

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

FACULTAD DE AGRICULTURA



INTRODUCCION A LOS APROVECHAMIENTOS
HIDRAULICOS SUPERFICIALES.

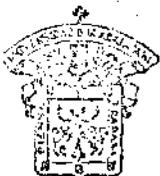
TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRONOMO

P R E S E N T A N

ANSELMO PEREZ RENDON

SERGIO ANTONIO RODRIGUEZ RIOS

Las Agujas, Municipio de Zapopan, Jal.
ENERO DE 1988



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
 Facultad de Agricultura

Expediente
 Número

24 de Junio de 1987



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

ING. ANDRES RODRIGUEZ GARCIA
 DIRECTOR DE LA FACULTAD DE AGRICULTURA
 DE LA UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
 PRESENTE

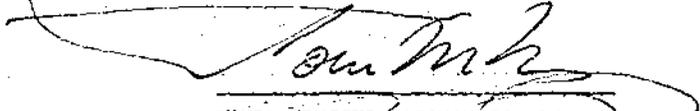
Habiendo sido revisada la Tesis del Pasante _____

ANSELMO PÉREZ RENDÓN Y SERGIO ANTONIO RODRÍGUEZ RÍOS, titulada -

" APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUPERFICIALES."

Damos nuestra aprobación para la impresión de la misma.

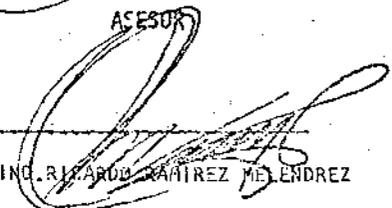
DIRECTOR.


 ING. ERNESTO ALZAMONTES LAU

ASESOR

ASESOR


 ING. SALVADOR MENA MUNGUÍA


 ING. RICARDO MARTÍNEZ MELÉNDEZ

hlg.

AGRADECIMIENTOS

A través de este documento queremos manifestar nuestro agradecimiento al personal Directivo y Docente de la Facultad de Agricultura de la Universidad de Guadalajara, por el gran esfuerzo que realizan tendiente a la formación de buenos Profesionistas. En particular al Ingeniero Ernesto Miramontes Lau, quien a lo largo de nuestra formación académica recibimos amistad y estímulo a la superación.

De igual manera queremos agradecer los valiosos consejos de nuestro Director y Asesores para desarrollar el presente trabajo de tesis.

Finalmente expresamos nuestro agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna manera colaboraron a la realización del presente trabajo.

ANSELMO PEREZ RENDON

SERGIO A. RODRIGUEZ RIOS

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

Anselmo Pérez Alonzo
Celia Rendón de Pérez

A MIS HERMANOS:

Esther Pérez R.
Celia Pérez R.
Rafael Pérez R.
Eilda Pérez R.
Oscar Pérez R.
Sonia Pérez R.

A MI ESPOSA E HIJOS:

Rosario Bacilio de P.
Oscar O. Pérez Bacilio
Sandra A. Pérez Bacilio
V. David Pérez Bacilio

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

(+) Irma Enedina Ríos Valderrama
Antonio Rodríguez Díaz

A MIS HERMANOS:

Gloria Alicia Rodríguez Ríos
Hilda Leticia Rodríguez Ríos
Jorge Luis Rodríguez Ríos
Rosa Rodríguez Ríos
Roxana Berenice Rodríguez Ríos

A MI ESPOSA:

Adriana Aguilar Lafarga

A MI HIJO:

Sergio Antonio Rodríguez Robles



BIBLIOTECA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

INTRODUCCION A LOS APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS SUPERFICIALES

I N D I C E

CAPITULO I	Pag.
INTRODUCCION	1
1.1.- ¿Qué es la Hidrología?	2
1.2.- Ciclo Hidrológico y finalidades de la Hidrología.	2
1.3.- Necesidades de los estudios hidrológicos	5
CAPITULO II	
EXPOSICION DEL ESTUDIO HIDROLOGICO DETALLADO	6
II.1.- Características fundamentales del estudio hidrológico detallado.	7
II.2.- Datos necesarios para realizar un estudio hidrológico de una presa de almacenamiento.	8
II.3.- Procesamiento de datos:	10
II.1.a.- Cálculo de datos faltantes de precipitación.	10
II.1.b.- Cálculo de la precipitación media anual en la cuenca.	15
II.1.c.- Cálculo de características fisiográficas.	19
II.4.- Cálculo del coeficiente de escurrimiento.	28
II.5.- Exposición del estudio hidrológico detallado.	37

CAPITULO III

CALCULO DE DEMANDAS Y CALENDARIO TEORICO DE RIEGO	55
III.1.- Procedimiento detallado.	56
III.1.a.- Introducción	56
III.1.b.- Selección del plan de cultivos	56
III.1.c.- Determinación de los usos consuntivos. (método de Blancy--- Criddle modificado).	60
III.1.d.- Método para determinar la lluvia efectiva.	67
III.1.e.- Cálculo para las láminas de riego y de su calendario de aplicación.	73
III.1.f.- Cálculo de la demanda anual.	87
III.2.- Procedimiento expedito.	87
III.2.a.- Síntesis del método.	87
BIBLIOGRAFIA.	89

C A P I T U L O I

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

En este breve capítulo trataré de hacer resaltar la necesidad del estudio de la HIDROLOGIA como base para la planeación, proyecto y realización de las obras hidráulicas en términos generales. Comprenderá tal capítulo los siguientes incisos:

I.1.- ¿QUE ES LA HIDROLOGIA?

I.2.- CICLO HIDROLOGICO Y FINALIDAD DE HIDROLOGIA.

I.3.- NECESIDADES DE LOS ESTUDIOS HIDROLOGICOS.



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

I.1.- ¿QUE ES LA HIDROLOGIA?

La HIDROLOGIA 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 ambiente, incluyendo su relación con los seres vivientes.

La HIDROLOGIA estudia los fenómenos hidrometeorológicos que gobiernan a las precipitaciones y a los escurrimientos y que determinan las sequías y las grandes crecientes, estudia también las modificaciones que sufre el escurrimiento producidas por la evaporación, accidentes topográficos y constitución del suelo, estudia también las modificaciones ocurridas en el escurrimiento por alteraciones artificiales (regiones desmontadas, regiones reforestadas, construcción de presas, drenes, carreteras, etc.); también compara las variaciones que tiene el escurrimiento en cuencas situadas en condiciones idénticas de precipitación pero con características fisiográficas diferentes.

I.2.- CICLO HIDROLOGICO Y FINALIDAD DE LA HIDROLOGIA.

El abastecimiento mundial de agua dulce, se tiene generalmente de la precipitación pluvial que proviene de la evaporación del agua de mar. El proceso de intercambio de humedad del mar a la tierra y viceversa, se conoce como CICLO HIDROLOGICO.

I.2.a.- CICLO HIDROLOGICO (Síntesis)

La primera etapa en el ciclo hidrológico es la evaporación del agua en los océanos, este vapor es llevado sobre los continentes por las masas de aire en movimiento. Si el vapor es enfriado hasta su punto de rocío se condensa en gotas pequeñas que forman nubes o neblina.

En condiciones meteorológicas favorables estas gotas se agrandan y caen como precipitación o lluvia.

Unas dos terceras partes de la precipitación que llega a la superficie regresan a la atmósfera por evaporación del agua, del suelo y de la vegetación y por la transpiración de las plantas.

La tercera parte restante de la precipitación regresa finalmente al océano por conductos superficiales y subterráneos.

En las figuras I-1 y I-2 de la siguiente página se ilustran el ciclo hidrológico desde un punto de vista descriptivo y el ciclo hidrológico desde el punto de vista cualitativo, respectivamente.

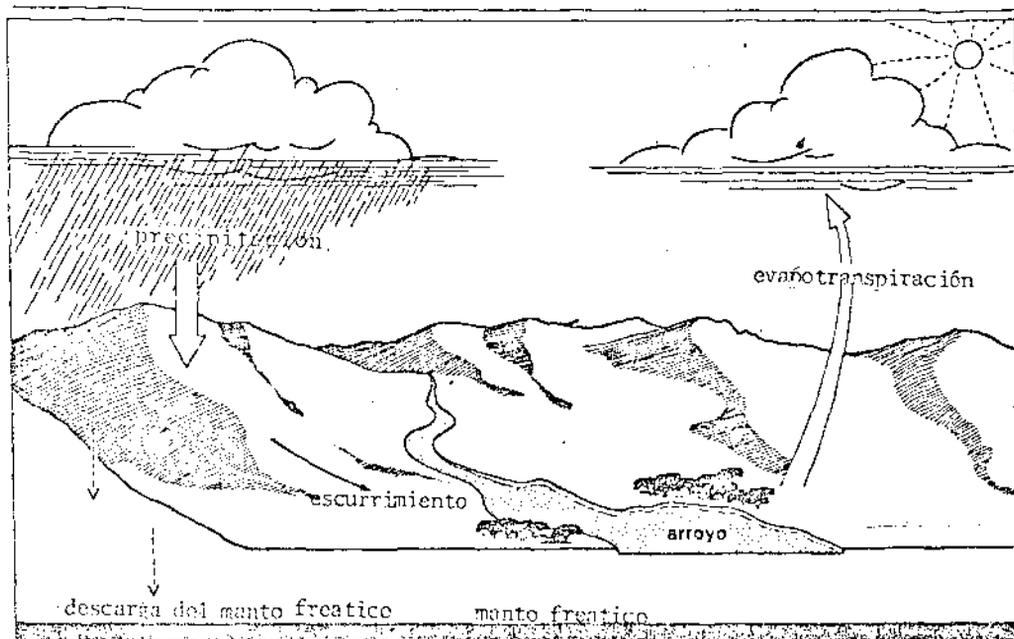


Fig. 1. Generalización del ciclo hidrológico en regiones semiáridas y trópico seco

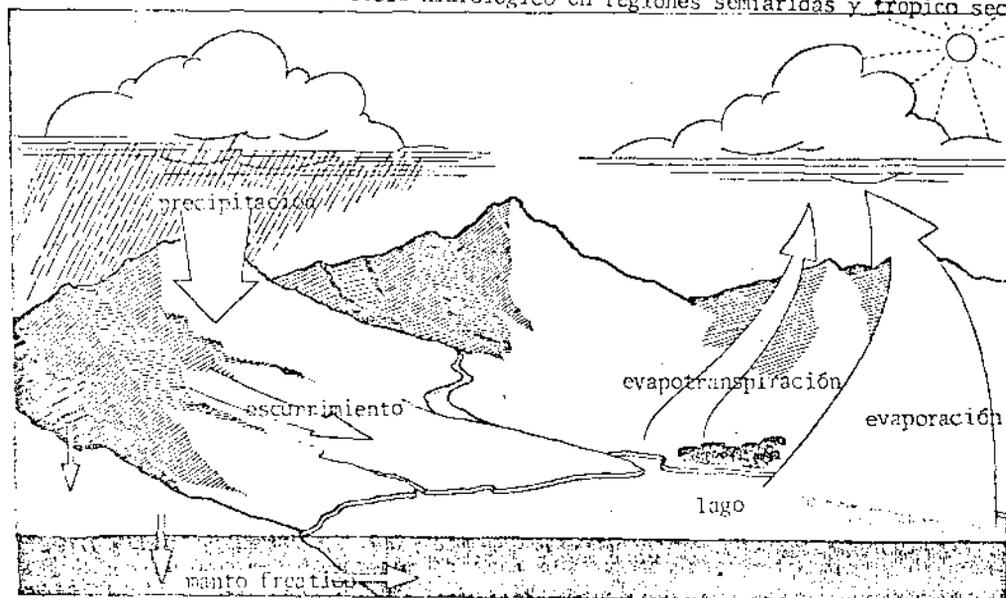


Fig. 2. Generalización del ciclo hidrológico en regiones templadas y tropicales húmedas.

I.2.b.- FINALIDAD DE LA HIDROLOGIA.

La Hidrología tiene como finalidad el estudio de la intensidad y ritmo de intercambio del agua en las diversas fases del ciclo hidrológico, en resumen estudia las variaciones del agua en el tiempo y en el espacio.

Dentro de la Hidrología la finalidad de los "Estudios Hidrológicos" es primordialmente conocer los volúmenes o gasto que transporta una corriente y la manera más conveniente de utilizarlos o eliminarlos así como la determinación de la avenida máxima que, con una determinada frecuencia, puede presentarse en un lugar.

Los fines más comunes para aprovechar el agua de una corriente son:

- a) Riego
- b) Generación de Energía Eléctrica
- c) Dotación de Agua Potable
- d) Control de Avenidas
- e) Centros de Recreo
- f) Navegación
- g) Control de Azolves
- h) Recarga de Acuíferos

En resumen la Hidrología proporciona la información necesaria para el diseño y construcción de una obra hidráulica que controle o utilice el agua.

