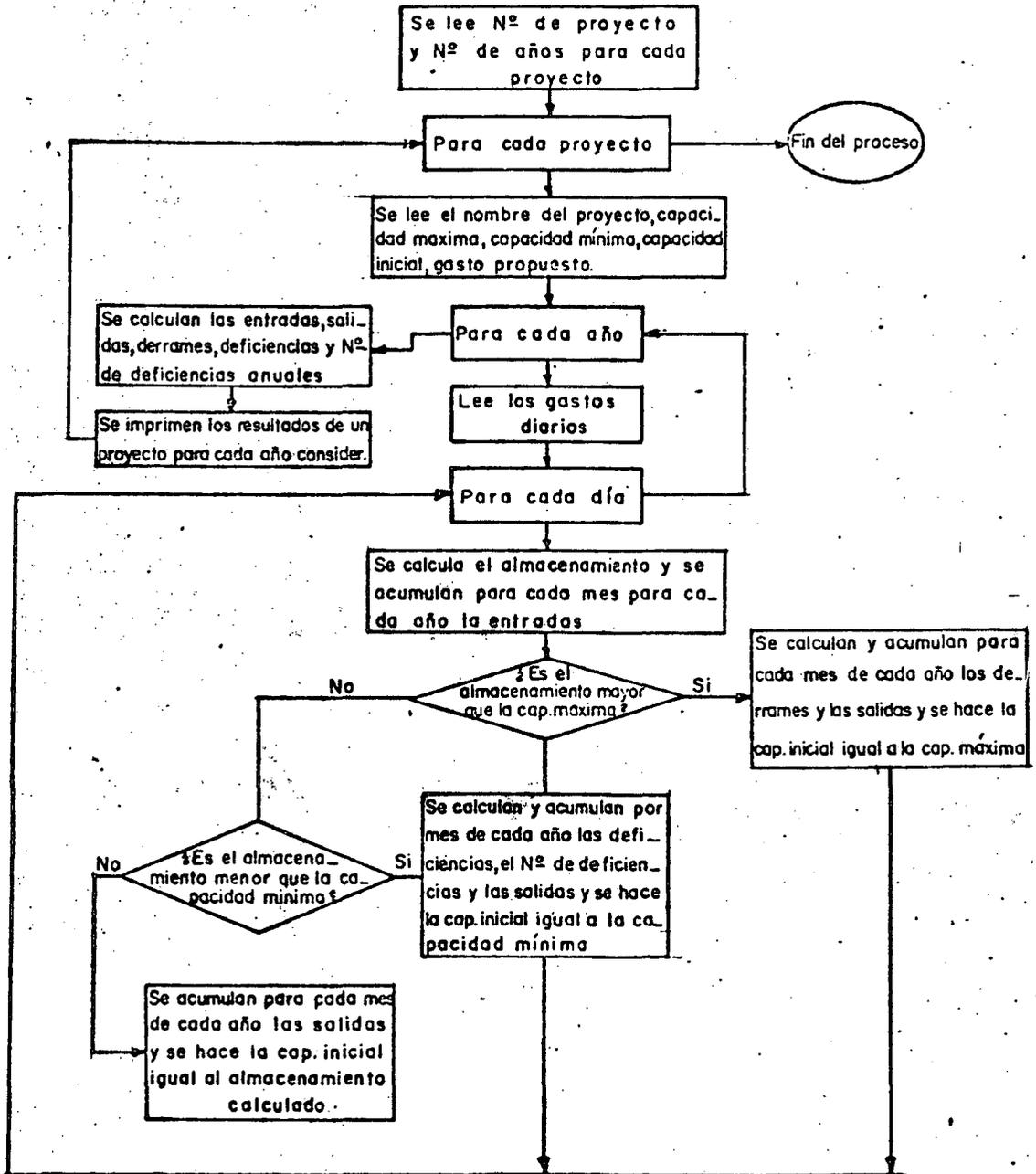
VI.- EJEMPLO DE APLICACION.

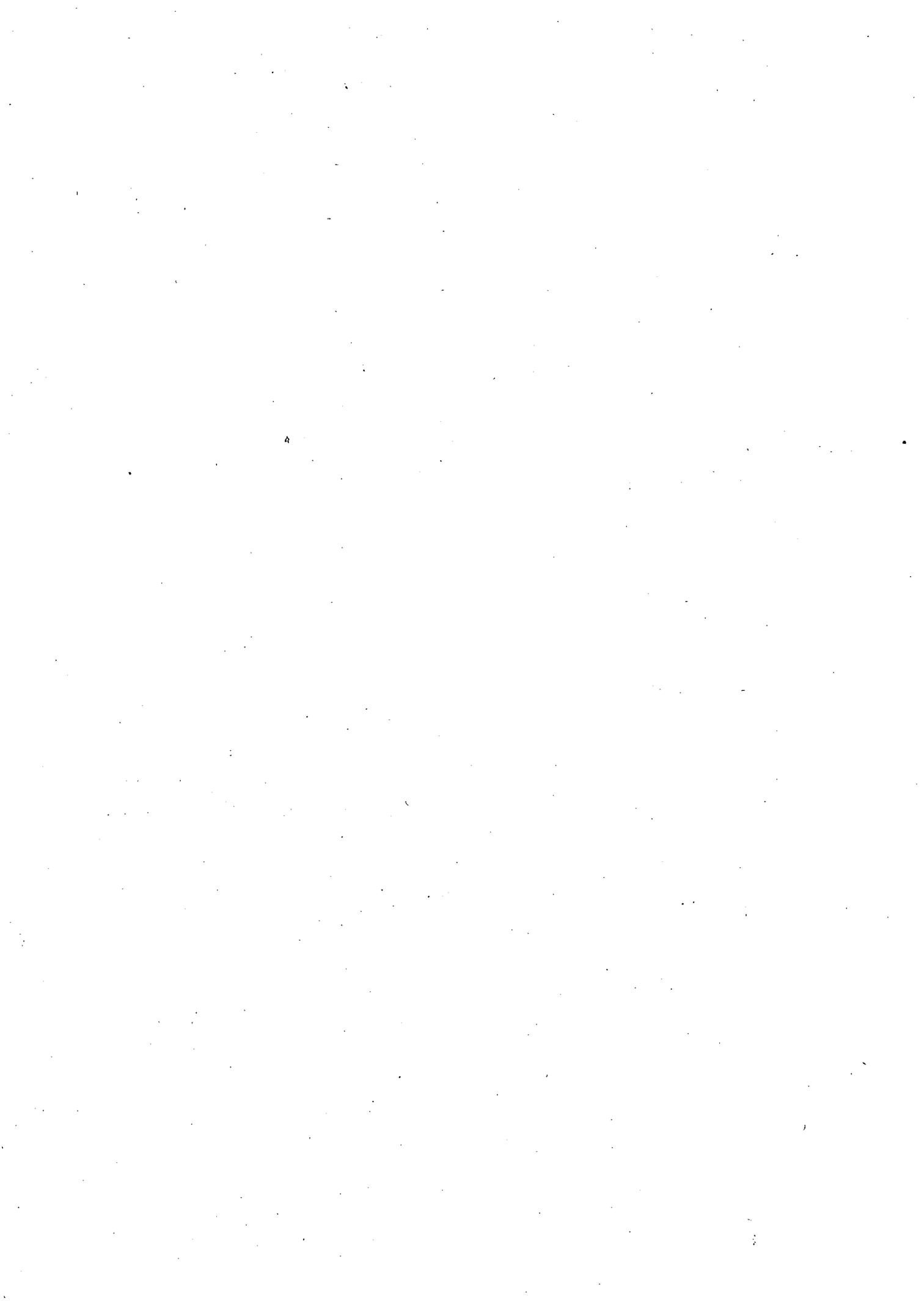
A continuación se muestra la forma en que se debe codificar la información para cada uno de los proyectos considerados. El ejemplo, es hipotético y muestra la información correspondiente a un proyecto para 2 años de registro; así como, los resultados obtenidos mediante este programa para dos años.

VII.- Se anexa al final el listado del programa.

ANEXO 1

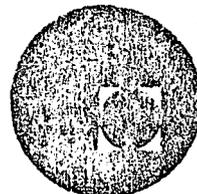
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA







centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam

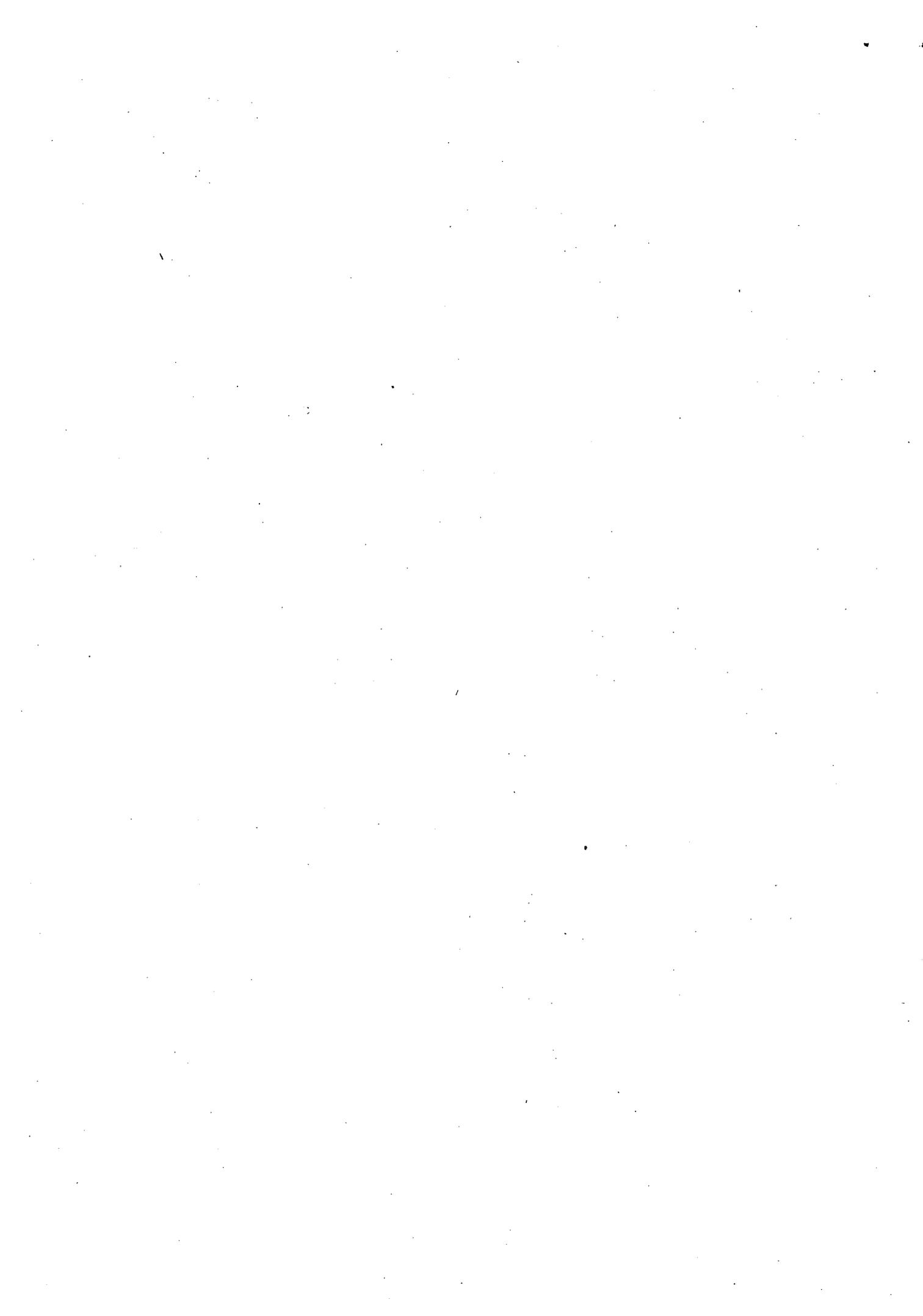


HIDROLOGIA SUPERFICIAL

INTRODUCCION A LOS APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

ING. FERNANDO AGUILAR AMILPA

SEPTIEMBRE, 1978



## INTRODUCCION A LOS APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

### 1.- CONSIDERACIONES GENERALES.

El desarrollo de los aprovechamientos hidráulicos es solamente una parte del desarrollo económico general de un país. Normalmente, el diseño de un aprovechamiento hidráulico se presenta -- cuando existe una necesidad, por parte de la comunidad, de aprovechar o controlar los escurrimientos en un río o cuerpo de agua cercano a su establecimiento; ocasionalmente la escasez de recursos de agua en una zona relativamente cercana, les impondrá la necesidad de buscar y aprovechar fuentes lejanas de agua.

Las necesidades a satisfacer y los beneficios socio-económicos que se obtengan de las obras construídas, serán los factores determinantes en el diseño de un aprovechamiento hidráulico.

Maass (1) explica en cuatro pasos el desarrollo que debe seguirse en el diseño de un aprovechamiento hidráulico :

#### a) Identificación de objetivos.

Aunque parece evidente, es necesario establecer en primera instancia cuales son los objetivos de una obra proyectada, ya que en algunas ocasiones este aspecto es tomado muy superficialmente por el ingeniero.

Un primer objetivo, y posiblemente el más general, es proporcionar el bienestar a la comunidad. Sin embargo, este objetivo se puede lograr de muchas maneras y no es necesariamente a través de una obra hidráulica que se va a satisfacer plenamente este ob-

jetivo. De esta manera, es necesario seguir un proceso para identificar de lo general a lo particular los objetivos de un aprovechamiento hidráulico.

b) Traslación de los objetivos a criterios de diseño.

La finalidad de este paso es la de establecer las condiciones de frontera del diseño, es decir, establecer las metas que permiten llegar a los objetivos y las restricciones que impone el aprovechamiento físico o de otra índole. Las siguientes preguntas que uno podría formularse <sup>P113</sup> ilustrar este aspecto.

