X-68

Facultad de Ingeniería

U. N. A. M.

Escurrimiento de Aguas Pluviales (Fórmula Empírica de Burkli-Ziegler)

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

p r e s e n t a :

MARIO HELGUERA MATEOS

México, D. F. 1979

FACULTAD DE INGENIERIA
EXAMENES PROFESIONALES
60-1-52

VNIVERSIDAD NACIONAL
AVPNMA

Al Pasante señor MARIO HELGUERA MATEOS,
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Héctor Alvarez Ramírez, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

"ESCURRIMIENTO DE AGUAS PLUVIALES"
(FORMULA EMPIRICA DE BURKLI-ZIEGLER)

Indice

1. Introducción
2. El problema hidrológico
3. Fórmula de Burkli-Ziegler
4. Unidades de los sistemas
5. Discusión de la fórmula
6. Generalidad de la fórmula
7. Aplicación de la fórmula a la ciudad de México bajo procesos comparativos

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 8 de marzo de 1979
EL DIRECTOR

ING. JAVIER JIMENEZ ESPRIU

JJE/OBLH/ser

CAPITULO I.- INTRODUCCION

El problema hidrológico de un sector urbanizado consiste en determinar el volumen de agua concentrado en un lugar de dicho sector en que ha caído una precipitación. Conocida la precipitación, la incógnita es el volumen concentrado.

En el problema intervienen varios parámetros, difíciles de cuantificar con exactitud unos, y aun de determinar otros, no obstante que en lo fundamental es muy sencillo.

Cada región tiene condiciones tan especiales, que los datos por considerar son diversos en cada una de ellas y el procedimiento que en un lugar se seguiría para este cálculo, resulta completamente inapropiado en otro.

Esta variabilidad de datos ha impedido que se establezcan fórmulas generales que faciliten la resolución del problema. Muchas veces lo más apropiado es hacer observaciones locales y deducir de ellas una expresión que será buena únicamente para el lugar correspondiente. Estas expresiones, por lo general, son empíricas, y las que se han determinado para diversos lugares resultan muy diferentes entre sí.

Sin embargo, muchas veces presta utilidad emplear una fórmula en otro lugar semejante a aquel para el cual fué establecida, y después de un conjunto de observaciones prácticas ver hasta qué punto la fórmula adoptada se ha verificado o apartado de la realidad.

Una adaptación en esta forma podrá facilitar el establecer una expresión conveniente al lugar de que se trate.

Las relaciones que unen tanto factor complejo y variable conducen casi siempre a fórmulas de estructura complicada, lo cual es un grave inconveniente, puesto que el hombre busca siempre la sencillez de expresión, y en su actividad diaria tiene la inevitable tendencia a sacrificar exactitud en aras de la rapidez y facilidad de cálculos. Además la complejidad de algunos factores que aun escapan al dominio del cálculo, justifican muchas veces esta actitud. Por tales motivos en el problema de que se trata, es práctica muy común emplear, cuando no se tienen datos suficientes locales, ni plan lógico a seguir, algunas de las fórmulas empíricas determinadas para otros lugares.

Muchas son las fórmulas establecidas, pero de entre la gran variedad que de ellas existe, algunas han alcanzado cierto carácter general que han hecho más frecuente su uso. Entre ellas se encuentra la llamada de BURKLI-ZIEGLER.

CAPITULO II.- EL PROBLEMA HIDROLOGICO.

Relaciones: Precipitación, escurrimiento y concentración.- En la determinación del volumen de agua de lluvia concentrado en un lugar del área A sobre la cual acontece la precipitación i. Presenta las siguientes fases:

1ª La lluvia se conoce por la altura i referida a un tiempo muy corto (el minuto). La superficie A se conoce en su extensión. El volumen de agua caído durante esa unidad de tiempo es Ai. Se representa dicho volumen como un manto de agua retenido sobre dicha superficie en caso de que ésta fuera impermeable. (fig. 1a)

2ª Parte de este volumen Ai por diversos motivos se pierde (evaporación, retención, infiltraciones, etc.), de acuerdo con la naturaleza del terreno. El valor i de la precipitación, o el volumen caído Ai se afecta de un coeficiente K llamado de Impermeabilidad, que engloba los factores que producen esta disminución. Resulta sobre la superficie A, un volumen KAi. K vale siempre menos que la unidad. En su límite extremo superior valdrá uno. (fig. 2b)