1.3.- NECESIDADES DE LOS ESTUDIOS HIDROLOGICOS.

Como anteriormente se mencionó los estudios hidrológicos persiguen una diversidad de fines y cada uno de tales aprovechamientos tienen sus peculiaridades, teniendo además una gran variedad en los datos disponibles, el resultado es que cada caso es distinto a los demás, encerrando cada uno sus problemas especiales; pero en todos hay que determinar fundamentalmente:

- 1) Cantidad de agua de que se dispone
- 2) Cantidad de agua que se va a extraer
- 3) Cantidad de agua perdida
- 4) Cantidad de azolves

Cada uno de los incisos anteriores es un problema, el cual se debe resolver en la forma más conveniente y sencilla posible.

Es en síntesis el objeto de un estudio hidrológico para una obra hidráulica, capacidad de azolves, etc.

De lo anteriormente expuesto se deduce la necesidad e importancia que tienen los estudios hidrológicos al ser la base de una futura obra hidráulica.

C A P I T U L O I I

EXPOSICION DEL ESTUDIO HIDROLOGICO DETALLADO

En el presente capítulo se describe de una manera sintética el estudio hidrológico para PRESAS DE ALMACENAMIENTO, en seguida se marcan los datos que son necesarios para la realización de tal estudio y a continuación se dan procedimientos para el procesamiento de datos que se utilizan tanto en el Estudio Hidrológico Detallado como en el Simplificado que realizan las gerencias de obras en los Estados y para el cual se da por último su secuela de cálculo. Comprende el capítulo los siguientes incisos y temas:

- II.1.- CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DEL ESTUDIO HIDROLOGICO - DETALLADO
- II.2.- DATOS NECESARIOS PARA REALIZAR UN ESTUDIO HIDROLOGICO - DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO
- II.3.- PROCESAMIENTO DE DATOS
 - II.3.a.- CALCULOS DE DATOS FALTANTES DE PRECIPITACION
 - II.3.b.- CALCULO DE LA PRECIPITACION MEDIA ANUAL - EN LA CUENCA
 - II.3.c.- CALCULO DE CARACTERISTICAS FISIOGRAFICAS DE LA CUENCA
- II.4.- CALCULO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO
- II.5.- EXPOSICION DEL ESTUDIO HIDROLOGICO DETALLADO

II.1.a.- CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES

El estudio hidrológico detallado para PRESAS DE ALMACENAMIENTO consiste en la estimación de volúmenes escurridos mensuales en la cuenca, a partir de los datos de lluvia mensuales en una estación climatológica próxima al centro de gravedad de la cuenca del proyecto; con tales volúmenes escurridos mensuales se estiman los anuales y posteriormente el volumen escurrido medio anual. Se proponen varias capacidades totales para la presa y se analizan calculándose los volúmenes derramados, evaporados y aprovechables medios anuales que se tendrían para cada una; con los valores calculados para los volúmenes aprovechables dividiéndolos entre el valor de la demanda anual en m^3 por Ha. previamente calculada, se obtienen las superficies probables de beneficio para cada capacidad total propuesta.

Graficando en el eje de las ordenadas las capacidades totales propuestas y en el eje de las abscisas las superficies en Ha. beneficiadas con cada una, se obtiene la gráfica CAPACIDADES BENEFICIOS TEORICOS, de la cual se selecciona la capacidad o capacidades totales más convenientes para analizar en detalle por medio de funcionamiento analítico del vaso por meses.

El análisis de la cantidad total por medio del funcionamiento analítico del vaso para obtener su superficie máxima de beneficio que se tiene cuando se presente el 5% de deficiencias en el período, es una de las características funda

mentales de tal estudio hidrológico detallado.

A continuación se estima la avenida máxima calculando el gasto máximo regional según se indicará en el inciso III.2 o bien el gasto máximo local según se expone en el inciso III.3. Una vez calculado el gasto de la avenida máxima se realiza su tránsito por el vaso de almacenamiento para la capacidad total adoptada, lo anterior se realiza por medio del método gráfico de Goodridge que se describe en detalle en el inciso III.4 o por el método analítico de Puls. Tanto el cálculo del gasto de avenida máxima como su tránsito por el vaso de almacenamiento son dos de las características fundamentales de tal estudio hidrológico detallado.

II.2.- DATOS NECESARIOS PARA REALIZAR UN ESTUDIO HIDROLOGICO DE UNA PRESA DE ALMACENAMIENTO

Como datos necesarios para la elaboración del estudio hidrológico se requiere lo siguiente:

- a) Coordenadas de la boquilla y de los centros de gravedad de la cuenca y de la zona de riego.
- b) Planos topográficos de la cuenca o copia fotostática de la cuenca, si fue tomada de una carta geográfica (DETENAL? -- CARTAS DE LA DEFENSA, etc.)
- c) Datos de precipitación anual de tres estaciones circunvecinas a la cuenca, con período común de datos de cuando me--

nos 5 años y que al formar un triángulo con ellas de vértices, la cuenca quede comprendida dentro de dicho triángulo totalmente o cuando menos una parte y su centro de gravedad.

- d) Datos de precipitación y evaporación total mensual y de temperatura media mensual en una estación climatológica lo más próxima al proyecto como sea posible y cuyo período de datos sea de cuando menos de 12 años (Estación Base).
- e) Informe de la visita de reconocimiento al vaso y a la cuenca del proyecto, en el cual se concentra la información geológica y de vegetación del vaso y cuenca y respecto a este último se requieren también los datos de tipo y uso de sus suelos.
- f) Planos topográficos del vaso, boquilla y zona de riego o en su defecto sólo la gráfica AREAS-CAPACIDADES del vaso, superficie levantada en Ha. de zona de riego y el perfil de la boquilla.
- g) Plan de cultivos propuesto por la gerencia de obras en el Estado de acuerdo a la Agricultura actual y a las recomendaciones del Estudio Agrológico.
- h) Datos físicos de los suelos de la zona de riego como son:

Capacidad de Campo, Punto de Marchitamiento permanente y -
Densidad aparente por horizontes de 30 cm. de cada uno; en
su defecto datos sobre la textura predominante de la zona
de riego.

- i) Definición de acuerdo a las condiciones topográficas y geológicas de vaso, de la longitud de cresta propuesta para el vertedor así como del tipo elegido.

II.3.- PROCESAMIENTO DE DATOS.

Dentro de este inciso se describirán los lineamientos a seguir para el cálculo de ciertos conceptos que requieren un análisis especial, como son los siguientes:

II.3.a.- CALCULO DE DATOS FALTANTES DE PRECIPITACION.

Antes de entrar a la descripción de uno de los métodos más comunes para la deducción de datos faltantes de precipitación, es conveniente recordar varios conceptos.

II.3.a.1.- INTRODUCCION.

PRECIPITACION.- Se define como PRECIPITACION toda el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico proveniente de la atmósfera. La precipitación tiene

una gran variedad de formas, pero a la Hidrología sólo interesa la lluvia y la precipitación helada (nieve y granizo).

TIPOS DE PRECIPITACION.- Para que se origine la -- precipitación es necesario que una parte de la atmósfera se - enfrié hasta que el aire se sature con el vapor de agua y se condense el vapor atmosférico. El enfriamiento de la atmósfera se logra por la elevación de aire caliente, elevación que puede ser: CONVECTIVA, OROGRAFICA y CICLONICA, definiéndose -- con lo anterior los tipos de precipitación.

MEDICION DE LA PRECIPITACION.- La cantidad de pre- cipitación se expresa como altura o lámina en milímetros que cae sobre el terreno. Esta cantidad se mide en un recipiente abierto de paredes verticales llamado: PLUVIOMETRO, consiste en un recipiente cilíndrico de aproximadamente 20 cm. de diámetro y 60 cm. de altura en el cual la tapa es un embudo receptor que descarga en una probeta graduada cuya área es de 10% del área del embudo, de manera que al leer un cm. de precipitación en la probeta se tendrá un mm. de lluvia. Para determinar las cantidades de lluvia y su variación con respecto al tiempo se utilizan pluviómetros de auto registro llamados: PLUVIOGRADOS.

REGISTROS DE PRECIPITACION O LLUVIA EN EL PAIS.- En la actualidad la Dirección de Hidrología de la S.A.R.H., así como otras dependencias como son: El Servicio Meteoroló

gico Mexicano (S. M. M.), el Instituto de Geografía de la --- U. N. A. M., la Comisión Internacional de Límites y Aguas --- (C. I. L. A.), y la Comisión Federal de Electricidad (C. F. E.); tienen una amplia red de estaciones climatológicas e hidrométricas en todo el país, por lo cual se cuenta con un número apreciable de datos para realizar los estudios hidrológicos en general.

REGISTROS DE LLUVIA INCOMPLETOS.- Con bastante frecuencia los registros de lluvia mensual de las estaciones climatológicas presentan durante uno o más años ausencia de datos mensuales, estos datos faltantes se deben calcular para obtener un mayor número posible de años de observación completos y así poder llegar a un resultado más exacto en el estudio hidrológico, para tal fin se puede utilizar el llamado: METODO RACIONAL DEDUCTIVO.

II.3.a.2.- METODO RACIONAL DEDUCTIVO.

A continuación se da la secuela de cálculo:

- a) Se efectúa la suma de precipitaciones mensuales en cada uno de los años completos.
- b) Se obtiene el promedio de la precipitación mensual dividiendo entre doce los valores calculados en el inciso anterior.

- c) Se calculan para todos los años completos los por cientos mensuales de precipitación, que serán igual a la precipitación mensual entre el promedio mensual ya calculado y por cien.
- d) Para comprobar los pasos anteriores se suman los por cientos mensuales y se calcula el promedio; debe obtenerse -- 1200 y 100 respectivamente.
- e) Se suman todos los por cientos mensuales calculados para cada uno de los meses (suma en renglones) y se anotan en en la columna 1.
- f) Los datos mensuales obtenidos en el paso anterior se dividen entre el número de años completos y se anotan en la columna 2.
- g) Se hace la hipótesis que considera que los datos mensuales faltantes, van a tener el mismo porcentaje promedio que el obtenido en el paso anterior del mes en cuestión.
- h) A continuación se calculan los datos faltantes, con ayuda de la siguiente fórmula:

$$X = \left(\frac{\sum P}{1200 - \sum S} \right) S$$

$$X = \left(\frac{\sum P}{1200 - \sum S} \right)$$

$$\therefore X = K S$$

en la cual:

X = Precipitación mensual desconocida.

P = Suma de precipitaciones mensuales conocidas en el año incompleto.

S = Suma de por cientos medios mensuales cuya precipitación se desconoce.

S = Por ciento medio en cada uno de los meses desconocidos.

i) Para los años que se han completado se aplican los incisos: a), b), c) y d).

j) A continuación se suman los por cientos de todos los meses y se obtiene el promedio, anotándose en las columnas 3 y 4 respectivamente.

k) Para comprobar que el desarrollo del método ha sido el correcto, el promedio de la suma de los valores calculados en el anterior debe ser:
1200 y 100 respectivamente.

NOTA: Para la simplificación del método:

Se recomienda para el caso en que los datos mensuales faltantes correspondan a un año en particular, se toma un período de ser posible se escogerá con seis años antes y seis -

años después del año incompleto, en el caso que lo anterior - no sea posible se complementará el ciclo de la mejor manera - posible.

II.3.a.3.- EJEMPLO NUMERICO.

A continuación en las dos siguientes formas especiales se tiene un ejemplo numérico de aplicación del Método Racional Deductivo.

II.3.b.1.- INTRODUCCION.

En distancias cortas en un terreno montañoso se observan grandes diferencias en la precipitación y también cuando cae en forma de chubascos o aguaceros en un terreno plano. Por lo anterior es necesario considerar métodos especiales para calcular la precipitación promedio en una zona.

La precipitación promedio en una cuenca es un factor de suma importancia al determinar de una manera indirecta los volúmenes escurridos en una cuenca no aforada, ya que éstos se estiman a partir de datos de lluvia en una estación climatológica cuyo valor promedio anual de precipitación se ajusta o corrige al valor de la precipitación media anual en la cuenca.

El método por aplicar para estimar la precipitación media anual en una cuenca, depende de la disponibilidad de datos y de la magnitud de dicha cuenca, distinguiéndose los siguientes métodos:

11.3.b.2.- METODO DE LAS RECTAS ISOYETAS.

Este método se aplica a cuencas de magnitud reducida en las cuales difícilmente se localizan estaciones climatológicas dentro de ellas, utilizándose para la aplicación del método sólo las más cercanas y con el mayor número de datos anuales de registro de lluvias, según la siguiente secuencia.