- ¿ Cuanta agua se necesita ? (meta)
- ¿ Cuanta agua puede esperarse ? (restricción)
- ¿ Quién puede usar el agua ? (restricción)
- ¿ Que clase de agua es ? (restricción)

La respuesta a esta y otras preguntas semejantes nos aproximan a ha la una primera idea del tipo de aprovechamiento que será necesario desarrollar para satisfacer los objetivos establecidos (presas de almacenamiento o derivación, pozos, conducciones, etc.)

c) Utilización de los criterios de diseño en la formulación de designos específicos.

Una vez establecidas las restricciones del diseño, se procede a analizar las diferentes alternativas que nos permitan conseguir los objetivos deseados.

d) Evaluación de alternativas.

Los resultados hasta el paso anterior permiten en forma individual el logro de un propósito; sin embargo, es necesario en -

contrar la alternativa que conduzca al resultado óptimo a través de la evaluación de las consecuencias que cada una de las alternativas lleva consigo (costo, beneficio, afectaciones, implicaciones, sociales, etc). Esto quiere decir que la solución del problema de los aprovechamientos hidráulicos no es determinista, ya que siempre existirá, en mayor o menor escala un grado de incertidumbre acerca de la posibilidad de que los factores por estudiar se comporten tal y como han sido planeados y por las consideraciones simplificadoras impuestas al problema para facilitar la matemática del mismo.

## 2.- METODOS PARA DETERMINACION DE LA CAPACIDAD UTIL DE UN VASO DE ALMACENAMIENTO.

Dado que la mayor parte de la inversión necesaria en el diseño de un sistema de aprovechamientos hidráulicos es absorbido por el costo de las estructuras, la función de producción, (definida en economía como aquella actividad dirigida hacia la transformación de un cierto recurso en una fuente de producción o consumo), puede separarse en dos partes: la relación entre los recursos aprovechables y las estructuras resultantes para el logro de dicho fin, y la relación entre las estructuras y las salidas utilizables. Estas dos partes se unen al definir como propósito de un vaso de almacenamiento el de un medio de regulación; es decir, la conversión de una cierta entrada de agua en la salida regida por las necesidades de la comunidad.

El volumen almacenado puede extraerse anualmente de acuerdo a una ley de demanda, comúnmente llamada "política de operación del sistema". La relación entre la capacidad del vaso y su rendimiento (operación) es, claramente, uno de los ingredientes más importantes de la función de producción. Esta relación depende, de una manera más o menos complicada, de los volúmenes de entrada y salida. En un extremo, si la trayectoria estacional de los volúmenes de entrada y aquella de la demanda son las mismas y si la región es lo suficientemente lluviosa, puede obtenerse un completo uso del agua sin necesidad de más almacenamiento que el necesario para lograr <sup>(por ejemplo)</sup> la carga adecuada para la generación de energía. En el otro extremo, si entradas y salidas están completamente fuera de fase, la extracción utilizada estará en función de la capacidad del vaso. Naturalmente, los casos intermedios son los más comunes.

Por lo anterior puede observarse que el logro de una estructura de tamaño adecuado y la garantía dentro de un riesgo aceptable de falla, de su buen funcionamiento dependerá por una parte, del uso que se haga de los datos disponibles y por otra, de la visión que se tenga del posible funcionamiento de la solución propuesta.

A) METODOS TRADICIONALES.

En términos generales, los métodos tradicionales para el análisis de un vaso de almacenamiento consisten en la recopilación-

necesaria para el análisis y la preparación de un plan tentativo, que satisfaga los objetivos deseados en forma óptima. En estos métodos el término "óptima" indica la mejor de las alternativas analizadas.

De entre todos estos métodos, el propuesto por Rippl es el más comúnmente usado para establecer la relación VOLUMENES DE ENTRADA - VOLUMENES EXTRAIDOS - CAPACIDAD DEL VASO y está basado en el diagrama de curva masa. Existen otros que son usados con cierta frecuencia, pero son variaciones al método de Rippl y sus diferencias no modifican las hipótesis fundamentales.

La primera hipótesis es la de suponer que tanto los volúmenes escurridos como los volúmenes extraídos son funciones conocidas del tiempo. Se establece el nivel mínimo de almacenamiento de tal manera que el nivel no bajará de ese mínimo durante el período en consideración. Las primeras fallas que pueden apreciarse son las siguientes :

1.- El análisis está basado únicamente en el registro histórico de los escurrimientos. Además presupone que, durante la vida útil de la obra, el registro se repetirá cíclicamente.

2.- De la suposición anterior se ve claramente que si las mediciones se hicieron durante un período de grandes lluvias, queda automáticamente descartada la posibilidad de largos períodos de sequía, lo cual no suena razonable dado el tamaño de vida útil de la obra y es factible pensar que puede presentarse un período de escu

rrimientos bajos. Lo mismo sucederá en el caso de un registro de escurrimientos altos.

3.- Como se mencionó, casi siempre el registro histórico es menor al tamaño de la vida útil de la obra. Si se tiene en cuenta que, para el método de Rippl, la capacidad útil aumenta con la longitud del registro, resultan incompatibles la capacidad y la vida útil de la obra.

Aunque la curva masa puede ser útil para determinar el funcionamiento de una presa en períodos cortos de tiempo, su uso como estimador de la capacidad del vaso por diseñar adolece de los defectos mencionados. El método podría usarse como una aproximación gruesa del problema, pero debe pensarse en el resultado como una capacidad adecuada si la obra hubiese sido construída en el inicio del registro histórico y con una vida útil igual al tamaño del mismo. El desarrollo del método es el siguiente :

Como se supone una variación cíclica de los escurrimientos y de la demanda, bastará analizar los escurrimientos para un período de tiempo T (T es el número de meses que tiene el registro). Entonces se procede a la elección arbitraria de un origen y, a partir de este punto, se considera a las entradas y a las extracciones como funciones de tiempo en el intervalo (0,T ). La primera relación que establece la cantidad de agua almacenada C (t), los volúmenes de entrada acumulada S(t) y la demanda acumulada D (t), está dada por la expresión :  $C (t) + S(t+x) - S(t) - (D(t+x) - D(t)) \geq C(t+x) \geq 0$  en los intervalos :  $(0 \leq t \leq T)$  y  $(0 \leq x \leq T - t)$

Esta relación se basa en el principio de continuidad y puede expresarse como : "el contenido de un vaso en cualquier instante, más el volumen de entrada en los próximos x meses, menos la demanda a satisfacer en esos meses debe resultar, cuando menos, igual a la cantidad de agua que existirá en el vaso x meses después". La desigualdad es necesaria pues puede haber derrames en el intervalo (t, t+x).

Del desarrollo de la desigualdad anterior, se llega a la determinación de la capacidad del vaso en términos de la expresión :

$$CAP = \max [s(t) - D(t)] - \min [s(t) - D(t)]$$

es decir:

$$CAP = RANGO[s(t) - D(t)] \quad (2)$$

La determinación de esta capacidad puede hacerse gráfica o analíticamente. Sea por ejemplo el registro de la figura (1) y considérese que la demanda está dada por la expresión :

$$DEM = COEF \cdot \frac{x}{T} \sum_j Q_j$$

en donde :

- DEM = Demanda Mensual
- COEF = Coeficiente de regulación
- Q<sub>j</sub> = Volumen escurrido en el mes j, j = 1, 2, T

la demanda mensual, representada en la figura (1) como D(t), será una recta cuya pendiente dependerá del valor del coeficiente de regulación. Este coeficiente indicará la cantidad de agua que se quiera aprovechar.

Una vez que la capacidad del vaso ha sido determinada, se procede a estudiar el funcionamiento del vaso. Dicho estudio se hace en base al registro histórico. De aquí se desprende un factor que resalta lo inadecuado del método : influye de manera importante el valor que suponga como estado inicial del vaso.

Si la demanda  $D(t)$  nunca cae por arriba de la curva de entradas  $S(t)$  no se requiere de almacenamiento inicial (Figura 2a.). - En cambio, cuando la curva  $D(t)$  está por arriba de la curva  $S(t)$ , se requiere de un almacenamiento  $C(0)$  para poder satisfacer la demanda. (Figura 2b).

Ambas suposiciones son ciertas si el escurrimiento, al inicio del funcionamiento de la obra, se presenta tal y como se supuso ; además, los escurrimientos deberán presentarse con variación cíclica. El problema se agrava si el registro es corto; en este caso será factible encontrar escurrimientos que se salgan de los límites superior e inferior de los volúmenes registrados.

La hipótesis de que la historia del vaso puede ser vista como una secuencia de períodos idénticos, es una aproximación muy tosca. Aunado a todo lo anterior, puede presentarse una variación -- anual tan grande, que puede ocurrir un volumen escurrido menor -- que la demanda anual; para este caso es necesario un sobrealmacenamiento anual para compensar los años lluviosos con los secos.

El método de Rippl no permite obtener un panorama de las posibles variaciones que pudieran presentarse una vez construída la obra.

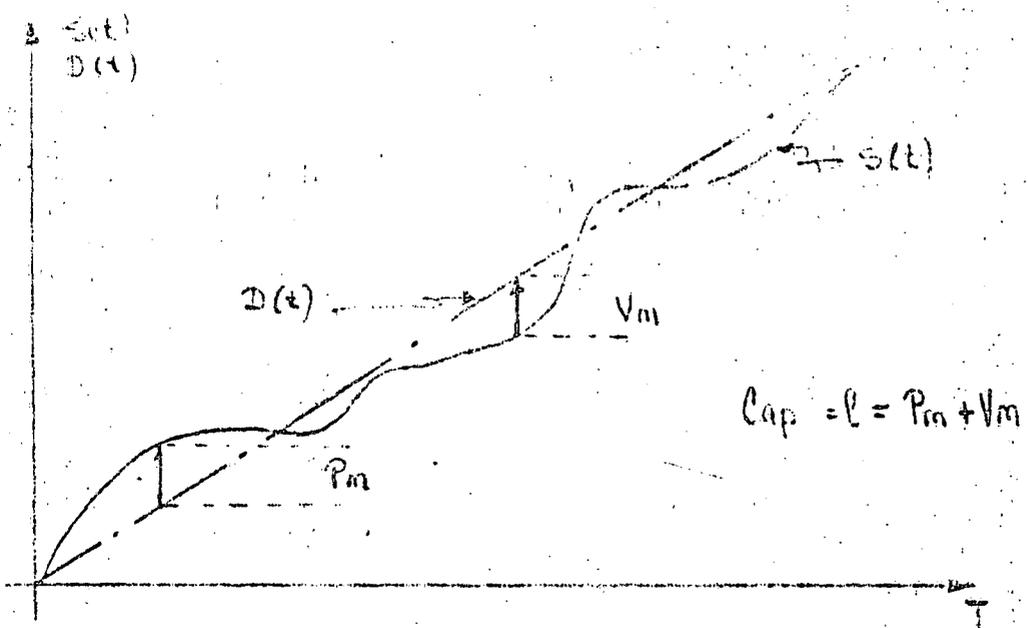


Figura 1: Curva masa

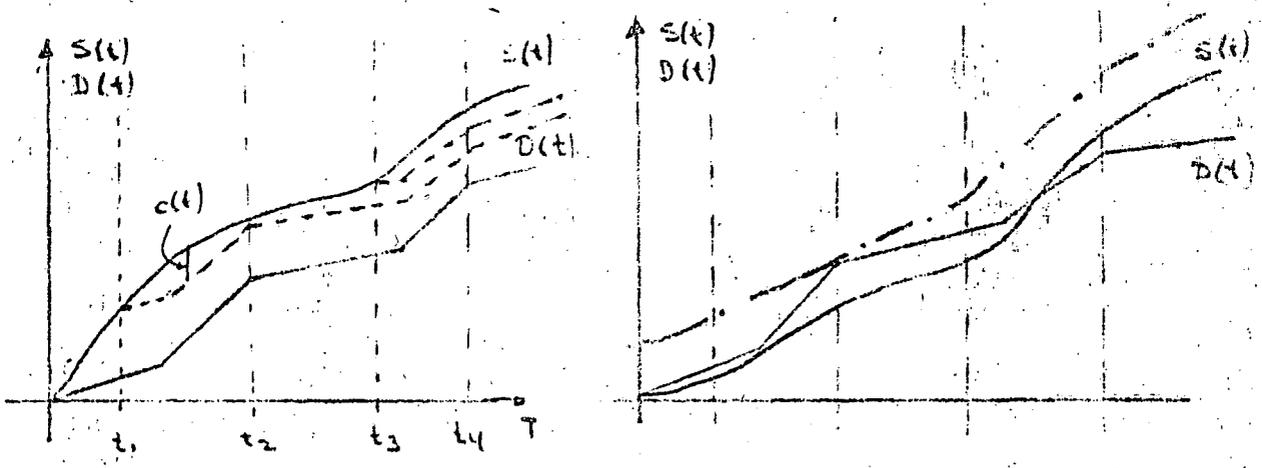


Figura 2

- a) No es necesario almacenamiento inicial ya que la curva de demandas nunca esta por arriba, de la curva de entradas
- b) Se corre paraboloicamente hacia arriba la curva de entradas hasta el momento en que la curva de demandas quede por abajo de la curva de entradas.

Finalmente, el método requiere de una serie de consideraciones basadas en el buen juicio y experiencia del calculista, pero no le proporciona herramientas para juzgar dichas consideraciones.

Allen Hazen desarrolló un método para tratar de resolver los problemas anteriores. Introdujo la variabilidad aleatoria de los escurrimientos, pero sigue adoleciendo de dos defectos, a saber: el usar únicamente el registro histórico y la falta de un indicador del riesgo de falla. Aplicó su método a una docena de presas y construyó unas curvas llamadas "curvas normales de almacenamiento"; con ellas puede calcularse la capacidad de la presa, si se cuenta con el coeficiente de variación de los escurrimientos y el cociente de la demanda anual entre el escurrimiento medio anual. Las limitaciones e inconveniencias del método de Hazen son:

1.- Su uso se limita a la región de donde proceden los escurrimientos estudiados, pues las gráficas, útiles en una región, pueden no serlo en otras.

2.- Los resultados están basados en variaciones uniformes de la demanda a través de un año, con esto resulta inaplicable a la mayoría de los problemas de la realidad.

3.- El método no es útil si es regulada una porción de los escurrimientos.

4.- Dada la poca información disponible (debido al tamaño de los registros históricos), la frecuencia y magnitud de los déficits no son estimados de manera precisa ni eficiente.

Por último, cuando el caso de almacenamiento forma parte de un sistema no unitario, existen ciertas condiciones de dependencia entre las unidades constitutivas del sistema que no toma en consideración el método de Rippl.

La capacidad de un vaso de almacenamiento dada como el rango de la función :  $(S(t) - D(t))$  , sin ser el mejor de los estimadores, puede ser aceptada para los métodos estadísticos y en este caso servirá para resaltar que no se pretende buscar una capacidad más exacta, sino un criterio que se adapte a la naturaleza aleatoria del problema y encontrar la capacidad más adecuada. Por tanto se aceptará como buena la expresión (2).

MÉTODOS ESTADÍSTICOS. El análisis estadístico considera al registro histórico como una de las muchas posibles muestras de una población formada por el conjunto de todos los valores que, con igual probabilidad, pueden tomar los escurrimientos en un período igual al registro.

Es conveniente hacer algunas aclaraciones antes de desarrollar algunos de los modelos estadísticos. La primera es recalcar el hecho de que el enfoque estadístico no requiere de mayor número de datos a los utilizados por los métodos tradicionales. Se trata de una variación en cuanto al manejo e interpretación de los resultados.

También debe aclararse que el tratamiento estadístico no mejora ni aumenta, estrictamente hablando, la información disponible.

Si la muestra de escurrimientos disponible no es representativa de la población, se tendrá que trabajar con ella pues no se dispone de otra cosa y debe tomarse en cuenta que se cometerá un error inevitable. Por tanto, se supone que la población tiene las mismas características de la muestra.

Tampoco se pretende crear un registro de escurrimientos para los próximos años. En base a las características estadísticas del registro, se puede establecer, con un número grande de muestras, los valores más probables de los escurrimientos. En términos de estos valores se determinará la capacidad de un vaso de almacenamiento y se estará en condiciones de decir cual será la respuesta más probable de la alternativa escogida.

Como podra verse, el enfoque estadístico se acerca más a la realidad del problema pues toma en consideración su naturaleza aleatoria y aún cuando no expresa una cifra única, proporciona un criterio para juzgar la respuesta del sistema.

Se analizarán a continuación dos tipos de modelos estadísticos de los escurrimientos. El primero utiliza el registro histórico para determinar las probabilidades de que la presa, en un instante dado, esté en un cierto nivel. A través de estas probabilidades se podra encontrar una capacidad tal que cumpla con los requisitos del diseño.

El segundo modelo tiene que ver con la generación de registros sintéticos de escurrimientos; estos registros representarán otras tantas muestras de la población y cada una de ellas determinará un

posible valor de la capacidad; finalmente, se tendrá una distribución de probabilidades de las capacidades y con el uso de algún criterio estadístico, se elegirá la capacidad adecuada.

El método desarrollado por P.AP. Morán determina la distribución de probabilidades de los diferentes niveles que puede ocupar el agua almacenada en una presa, así como las probabilidades de derrame y vaciado de dicha presa. El método se desarrolla bajo la imposición de hipótesis que constituyen las limitaciones y defectos del mismo. Las hipótesis de partida del método de Morán son :

- a) Las entradas al vaso no están correlacionadas.
- b) La extracción en la unidad de tiempo considerada  $E_t$ , se hace después de lo que entró en esa unidad de tiempo  $X_t$ .
- c) Si al obtener la diferencia  $X_t - E_t$ , el nivel de la presa toma un valor entre  $C_i$  y  $C_j$ , se considerará que el nivel en la presa es el mayor de  $C_i$  o  $C_j$ .
- d) Las fronteras están previamente definidas.

El modelo propuesto por Morán sirve fundamentalmente para estudios anuales en los que es posible considerar las entradas independientes. El desarrollo del método, en forma breve, se basa en lo siguiente :

Sea una presa y la curva Elevación-Capacidad correspondiente, tal y como se muestra en la figura 3

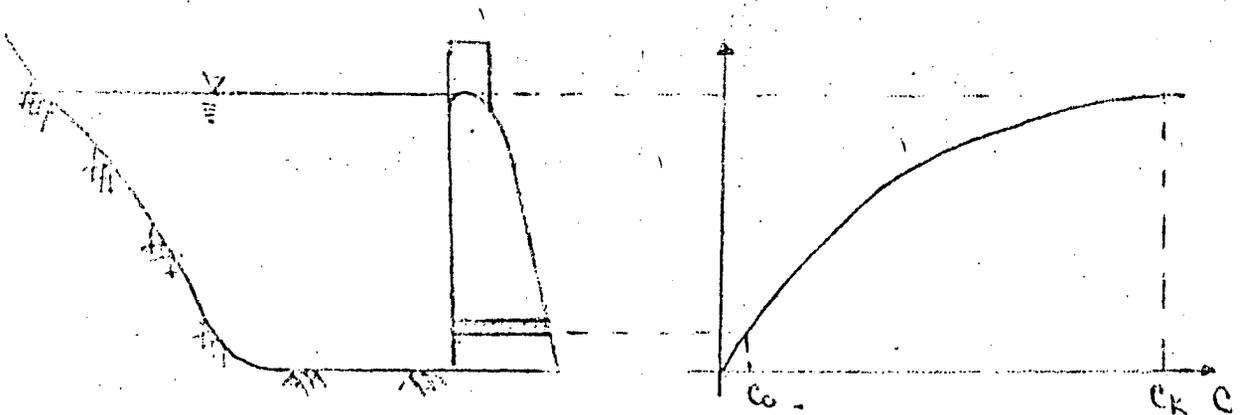


Figura 3. Plantamiento del Problema.

Las condiciones de frontera son:

A partir de  $C_k$  empieza el vertido.

Debajo de  $C_0$  no hay extracción.

Por otra parte si se dispone de un registro de  $N$  años de volúmenes de entrada anual, es posible fijar intervalos de clasificación y de construir un histograma de volúmenes de entrada (figura 4).

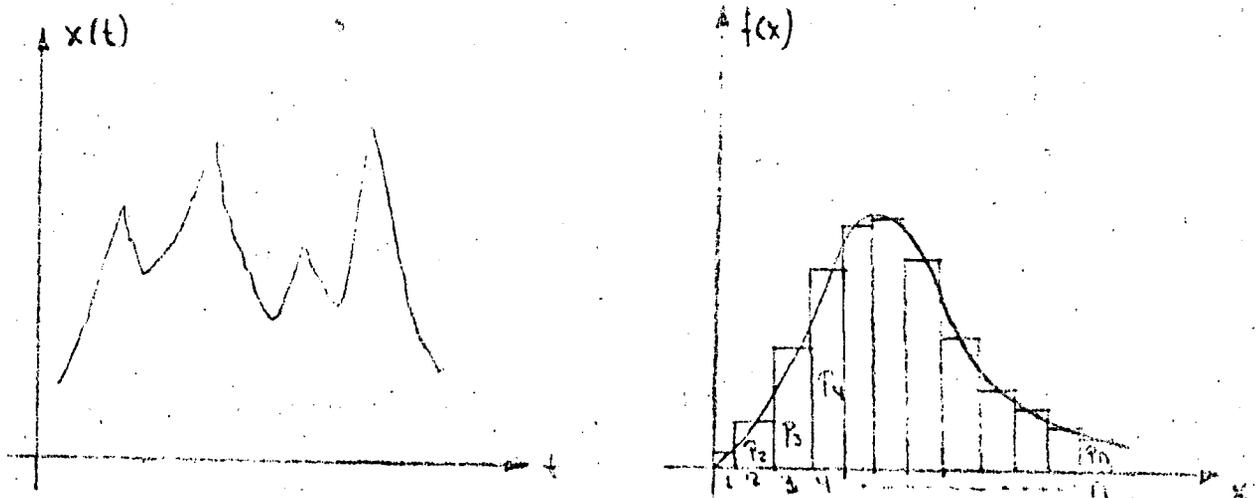


Figura 4. Histograma de los volúmenes de entrada a partir del registro.

Una vez conocidas las limitaciones  $C_0$  y  $C_k$ , se tratará de encontrar las probabilidades de permanencia en un cierto nivel  $C$  así como la distribución de dichas probabilidades, tal y como se muestra en la Figura 5.

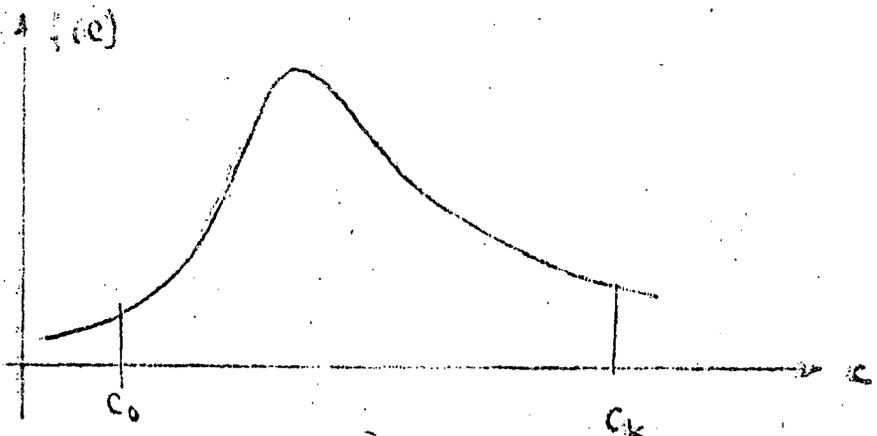


Figura 5. Distribución de probabilidades de permanencia en un nivel  $C$ .

La exposición simple del problema puede hacerse a través del siguiente ejemplo:

Supóngase que las condiciones de frontera son:

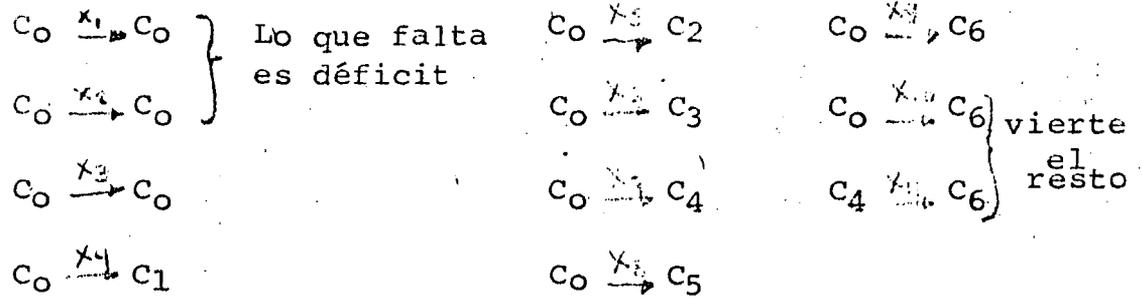
$$C_0 = 3u. \quad C_k = 9u.$$

y además, la extracción será constante e igual a:  $E = 3u$ . Se

supone que el nivel inicial es  $C_0$  y sean :

$$\begin{array}{ll} x_1 = 1 & x_5 = 5 \\ x_2 = 2 & \dots\dots\dots \\ x_3 = 3 & \dots\dots\dots \\ x_4 = 4 & x_n = n \end{array}$$

Las posibles entradas al vaso, si se analizan los posibles niveles a los que la presa puede llegar si está en  $C_0$  se tendrá:



y si se expresa como  $P_{ij}$  la probabilidad de que la presa pase del nivel (o) al nivel (i), se tendrá :

$$\begin{aligned}
 P_{00} &= P_1 + P_2 + P_3 & P_{03} &= P_6 \\
 P_{01} &= P_4 & P_{04} &= P_7 & P_{06} &= P_9 + \dots + P_n \\
 P_{02} &= P_5 & P_{05} &= P_8
 \end{aligned}$$

Si se hace lo mismo para  $C_1$  y  $C_2$ , etc. se podrá formar una matriz que Morán denomina matriz de transición pues mide la probabilidad de cambio de los diferentes estados.

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots & P_{0n} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n0} & P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}$$

La idea básica de Morán es darle a su modelo una estructura de correlación en serie donde la influencia de valores previos expresada como :

$$P_t = P(C_t = C_i | C_{t-1} = C_j; C_{t-2} = C_k; \dots; C_{t-n} = C_s)$$

queda totalmente concentrada en el valor inmediatamente anterior con lo cual llega a la expresión particular de una estructura Markoviana de primer orden :

$$P_{ij} = P (C_t = C_j | C_{t-1} = C_i) \quad (1)$$

Según esto, la ecuación que da las probabilidades de los posibles valores de  $C_t$ , está dada por :

$$P (C_t = C_j) = \sum_{i=1}^N P(C_t = C_j | C_{t-1} = C_i)$$

y la expresión anterior puede escribirse :

$$P_t = P_{ij} P_{t-1}$$

en donde  $P_t$  ;  $P_{t-1}$  son matrices columnas que representan las probabilidades de transición en cada uno de los estados (i). En base a la expresión anterior puede escribirse que :

$$P_1 = P_{ij} P_0$$

$$P_2 = P_{ij} P_1 = (P_{ij})^2 P_0$$

$$P_n = (P_{ij})^n P_0$$

Puede demostrarse que para valores grandes de (n), los renglones de la matriz de transición se hacen iguales. Esto último puede interpretarse como la existencia de un valor a partir del cual la distribución de probabilidades de los diferentes niveles del vaso será la distribución de probabilidades de transición cuando estas son invariantes. Se le llama matriz de equilibrio a la dada por la expresión :

$$(P_{ij})^n = e_{ij}$$

$n \rightarrow \infty$

en donde :

$$e_{ij} = e_{kj} \quad (i \neq k) \quad \sum_j e_{ij} = 1$$

Supongamos que tenemos ahora dos números R y S muy grandes, de lo anterior se puede expresar :

$$p^{r+s} = (P_{ij})^{r+s} P_o \quad (1)$$

y además :

$$p_s = (P_{ij})^s P_o \quad (2)$$

pero como para valores de R y S lo suficientemente grandes se puede escribir que:

$$\begin{aligned} P_s &= P_o \quad e_{ij} \\ P_{r+s} &= P_o \quad e_{ij} \end{aligned}$$

entonces :

$$e_{ij} P_s = P_{r+s} \quad e_{ij} = P_s = P_{r+s} = P_e \quad (3)$$

Es decir, a partir de R años la distribución se hace estacionaria (o sea que las probabilidades de estado son las mismas). De la ecuación (1) se puede expresar :

$$p_{r+s} = \frac{P_o (P_{ij})^r}{P_s} \frac{(P_{ij})^{r+s}}{e_{ij}} \quad (4)$$

y (4) puede escribirse:

$$p_{r+s} = P_s \quad e_{ij}$$

y de la ecuación (3) :

$$P_e = P_e \quad e_{ij} \quad (5)$$

De la expresión anterior se concluye que cualquiera de los renglones de la matriz de equilibrio es la solución al problema.