- a) Se seleccionan tres estaciones climatológicas que tengan un período común mínimo de 5 años de datos anuales de precipitación, procurando que al formar un triángulo con ellas como vértices éste abarque en su totalidad a la cuenca o cuando menos a una parte y al centro de gravedad de dicha. Siempre que sea posible la estación base será una de las tres estaciones climatológicas seleccionadas para formar el triángulo.
- b) Definiéndose como líneas isoyetas las que unen puntos de igual precipitación, se trazan las correspondientes a la precipitación media anual de cada estación, para las condiciones geométricas que se tienen, las isoyetas resultan ser líneas rectas paralelas y equidistantes.
- c) Se lee el valor de la precipitación en centro de gravedad de área estudiada, valor que corresponde sensiblemente a la precipitación media anual en la cuenca (P_{mc}) y que para simplificar se adopta como tal.

II.3.b.3.- METODO DE LAS AREAS DE INFLUENCIA O METODO DE THIESSEN.

En una cuenca en la cual dentro y cerca de ella - se tienen tres o más estaciones climatológicas con un amplio período común de observaciones, se puede seguir el siguiente método:

- a) Se trazan triángulos que ligan las estaciones más próximas entre si.
- b) A continuación se trazan líneas bisectoras perpendiculares a los lados de los triángulos, con los cuales se forman una serie de polígonos; cada uno de ellos contiene una estación.
- c) Cada polígono formado es el área de influencia de cada estación, esto es, el área tributaria. Por lo anterior, la altura de precipitación media anual en la cuenca será:

$$P_{mc} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A}$$

en donde:

P_{mc} = Precipitación media anual en la cuenca, en mm.

P_j = Precipitación media anual en la estación i , en mm.

A_j = Area tributaria de la estación i , en Km^2 .

A = Area total de la cuenca, en Km².

n = Número de estaciones localizadas dentro y cerca de la cuenca.

II.b.4.- METODO DE LAS CURVAS ISOYETAS.

Cuando el número de estaciones dentro de la cuenca es mayor de cinco se utiliza el siguiente procedimiento:

- a) Se forman isoyetas de acuerdo a los valores de la precipitación media anual.
- b) Se calculan las áreas limitadas por isoyetas y parteaguas.
- c) Para calcular la altura de precipitación media anual en la cuenca se aplica la siguiente fórmula:

$$P_{mc} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \cdot A_i}{A}$$

en la cual:

P_{mc} = Precipitación media anual en la cuenca, en mm.

P_j = Altura de precipitación media entre dos isoyetas, en mm.

A_j = Area entre isoyetas o isoyeta y parteaguas, en Km².

A = Area total en la cuenca, en Km².

n = Número de tramas entre isoyetas.

II.3.b.5.- METODO DE LAS CARTAS ISOYETAS.

Cuando ninguno de los métodos anteriormente expuestos se pueden aplicar debido a la falta de información climatológica o bien se requiere checar el valor obtenido con tal método, se recomienda calcular el valor de la precipitación media anual con ayuda de unas cartas isoyetas.

En la actualidad las mejores cartas isoyetas con que se cuenta para la República Mexicana, son las elaboradas por la S.A.R.H. para un período de observación de 40 años (1931-1940).

Para calcular la P_{mc} se localiza la cuenca y su centro de gravedad en el plano respectivo y se lee directamente el valor interpolando entre curvas isoyetas cuando sea necesario.

II.3.c.- CALCULO DE CARACTERISTICAS FISIOGRAFICAS DE LA CUENCA.

DEFINICION.- Cuenca fluvial, cuenca de drenaje o simplemente CUENCA es el área tributaria hasta un punto determinado sobre una corriente, área que contribuye al descubrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y su afluentes.

La cuenca de drenaje de una corriente esta limitada por su DIVISORIA O PARTEAGUAS, que es una línea imaginaria que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento

(originado por la precipitación) que en el sistema de corriente fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por todos los puntos de mayor topografía y en él tienen las corrientes su punto de inicio.

La mayoría de las veces se requiere dividir las grandes cuencas para facilitar su estudio, en subáreas o cuencas tributarias que las limitan parteaguas interiores. En términos generales estas subdivisiones se hacen de acuerdo con las estaciones hidrométricas existentes en la cuenca en estudio.

Del agua que se precipita una parte escurre y descarga hacia los puntos más bajos de la cuenca por lo cuales pasa la corriente principal, por lo anterior las características del escurrimiento dependen en gran parte de los factores fisiográficos de la cuenca (entre otros muchos). Entre estos se puede mencionar principalmente su área o magnitud (que incluye geología y vegetación superficial), forma, pendiente, elevación media, características del colector principal, etc.

11.3.c.1.- AREA O MAGNITUD (A).

El área o magnitud de una cuenca es el área en proyección horizontal encerrada por el parteaguas, expresada en Km^2 ; determinándose por levantamiento topográfico para cuencas menores de 100 Km^2 y por medio de cartas, mapas o planos topográficos (de preferencia en planos de DETENAL) para cuen-

cas mayores de 100 Km².

En hidrología es bastante difícil distinguir entre una cuenca grande y una pequeña y considerando sólo su tamaño, pues dos cuencas del mismo tamaño pueden ser diferentes completamente. Una cuenca pequeña se define como aquella cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y a las características físicas del suelo.

En una cuenca grande el escurrimiento más sensible al efecto del almacenaje en el cauce, por lo cual deberá dársele primordialmente atención a las características físicas -- de este último.

Con propósitos prácticos el Dr. Ven Te Chow ha definido como cuenca pequeña aquella cuya magnitud no excede de 250 Km².

11.3.c.2.- FORMA DE LA CUENCA.

Existen varios índices para determinar la forma de las cuencas; entre ellos uno de los más usados es el "Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius", que es la relación (K) que existe entre el perímetro P de la cuenca y el perímetro de un círculo que tenga la misma superficie A de la cuenca, esto es:

$$K = \frac{P}{2 \pi r} = \frac{P}{\frac{2 \pi \sqrt{A}}{\sqrt{\pi}}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$A = \pi r^2; \quad r = \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} \quad K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Este índice será mayor o igual a la unidad de manera que se aproximará a 1.00 cuando la firma de la cuenca se a semeje a la de un círculo, este índice es adimensional y no depende de la extensión de las cuencas; sirve en general el conocimiento del valor numérico de tal índice para tener una idea de la manera de concentración de los escurrimientos y de la potencialidad de la cuenca para generar avenidas.

II.3.c.3.- GEOLOGIA Y VEGETACION SUPERFICIAL DE LA CUENCA.

La Geología y vegetación superficial son en síntesis dos factores que sirven para normar el criterio de selección del Agrónomo, sobre todo en el concepto de coeficiente de escurrimiento.

Dentro del aspecto de la Geología superficial se debe clasificar la cuenca como permeable, semipermeable o impermeable, así como marcar las zonas de fallas o accidentes geológicos por donde pudiese haber fugas del escurrimiento.

para tener una idea de la vegetación superficial se deben calcular los llamados coeficientes de cubrimiento -- que son porcentajes de la superficie de la cuenca ocupada por bosques, terrenos cultivados, pastos, etc.

II.3.c.4.- PENDIENTE DE LA CUENCA (Sc)

Existen diversos criterios para valuar la pendiente

de una cuenca, uno de los más generalizados y sencillos es el siguiente:

A) Criterio Alvord.-

La pendiente de la cuenca según este criterio está dada por la fórmula:

$$S_c = \frac{D L}{A}$$

en la cual:

S_c = Pendiente de la cuenca adimensional.

D = Desnivel constante entre curvas de nivel, en Km.

L = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca, en Km.

A = Area de la cuenca, en Km.²

II.3.c.5.- ELEVACION MEDIA DE LA CUENCA.

Para estimar la elevación media de la cuenca se divide el mapa topográfico de la misma, en cuadrados de igual tamaño considerando que cuando menos 100 intersecciones queden comprendidas dentro de la cuenca.

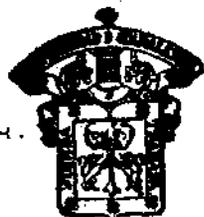
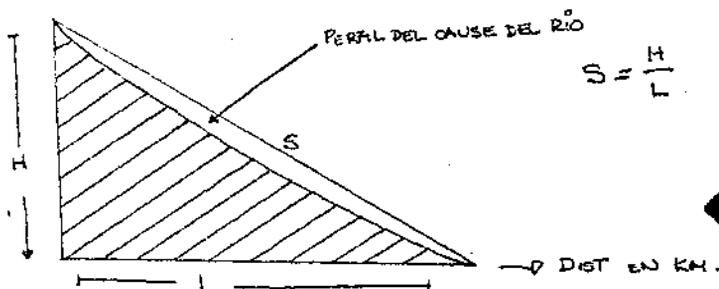
La elevación media de la cuenca se calcula como el promedio de las elevaciones de todas las intersecciones.

II.3.c.6.- PENDIENTE DEL CAUCE.

Para estimar la pendiente del cauce principal se tienen varios métodos, de los cuales los más usados y sencillos son:

A) Pendiente Promedio.-

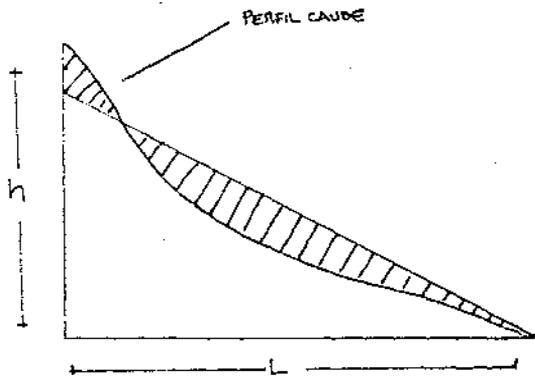
Según este método la pendiente de cauce principal se estima como la relación entre desnivel total entre la longitud horizontal del cauce, esto es:



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

B) Método de Igualación de Áreas.-

La pendiente del cauce se toma como la pendiente de una línea recta que se inicia en la parte más baja de una corriente y que forma igual área bajo de ella, como el perfil del cauce.



$$h = \frac{2a}{L}$$

a = área bajo del perfil del cauce en m.

C) Fórmula de I-Pai-Wu.-

De acuerdo a este criterio la pendiente del cauce está dada por la fórmula:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

en la cual:

S = Pendiente media del cauce, adimensional.

m = Número de tramos de igual longitud.

S_1, S_2, S_m = Pendiente de cada tramo.

II.3.c.7.- TIEMPO DE CONCENTRACION.

Se define como Tiempo de Concentración al tiempo - en horas que le tomó al agua viajar desde el punto más distante de la cuenca sobre el colector principal, hasta la boquilla o punto de interés.

Para calcular el tiempo de concentración existen - diversas fórmulas empíricas de las cuales las más utilizadas - son las siguientes:

a) FORMULA DE ROWE PARA CUENCAS PEQUEÑAS.

$$T_c = \left[\frac{0.86 L^3}{H} \right]^{0.385}$$

en la cual:

T_c = Tiempo de concentración, en horas.

L = Longitud del colector más largo, en Km, medido sobre el plano topográfico de la cuenca.

H = Desnivel total del colector o curso más largo, en m.

b) FORMULA DE KIRPICH PARA CUENCAS PEQUEÑAS.

$$T_c = \frac{0.0003245 (L)^{0.77}}{(S_c)^{0.385}}$$

en la cual:

T_c = Tiempo de concentración, en horas.

L = Longitud en línea recta desde el punto hidráulicamente más distante del colector principal al sitio de interés (boquilla), en m.

S_c = Pendiente de la cuenca, adimensional.

c) FORMULA DE LEBEDIEV PARA CUENCAS GRANDES.

$$T_c = \frac{L_R}{3.6 V}$$

en la cual:

T_c = Tiempo de concentración, en horas.

L_R = Longitud real del colector más largo, en Km. Esta longitud es medida sobre el plano de la cuenca y multiplicada por un factor de corrección que oscila entre 1.05 y 1.30 dependiendo de la pendiente de dicho colector, a mayor pendiente mayor factor de corrección y viceversa.

V = Velocidad del agua en m/seg cuyo valor fluctúa entre 0.30 y 2.5 m/seg dada en la tabla siguiente.

VELOCIDADES DEL AGUA EN M/SEG

PENDIENTE DEL CAUCE	BOSQUES (En proporción superior en la cuenca).	PASTIZALES (En proporción superior en la cuenca).	CAUCE natural no muy bien definido.
0 - 3	0.30	0.50	0.30
4 - 7	0.60	0.90	0.90
8 -11	0.90	1.25	1.50
12 -15	1.10	1.50	2.50

II.4.a.- INTRODUCCION.

Para cuencas que no están aforadas la determinación de los volúmenes escurridos se efectúa por evaluación de un porcentaje con respecto a los volúmenes llovidos, este porcentaje se denomina: COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO. Por lo anterior, el coeficiente de escurrimiento (C) es la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido en la cuenca, expresado en por ciento.