Entonces, el procedimiento a seguir sería elevar la matriz de transición obtenida a partir del histograma de entradas, de las fronteras establecidas y de las demandas, a un determinado número de potencias hasta lograr que los renglones de la matriz sean iguales. Logrado esto se resuelve el sistema:

$$(e_{ij}) P_e = 0$$

Existe una segunda manera de atacar el problema, con el uso de un procedimiento Monte-Carlo, el cual a grandes rasgos consiste en marcar las probabilidades de cada estado. Sea, por ejemplo, la matriz de transición :

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} \end{pmatrix}$$

El método se basa en la selección de un número aleatorio ( $a_1$ ), entonces para el estado  $C_0$  se tendrá que :

$$\text{si } a_1 \leq P_{00} \Rightarrow C_0 \rightarrow C_0$$

$$\text{si } P_{00} < a_1 \leq P_{00} + P_{01} \Rightarrow C_0 \rightarrow C_1$$

$$\text{si } P_{00} + P_{01} < a_1 \leq P_{00} + P_{01} + P_{02} \Rightarrow C_0 \rightarrow C_2$$

El mismo procedimiento podría hacerse para  $C_1$  y  $C_2$ . La operación se repite iterativamente, tantas veces como se quiera. Los valores de las probabilidades  $P(C_0)$ ,  $P(C_1)$  y  $P(C_2)$  se obtienen al dividir el número de veces que el agua alcanza el nivel  $C_i$ , el número total de veces que se hizo el proceso. Se ha encontrado que para obtener la distribución de probabilidades de un sistema de 6 niveles se necesitan un número de iteraciones del orden de 1000.

El método se presta para el desarrollo por medio de una computadora electrónica la cual puede desarrollar todos los cálculos en unos cuantos minutos.

El método de Morán no es, con mucho, el mejor de los métodos estadísticos, sus consideraciones reflejan sus limitaciones ; sin embargo, es factible utilizarlo como instrumento de comparación en la etapa de ante-proyecto. Han surgido otras variantes al método que tratan de resolver sus inconsistencias y, sin variar la esencia del método, han corregido los defectos de que dicho método adolecía.

Prabhu, considera las entradas y salidas como procesos estocásticos, si bien la matemática del método es un tanto compleja.- Este método permite atacar el problema con técnicas Monte Carlo, simplemente se hace uso de dos tablas de números casuales, una para las entradas y otra para las demandas. Supóngase conocidos los histogramas de las entradas al vaso, así como de las demandas, se pueden transformar ambos histogramas a sus respectivas curvas  $F$  (Figura 6)

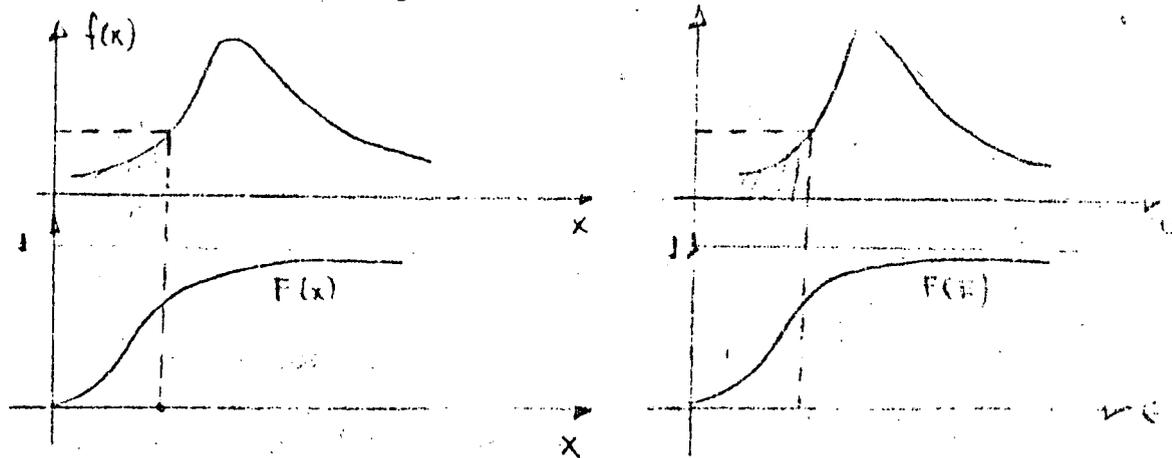


Figura 6. Generación de entradas y salidas. Método de Prabhu

Entonces, se procede a establecer el estado inicial  $C_0$ , se toma un número casual de cada una de las tablas y se calcula la nue

va entrada y la nueva salida. Se llega a la expresión :

$$C_k = C_o + X_j - E_j$$

se repite el proceso y se tendrá finalmente :

$$P (C_k) = \frac{\text{No. total de veces en } C_k}{\text{No. total de iteraciones}}$$

Como puede verse, una de las principales limitaciones a los dos métodos vistos anteriormente es el considerar entradas aleatorias independientemente entre sí. Tal consideración restringe el campo de acción del método a su mínima expresión, pues únicamente podría utilizarse como una medida de aproximación para, después de seleccionar varias alternativas, afinar el cálculo por otros métodos.

E.H. Lloyd elaboró un método para resolver el problema de la interdependencia entre las entradas. Al intentar elaborar dicho modelo, utilizó gran parte de la teoría expuesta por Morán. En términos generales, expresa la entrada en un cierto instante (t) como una función autorregresiva del tipo :

$$X_t = B_1 X_{t-1} + B_2 X_{t-2} + \dots + U_t$$

Lloyd considera que puede simplificarse la expresión anterior si se supone que toda la dependencia está expresada por el valor de la entrada en el instante t-1 más una cierta componente aleatoria, esto es :

$$X_t = B_1 X_{t-1} + U_t$$

El procedimiento a seguir es dividir en rangos el hidrograma

de las entradas. Si  $X_m$  es el pico máximo se podrán obtener expresiones del tipo :

$$P (X_m, X_0) = P_{m0} (X)$$

$$P (K_m, X_1) = P_{m1} (X)$$

. . . . .  
 . . . . .

$$P (X_m, K_n) = P_{mn} (X)$$

Con esto se resolvería el problema de la dependencia producida por la persistencia (a valores grandes le seguirán, generalmente, valores grandes) y queda aún pendiente el de la persistencia producida por las estaciones. Sea el estado  $C_0$  en el instante  $N-1$ , y la entrada  $X_0$  en el mismo instante que pueden expresarse como :

$$\begin{matrix} N-1 & N-1 \\ C_0 & X_0 \end{matrix}$$

Si hubiera  $m$  categorías de entrada se tendría :

$$\begin{matrix} \pi_{00} = X_0 \rightarrow X_0 \\ \pi_{01} = X_0 \rightarrow X_0 \\ \vdots \\ \pi_{0m} = X_0 \rightarrow X_m \end{matrix} \quad \begin{matrix} N & N \\ C_j & X_j \\ j = 1, 2, 3, \dots, n \\ j = 1, 2, 3, \dots, m \end{matrix}$$

en donde  $C_j$  tomaría todos los valores posibles de acuerdo a la ley de extracciones, considerada como fija en este caso.

La matriz de transición vista en el método de Morán, toma ahora un tamaño mucho mayor, pues si antes el número de términos

dentro de ella era igual al número de estados al cuadrado, ahora el total de términos estará representado por el producto -- del número de estados por el número de entradas y elevado al cuadrado.

Se sigue cumpliendo que :

$$\sum_{i=1}^N \pi_{oi} = 1$$

y puede escribirse una expresión semejante a la dada por Morán:

$$P^N(C, X) = \prod_{i=1}^N P(C, X)$$

Únicamente que en este caso, un método Monte Carlo no es conveniente. La matriz de equilibrio estará expresada por :

$$\left( \prod_{i=1}^N P(C, X) \right)^n = Q_{ij}$$
$$n \rightarrow \infty$$

Puede ocurrir que existe dependencia entre un valor de la entrada y mucho más de un valor hacia atrás, pero el método, aunque soluble, hace pensar en la búsqueda de otros caminos. Como se dijo anteriormente dado el tipo de información que estos métodos proporcionan, es factible su utilización en la comparación de diversas situaciones de anteproyecto con lo cual se puede obtener una buena medida del riesgo a correr en la selección de un tipo determinado de obra.



## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Enrique Aguilar Amilpa.  
"Técnicas de Simulación para el Diseño de Aprovecha --  
mientos Hidráulicos".  
Tesis Profesional (UNAM), 1968.
- 2.- M.M. Hufschmidt & B. Fiering.  
"Simulación Techniques for design of Water-Resources --  
Systems"  
Harvard University Press. 1966.
- 3.- Arthur Mass; M.M. Hufschmidt y Otros.  
"Design of Water-Resource Systems"  
Harvard University Press. 1966.
- 4.- E. Kuiper.  
"Water Resources Development : Planning, Engineering and  
Economics"  
Butter Worths. 1965
- 5.- Ven Te Chow  
"Handbook of applied Hydrology"  
McGraw-Hill 1964
- 6.- P.A. P. Moran  
"The Theory of Storage"  
Methuen & Co. 1961
- 7.- Apuntes tomados durante un Seminario impartido por :  
El Ing. José Luis Sánchez B. en la División del Doctorado  
de la Facultad de Ingeniería (UNAM).
- 8.- E.H. Lloyd  
"A probability Theory of Reservoirs with serially correla  
ted inputs"  
Journal of Hydrology 1963
- 9.- R. Arroyo M.  
"Análisis de las leyes de entrada a vasos de almacenamiento"  
Tesis Profesional (UNAM)
- 10- F.C. Mills  
"Statistical Methods"  
Holt, Rinehard & Winston. 1955
- 11- Myron B. Fiering  
"Streamflow Synthesis"  
Harvard University Press 1967



## COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

26.

### V. SISTEMAS DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

#### A. ASPECTOS ECONOMICOS.

El desarrollo de los aprovechamientos hidráulicos es sólo una parte del desarrollo económico general de un país. Entre los factores que interviene en el estudio de los aprovechamientos hidráulicos, los hidrológicos y los económicos normalmente pueden analizarse objetivamente; sin embargo factores como los sociales y los políticos escapan a un tratamiento exclusivamente matemático. En esta discusión se presentan solamente los factores económicos.

El nivel de desarrollo de los diferentes países obliga a utilizar técnicas que toman en cuenta las condiciones particulares en cada uno de ellos (Ref.26). La economía en los países en vía de desarrollo no se encuentra en general en condiciones de libre competencia ni de control estatal completo. Aún en estos países las condiciones varían de uno a otro (Ref.27). El autor de esta última referencia, señala características generales de los países en vía de desarrollo que bien pueden variar de uno a otro.

- a) Un alto porcentaje de la población (60% o más) vive en zonas rurales.
- b) Existe un alto grado de subdesarrollo de las zonas rurales.
- c) La distribución del ingreso en la población no es uniforme.
- d) El capital disponible para la inversión per-cápita es bajo.
- e) El nivel técnico es demasiado bajo.
- f) Un alto porcentaje de las exportaciones esta constituido por materia prima.
- g) Existe una deficiencia de capital disponible.

En la referencia 26 se definen cinco criterios económicos de planeación:

- a) Minimización de la intensidad de capital, es decir que no debe invertirse solamente en un proyecto.
- b) Maximización de la productividad marginal social del capital.
- c) Maximización de la acumulación del capital, es decir incrementar el interés de los ahorros.
- d) Maximización de la oportunidad de empleos mediante el desarrollo de proyectos.
- e) Utilización de funciones objetivo múltiples.

En un sistema complejo de aprovechamientos hidráulicos múltiples las complicaciones son tales que es necesario utilizar un análisis matemático que refuerce la experiencia y el criterio de los planeadores. Un análisis muy socorrido es el de beneficio-costos que se comenta en seguida.

#### 1.- Análisis de beneficio-costos.

Expresado en una forma muy sencilla, este análisis consiste en calcular el beneficio y el costo de un proyecto y dividir el primero entre el segundo. Si el resultado es mayor que 1 teóricamente hablando, se tiene un proyecto económicamente factible. Existen una serie de complicaciones en el cálculo de estos dos valores. Por ejemplo, se dice que los beneficios por con-

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

27.

control de avenidas, es decir los ahorros que se obtienen al reducir las inundaciones, son beneficios negativos. En cambio la producción de energía eléctrica produce beneficios positivos. En el caso de la evaluación de beneficios por control de avenidas deben tomarse en cuenta muchos factores que definen el aspecto hidrológico del problema, además de la evaluación económica. Así en general, para estudiar un sistema de aprovechamientos hidráulicos, es necesario utilizar no de los hidroeconómicos.

## a) Clasificación de los beneficios.

Los beneficios pueden ser tangibles, secundarios o intangibles. Los dos primeros pueden expresarse en unidades monetarias y el tercero generalmente no se considera en el análisis de beneficio-costos. Actualmente se investiga la utilización de indicadores económicos que midan los beneficios intangibles y la posibilidad de hacer muestreos en la población en donde se piensa realizar un proyecto para conocer la disposición de los habitantes de la región con respecto a ese proyecto.