En el coeficiente de escurrimiento influyen un sin número de factores, siendo los principales

II.4.b.- METODOS PARA LA DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.

El coeficiente de escurrimiento puede ser determi-

nado por cualquiera de los procedimientos siguientes, dependiendo sólo de la disponibilidad de datos, estos procedimientos o métodos son:

1) METODO DE DETERMINACION DIRECTA.

Cuando se disponga de aforos practicados en la corriente se tienen los volúmenes escurridos, cuyos porcentajes con respecto a los volúmenes llovidos en la cuenca drenada de la estación hidrométrica analizada, dan los coeficientes de escurrimiento respectivos.

2) METODO DE COMPARACION.

En este método se compara la cuenca en estudio, con otra u otras semejantes en donde se tenga estación de aforos y por lo tanto, se conozcan los coeficientes de escurrimiento. La semejanza estará dada por la igualdad de características topográficas (pendiente, magnitud, forma de concentración, etc.), geológicas, de vegetación y climatológicas en general.

3) METODOS EMPIRICOS.

Existen varios métodos empíricos para estimar el coeficiente de escurrimiento, sin embargo, cada uno tiene como inconveniente que sólo considera dos o tres factores de todos

los que influyen y determinan el coeficiente de escurrimiento, por lo anterior es conveniente aplicar todos los métodos y en base a los resultados inferir un valor por adoptar para el coeficiente de escurrimiento medio anual.

3.a. - METODO DE LAS FORMULAS.

Este método toma en cuenta dos de los factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento, éstos son: Precipitación media anual en la cuenca y Geología de la misma.

SECUELA DE APLICACION.

1) En base al reconocimiento terrestre o aéreo, fotografías aéreas o bien cartas geológicas de la cuenca, se clasifica ésta como PERMEABLE, SEMIPERMEABLE o IMPERMEABLE. Puede una cuenca presentar dos o las tres condiciones geológicas en cuyo caso se delimitan y se les estima el porcentaje correspondiente.

2) Para la o las condiciones geológicas definidas se calcula el coeficiente de escurrimiento en % aplicando la fórmula respectiva, éstas son:

$$\text{Cuenca PERMEABLE} \quad C = \frac{P_{mc} - 250}{100.00} + 3.3$$

$$\text{Cuenca SEMIPERMEABLE} \quad C = \frac{P_{mc} - 250}{80.65} + 6.7$$

$$\text{Cuenca IMPERMEABLE} \quad C = \frac{P_{mc} - 250}{68.80} + 9.3$$

3) Se multiplica cada coeficiente de escurrimiento calculado por el porcentaje que le corresponda y se suman obteniéndose el final para la cuenca por el método de las FORMULAS.

3.b. - METODO DE LAS GRAFICAS.

En el presente método intervienen como factores -- que influyen en el coeficiente de escurrimiento los siguientes: Precipitación media anual en la cuenca, tipo de suelo y vegetación de la cuenca.

Los suelos pueden ser clasificados de acuerdo a sus propiedades hidrológicas en los siguientes 4 tipos:

Suelos tipo A. -

Suelos con potencia de escurrimiento mínimo. Son suelos con altos porcentajes de infiltración cuando están completamente mojados, consisten principalmente de arenas o gravas profundas y bien drenadas, así como loess muy permeables.

Suelos tipo B. -

Son suelos que tienen moderados porcentajes de infiltración cuando están completamente mojados, consisten de arenas de mediana profundidad, loes más compactos que los del -

tipo A y terrenos migajosos.

Suelos tipo C.-

Suelos que tienen bajos porcentajes de infiltración cuando están completamente mojados, comprenden suelos poco profundos, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable o bien conteniendo mucha arcilla y coloides, aunque menos que el tipo D.

Suelos tipo D.-

Suelos con potencial de escurrimiento alto. Son suelos que tienen muy bajos porcentajes de infiltración cuando están mojados. En estos suelos se incluye la mayor parte de las arcillas que más aumentan de volumen al mojarse, así como algunos suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

El factor vegetación de la cuenca se tomará según las siguientes condiciones:

Condición A).-

Suelos o terrenos cultivados, incluye suelos con pastizal cubierto del 50 al 75% y con pastoreo regular y bosque cubierto menor del 25%.

Condición B).-

Terrenos o zonas boscosas.

Condición C).-

Suelos sin cultivo o áreas incultas, se incluyen zonas montañosas sin bosque.

SECUELA DE APLICACION.

1) Se obtienen los porcentajes correspondientes de tipo de suelo y condición de vegetación en la cuenca, de acuerdo a la información de la visita terrestre o área o bien en base a las cartas geográficas con que se cuente de dicha cuenca.

2) Las rectas A, B y C de la gráfica se usan de la manera siguiente: cada recta se utiliza cuando las características de suelo y vegetación se correspondan, ejemplo: recta A, con suelo tipo A y condición de vegetación A; en el caso de no ser así se efectuará una interpolación entre rectas.

3) Entrando a la gráfica con el valor de la precipitación media anual en la cuenca y seleccionando la recta adecuada según suelo y vegetación, se estiman los coeficientes de escurrimiento en %.

4) Se multiplica cada coeficiente por el porcentaje que le corresponda, se efectúa la suma y se obtiene el coeficiente de escurrimiento medio anual.

5) El rango de aplicación del método anterior es para precipitaciones mayores de 250 mm. y menores de 1200 mm.

3.c.- METODO BASADO EN LOS NUMEROS DE ESCURRIMIENTO.

Según este método el coeficiente de escurrimiento se valúa por medio de la fórmula siguiente:

$$C = \frac{\left[P_{mc} - 500 \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{100} \right) \right]^2}{\left[P_{mc} \quad P_{mc} \quad 2032 \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{100} \right) \right]} \times 100$$

en la cual:

C = Coeficiente de escurrimiento, en por ciento.

P_{mc} = Precipitación media anual en la cuenca, en centímetros.

N = Número de escurrimiento. Se tomará el valor señalado en la tabla "A" que se anexa a continuación en la siguiente hoja, dependiendo del tipo y uso de suelo y de la vegetación o cobertura.

Para una cuenca formada con áreas a las que corresponda un número de escurrimiento diferente, el valor de N para la cuenca será el promedio pesado, con respecto al área, de los valores de N en cada zona, esto es:

$$N_{prom} = \frac{(N_j \times \text{área a que corresponde})}{\text{Area total}}$$

SECUELA DE APLICACION.

- 1) Se separan los tipos y usos y coberturas de los suelos en la cuenca, calculándoles sus áreas correspondientes (A_j).
- 2) Se calculan los números de escurrimiento individuales (N_j) - con auxilio de la tabla anexa siguiente.
- 3) Se calcula el Número de Escurrimiento (N).
- 4) Se calcula el coeficiente de escurrimiento medio anual (C) - aplicando la fórmula inicial.

El método anterior, fue tomado íntegramente del trabajo complementario presentado por Geosistemas, S.A. y Empresas Técnicas I.C.A. en el Simposio sobre PEQUEÑOS ALMACENAMIENTOS - efectuado el 29 de agosto de 1975 en México, D.F..

3.d.- METODO PROPUESTO EN EL NUEVO INSTRUCTIVO DE PEQUEÑOS ALMACENAMIENTOS.

En este método el coeficiente de escurrimiento se calcula por cualquiera de las dos siguientes fórmulas, según -- el valor de parámetros K , éstos son:

$$\text{para } K \leq 0.15 \quad C = \frac{P_{mc} - 250}{2000.0} \quad (1)$$

$$\text{para } K > 0.15 \quad C = \frac{P_{mc} - 250}{2000.0} \cdot K + \frac{K - 0.15}{1.50} \quad (2)$$

en tales fórmulas:

C = Coeficiente de escurrimiento, endecimal.

P_{mc} = Precipitación media anual en la cuenca; en mm.

K = Parámetro que depende del tipo y del uso o cubierta del suelo, dado en la tabla "B" que se tiene en la hoja siguiente.

SECUELA DE APLICACION.

1) Se determinan las áreas y los porcentajes correspondientes, para los tipos y usos o cubiertas del suelo en la cuenca.

2) Para cada uso y tipo de suelo, se determina el valor del parámetro K, con auxilio de la tabla "B".

3) Para cada uso y tipo de suelo, se calcula el coeficiente de escurrimiento, por medio de la fórmula (1) o (2) según el valor de K.

4) Se multiplica cada coeficiente de escurrimiento calculado - por su porcentaje respectivo, se suman los resultados obteniéndose el coeficiente de escurrimiento medio anual.

En el método anteriormente expuesto las fórmulas - tienen un rango de aplicación para precipitaciones de 350 a -- 2250 mm. Sin embargo, se aconseja emplearlas con cuidado y --- cierto criterio cuando la precipitación tiene valores cercanos a alguno de los límites marcados.

II.5.- EXPOSICION DEL ESTUDIO HIDROLOGICO DETALLADO.

II.5.a.- INTRODUCCION.

El estudio hidrológico tiene por objeto determinar las características principales de la obra, en este estudio se determinará la capacidad total más adecuada para la presa, así como su superficie máxima posible de beneficio y el gasto de - avenida máxima.

Antes de efectuar un estudio hidrológico es necesario definir los siguientes conceptos.

ALMACENAMIENTO ECONOMICO.- Desde el punto de vista

hidrológico el aprovechamiento más conveniente para una presa de almacenamiento con fines de riego, dependerá del régimen de la corriente, de la capacidad total adoptada, de las condiciones físicas del vaso, de la superficie propuesta por beneficios de las demandas de riego y de la magnitud de las pérdidas por evaporación e infiltración.

La existencia de factores adversos de índole hidrológico, topográfico o geológico, pueden restringir la capacidad total de un almacenamiento. En caso contrario, esto es, -- cuando no exista limitación alguna, la capacidad total podrá ser aquella que aproveche al máximo el escurrimiento aportado por la cuenca, en cuyo caso el almacenamiento tendrá una capacidad óptima hidrológicamente con la característica de la no existencia de derrames; sin embargo, esta solución en general no es conveniente desde el punto de vista económico.

EL ALMACENAMIENTO ECONOMICO. Puede deducirse al observar la gráfica de "Capacidades Totales - Beneficios Teóricos" que se obtiene al efectuar el estudio hidrológico y que se construye sobre ejes cartesianos en donde las ordenadas representan las capacidades totales que pueden darse al almacenamiento y las abscisas indican el beneficio correspondiente a la capacidad: de esta manera, la gráfica queda formada por una línea quebrada cuya pendiente va aumentando en cada tramo hasta llegar a un punto a -

a partir del cual la pendiente se manifiesta muy pronunciada; lo que significa que para un incremento en el beneficio, se -- requiere un incremento de almacenamiento considerable, haciéndose antieconómico proyectar almacenamientos mayores a la ordenada de ese punto de quiebre brusco, representativo de la capacidad económica recomendable para riego.

Sin embargo, en el caso de aprovechamientos para regularización de avenidas, las costas superiores de almacenamiento son las que permiten obtener mejores resultados.

PROCESO HIDROLOGICO.- La precipitación total sobre una cuenca sigue una serie de procesos más o menos complicados antes de aparecer como escurrimiento superficial que llega al vaso de una presa de almacenamiento. Es evidente que esa serie de procesos dependa de las características de la precipitación y de las propiedades físicas de la cuenca. Por lo tanto, para llevar a cabo un estudio hidrológico, es necesario conocer el régimen de la corriente por aprovechar, durante un lapso de -- tiempo amplio; entendiéndose por régimen de una corriente la -- variación del volumen escurrido con respecto al tiempo.

REGIMEN DE LA CORRIENTE (CALCULO DE LOS VOLUMENES ESCURRIDOS).

Para conocer el régimen de una corriente, se calculan los volúmenes escurridos en ella en un período de tiempo lo más amplio posible, lo anterior se logra por medio de cualquiera de los métodos siguientes:

A) METODO DIRECTO.- Consiste en la obtención de los HIDROGRAMAS de la corriente, por medio de una estación hidrométrica y a partir de tales hidrogramas se obtienen los volúmenes escurridos mensuales y anuales.

B) METODO INDIRECTO.- Consiste en deducir los volúmenes escurridos en función de los tres factores que lo producen, que son: precipitación, área de cuenca y coeficiente de escurrimiento.

Como generalmente las corrientes por aprovechar con pequeñas presas de almacenamiento no cuentan con estación de aforos, los volúmenes escurridos se obtienen por el método indirecto.

Con el objeto de definir el llamado: Almacenamiento Económico, se debe seguir el siguiente procedimiento de estudio:

A) DATOS GENERALES DEL APROVECHAMIENTO.

Como punto de partida de todo estudio hidrológico se deben enlistar los siguientes datos:

Nombre del aprovechamiento

Municipio y Estado

Coordenadas geográficas de la boquilla

Corrientes por aprovechar

Región hidrológica

Cuenca general

B) CALCULO DEL AREA DE LA CUENCA.