En un distrito de riego el beneficio tangible se refiere al beneficio directo que se obtendría al aumentar el valor de una cosecha debido al sistema de irrigación y el beneficio secundario sería el incremento en las ganancias de los agricultores de la región. Se tendrían otros beneficios que no es posible expresar en pesos y que en este ejemplo sería el mejor nivel de educación que obtendrían los hijos de los agricultores debido a su nueva situación económica, etc.

## b) Periodo de análisis y tasa de descuento para un sistema de aprovechamientos hidráulicos.

Al hacer un análisis de beneficio-costos es necesario definir un periodo durante el cual se calculen ambos valores. Este horizonte de planeación o periodo de análisis deberá ser igual o menor que la vida económica del sistema y esta a su vez, menor o igual que su vida física.

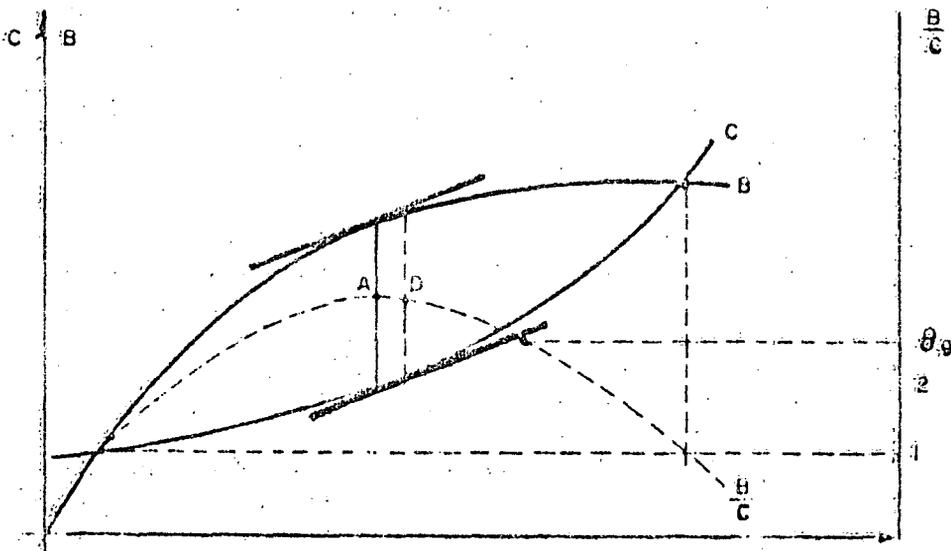
Horizonte de planeación  $\leq$  Vida económica  $\leq$  Vida física

En los Estados Unidos el criterio gubernamental para este tipo de proyectos consiste en utilizar como horizonte de planeación la vida económica esperada del sistema o cien años, escogiendo siempre el valor menor. Esto se debe a que los beneficios prorrateados en el futuro son despreciables a plazos mayores de cien años.

Con objeto de considerar, tanto en los beneficios como en los costos, el efecto del tiempo, se utiliza una tasa de interés que toma en cuenta la depreciación del capital.

## c) Descripción del método tradicional y modificaciones para utilizarlo en los países en vías de desarrollo.

Definido el periodo de análisis, la tasa de interés, la inversión inicial, los costos de operación, mantenimiento y reparaciones y los beneficios, pueden calcularse costos y beneficios actualizados para diferentes escalas de desarrollo y representarlos gráficamente como se muestra en la figura



### ESCALA DE DESARROLLO.

Generalmente las curvas B de beneficios y C de costos se intersectan en dos puntos; obteniéndose para los demás puntos relaciones beneficio-costos diferentes de 1. La curva que indica la variación de esta relación se muestra también en la figura. El punto A es el máximo de esta curva. Aparece también el beneficio neto B-C que ocurre en el punto D en que las pendientes de las tangentes a B y C son iguales. Generalmente la escala de desarrollo correspondiente al beneficio neto máximo es superior a la que da el valor máximo de la relación B/C. En general la iniciativa privada está interesada en el criterio de la máxima relación B/C, ya que su capital está limitado y además esto presenta un atractivo para sus accionistas; sin embargo los sistemas de aprovechamientos hidráulicos normalmente son construídos por el gobierno, al cual le interesa maximizar los beneficios netos.

El análisis de beneficio-costos tiene muchos puntos débiles. En Estados Unidos se utiliza fundamentalmente para demostrar al Congreso que un proyecto es económicamente factible cuando la relación beneficio-costos es mayor que uno. Sin embargo esta relación beneficio-costos puede utilizarse como un índice para comparar varios proyectos cuyos beneficios y costos hubieran sido calculados sobre las mismas bases.

Con objeto de ver si es posible utilizar este análisis en los países en vías de desarrollo, es necesario estudiar las hipótesis en las que se basa:

- 1) Se supone que los precios de mercado reflejan los valores sociales. En un país con economía de competencia libre los precios de mercado sí son muy cercanos a los valores sociales; sin embargo en muchos países en vías de desarrollo puede suceder que un gran sector de la población no tenga el poder de adquisición necesario para comprar un producto a los precios de mercado.

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

29.

- (ii) La distribución de beneficios entre los diferentes sectores económicos e individuos no se considera en el estudio de factibilidad económica, es decir no se toman en cuenta los posibles beneficios que se pudieran obtener de la reinversión de los beneficios originales. Esto sí debería tomarse en cuenta en los países en los que el gobierno reinvierte los beneficios originales.

Para utilizar el análisis de beneficio-costos en los países en vías de desarrollo, lo más importante es tener en cuenta que los precios de mercados son diferentes a los valores sociales; por lo tanto, la tasa de interés no debe ser igual de la que se obtiene en un banco. En los Estados, en proyectos de aprovechamientos hidráulicos, se utiliza una tasa de interés de 3.125% en comparación con el interés bancario del 5%. Esto se explica, ya que el gobierno utiliza los aprovechamientos hidráulicos no solamente como una inversión, sino como un medio para llevar a cabo algunas de sus políticas como son reducir la inflación e incrementar el nivel de vida en algunas zonas muy pobres. En los países en vías de desarrollo la tasa de interés debe ser mucho menor. En lugar de la tasa de interés de mercado se debería utilizar una tasa de interés social. Existen varios modelos matemáticos para calcular este valor y parece ser que el mejor y el más reciente es:

$$\gamma = -(g-1) \left( \frac{d^2 W}{d \left( \frac{C}{N} \right)} \right) \quad (V.1)$$

en donde  $g$  = tasa de crecimiento del producto nacional bruto  
 $l$  = tasa de crecimiento de la población  
 $W$  = índice del bienestar social  
 $C$  = consumo nacional total  
 $N$  = número de habitantes del país

En los países desarrollados existen muchas posibilidades de inversión; en cambio en los países en vías de desarrollo la selección es limitada y en ocasiones conviene incrementar la escala de desarrollo aún más allá de los puntos A y B de la figura V.1. Esta escala queda definida por un valor  $\theta_g$  de la relación B/C

$$\theta_g = \sum_{i=1}^n d_i \frac{p_i}{n} + (1 - \sum_{i=1}^n d_i) U_c \quad (V.2)$$

en donde:

$\theta_g$  = coeficiente del costo de oportunidad social  
 $i$  = índice de los vectores económicos  
 $p_i$  = productividad del capital en el sector  $i$   
 $d_i = \frac{R_i}{\text{presupuesto total gubernamental}}$   
 $R_i$  = reducción en la inversión ocasionada al impuesto en las ganancias del sector  $i$   
 $U_c$  = valor social del consumo actual,  
 $n$  = número de vectores económicos.

El valor de  $\theta_g$  representa el costo de oportunidad social que depende de varios factores. Su efecto es modificar  $C_y$  que es la inversión inicial. Con objeto de calcular el beneficio neto, podemos emplear la fórmula

$$z = \sum_{t=1}^T \left[ \frac{\theta_{1y} - \theta_{01y}}{(1+\gamma)^t} - \theta_{0cy} \right] \quad (V.3)$$

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

30.

en donde:

$B_{ty}$  = beneficios de la escala de desarrollo (y) en el tiempo (t)

$O_{ty}$  = costos de operación y mantenimiento.

$C_y$  = inversión inicial de la escala (y)

T = período de análisis.

y = escala de desarrollo.

Z = beneficios netos.

Otra forma de tener en cuenta la diferencia entre los precios de mercado y los valores sociales es utilizar lo que los economistas llaman -- "precios de mercado".

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

31.

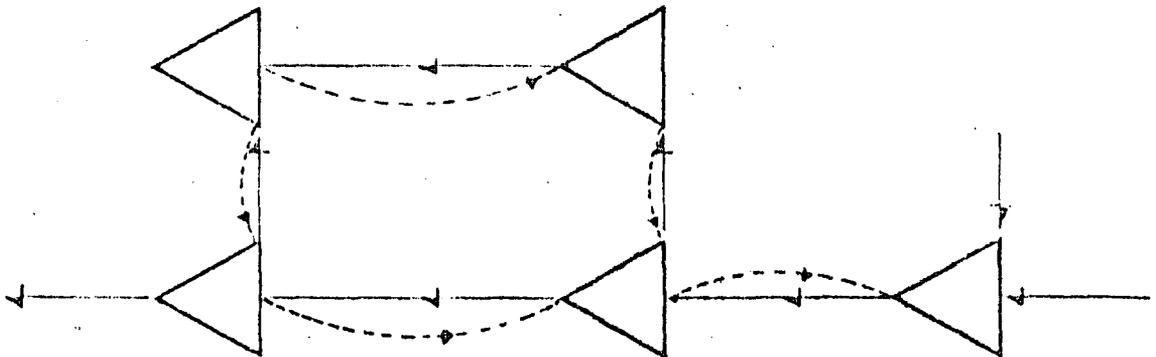
## B. SIMULACION DE SISTEMAS HIDROECONOMICOS.

Cuando se estudian sistemas de aprovechamientos hidráulicos, por una parte debe de simularse su comportamiento hidrológico, pero, esto no es suficiente sino que la simulación debe expandirse para incluir factores económicos y obtener así modelos hidroeconómicos.

El significado amplio de la palabra "simulación" es modelar; es decir cuando se tiene un problema real complejo, lo simulamos con un sistema sencillo que puede ser un modelo matemático o de laboratorio. En un sentido estrecho, significa simulación en una computadora, siguiendo en un programa los pasos del problema real.

### 1.- Ejemplo-plan hidráulico de Texas.

Un ejemplo de aplicación de técnicas de análisis de sistemas es el plan hidráulico de Texas\* que con un presupuesto de cien mil millones de pesos, piensa desarrollarse en los próximos treinta años. Es un plan complejo que involucra no solamente la distribución, utilización y control del agua dentro del estado, sino que también supone que a partir de 1981 será necesario importar agua del río Mississippi y que después se tendrá exceso de agua y será posible exportarla al estado de Nevada. El problema es tan complejo que es necesario simular todo el sistema hidroeconómico. La primera etapa consistió en hacer la simulación utilizando exclusivamente hidrología determinista para definir por una parte la localización y tamaños de vasos y plantas de bombeo y por otra la secuencia de construcción. Con objeto de optimizar la asignación de localización y dimensiones pueden usarse técnicas de programación matemática. En la figura se muestra un esquema de una parte del sistema en donde los triángulos representan vasos y las líneas flujo de agua que puede ir por gravedad en una dirección o ser bombeado en la otra.



Sería difícil aplicar programación lineal en este problema debido al gran número de variables, de manera que se está utilizando el método de "Out of Kilter" desarrollado por la Rand Corporation de California.

\*Texas Water Resources Development Board

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la

Industria Eléctrica

32.

## 2.- Comentarios acerca de algunos aspectos particulares de la simulación.

- a) Fórmula de Hurst (Ref.28). Esta fórmula es un modelo que simula la naturaleza estocástica de las tendencias a largo plazo de los escurrimientos en un río y puede utilizarse en diseños preliminares para estimar la capacidad de un vaso, con ventaja sobre el análisis de curva masa.
- b) Método de Morán; Es un modelo estocástico del comportamiento de un vaso que da como resultado la probabilidad de tener diferentes niveles en un vaso cuya dimensión se ha propuesto de antemano. Este método no ha sido llevado a la práctica en forma íntegra debido a la dificultad en obtener procedimientos prácticos de la teoría desarrollada por Morán y otros matemáticos (Ref.29).
- c) Políticas de operación en la simulación. Cuando se está utilizando la simulación para diseñar un sistema de aprovechamientos pueden obtenerse políticas de operación de ingenieros con experiencia y tratar de mejorarlas haciendo pruebas de sensibilidad con un modelo de simulación. Otro enfoque es utilizar políticas automáticas dentro del mismo modelo de simulación de tal manera que la operación del sistema satisfaga el promedio de las condiciones hidrológicas que se predigan. En este último caso convendría probar el sistema también para condiciones hidrológicas extremas y si la diferencia del comportamiento de sistema no es muy grande con respecto a las condiciones promedio, podrían utilizarse estas en todo el estudio.
- d) Comparación de resultados utilizando hidrología estocástica e hidrología determinista en el análisis de sistemas de aprovechamientos hidráulicos.

El enfoque determinista supone que los eventos hidrológicos históricos se repetirán en el futuro, de manera que el diseño se hace en realidad no para el futuro sino para el pasado. De cualquier forma hay que definir un nivel de diseño y dependería entonces de las políticas de planeación si se deseara por ejemplo diseñar el proyecto para un registro del doble del observado. Sin embargo al utilizar hidrología estocástica tenemos la oportunidad de observar el comportamiento del sistema sujeto a diferentes posibles secuencias de escurrimientos que desde un punto de vista estadístico pudieran ocurrir en el futuro. El resultado es que la hidrología estocástica permite utilizar en forma más completa la información disponible y hacer así un mejor análisis hidroeconómico.

En Estados Unidos existen dos dependencias gubernamentales\* que están elaborando programa de computadora para utilizar técnicas de hidrología estocástica.

\* Center of Hydrologic Engineering del Corps of Engineers (Sacramento, California) y Bureau of Reclamation.

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

33.

## C. OPTIMIZACION

### 1.- Concepto de optimización.

En un sistema de aprovechamientos hidráulicos se tiene en general una función objetivo que puede ser, por ejemplo, la expresión del beneficio neto que desea maximizarse.

$$\text{Máx} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T \frac{B_{pjt} - M_{jt}}{(1+r)^t} - \sum_{j=1}^n K_j = F \quad (V.4)$$

Sujeta a una serie de restricciones que pueden ser, por ejemplo, la expresión matemática de una política de redistribuir el ingreso en una región:

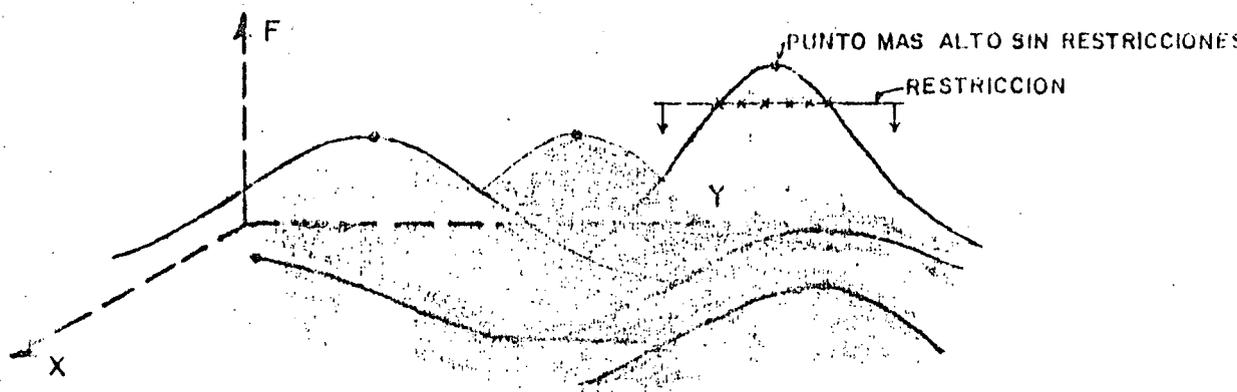
$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T \frac{(B_p + B_s)_{jt}}{(1+r)^t} \geq B_k = F_c \quad (V.5)$$

en donde:

- J = índice de la componente del sistema
- n = número de componentes en el sistema.
- t = año
- T = número de año en el horizonte de planeación
- B<sub>p</sub> = Beneficios directos
- B<sub>s</sub> = Beneficios secundarios
- B<sub>k</sub> = Nivel que se desea mantener en una región k
- r = tasa de interés

Al procedimiento para encontrar el valor óptimo de la función objetivo, respetando las restricciones se le llama optimización.

Suponiendo que la función objetivo solamente tuviera dos variables, podría representarse por una superficie de respuesta.



# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

34.

El propósito de la optimización en el ejemplo anterior sería encontrar el punto mas alto entre todos los puntos altos, respetando las restricciones, que en forma gráfica pueden representarse como fronteras.

Existen una serie de técnicas de optimización que requieren conocimientos de estadística, probabilidades e investigación de operaciones. Parece ser que la mejor forma de desarrollar estos estudios de análisis de sistemas es que un grupo de ingenieros que tengan los conocimientos mencionados lleven a cabo el trabajo detallado, supervisados por ingenieros con experiencia.

## 2.- Técnicas de optimización.

a) Técnicas de muestreo (Ref.30). Consisten en escoger valores de las variables del sistema (ya sea en forma ordenada o aleatoria, dependiendo del método) y calcular con una simulación hidro-económica del sistema el valor correspondiente de la función objetivo, para definir puntos de la superficie de respuesta, hasta encontrar el punto en donde sea óptimo el valor de la función objetivo.

b) Técnicas de programación matemática. (Ref.31)

En algunos casos es posible expresar tanto a la función objetivo como a las restricciones con funciones lineales, y llegar a definir, mediante programación lineal, por ejemplo los tamaños de los vasos y distritos de riego, y las potencias que deben instalarse en las plantas de un sistema de aprovechamientos hidráulicos.

Existen problemas en los que además de tratar de definir los valores de una serie de variables para optimizar una función objetivo, es necesario tomar en cuenta una secuencia de eventos, como por ejemplo, el programa de construcción de una serie de proyectos en un sistema de aprovechamientos hidráulicos, o una serie de decisiones para operar uno o varios vasos. En este tipo de problemas se puede utilizar la programación dinámica.

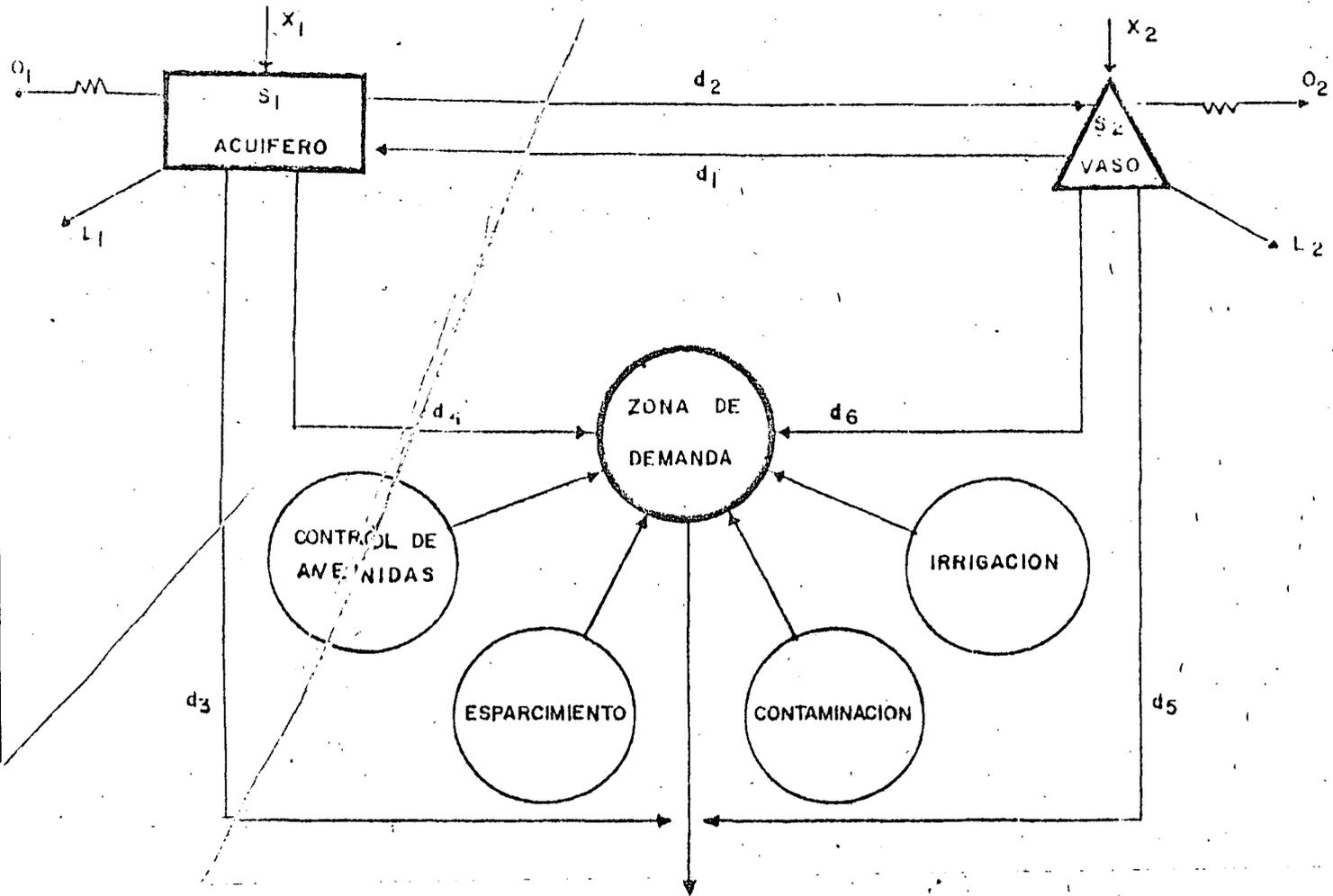
En la referencia 31, Buras discute la utilización de programación lineal y programación dinámica a sistemas de aprovechamientos hidráulicos y presenta una lista bibliográfica de libros y artículos con aplicaciones.

La Universidad de Illinois lleva a cabo actualmente un programa de investigación relacionado con sistemas de aprovechamientos hidráulicos. Ha desarrollado un modelo que sirve como bloque para construir un modelo de cualquier sistema:

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

35.



- $X_1$  = recarga al acuífero
- $X_2$  = escurrimiento de entrada al vaso
- $L_1$  = pérdidas por infiltración en el acuífero
- $L_2$  = pérdidas por infiltración y evaporación
- $O_1$  = extracciones del acuífero, fuera del módulo
- $O_2$  = extracciones del vaso, fuera del módulo
- $d_1$  = recarga del vaso al acuífero
- $d_2$  = infiltración del acuífero al vaso
- $d_3$  o  $d_6$  = extracciones del vaso y del acuífero

Las ecuaciones de sistema del módulo para el intervalo de tiempo  $(k, k+1)$  son:

$$S_1(k+1) = S_1(k) + X_1(k,k+1) + d_1(k,k+1) - d_2(k,k+1) - d_3(k,k+1) - d_4(k,k+1) - O_1(k,k+1) - L_1(k,k+1)$$

$$S_2(k+1) = S_2(k) + X_2(k,k+1) + d_2(k,k+1) - d_1(k,k+1) - d_5(k,k+1) - d_6(k,k+1) - O_2(k,k+1) - L_2(k,k+1)$$

# COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Instituto de Investigaciones de la  
Industria Eléctrica

36.

con las restricciones hidráulicas y geométricas:

$$d_{j\min}(k|k+1) \leq d_j(k|k+1) \leq d_{j\max}(k|k+1)$$

$$S_{i\min}(k|k+1) \leq S_i(k|k+1) \leq S_{i\max}(k|k+1).$$

Debido a la gran cantidad de parámetros que intervienen no es posible utilizar programación lineal ni programación dinámica como tal, sino que se está empleando una nueva técnica llamada programación dinámica por aproximaciones sucesivas.

Ya se tiene programado el módulo y el modelo de demanda por irrigación, y se están aplicando en una cuenca de Illinois. Mas adelante se desarrollarán los otros modelos de la demanda, incluyendo el de energía hidroeléctrica.

En México se están aplicando técnicas de programación dinámica para tratar de encontrar la forma óptima de operar el sistema agrícola y termo-hidroeléctrico del Río Yaqui. El Instituto de Ingeniería de la UNAM y el IIE de CFE publicarán el informe final próximamente.

REFERENCIAS

- \* 1. Chow, Ven Te. "Hydrologic Systems for Water Resources Management", Hydrology In Water Resources Management", Conference Proceedings, Water Resources Research Institute, Clemson University, Clemson, South Carolina, Report No.4 March 1968.
- \* 2. Chow, Ven Te, "Systems Approaches in Hydrology and Water Resources", 1969.
- \* 3. Chow, Ven Te, "New Trends in Hydrology", Journal of Hydrology 6 (1968)
- \* 4. U.S. Weather Bureau Hydrometeorological Reports Nos. 33,34,36
- \* 5. Yevjevich, Vujica, Jackson Donald R, Sicular George M. "Misconceptions in Hydrology and Their Consequences", Comments and Reply, Water Resources Research, Vol. 4No.2 april 1968, Vol.5, No.2, april 1969.
- \* 6. Chow, Ven Te, "R. & D. of a Watershed Experimentation System", JETS Journal, February 1968.
- \* 7. Hoyt, L Arthur, "Rainstorms Made to Order", Public Works Magazine, March 1968.
- \*\* 8. Chow V.T. and Harbaugh T.E. "Raindrop Production for Laboratory Watershed Experimentation", Journal of Geophysical Research, Vol. 70 No.24, 1965
- \*\* 9. Chow V.T., "Laboratory Study of Watershed Hydrology", International Hydrology Symposium, Fort Collins, Colorado, 1967.
- \*\*10. Harbaugh T.E., "Numerical Techniques for Spatially Varied Unsteady Flow", Water Resources Research Center, University of Missouri, Report No.3, 1967
- \*\*11. Chen C.L. and Chow V.T., "Hydrodynamics of Mathematically Simulated Surface Runoff", Hydraulic Engineering Series No. 18 University of Illinois, 1968.
- \*\*12. Harbaugh T.E. and Chow V.T., "A Study of the Roughness of Conceptual River Systems or Watersheds, Hydraulic Engineering Series No.15, University of Illinois 1967.
- \*\*13. Harbaugh T.E., "Hydroplanning: The Effect of Grooving on Surface Drainage of Concrete Pavements", paper presented to the Highway Research Board Annual Meeting of Committee D-B4, 1968, Washington D.C.
- \*\*14. Yen B.C., and Chow V.T., " A Study of Surface Runoff Due to Moving Rainstorms" Hydraulic Engineering Series No. 17, University of Illinois, 1968.
- \*\*15. Yen B.C. and Chow V.T., "A Laboratory Study of Surface Runoff Due to Moving Rainstorms", Water Resources Research Vol. 5, No.5 October, 1969.
- \*\*16. Chery D.L. "Construction Instrumentation and Preliminary Verification of a Physical Hydrologic Model", M.S. Thesis Utah State University, 1965

\* Repartidas a los asistentes al Seminario.