El área de la cuenca se define y calcula según lo expuesto en el inciso II.3.c.1.

C) DEDUCCION DE DATOS FALTANTES DE PRECIPITACION.

Quando se requiera completar registros de precipitación en estaciones climatológicas auxiliares o en la posible estación base, se recomienda utilizar el método racional deductivo expuesto en el inciso II.3.a.2.

Los datos de precipitación ya completos se vaciaran en la forma especial siguiente (FORMA II-A).

D) CALCULO DE LA PRECIPITACION MEDIA ANUAL. (Pmc)

De acuerdo a la disponibilidad de estaciones climatológicas cerca de la cuenca y de sus datos de precipitación anual se aplica alguno de los métodos expuestos en el inciso II.3.b. independientemente del método aplicado se debe calcular la Pmc por el método de las cartas isoyetas con período de 1931-1970, confrontandose tal valor con el calculado por cualquiera de los otros métodos y adoptandose el menor de ambos como valor final y definitivo de la precipitación media anual en la cuenca.

E) SELECCION DE LA "ESTACION BASE".

Con sólo el valor calculado para la precipitación media anual en la cuenca, no es posible obtener la forma en que varia el escurrimiento, si no que se necesita disponer de un mayor número de datos que encaucen hacia el mejor conocimiento del régimen. Para tal efecto se supone que dentro de la zona abarcada por la isoyeta que definió la Pmc y que comprende a la cuenca, se tiene la misma Ley de variación de la precipitación, es decir, que cuando una estación considerada aumenta la precipitación, en una "Estación ficticia" ubicada en el centro de gravedad ocurre lo mismo y viceversa.

Basándose en lo anterior se elige la estación pluviométrica más conveniente que será la más cercana al centro de gravedad de la cuenca y que cuenta con el mayor número de registros mensuales de precipitación. A esta estación se le denomina ESTACION BASE, cuyo objeto fundamental es que a partir de sus datos, sea deducido un período de observación en la estación ficticia, esto es conocer los valores mensuales de lluvia en la cuenca, a partir de los cuales se deducirán los escurrimientos en la misma. Cuando no se pueden satisfacer las dos condiciones anteriormente expuestas para seleccionar la "estación base", generalmente se prefiere la que reúne la segunda condición, a fin de contar con un mayor período para los análisis posteriores.

F) CALCULO DEL FACTOR DE TRANSPORTE (F).

Elegida la "estación base", se divide el valor de la precipitación media anual en la cuenca (Pmc) entre el valor de la precipitación media anual de la estación base, esto es:

$$F = \frac{P_{mc}}{P_m}$$

Conociendo el valor anterior, bastará con multiplicar por este factor las precipitaciones mensuales registradas en la estación base para deducir las correspondientes en la cuenca.

G) CALCULO DE COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL (C).

Para la estimación del coeficiente de escurrimiento - medio anual (C) se aplican los métodos expuestos en el inciso II.4 en base a los valores que se obtengan se selecciona el valor final definitivo para tal coeficiente.

H) CALCULO DEL PORCENTAJE DE VARIACION DE LAS PRECIPITACIONES.

El porcentaje de variación del escurrimiento es una - representación numérica aproximada de la forma en que varía el régimen del escurrimiento de una corriente y que nos es útil para - tener una idea de como prever un mayor aprovechamiento.

Para cuantificar la variación del escurrimiento, se determinan los promedios de los volúmenes anuales escurridos mayores y menores que el medio anual; su diferencia se divide entre el volumen escurrido medio anual en el período considerado y se multiplica por 100, obteniéndose el porcentaje de variación.

$$\%V = \frac{\text{Promedio Vols. mayores} - \text{Promedio Vols. menores}}{V_m} \times 100$$

Tomando en cuenta que si los volúmenes escurridos -- son deducidos por el método indirecto, sólo intervienen los valores de las precipitaciones, áreas de la cuenca y coeficiente de escurrimiento, de los cuales los dos últimos son constantes, por lo anterior podemos representar la expresión anterior considerando únicamente las precipitaciones, en la siguiente forma:

$$\%V = \frac{P_{may} - P_{men}}{P_m} \times 100$$

en la cual:

$\%V$ = Porcentaje de variación, en por ciento.

P_{may} = Promedio de precipitación en medias anuales mayores que la precipitación media anual, en mm.

P_{men} = Promedio de precipitaciones medias anuales menores que la precipitación media anual, en mm.



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

P_m = Precipitación media anual en la estación base, para el período de estudio, en mm.

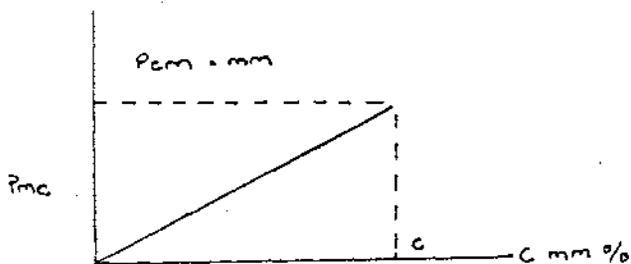
Si el porcentaje de variación es mayor o igual que el 40% se calcularán los escurrimientos haciendo el coeficiente de escurrimiento variable anualmente con el fin de conocer los volúmenes escurridos y su variación en una forma más apegada a su presentación. Si el porcentaje de variación es menor del 40% se calcularán los escurrimientos con un coeficiente de escurrimiento constante.

Para el cálculo del porcentaje de variación de las precipitaciones se recomienda utilizar la siguiente forma especial (FORMA II-B).

I) CALCULO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO VARIABLE.

En realidad el coeficiente de escurrimiento no es constante año con año sino que varía continuamente al variar el factor principal que lo determina y que es la precipitación anual.

Haciendo la hipótesis de que la variación del coeficiente de escurrimiento (C) con respecto a la precipitación es lineal, se puede construir la gráfica siguiente:



De la figura anterior se puede deducir lo siguiente:

$$\frac{P_{mc}}{C} = \frac{F P_n}{C_n}$$

De la expresión anterior se deduce que:

$$C_n = \frac{F P_n}{P_{mc}} C \quad (1)$$

en donde:

P_{mc} = Precipitación media anual en la cuenca, en mm.

C = Coeficiente de escurrimiento medio anual, en decimal.

F = Factor de transporte, adimensional.

P_n = Precipitación anual del año "n" en la estación base, en mm.

C_n = Coeficiente de escurrimiento para el año "n", en decimal.

siendo: $F = \frac{P_{mc}}{P_m}$ por lo tanto $P_{mc} = F P_m$ (2)

en donde:

P_m = Precipitación media anual en la estación base, en mm.

Sustituyendo la ecuación (2) en la expresión (1) se obtiene:

$$C_n = \frac{F}{F} \frac{P_n}{P_m} C$$

por lo tanto:

$$\therefore C_n = \frac{C}{P_m} P$$

$$K = \frac{C}{P_m}$$

$$C_n = K P_n$$

Para efectuar los cálculos del coeficiente de escurrimiento variable se recomienda utilizar la forma especial siguiente (FORMA II-C).

Habrán ocasiones en que la variación del régimen, convenga deducir los escurrimientos (o si se quiere realizar un estudio más lógico), aplicando coeficientes de escurrimiento variable cada mes, con el mismo criterio aplicado.

J) DETERMINACION DE LOS VOLUMENES ESCURRIDOS.

Para la estimación de los volúmenes escurridos anuales y para la determinación del volumen medio anual escurrido, es necesario calcular primeramente los volúmenes escurridos mensuales que se calculan a partir de la expresión siguiente:

$$V_E = C_n \times A \times F \times P_m$$

en la cual:

V_E = Volumen escurrido medio mensual, en miles de m^3 .

C_n = Coeficiente de escurrimiento anual para el año "n", en decimal.

A = Area de la cuenca, en Km^2 .

P_m = Precipitación mensual en la estación base, en mm.

F = Factor de transporte, adimensional.

METODO DE CALCULO.- Habiendo sido calculado para cada año el factor $C_n \times A \times F$ en la FORMA II-C, para calcular los volúmenes escurridos mensuales en miles de m^3 se multiplicará tal factor en m^2 por el valor de la lluvia mensual en mm. y por 10^{-6} ; para facilitar el cálculo anterior se recomienda utilizar la siguiente forma especial (FORMA II-D).

K) CALCULO DE LOS VOLUMENES DERRAMADOS.

Conociendo los volúmenes escurridos anuales (V), se disponen varias alternativas para la capacidad total del vaso (C_T), calculándose los volúmenes derramados medios anuales (D_m), durante el período de estudio, es obvio que, en forma aproximada:

VOLUMEN ESCURRIDO ANUAL (V) CAPACIDAD TOTAL (C_T) DERRAME ANUAL

(D) por lo anterior: $D = V - C_T$ (si $V < C_T$ se tendrá $D = 0$) y sumando todos los volúmenes derramados anualmente, y dividiendo dicha suma entre el número de años del período en estudio, se obtiene el volumen medio anual derramado; esto es:

$$\sum D = \sum (V - C_T)$$

$$\frac{\sum D}{n} = \frac{\sum (V - C_T)}{n} \quad \text{por lo tanto} \quad D_m = \frac{\sum (V - C_T)}{n}$$

en donde:

D_m = Volumen derramado medio anual en el período, para la capacidad total propuesta C_T , en miles de m^3 .

V = Volumen escurrido anual, en miles de m^3 .

C_T = Capacidad total propuesta, en miles de m^3 .

n = Número de años del período estudiado.

Conviene anotar los porcentajes de los volúmenes de derrames con respecto al volumen medio anual escurrido, esto es:

$$\%D = \frac{D_m}{V_{EMA}} \times 100$$

siendo:

$\%D$ = Porcentaje de derrame para la capacidad total (C_T) propuesta.

V_{EMA} = Volumen escurrido medio anual, en miles de m^3 .

Para facilitar los cálculos anteriores se recomienda utilizar la forma especial siguiente (FORMA II-E)

L) CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE AZOLVES (C_{AZ}).

Capacidad de azolves en una presa de almacenamiento, es aquella que se destina a recibir el material de acarreo, que durante la vida útil de la obra depositará la corriente en el vaso y cuya magnitud debe cubrir el volumen necesario para proteger el libre funcionamiento de la obra de toma; se considera para calcularlo, un porcentaje promedio anual de sedimentación del 0.10% del volumen escurrido medio anual, que para una vida útil del almacenamiento de 50 años, el volumen de azolves será:

$$C_{AZ} = 0.0010 \times 50 \times V_{EMA}$$

por lo cual:

$$C_{AZ} = 0.050 V_{EMA}$$

N) CALCULO DE LA EVAPORACION NETA MEDIA ANUAL (E_N).

La evaporación es un factor muy importante en todo estudio hidrológico, pues este fenómeno origina la pérdida de un volumen de agua en un vaso de almacenamiento, volumen que debe ser tomado en cuenta al efectuar el funcionamiento analítico del vaso.

Se define como EVAPORACION NETA MEDIA ANUAL en un vaso de almacenamiento, a la evaporación media anual observada en el período de estudio; afectada por un coeficiente reductor función del tipo de evaporámetro que se use y disminuida con la precipitación deducida en el vaso, esto es:

$$E.N. = C_R E_M - P_{mc} \cdot (1-C)$$

en donde:

E.N. = Evaporación neta media anual, en mm.

C_R = Coeficiente de reducción que depende del tipo de evaporámetro.

E_m = Evaporación media anual observada, en mm.

P_{mc} = Precipitación media anual en la cuenca, en mm.

C = Coeficiente de escurrimiento medio, en decimal.

N) CALCULO DE LOS VOLUMENES EVAPORADOS (V_{EV}).

Para calcular los volúmenes evaporados medios anuales (V_{EV}) se usará la siguiente expresión:

$$V_{EV} = E.N. \times A_m$$

en la cual:

V_{EV} = Volumen evaporado medio anual, en miles de m^3 .

E.N. = Evaporación neta media anual, en m.

A_m = Area media, en miles de m^2 , correspondiente a la capacidad media (CM) y encontrada con auxilio de la gráfica - AREAS - CAPACIDADES del vaso.

La capacidad media está dada por la fórmula:

$$CM = \frac{C_T + C_{AZ}}{2}$$

siendo:

CM = Capacidad media, en miles de m^3 .

C_T = Capacidad total propuesta, en miles de m^3 .

C_{AZ} = Capacidad de azolves, en miles de m^3 .

METODO DE CALCULO.

Para el cálculo se tomará la evaporación (E.N.) constante en todo el período de estudio, lo cual es falso, pero el error que se tiene no es de gran consideración.

O) CALCULO DE LOS VOLUMENES APROVECHABLES (V_{APROV}) Y DE LA SUPERFICIE BENEFICIADA (S.B.).