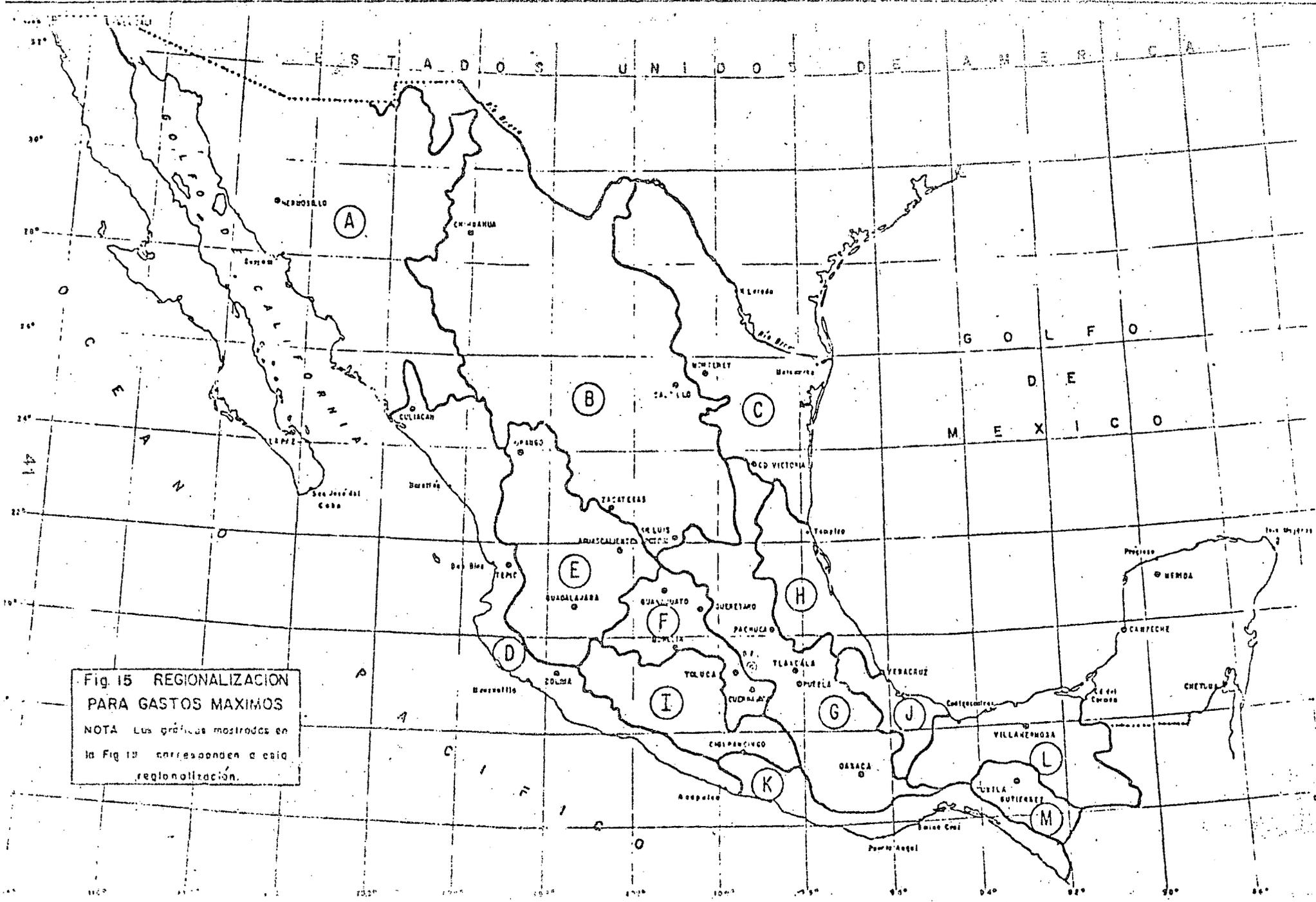
\*\* Disponibles en el IIE.

REFERENCIAS (Continuación)

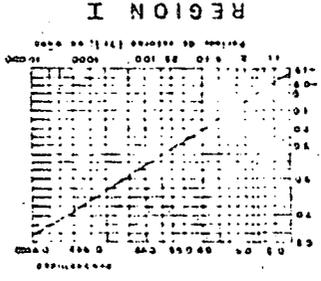
- \*\* 17. Chery D.L., "Design and Tests of Physical Watershed Model", Journal of Hydrology 4 (1966), 224-235
- \*\* 18. Chery D.L. "A Review of Rainfall-Runoff, Physical Models as Developed by Dimensional Analysis and Other Methods", Water Resources Research, Vol.3
- \*\* 19. Grace R.A. and Eagleson P.S., "The Modeling of Overland Flow", - Water Resources Research Vol. No.2 No.3, 1966
20. Grace R.A. and Eagleson P.S. "Scale Model of Urban Runoff From Storm Rainfall", Proc. ASCE paper No. 5249 HY2, 1967
- \*\* 21. Zanobetti D. et Lorgeré H., "Le Modèle Mathématique que du Delta du Mékong", La Houille Blanche No.1, 1968, No.4, 1968, No.5, 1968.
- \*\* 22. Crawford N. & Linsley R.K., "Digital Simulation in Hydrology; - Stanford Watershed Model IV", Technical Report No.39, Department of Civil Engineering Stanford University, July 1966.
- \*23. Hurst H.E., "Long Term Storage Capacity of Reservoirs", ASCE Transactions, papers No.2447
- \* 24. Morán P.A.P., "The Theory of Storage", Mauthen and Co., 1961
- \* 25. Chow V.T. and Ramaseshan, "Sequential Generation of Rainfall and Runoff Data", Proc. ASCE paper No.4416, HY4, 1965, "Closure", - Proc. ASCE, discussions HY4, 1966.
- \*\* 26. Mobashen Fereidoun, "Economic Evaluation of a Water Resources - Development Project in a Developing Economy" Water Resources Center Contribution No.126, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, California, July 1968.
27. Leibenstein, H., "Economic Backwardness and Economic Growth", John Wiley and Sons, Inc, 1963, p. 40-41
- \*\* 28. Hurst H.E., "Long-Term Storage Capacity of Reservoirs", Transactions ASCE, paper No.2447, 1950.
- \*\* 29. Lloyd, E.H. "Stochastic Reservoir Theory", en Advances in Hydroscience editado por V.T.Chow, Vol. 4, Academic Press, N.Y., 1967.
- \*\* 30. Maass A., Design of Water-Resource Systems, capítulo 10, Harvard University Press, 1962
- \*\* 31. Buras N., "Dynamic Programming in Water Resources Development", en Advances in Hydroscience, editado por V.T.Chow, Vol.3, Academic Press, N.Y. 1966
- \* 32. Chow V.T., "The Progress of Hydrology", en Isotopes in Hydrology, proceeding of a symposium, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1967.

REFERENCIAS (Continuación)

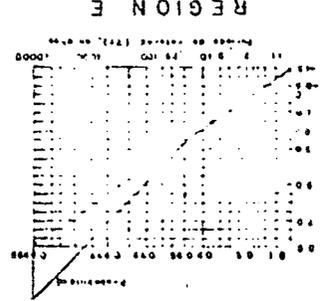
- \*\* 33. Bock P, Banks H.O., Chow V.T., Hazen R., "Useful Applications of Earth-Oriented Satellites-Hydrology", National Academy of Sciences, Washington D.C., 1969.



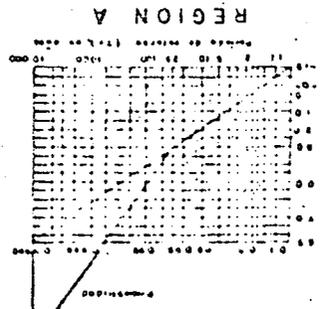
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada

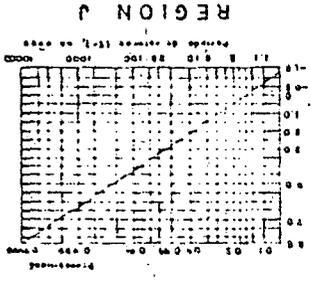


Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada

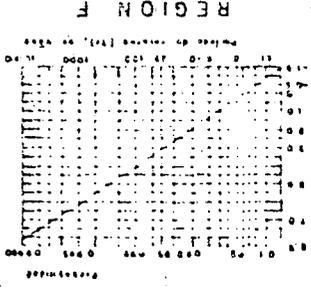


NOTA:  
Los gráficos se refieren a las  
regiones mostradas en la fig. 14

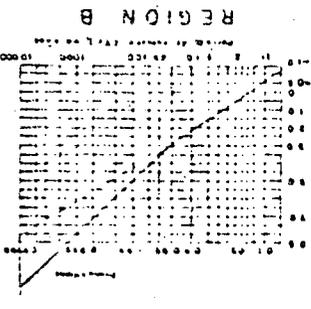
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



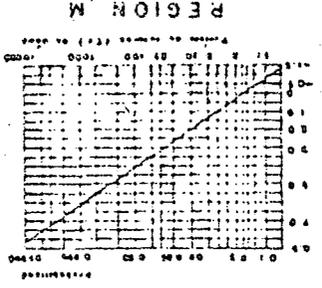
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



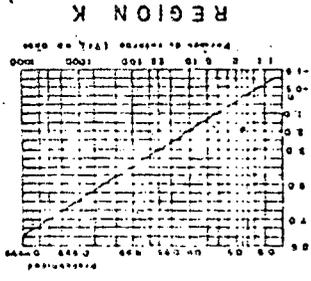
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



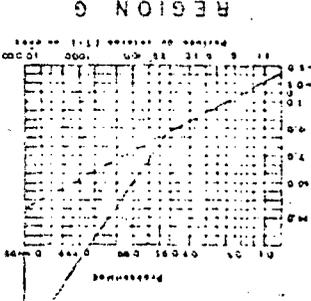
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



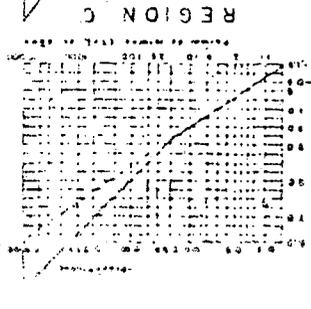
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



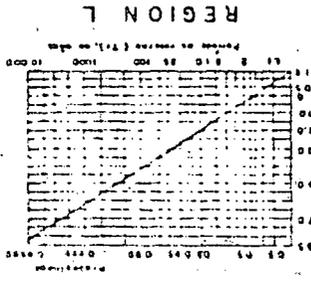
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



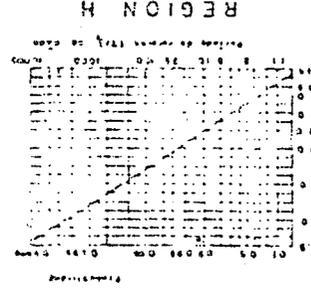
Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



Y(T<sub>r</sub>) Variable normalizada



TITULO 15 ESTIMACION DE LA VARIABLE NORMALIZADA PARA LA REGIONALIZACION

DE GASTOS MAXIMOS

$Q(T_r) = A \cdot Y(T_r) + B$   
 $Q(T_r)$  gasto máximo para un periodo de  
retorno  $(T_r)$  m/seg  
 $Y(T_r)$  variable normalizada para un  $(T_r)$   
AY B parámetros regionales de Gumbel  
(Tabla 5)

Regiones	Parámetros regionales A y B Gumbel I para gastos máximos		Número de esta ciclos-año
A	$A = \frac{0.62 \ 0.32 \ 0.51 \ 1.15}{\frac{AR \ S \ I}{10.18}}$	$B = \frac{0.34 \ 0.36 \ 0.42 \ 1.01}{\frac{AR \ P \ I}{547.95}}$	446
B	$A = \frac{1.73 \ 0.25 \ 3.40 \ 3.01}{\frac{AR \ S \ P}{2.29}}$ $1.07 \ I$	$B = \frac{3.01 \ 4.10 \ 3.57}{\frac{173407 \ L \ S \ P}{0.60 \ 3.60}}$ $AR \ I$	208
C	$A = \frac{0.56 \ 0.32 \ 1.12}{\frac{AR \ S \ P}{0.42 \ 0.43}}$ $1.13 \ L \ I$	$B = \frac{0.41 \ 0.14 \ 0.77}{\frac{AR \ S \ P}{0.28}}$ $2.16 \ L$	253
D	$A = \frac{0.53 \ 1.23}{\frac{5.71 \ AR \ I}{0.10 \ 0.71}}$ $L \ P$	$B = \frac{0.47 \ 0.656 \ 0.86}{\frac{AR \ P \ I}{0.07 \ 0.30}}$ $2267 \ L \ E$	450
E	$A = \frac{0.50 \ 1.45}{\frac{AR \ P}{0.09 \ 0.24 \ 0.21}}$ $6336 \ I \ S \ L$	$B = \frac{0.39 \ 0.52 \ 0.39 \ 2.65}{\frac{L \ AR \ S \ P}{0.08}}$ $Exp \ 16.2 \ I$	450
F	$A = \frac{0.53 \ 0.67 \ 1.81}{\frac{3.82 \ AR \ S \ I}{0.76}}$ $P$	$B = \frac{0.48 \ 0.64 \ 1.77}{\frac{1.21 \ AR \ S \ I}{0.50}}$ $P$	293
G	$A = \frac{0.44 \ 0.80}{\frac{AR \ I}{0.06}}$ $15.5 \ S$	$B = \frac{0.61 \ 0.72 \ 0.52}{\frac{AR \ P \ I}{0.34 \ 0.16}}$ $529 \ L \ S$	499
H	$A = \frac{0.33 \ 0.28 \ 0.13 \ 0.36 \ 0.71}{\frac{L \ AR \ S \ P \ I}{12.40}}$	$B = \frac{0.42 \ 0.32 \ 1.77 \ 0.62}{\frac{AR \ L \ P \ I}{Exp \ 14.4}}$	261
I	$A = \frac{0.44 \ 2.90}{\frac{AR \ I}{0.97 \ 0.81}}$ $29375 \ S \ P$	$B = \frac{0.40 \ 2.48}{\frac{AR \ I}{0.82 \ 1.10}}$ $117 \ S \ P$	100
J	$A = \frac{0.33 \ 0.88}{\frac{22 \ AR \ P}{1.14 \ 0.18}}$ $I \ L$	$B = \frac{0.80 \ 1.06}{\frac{AR \ I}{0.17}}$ $149 \ L$	197
K	$A = \frac{0.41}{\frac{2696 \ L}{0.60 \ 0.54 \ 0.65}}$ $S \ P \ I$	$B = \frac{0.45 \ 0.21 \ 0.76}{\frac{AR \ P \ I}{0.49}}$ $250 \ S$	222
L	$A = \frac{0.56 \ 1.46}{\frac{Exp \ 38.5 \ L \ S}{0.62 \ 1.80}}$ $AR \ I$	$B = \frac{1.08 \ 1.26 \ 0.44}{\frac{Exp \ 77.8 \ L \ S \ P}{2.35 \ 0.42}}$ $I \ AR$	198
M	$A = \frac{0.28 \ 0.37 \ 0.59 \ 0.68}{\frac{AR \ S \ P \ I}{0.12}}$ $4.8 \ L$	$B = \frac{0.84 \ 0.42 \ 1.28 \ 0.46}{\frac{AR \ S \ P \ I}{0.40}}$ $2379 \ L$	152

A y B Parámetros de Gumbel  
L. Longitud, en Km AR. Area, en km<sup>2</sup> S. Pendiente, en fracción P. Precipitación media anual, en mm I. Precipitación máxima en 24 hrs. y período de retorno de 10 años, en mm.

Tabal 5 Ecuaciones regionales de gastos máximos.

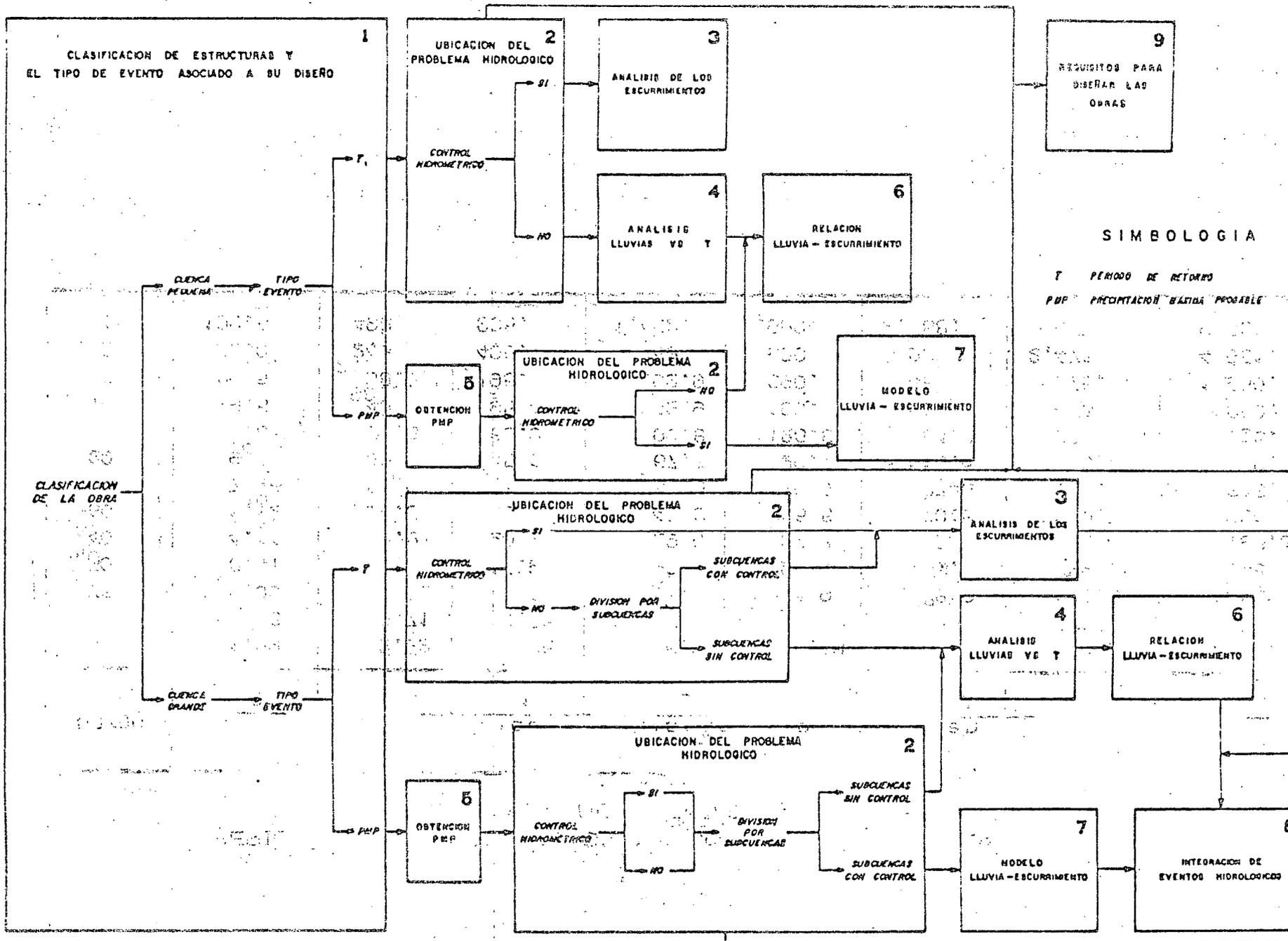


TABLA 6 SECUENCIA DE CALCULO PARA DEDUCIR LA AVENIDA DE DISEÑO O DE REVISION

TABLA 6.2

PERIODOS DE RETORNO ASOCIADOS CON DIVERSOS GRADOS DE RIESGO  
Y VIDA DE DISEÑO ESPERADA

Riesgo %	Vida de diseño esperada, en años							
	2	5	10	15	20	25	50	100
95	1.29	2.22	3.86	5.52	7.18	8.85	17.2	33.9
90	1.46	2.71	4.86	7.03	9.19	11.4	22.2	43.9
75	2.00	4.13	7.73	11.0	14.9	18.6	36.6	72.6
50	3.41	7.73	14.9	22.1	29.4	36.6	72.6	145.0
40	4.44	10.3	20.1	29.9	39.7	49.5	98.4	196.3
30	6.12	14.5	28.5	42.6	56.5	70.6	140.7	281.
25	7.46	17.9	35.3	52.6	70.0	87.3	174.	348.
20	9.47	22.9	45.3	67.7	90.1	113.0	225.	449.
15	12.8	31.3	62.0	90.8	123.6	154.3	308.	616.
10	19.5	48.0	95.4	142.9	190.	238.	475.	950.
5	39.5	98.0	195.	292.9	390.	488	975.	1,950.
2	99.0	248.	495.	743.	990.	1,238.	2,476.	4,951.
1	199.5	498.	995.	1,492.	1,990.	2,488.	4,977.	9,953.



DIRECTORIO DE ALUMNOS DEL CURSO: HIDROLOGIA SUPERFICIAL  
DEL 28 DE AGOSTO AL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1978

NOMBRE Y DIRECCION

JORGE CASTRO ALBONCE  
Japón No. 76 Col. Romero Rubio  
México 9, D.F.  
Tel: 789-30-23

ING. JULIO CESAR CERVANTES PELCASTRE  
Calle 315 No. 614  
Col. Nva. Atzacolco  
México 14, D.F.  
Tel: 577-30-80

JESUS MIGUEL CERVANTES RODRIGUEZ  
Real de los Reyes No. 87-D 303  
Col. Coyoacán  
México 21, D.F.  
Tel: 544-90-96

ING. ARTURO CORTES TATACOYA  
Degollado 198-9  
Col. Guerrero  
México 3, D.F.  
Tel: 529-56-03

JUAN FCO. CRUZ ROMAN  
Edif. 63-B-502 Unidad Vallejo  
Col. Lindavista  
México 14, D.F.  
Tel:

LIC. EDUARDO FLORES SAUCEDA  
Edif. A-9 Depto. 402  
Torres de Mixcoac,  
México 19, D.F.  
Tel: 593-97-05

JOSE ALBERTO GARCIA GOMEZ  
Sabinos No. 32  
Jardines de San Mateo  
México, D.F.  
Tel: 373-09-31

MARIO GUEMEZ VERA  
Amado Nervo No. 44-2  
Col. Sta. Ma. la Ribera  
México 4, D.F.  
Tel: 535-94-33

EMPRESA Y DIRECCION

Com. del Plan Nat. Hidráulico  
Tepic No. 40, Col. Roma  
México 7, D.F.  
Tel: 574-49-43

S.A.R.H. Control de Ríos  
Insurgentes 30-32  
Col. Juárez  
México, D.F.  
Tel: 535-81-49

C.P.N.H.  
Tepic No. 40  
México 7, D.F.

S.A.R.H.  
Sierra Gorda No. 23  
Col. Tecamachalco  
México 10, D.F.  
Tel: 520-58-17

S.A.R.H.  
Reforma 46-P.E.  
México 1, D.F.  
Tel: 535-22-20

S.A.R.H. Depto. Desarrollo Mod.  
Reforma 69-4o. piso  
México 1, D.F.  
Tel: 535-25-25

S.A.R.H.  
Sierra Gorda No. 23  
Tecamachalco  
México 10, D.F.  
Tel: 520-58-17

C.P.N.H.  
Tepic No. 40  
Col. Roma  
México 7, D.F.  
Tel: 574-49-43

DIRECTORIO DE ALUMNOS DEL CURSO: "HIDROLOGIA SUPERFICIAL"  
DEL 28 DE AGOSTO AL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1978

NOMBRE Y DIRECCION

ING. J. JESUS LANDEROS ORTIZ  
 Av. Ezequiel No. 78-9  
 Col. Gpe. Tepeyac  
 México 14, D.F.  
 Tel: 5 37-40-54

JAVIER LEY REYES  
 5 de febrero No. 132-7  
 Col. Obrera  
 México 8, D.F.  
 Tel:

CONRADO LEZAMA MUÑOZ, ING.  
 Martín Serrano No. 16  
 Circuito Escultores,  
 Cd. Satélite, Edo. de México

ING. JACOBO LOPEZ AGUILAR  
 Coahuila 758 Nte.  
 Cd. Obregón, Son.  
 Tel: 4-41-18

ING. DANIEL LOPEZ DE LARA CASTAÑON  
 Calle Xitle No. 360  
 Frac. Los Volcanes  
 Cuernavaca, Mor.  
 Tel: 546-35

ING. RAUL LOPEZ TSUBUKU  
 Batalla de Celaya L-14  
 Col. Zona Residencial Militar  
 México 10, D.F.  
 Tel: 520-86-92

ING. CUAUHEMOC ORDOÑEZ MEDINA  
 Av. Guadalupe y Ramírez No. 20  
 Col. Xochimilco  
 México 23, D.F.  
 Tel: 676-02-44

ING. PASCUAL RAMOS BLANCO  
 Edo. Colima 82-3  
 Col. Providencia  
 México 14, D.F.

EMPRESA Y DIRECCION

C.A.V.M.  
 Baldaras 55  
 México 1, D.F.  
 Tel: 585-50-66 Ext. 206

S.A.R.H.  
 Reforma 46- P.E.  
 México 1, D.F.  
 Tel: 5 35-22-20

C.P.N.H.  
 Tepic No. 40 - 1er. piso  
 Col. Roma  
 México 7, D.F.  
 Tel: 5 84-72-01

S.A.R.H.  
 Hidalgo y Sinaloa  
 Cd. Obregón, Son.  
 Tel: 3-52-95

C.P.N.H.  
 Tepic No. 39  
 Col. Roma  
 México 7, D.F.  
 Tel: 5 74-66-92

S.A.R.H.  
 Sierra Gorda No. 23  
 Lomas de Tecamachalco  
 México 10, D.F.  
 Tel: 5 20-58-17

S.A.R.H.  
 Insurgentes 30-3er. piso  
 Col. Juárez  
 México 7, D.F.  
 Tel: 592-57-65

C.P.N.H.  
 Tepic No. 40  
 México 7, D.F.  
 Tel: 574-49-43

DIRECTORIO DE ALUMNOS DEL CURSO: "HIDROLOGIA SUPERFICIAL"  
DEL 28 DE AGOSTO AL 20 DE SEPTIEMBRE DE 1978

---

NOMBRE Y DIRECCION

SALVADOR RIVERO LABORDE  
Cerro Gordo 300  
Col. Campes tre Churubusco  
México 21, D.F.  
Tel: 5 44-69-16

ELOY GABRIEL SALGADO NOCHEBUENA  
Lago Chalco No. 27-2  
Col. Anáhuac  
México 17, D.F.

ING. FRANCISCO SANDOVAL PADILLA  
Santander No. 76  
Col. San Rafael Azcapotzalco  
México 16, D.F.  
Tel: 561-68-84

RAMON VARGAS SANTOS  
Torres Adalid 1559-9  
Col. Narvarte  
México 12, D.F.  
Tel:

ING. PEDRO VERJAN VARGAS  
Virginia 164  
Col. Nativitas  
México 13, D.F.  
Tel: 532-27-32

FRANCISCO VIRAMONTES MARTINEZ  
Arquímedes 77-4  
Col. Polanco  
México 5, D.F.  
Tel: 250-34-79

MAURO TRINIDAD BAUTISTA  
Ciprés No. 37-14  
Col. Sta. Ma. la Ribera  
México 4, D.F.

EMPRESA Y DIRECCION

Ing. y Proces. Elect., S.A.  
San Lorenzo 153  
Col. Del Valle  
México, D.F.  
Tel: 575-40-77

S.A.R.H.  
Balderas 55-4o. piso  
México 1, D.F.  
Tel: 585-50-66 Ext. 408

C.A.V.M.  
Balderas 55-204  
México 1, D.F.  
Tel: 510-02-94

S.A.R.H.  
Reforma 46-9o. piso  
México 1, D.F.  
Tel: 546-47-05

C.A.V.M.  
Balderas 55-2o. piso  
México 1, D.F.  
Tel: 510-02-94

S.A.R.H.  
Reforma 69-19  
México 1, D.F.  
Tel: 591-18-37 y 591-19-42

S.A.R.H. Control de Ríos  
Insurgentes 30-32  
Col. Juárez  
México 6, D.F.  
Tel: 535-81-49