Para determinar los volúmenes aprovechables medios anuales (V_{APROV}) que corresponden a cada una de las capacidades totales propuestas, se parte de la siguiente igualdad:

Vol. esc. medio anual = Vol. aprov. Vol. derramado Vol. evapor.,
esto es:

$$V_{EMA} = V_{APROV} + D_M + V_{EV}$$

por lo tanto:

$$V_{APROV} = V_{EMA} - (D_M + V_{EV})$$

La expresión anterior se puede aplicar para cada capacidad total propuesta cuyos D_M y V_{EV} son ya conocidos.

Para calcular la superficie de beneficio, bastará - con dividir el volumen aprovechable anual previamente calculado entre la demanda bruta de riego (la cual se calcula según lo indicado en el capítulo III).

P) GRAFICA CAPACIDADES TOTALES - BENEFICIOS TEORICOS.

Con los resultados obtenidos, estamos en posibilidad de construir una curva de "capacidades totales - beneficios" con la cual podemos definir nuestra capacidad conveniente, atendiendo al máximo beneficio con la capacidad mínima, - es decir, obtendremos la Capacidad Económica.

Una vez determinada la capacidad económica y su beneficio, se estudiará por medio del funcionamiento analítico del vaso, descrito.



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

C A P I T U L O I I I

CALCULO DE DEMANDAS Y CALENDARIO TEORICO DE RIEGO

En el presente capítulo se describen las bases y - conceptos teóricos, así como las secuelas de cálculo requeridas para llegar a la formación de la llamada Ley de Demandas. Comprenderá el capítulo los siguientes incisos:

III.1.- PROCEDIMIENTO DETALLADO.

III.1.a.- INTRODUCCION.

III.1.b.- SELECCION DEL PLAN DE CULTIVOS.

III.1.c.- DETERMINACION DEL USO CONSULTIVO.
(Método de Blaney-Criddle Modificado)

III.1.d.- METODOS PARA DETERMINAR LA LLUVIA EFECTIVA.

III.1.e.- CALCULO DE LAS LAMINAS DE RIEGO Y DE SU CALENDARIO DE APLICACION.

III.1.f.- CALCULO DE LA DEMANDA ANUAL.

III.1.g.- EJEMPLO NUMERICO.

III.2.- PROCEDIMIENTO EXPEDITO.

III.2.a.- SINTESIS DEL METODO.

III.2.b.- EJEMPLO NUMERICO.

III.1.- PROCEDIMIENTO DETALLADO.



III.1.a.- INTRODUCCION.

ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

La construcción de una obra hidráulica tiene como finalidades principales el control y el aprovechamiento del agua, dentro de los fines de aprovechamiento está el uso del agua para riego y las dotaciones para gente y animales.

Para determinar las necesidades de agua de riego es necesario efectuar un análisis, que dependa de los siguientes factores: tipos de cultivos, condiciones climáticas del lugar, características físicas de los suelos por regarse y localización geográfica de la zona, etc..

Se entiende por "riego" la aplicación artificial del agua al terreno, con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo. El riego sirve para corregir las deficiencias en cantidad y distribución de las precipitaciones de una determinada área.

III.1.b.- SELECCION DEL PLAN DE CULTIVOS.

A través de los años el riego ha sido eminentemente empírico, teniendo la tendencia a dar un máximo de riego en la creencia de que el rendimiento unitario se incrementaría.

La práctica anterior trae como consecuencias el sobrerriego y variados efectos de los cuales los de mayor importancia son:

- 1.- Disminución de las zonas bajo riego, debido al desperdicio de agua.
- 2.- Salinización progresiva de los suelos.
- 3.- Erosión de los suelos.

Para utilizar racionalmente el agua es necesario calcular las láminas requeridas y su intervalo de aplicación para unos cultivos propuestos de acuerdo a las condiciones climáticas, prácticas actuales, experiencias y necesidades de la población; estos cultivos propuestos forman el llamado "PLAN DE CULTIVOS" en el cual se indican por cientos del área por regar con cada cultivo, así como su ciclo vegetativo o período de desarrollo.

III.1.b.1.- SECUENCIA PARA LA SELECCION DEL PLAN DE CULTIVOS.

- 1.- Se principia por ubicar geográficamente a la zona de riego y seleccionar el distrito de riego más cercano.
- 2.- De todos los cultivos que se tengan en el distrito de riego seleccionado, junto con los recomendados en el estudio agrológico.

co del lugar y los practicados actualmente en las zonas, se obtienen sus períodos de la siembra, recolección y período vegetativo.

Lo anterior se realiza en base a los cuadernos del Departamento de Planeación Agrícola de la S.A.R.H..

3.- Con todos los cultivos que se tienen, se deben formar grupos de cultivos (cereales, hortalizas, forrajeros, oleaginosas, frutales) cuyos períodos vegetativos (número de días y meses que comprende) sean similares y que el valor de sus usos consultivos no difiera en más de un 15%.

4.- Se selecciona un cultivo de cada uno de los grupos formados en el inciso anterior; tal cultivo deberá ser el que reúna las condiciones medias (período vegetativo más amplio y uso consultivo mayor).

5.- Una vez seleccionados los cultivos sólo falta determinar los porcentajes con que intervendrán, el estudio; tales porcentajes se adoptan en base a las necesidades específicas del proyecto, y requerimientos de la población y tendencias económicas del país.

6.- Cuando los períodos vegetativos de los cultivos permiten programar un segundo ciclo en la superficie de uno o más cultivos (repetición) estas áreas deberán limitarse como se indica a continuación:

- a) Pequeños almacenamientos 15%.
- b) Medianos y grandes almacenamientos 40%.
- c) Derivadoras 60%.
- d) Plantas de bombeo y pozos profundos 40%.
- e) Manantiales 60%.

Los porcentajes propuestos para repetición de cultivos podrán aumentarse sólo en los casos en los cuales, por limitación física de área susceptible de riego, sea mayor la disponibilidad del recurso agua.

Deberán indicarse los cultivos alternativos para cada uno de los considerados en el plan de cultivos definitivos.

NOTAS.-

1a.- La programación de frutales en el plan de cultivos propuesto, se aceptará sólo en los casos en los cuales en la zona donde se encuentra enclavado el proyecto, el desarrollo de la especie que se pronone sea cuando menos en mediana escala y con resultados favorables; en todo caso el % máximo de frutales admisibles en un almacenamiento será del 30%.

2a.- Los cultivos forrajeros deberán considerarse en el estudio, siempre y cuando éstos sean necesarios para mantener o desarrollar actividades de tipo pecuario de los usuarios del proyecto.

III.1.c.- DETERMINACION DEL USO CONSUNTIVO.

Se define como USO CONSUNTIVO a la cantidad de agua consumida sin posible recuperación, para que los cultivos se desarrollen completamente agua empleada por los mismos para - transpirarla, acumularla en sus tejidos, o para ser evaporada a la atmósfera directamente desde el suelo. Por lo anterior - el uso Consuntivo de una planta es igual al agua transpirada, más el agua en la construcción de tejidos.

Frecuentemente se utiliza el término "evapotranspiración" para designar al uso consuntivo, considerando que los términos transpiración y evaporación son los más importantes, ya que el 99% del consumo de agua o uso consuntivo de la planta se debe a tales términos.

a).- Transpiración. Es el término que describe el agua que penetrando a través de las raíces de las plantas es utilizada, en la construcción de tejidos y emitida a las hojas para ser reintegrada a la atmósfera.

b).- Evaporación. Que es el término por el cual se describe el agua evaporada por el terreno adyacente, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas.

El agua depositada por el rocío, la lluvia o la llu

via artificial sobre la superficie de las hojas de las plantas y que se evapora sin ser utilizada por el sistema de riego, forma parte de la evatranspirada.

III.1.c.1.- FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL USO CONSUNTIVO.

La variabilidad del uso consuntivo de una planta depende de diversos factores, en su mayoría determinantes del desarrollo vegetativo de las plantas y del consumo de agua, éstos son:

SUELO.- Dentro de este factor intervienen las siguientes características: Textura, Estructura, Fertilidad, Salinidad, Capacidad de retención del agua, Profundidad, Nivel freático, Pendiente, Drenaje, etc...

CULTIVOS.- Dentro de este factor intervienen las siguientes características: Especie, Variedad, Ciclo Vegetativo, Fase de Desarrollo, Fisiología, etc..

CLIMA.- Dentro de este factor intervienen las siguientes características: Temperatura, Precipitación, Radiación Solar, Foto-período, Estado de Humedad del Aire, Régimen de Vientos, Latitud, Nubosidad, etc..

III.1.c.2.- METODO PARA DETERMINAR EL U.C.

Existen varios métodos para determinar la cantidad de agua consumida por los cultivos y la vegetación natural, ta les métodos se pueden separar en dos grandes grupos: Métodos Directos y Métodos Indirectos.

A) Métodos Directos.

El origen del agua que utiliza la planta para desarrollarse ya sea de lluvia solamente, de lluvia y de riego, o de lluvia y subterránea, es un factor muy importante que se debe tomar en cuenta para la elección del método a seguir. Los principales métodos son:

- 1) Experimentos de tanques y lisímetros.
- 2) Método de integración.
- 3) Método gravimétrico en parcelas experimentales.
- 4) Estudios sobre la humedad del suelo.
- 5) Método de "Entradas y Salidas" de agua para grandes extensiones.

B) Métodos Indirectos.

Varios investigadores han estudiado la medida en que la temperatura, radiación solar, humedad, velocidad del viento y presión de vientos influyen sobre la evapotranspiración; entre estos estudios sobresalen:

- 1) Método de Penman.
- 2) Método de Lowry-Johnson.

- 3) Método de Thornthwaite.
- 4) Método de Blaney-Criddle.

Debido a la escasez de estudios en nuestro país se tiene que recurrir a los métodos indirectos para calcular los U.C., de los cuales se ha adoptado por lo accesible de los datos el de los Doctores Harry F. Blaney y W. D. Criddle, pero modificado en cuanto al efecto de la temperatura, ampliado en lo que se refiere a los coeficientes del uso consuntivo y completado o auxiliado por el método de Thornthwaite en el cálculo de la lluvia efectiva por el denominado método de Prescott.

III.1.c.3.- DESARROLLO DEL METODO DE BLANEY-CRIDDLE MODIFICADO.

La fórmula obtenida por los mencionados autores, relaciona la temperatura media del lugar, la luminosidad y la evapotranspiración, además introduce un factor de corrección que depende de la época de desarrollo de la planta y del cultivo propuesto.

DESARROLLO DEL METODO.

$$U.C. = K F \quad (1)$$

en donde:

U.C. = Uso Consuntivo, en pulgadas.

K = Coeficiente global de Uso Consuntivo, depende del cultivo, dado en la tabla A.

F = Factor temperatura-luminosidad o factor "Fuerza Evaporante".

$$F = \sum_{i=1}^n f \quad (2)$$

en donde:

f = Valor mensual del factor temperatura-luminosidad, es igual a:

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

en la cual:

t = Temperatura media mensual, en F°

P = Porcentaje de horas luz anual, depende de la latitud del lugar y está dado en la tabla b, es igual a:



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

$$P = \frac{\text{Suma horas luz en el mes}}{\text{Suma horas luz en el año}} \times 100$$

Con el objeto de aplicar el método en el sistema métrico se debe sustituir en la ecuación (3) la temperatura en C°, para lo cual se usa la siguiente relación F° = (9/5) C° + 32, efectuando las operaciones y reduciendo se obtiene:

$$f = P \frac{(t + 17.8)}{21.8} \quad (4)$$

En investigaciones recientes se ha encontrado que para las zonas áridas, es necesario corregir el factor temperatura, por medio del llamado: Coeficiente Térmico K_t; está -

dato por la siguiente expresión:

$$K_t = 0.03114 t + 0.2396 \quad (5)$$

en donde:

t = Temperatura en C°

Por lo anterior la ecuación para calcular el Uso Consuntivo será:

$$U.C. = K \frac{n - 12}{n - 1} \left[P K_t \frac{(t + 17.8)}{21.8} \right] \quad (6)$$

Para poder estimar los Usos Consuntivos en periodos mensuales y no sólo el total del ciclo obtenido en base al valor del coeficiente global K, se deben emplear los llamados -- Coeficientes de Desarrollo que son valores numéricos que varían con la época de crecimiento del cultivo que se analiza.

Experimentos realizados por el Soil Conservation Service, han conducido a la formación de gráficas que permiten -- calcular el coeficiente de Uso Consuntivo en función del avance de desarrollo de las plantas, por lo anterior a tales coeficientes se les denomina "Coeficientes de Desarrollo K_c ".

Los valores de K_c se obtienen para cada cultivo con las tablas C y C' de acuerdo al número de meses del Ciclo Vegetativo.

NOTA. -

Los valores de las tablas C y C' fueron obtenidos de las gráficas de K_c contra por ciento del ciclo vegetativo, que fueron formadas a partir de datos experimentales por el U.S.S.C.S..

Para cada cultivo se calcula mensualmente su Uso Consuntivo Teórico (U.C.T.) que será igual al producto del factor f mensual correspondiente por el K_c respectivo.

Para tener una concordancia entre el coeficiente global obtenido K' con el seleccionado K , se debe aplicar un coeficiente de ajuste C al de Uso Consuntivo, definido de la manera siguiente:

$$K' = \frac{\sum 1^n (U.C.T.)}{\sum 1^n f} \quad (7)$$

en la cual:

n = número de meses del período vegetativo.

$$C = \frac{K}{K'} \quad (8)$$

Por último se calcula por cada mes del período vegetativo el llamado: Uso Consuntivo ajustado (U.C.A.) igual a:

$$U.C.A. = C (U.C.T.) \quad (9)$$

CALCULOS.

Para llevar a cabo los cálculos de los Usos Consuntivos ya corregidos, de los cultivos propuestos, se lleva a cabo la siguiente secuela (previamente definido el Plan de Cultivos):

1.) Se determinan las Temperaturas medias mensuales con auxilio de la forma denominada "Datos de Temperatura".

2.) Se calculan los coeficientes globales de Uso Consuntivo (f) y (fK_t), con auxilio de la forma denominada "Tablas de Factores Generales para el cálculo del Uso Consuntivo".

3.) Se selecciona el Coeficiente Global de Uso Consuntivo (K) - y los Coeficientes del Desarrollo (K_c) para los cultivos respectivos, con tales valores y con los previamente calculados (f , fK_t), se completa la "Tabla de Usos Consuntivos"; obteniéndose con lo anterior los Usos Consuntivos ajustados (U.C.A.),

III.1.d. - METODO PARA DETERMINAR LA LLUVIA EFECTIVA.

Se denomina "lluvia efectiva" a la cantidad de precipitación pluvia aprovechada por la planta, esto es aquella que tiende a humedecer la capa de suelo comprendida entre la superficie y la profundidad que alcancen las raíces (profundidad radical), expresada en centímetros.

Los métodos para estimar la lluvia efectiva se dividen en dos grupos, unos son para los cultivos anuales (Maíz, frijol, trigo, sorgo, etc.) y otro es para los cultivos perennes (alfalfa, pastos y frutales).

III.1.d.1.- LLUVIA EFECTIVA DE LOS CONSUNTIVOS ANUALES.

Existen variados métodos para determinar la lluvia efectiva de los cultivos anuales, dos de los cuales son los más confiables, utilizándose conjuntamente para deducir los valores de la lluvia efectiva de una manera aproximada, estos dos métodos son los denominados:

Método de las Frecuencias de lluvia y Método de Prescott.

a) Método de Frecuencias de Lluvia.

Como ya fue expresada de la precipitación total una parte se pierde por evaporación, otra escurre y de la parte que se infiltra una cierta cantidad se pierde por gravedad. Por lo anterior la LLUVIA EFECTIVA debe expresarse como un porcentaje de la lluvia total. En la estimación del llamado "coeficiente de efectividad (C_e)" deben tomarse en cuenta factores como: --- Textura, Compactación, Pendiente del terreno, Cubierta Vegetal, Densidad y duración de las lluvias, etc.; para la República Mexicana se tiene que tal coeficiente C_e fluctúa entre 0.60 y --- 0.80 (zonas semi-áridas).

Antes de aplicar el coeficiente de efectividad es necesario conocer el concepto de LLUVIA REPRESENTATIVA, que es un valor tomado de los datos de precipitación para cada mes del período en estudio. Para elegir la Lluvia Representativa del período en cada mes, habrá de considerarse una lluvia con un porcentaje de frecuencia, cuyo rango de variación oscila entre el 50% y el 80%, esto es:

$$F = \frac{m}{n} \times 100$$

en donde:

F = Frecuencia, en %; (generalmente se adopta el 75%).

m = Número correspondiente al dato, en forma progresiva, ordenados de mayor a menor.

n = Número total de datos.

Por lo anterior se tendrá que para la Lluvia Representativa (LL_r), la expresión con la que se deduce es la siguiente:

$$LL_r = C_e \times LL_r$$

en donde:

LL_e = Lluvia efectiva en centímetros.

C_e = Coeficiente de efectividad.

LL_r = Lluvia Representativa del período de datos, transformada de milímetros a centímetros.

b) Método de Prescott.

Prescott y Anderson después de una serie de experiencias estimaron que puede considerarse como Lluvia Efectiva el 50% de los valores mensuales de la precipitación, siempre y cuando el 80% de estas precipitaciones sean superiores o iguales al valor obtenido de multiplicar 0.90 por la Evapotranspiración a la potencia de 0.75 determinada por el Método Thornthwaite.

C.W. Thornthwaite buscando una expresión simple que empleara datos climatológicos accesibles, desarrolló una fórmula empírica basada en la temperatura y en la latitud del lugar, ésta es:

$$E_t = 1.6 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a \quad (1)$$

en la cual:

E_t = Evapotranspiración mensual, en cm. y sin corregir.

T = Temperatura media mensual, en C°

I = Índice de calor (o de Temperatura). Es la suma de los índices mensuales de temperatura (i), esto es:

$$I = \sum_{i=1}^{i=12} i \quad (3)$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right) 1.514 \quad (2)$$

en donde:

a = Constante que depende del lugar y que es función del índice anual de la temperatura (I), cuyo valor es:

$$a = 0.000000675 (1)^3 - 0.0000771 (1)^2 + 0.01792 (1) + 0.49239 (4)$$

CALCULOS.

Para obtener la Lluvia Efectiva por el Método de Prescott se recomienda seguir la siguiente secuela:

- 1.- Se obtienen las temperaturas medias anuales (T).
- 2.- Se calculan los valores de los índices mensuales de temperatura (i), pudiéndose utilizar la Tabla "D" siguiente o por la ecuación (2).
- 3.- Se calcula el índice anual de calor por la fórmula (3).
- 4.- Se calcula el exponente "a" por medio de la ecuación (4).
- 5.- Se estima la Evapotranspiración en el mes considerado, aplicando la ecuación (1).
Para seguir la secuela anterior se recomienda utilizar la forma denominada "Cálculo de la evapotranspiración".
- 6.- Se calcula el valor de factor F , que se debe a los diferentes valores de iluminación que ocurren a diferentes latitudes, lo cual influye en la evapotranspiración. Se obtiene de la tabla F.

7.- Se completa la FORMA obteniéndose la evapotranspiración corregida en cm. (E_t).

8.- Los datos ya calculados para la evapotranspiración potencial corregida se llevan a la forma denominada "Cálculo de la Lluvia Efectiva" y completando la tabla se deduce la Lluvia Efectiva.

NOTAS.-

Para temperaturas mayores de 26.5 C° se observó que no hay influencia del índice de calor, por lo que la evapotranspiración potencial sin corregir sólo es función de aquella; obteniéndose por medio de la tabla E.

III.1.s.2.- LLUVIA EFECTIVA DE LOS CULTIVOS PERENNES.

En base a los resultados experimentales que se han obtenido en los Distritos de Riego, se puede deducir que los cultivos perennes como son: Alfalfa, Pastos y todas las variedades de Frutales, aprovechan como lluvia efectiva unos porcentajes de la lluvia precipitada mensualmente. Los factores que afectan a los porcentajes mencionados son entre otros: textura del suelo, pendiente del terreno, intensidad de lluvia diaria, compactación del suelo, etc.

El método propuesto por la Residencia de Agrología, para estimar la lluvia efectiva mensual de los cultivos perennes, consiste en multiplicar a la lluvia media mensual por un porcentaje que se estima según la siguiente tabla "G" y que toma en cuenta a dos de los principales factores que son: textura y pendiente del terreno.

		ALFALFA	PASTOS	FRUTALES
Textura:	Arenosa			
Pendiente:	Suave	75%	75%	60%
Textura:	Franca a Arcilla arenosa			
Pendiente:	Mediana	66%	66%	50%
Textura:	Arcillosa			
Pendiente:	Fuerte	50%	50%	40%

III.1.e.- CALCULO DE LAS LAMINAS DE RIEGO Y DE SU CALENDARIO DE APLICACION.

Como ya se mencionó anteriormente el sobrerriego -- que se produce al dar láminas mayores que las necesarias y a intervalos inadecuados, tiene consecuencias fatales para los suelos (salinización, erosión, salubilización de elementos nutritivos, etc.), por lo tanto, hay que evitarlo, lo cual se logra por medio del uso racional del agua de riego.

En base a los estudios realizados por diferentes investigadores sobre las relaciones Agua-Suelo-Planta, se han po-

dido obtener fórmulas racionales para el cálculo de las láminas por aplicar en cada riego y se han desarrollado métodos para de terminar sus intervalos de aplicación, uno de los cuales se de talla más adelante.

Antes de entrar en la deducción de la fórmula racional de láminas de riego, es necesario definir los siguientes términos:

TEXTURA.- La textura es la relación entre los diferentes tamaños de partículas que componen un suelo determinado.

DETERMINACION DE LA TEXTURA.-

a) Determinación práctica en campo.-

Consiste este procedimiento en la estimación de la textura al tacto, es un procedimiento rápido en el cual se logra mayor aproximación cuando se tiene experiencia. Se humedece una pequeña cantidad de suelo y se amasa con los dedos estimando al tacto y en forma cualitativa la textura.

b) Determinación por medio de triángulo de texturas.-

Conociendo los porcentajes de arcilla, limo y arena se llevan al triángulo.

DENSIDAD APARENTE. (D_a).-

Se llama Densidad Aparente de un suelo a la relación que existe entre el peso del suelo seco y el volumen total del

mismo incluyendo vacíos, esto es:

$$D_a = \frac{P_{ss}}{V_T}$$

siendo:

D_a = Densidad aparente.

P_{ss} = Peso del suelo seco.

V_T = Volumen total.

DETERMINACION DE LA DENSIDAD APARENTE (D_a),-

a) Determinación en campo y laboratorio.

Se hace una excavación en el suelo de aproximadamente 20 cm. x 20 cm. x 15 cm. guardando la tierra extraída en un recipiente con tapa para evitar pérdidas de humedad, se cubre el hoyo con polietileno haciendo que adquiera la forma de la oquedad con todas sus irregularidades, agregándose después agua con una probeta graduada para saber el volumen de agua con que se llena el hoyo que será el volumen total del suelo, se pesa el suelo previamente seco y la Densidad Aparente se calculará por la fórmula:

$$D_a = \frac{P_{ss}}{V_T}$$

b) Determinación de acuerdo a la textura del suelo por medio de la tabla siguiente:

Arenosa	1.65
Franco-Arenosa	1.50
Franca	1.40
Franco-Arcillosa	1.30
Arcillosa	1.25
Suelos orgánicos menos de	1.00

CAPACIDAD DE CAMPO (C.C.).-

Capacidad de Campo es el % de humedad respecto al peso del suelo seco, que existe en un suelo después de un riego pesado, esto es, una vez efectuada la eliminación del agua gravitacional, por lo anterior tal característica dependerá principalmente de la textura, estructura y grado de compactación del suelo.

a) Determinación de la Capacidad de Campo (C.C.).-

Entre dos y cinco días posteriores a un riego pesado se determina la cantidad de agua contenida en una muestra en peso secado (en horno a 110C°) y se determina la capacidad de campo por medio de la fórmula siguiente:

$$C.C. = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100$$

en donde:

Psh = Peso suelo húmedo.

Pss = Peso suelo seco.

b) Determinación a partir de la Textura.-

Del análisis de una muestra de suelo en el laboratorio se determinan sus % de arcilla, limo y arena con lo cual se determina su textura y C.C. en el Cuadro de Clasificación de -- Tierras para Fines de Riego del U.S.B.R., que a continuación se anexa:

c) DE acuerdo a la textura del suelo, según la tabla siguiente:

Arenosa	6 a 12
Franco-Arenosa	10 a 18
Franca	18 a 26
Franco-Arcillosa	23 a 31
Arcillo-Arenosa	31
Arcillosa	31 a 40

PUNTO DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE (P.M.P.).-

Punto de Marchitamiento Permanente es el % de humedad de un suelo, cuando las plantas se marchitan permanentemente, es decir, que la planta ya no tiene la energía necesaria para extraer humedad al suelo, depende tal característica de la textura, estructura y grado de compactación del suelo.

Determinación del Punto de Marchitamiento Permanente (P.M.P.).-

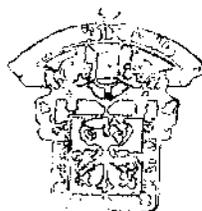
a) Puede determinarse el valor de P.M.P. midiendo el % de humedad con respecto al peso del suelo seco cuando en el campo se noten síntomas de marchitez permanente en las plantas, esto es, cuando no se recuperan, aún proporcionándoles una atmósfera saturada.

b) BRIGG estableció una fórmula que relaciona a la capacidad de campo con el punto de marchitamiento de la cual se puede despejar este último término conocido C.C., ésta es:

$$\frac{C.C.}{P.M.P.} = 1.84$$

d) De acuerdo a la textura del suelo, según la tabla siguiente:

Arenosa	2 a 6
Franco-Arenosa	4 a 8
Franca	8 a 12
Franco-Arcillosa	11 a 15
Arcillo-Arenosa	15
Arcillosa	15 a 19



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
UNALVA

PROFUNDIDAD RATICULAR (P_r).-

Es la profundidad que alcanza el sistema de raíces

de una planta medida desde la superficie del terreno.

La llamada profundidad raticular MEDIA corresponde a la profundidad que alcanzan las raíces en su parte corpulenta, esto es, aproximadamente unos 2/3 de profundidad total de raíces.

III.1.e.1.- DEDUCCION DE LA FORMULA RACIONAL DEL RIEGO.

Todo suelo entre sus partículas tiene una gran cantidad de poros los cuales son ocupados por el aire, pero al humedecerse el suelo, el aire es desalojado y el agua ocupa su lugar, pudiendo llegar hasta el punto en que todos los poros están llenos de agua y ésta escurre libremente entre ellos debido a la acción de la gravedad, en esta condición se dice que el suelo está SATURADO.

Entre un suelo saturado y un suelo seco, existe una variación muy considerable en su contenido de humedad; este contenido se expresa generalmente en porcentaje respecto al peso del suelo seco, esto es:

$$P_s = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 = \frac{P_a}{P_{ss}} \times 100 \quad (1)$$

en la fórmula anterior:

P_s = Porcentaje de humedad respecto al peso del suelo seco.

Psh = Peso del suelo húmedo.

Pss = Peso del suelo seco.

Pa = Peso del agua contenida por el suelo.

También se puede expresar el contenido de agua en el suelo en forma de volumen de agua, con respecto al volumen total del suelo, esto es:

$$P_V = \frac{V_a}{V_T} \times 100 \quad (2)$$

siendo:

P_V = Por ciento en volumen

V_a = Volumen de agua.

V_T = Volumen total del suelo.



ESCUELA DE AGRICULTURA
BIBLIOTECA

Como la unidad de volumen de agua pesa la unidad de peso, es válida la siguiente igualdad:

$$P_a = V_a$$

Si de (1) se despeja P_a y se sustituye en (2), se tiene:

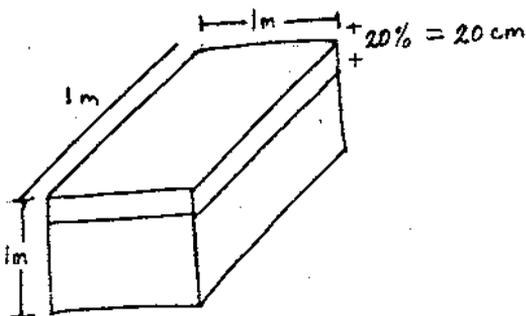
$$P_a = \frac{P_{ss} \times P_a}{100} \times V_a$$
$$P_v = \frac{P_s \times P_{ss} \times 100}{V_T \times 100} \quad (3)$$

Simplificando y sustituyendo a la relación $\frac{P_{ss}}{V_T}$ por la Densidad Aparente se obtienen:

$$P_v = P_s \times D_a$$

La expresión anterior indica, que el contenido de humedad de un suelo expresado como un por ciento de volumen -- respecto al volumen total del suelo, es igual al producto del -- porcentaje de humedad respecto al peso del suelo seco por su -- densidad aparente.

Si se analiza un volumen unitario de suelo que sea -- igual al producto de un metro cuadrado de superficie por un -- metro de profundidad, el porcentaje de agua será una lámina en -- centímetros igual a dicho porcentaje, esto es:



Para determinar la lámina requerida para humedecer el suelo a una profundidad diferente de la unidad, bastará con multiplicar ($P_s \times D_a$) por la profundidad deseada en metros, esta profundidad será (P_r) o sea hasta donde llegan las raíces de las plantas; por lo anterior:

$$P_v = L = P_s \times D_a \times P_r$$

siendo:

L = Lámina de agua, en cm.

La expresión anterior indica que LA LAMINA DE AGUA NECESARIA PARA HUMEDECER UN SUELO EN UN PORCENTAJE CUALQUIERA - P_s HASTA UNA PROFUNDIDAD DADA P_r SERA IGUAL AL PRODUCTO DE DICHO PORCENTAJE POR LA PROFUNDIDAD RADICULAR Y POR LA DENSIDAD A PARENTE DEL SUELO QUE SE PRETENDE HUMEDECER.

Ahora el problema que se tiene es conocer el porcentaje P_s al cual se requiere humedecer el suelo, valor que dependerá de la humedad por la planta y que lógicamente es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, por lo anterior:

$$L = (C.C. - P.M.P.) D_a \times P_r$$

Fórmula racional de las láminas de riego.

III.1.e.2.- LAMINAS DE PRESIEMBRA Y NORMAL DE RIEGO.

En todos los cultivos anuales, excepto en los perennes se acostumbra calcular dos diferentes tipos de láminas de riego, éstas son: una lámina pesada o de PRESIEMBRA que humedezca el suelo hasta la profundidad radicular o humedad aprovechable (C.C. - P.M.P.) y otra llamada: NORMAL que tiene en cuenta que para los cultivos los rendimientos máximos se obtiene cuando sólo se utiliza un 50% de la humedad aprovechable, durante los períodos vegetativos de floración y fructificación, no llegando en algunos casos más que al 25% el nivel de consumo que da las máximas producciones. Sin embargo, pretender utilizar sólo el 25% de la humedad aprovechable equivale a tener una mayor frecuencia de riegos, lo cual resulta costoso, por lo anterior generalmente se pretende utilizar el 50% de la humedad aprovechable.

Por lo anterior:

$$L_p = (C.C. - P.M.P.) D_a \times P_r$$

$$L_n = 0.50 (C.C. - P.M.P.) D_a \times P_r$$

En caso de contar con estudio Agrológico Detallado se podrá disponer de datos de C.C., P.M.P. y D_a para 4 horizontes o capas de suelo en que se divide, P_r , calculándose u-

na lámina de aplicación para cada estrato.

El valor de 0.50 adoptado para la lámina normal habrá de prorratearse y dicha lámina normal será la suma de las láminas calculadas para cada perfil en que fue dividida la P_r . El prorrateo mencionado se hará en función del porcentaje de humedad extraído en cada perfil; dividiendo el porcentaje de humedad aprovechable en cada estrato entre el porcentaje de humedad aprovechada, (0.50), esto es:

$$K_1 = \frac{0.40}{0.50} = 0.80; \quad K_2 = \frac{0.30}{0.50} = 0.60 \quad \dots \text{etc.}$$

III.1.e.3.- PERIODICIDAD DE RIEGOS (CALENDARIO DE RIEGO).

Para elaborar un programa de riego para cada cultivo se deben considerar L_p y L_n y el consumo de la planta, tomando en cuenta su ciclo vegetativo y la lluvia efectiva.

Con los valores de U.C.A. y de LL_e calculados para los cultivos se construyen gráficas sobre un par de ejes cartesianos, en el eje de las abscisas aparece el ciclo vegetativo dividido en meses y días; sobre el eje de las ordenadas los valores de (U.C.A. - LL_e) acumulado y también los valores de las láminas netas acumuladas. Lo anterior se realiza utilizando -- previamente las formas especiales.

En seguida se procede a llevar desde el eje de las ordenadas el valor de L_p hasta interceptar a la curva construida, por tal punto se levanta una línea hasta tener el valor de L_n , interceptando a esa altura nuevamente la curva y así sucesivamente hasta tener cubiertas las necesidades de agua que marca la curva. En cada intercepción con la curva de (U.C.A. - LL_e) se baja referencia, leyéndose el día en que habrá de aplicarse los riegos normales y respecto a la lámina de presiembra se considera su aplicación 15 días antes del inicio del ciclo vegetativo del cultivo.

CALCULOS.

- 1.- El método descrito anteriormente para calcular las láminas de presiembra y normales para cada cultivo, se aplica para los dos valores de la profundidad radicular (MEDIA y ALTA), obteniéndose dos valores para cada lámina.
- 2.- Se aplican ambos valores de las láminas de presiembra y normal (L_p y L_n) calculadas, a la curva de (U.C.A. - LL_e) acumulada y se obtienen dos periodicidades o calendarios de riego.
- 3.- Por último basándose en los resultados reportados o recomendaciones de riego que para cada cultivo se tienen en los folletos de los Institutos Nacionales de Investigación Agrícola; se confrontan y adecúan dichos calendarios de riego en uno único y final.

III.1.e.4.- CALCULO DE LAS LAMINAS BRUTAS O DE DERIVACION (ESTUDIO DE LAS EFICIENCIAS).

Dentro de un sistema de riego se tienen siempre pérdidas de agua en la conducción (canales y tuberías) y en la aplicación o riego (filtración, evaporación, desague, etc.), -- por lo anterior, para asegurar la aplicación de las láminas -- L_p y L_n se deben incrementar por un factor que está definido de la manera siguiente:

$$C = \frac{1.0}{E_c \times E_r}$$

siendo:

C = Coeficiente de transformación de láminas netas a láminas brutas.

E_c = Eficiencia en la conducción, para canales revestidos de concreto tiene un valor del 80%.

E_r = Eficiencia de riego, para condiciones normales de trabajo un valor de 75% es lo indicado,

Por lo anterior:

$$C = \frac{1.0}{0.80 \times 0.75} = \frac{1.0}{0.60} = 1.666$$

Las láminas del calendario de riego se multiplican por el factor anterior, obteniéndose las láminas brutas o de extracción.

III.1.f.- CALCULO DE LA DEMANDA ANUAL.

Para calcular la demanda anual y las demandas mensuales por Ha., se realiza el siguiente cálculo previo para 100 Ha. en la tercera tabla de la forma especial llamada: CALCULO DE LA DEMANDA ANUAL, para la cual, el volumen mensual de agua en milcs de m^3 para 100 Ha., se obtiene multiplicando la lámina bruta mensual en cm. por el % del área total que ocupará el cultivo respectivo y dividiendose entre diez.

La demanda anual por Ha. en m^3 será igual al volumen total acumulado de los cultivos x 1000 y entre 100.

III.2.- PROCEDIMIENTO EXPEDITO.

III.2.1.- SINTESIS DEL METODO.

El método consiste en la selección primeramente del plan de cultivos, el cual contendrá predominantemente la Agricultura de la región del proyecto, enseguida con toda la información recabada sobre las prácticas de riego para los diferentes cultivos de la zona en estudio, esto es, el conocimiento de las láminas brutas de riego tanto de presiembra como normales; se llevan a la 2a. tabla de la forma especial denominada: CALCULO DE LA DEMANDA ANUAL. Por último, se completa la forma anterior, obteniéndose finalmente la demanda anual por Ha., a

sí como las demandas mensuales respectivas, lo anterior se realiza en base al método descrito en el inciso III.1.d.4.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Brinker, R.C. 1969. Topografía Elemental. México, D.F. --- Pax México.
- 2.- Castilla Pérez, O. 1966. Determinación Práctica del Uso -- Consuntivo. Memorandum Técnico No. 231, S.R.H. México, D.F.
- 3.- Departamento de Ingeniería Experimental. 1967. Mecanica de Suelos. Instructivo para Ensayo de Suelos. S.R.H. México, D.F.
- 4.- Dirección General de Estudios. 1958. Proyecto de las Obras de Pequeña Irrigación. Memorandum Técnico No. 144. S.R.H. México, D.F.
- 5.- Dirección General de Estudios. 1973. Proyectos de Zonas de Riego. Memorandum Técnico No. 285. S.R.H. México, D.F.
- 6.- Dirección General de Ingeniería Agrícola. 1968. Criterios - Generales para el Diseño de Pequeñas Obras Hidráulicas para Riego y Abrevadero. Boletín Informativo. S.A.G. México, D.F.
- 7.- Linsley, R. K. y Franzini, 3.B. 1970. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Ed. Cecca. México, D.F.
- 8.- Orla Martínez, H. 1967. Hidrología. Apuntes de Clase, Chapingo, México. Ena.
- 9.- Rodríguez, T. F. 1973. Elementos de Escurrimiento Superficial. Memorandum Técnico No. 342. S.R.H. México, D.F.
- 10.- Rufz Vázquez, M. 1958. Estudios Hidrológicos. Memorandum Técnico No. 142. S.R.H. México, D.F.

11.- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 1975. Simposium sobre Pequeños Almacенamientos. México, D.F.