3ª Este volumen KAi es el que puede correr sobre el área A hasta un lugar D, de acuerdo con ciertas características de la propia superficie A. El volumen acumulado en la unidad de tiempo es variable tiene diversos valores entre los que acontece un máximo que puede ser el total KAi o sólo parte de éste. Si es parte, el volumen acumulado, si se extendiera sobre A, formaría un manto de espesor igual a una fracción de Ki. Esta disminución está dada por un coeficiente C llamado de ESCORRENTIA y de valor por lo general inferior a uno. Su magnitud mayor es la unidad. (fig. 2c)

Por lo tanto, conocida la superficie A, la disminución de la altura i de precipitación para tener la equivalente CKi del volumen concentrado, es el problema por resolver. Pero la determinación de K y C es muy compleja y casi siempre el caso resulta indeterminado. Asignar valores medios puede dar lugar a resultados lejanos de la realidad.

Observaciones prácticas.- Supóngase una red de alcantarillado o una cuenca de un río, en que se conocen las alturas i de precipitaciones observadas durante un largo período de tiempo. Se conocen además algunas características de las superficies sobre las cuales acontecen estas precipitaciones. En un lugar determinado de la red o de la cuenca se establece un aparato de medida y desde el momento en que empieza a llover hasta que deja de llegar agua procedente de la precipitación, se anotan los consiguientes volúmenes de agua que pasan por dicho lugar. En esta forma se tiene una manera de relacionar las alturas de precipitación con los volúmenes de agua medidos.

Si se hacen intervenir algunos otros factores cuantificados en cierta medida, será factible determinar una expresión en que el valor de los volúmenes acumulados en diversas condiciones de área y de lluvia pueda determinarse por medio de ella.

Ya se dijo que tal expresión es por lo general empírica.

Expresión fundamental.- Este volumen buscado viene a ser función de la lluvia, es decir, de la magnitud i que la mide. Es lógico suponer que a mayor cantidad de agua caída del cielo se tendrá un gasto mayor acumulado.

Asimismo la extensión de la superficie sobre la cual llueve influye en la magnitud de este gasto, pues lógico es pensar que entre mayor sea A, mayor será el volumen que se acumule en un punto dado.

Por lo tanto, el gasto Q buscado es función directa de A y de i y lo será por tanto de su producto.

$$Q = A\,i$$

Si ahora se considera la disminución que produce la permeabilidad del terreno y se sintetiza en el coeficiente K se tendrá la fórmula:

$$Q = K\,A\,i$$

que se ha llamado racional y es la fundamental para la estimación de las concentraciones.

Funciones por determinar.- Si el gasto Q es función de i y crece con él, debe determinarse en qué forma se verifica este crecimiento, es decir, determinar la función:

$$Q = f\,(i)$$

Asimismo, la superficie A recoge más agua entre más grande sea. Pero a igualdad de área pueden presentarse dos casos: uno de superficies planas, de pendientes suaves y otra de cuestas fuertes, escarpadas, etc. Puede ser que una superficie esté desprovista de vegetación y otra de igual magnitud esté cubierta de bosques. Una misma superficie puede tener tan diversas características que el agua llovida sobre iguales extensiones no permita acumular el mismo volumen. Q viene, por tanto, a ser una función compleja de A.

$$Q = f\,(A)$$

y por tanto:

$$Q = f\,(Ai)$$

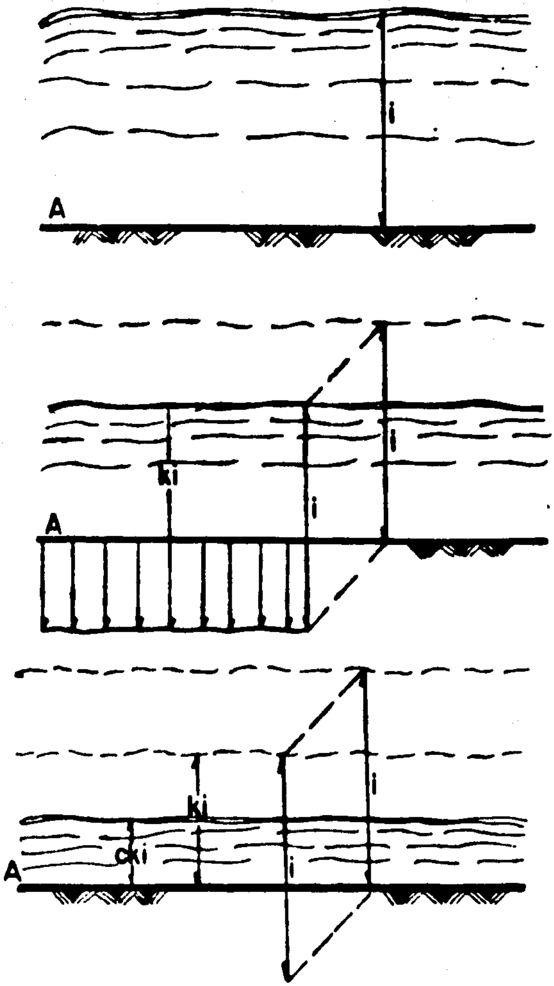
Se repite, la determinación de esta compleja función es el objeto del problema hidrológico. La interpretación práctica de esta función por datos tomados directamente de observaciones de una región conduce a expresiones incompletas que a veces resultan de fácil y conveniente aplicación.

FIGURA I

(a)

(b)

(c)



Capítulo III. FORMULA DE BURKLI-ZIEGLER.

Burkli-Ziegler, de nacionalidad Suiza, en el deseo de estimar con precisión los volúmenes acumulados, provenientes de fuertes lluvias, en la ciudad de Zurich practicó por el año de 1878 minuciosas observaciones que le condujeron a establecer la fórmula que lleva su nombre.

No es completamente original de él. Su origen se debe a Hawsley, pero Burkli-Ziegler la obtuvo por modificaciones diversas.

Esta fórmula se ha usado en Europa y adaptado al sistema inglés se ha empleado en los países correspondientes, tanto en el cálculo del agua que entrega una cuenca como en el de atarjeas y colectores de un sistema de alcantarillado pluvial.

Se intentará dar una deducción de ella, partiendo de principios racionales, que no fueron los que consideró Burkli-Ziegler, pero que la explican suficientemente.

Influencia del área.- La función entre gasto y área:

$$Q=f(A)$$

es una de las determinaciones fundamentales de la fórmula de que se trata.

Recordando lo que en cuestión de concentraciones se detalló en capítulos anteriores, es fácil comprender la influencia de A por lo que a extensión se refiere.

Supóngase un área A y en ella el lugar D de desfogue ó acumulación de las aguas al empezar a llover y establecerse el escurrimiento, empieza a pasar por D el agua proveniente de una pequeña zona a_1; después de otra mayor a_2; luego de otra más grande a_3, etc. (fig. 2a).

CONSIDERACIONES

La zona que contribuye con el agua que llega a D es cada vez mayor y va ensanchando hacia arriba su contorno superior bbb. Esto va aconteciendo hasta que cesa la lluvia. El agua caída en bbb tarda cierto tiempo en llegar a D. Hasta cuando este tiempo es igual al de duración de la lluvia, se agranda la zona contribuyente. Después el agua que llega a D ya no proviene de la misma zona. La parte (fig. 2b) cercana a D ya no contribuye con agua, pues en ellas ya no llueve. Pero las aguas arriba del contorno bbb que todavía no llegaban a D son las que ahora escurren hacia él. El contorno bbb sigue alejándose de D, pero en cambio la parte inferior de la zona tributaria también va separando su contorno ddd del lugar D. Esta zona se va desalojando hacia arriba sin recibir más agua que la que ya obtuvo de la lluvia. Si esta zona se conservara siempre igual en área, el volumen que arrojaría sería constante, hasta el momento en que el contorno bbb llegara a coincidir con el límite ccc de la superficie A.

Sigue desalojándose el área de tributación, pero el contorno bbb ya no puede abarcar nuevas extensiones (fig. 2c). En tanto ddd sigue subiendo y por tanto la zona va siendo cada vez menor y por lo mismo, desciende el gasto que proporciona. Llega a ser nulo cuando ddd coincide con ccc.

De estas consideraciones se ve que el contorno bbb de la primera etapa depende del tiempo de duración de la lluvia y a la vez de la extensión del área A. Por tanto, la primera y espontánea suposición de que el gasto Q crece con A empieza a modificarse. El contorno bbb limita la superficie que entrega íntregra su agua al punto D. Si el área A es pequeña resulta lógico suponer que la lluvia pueda durar un tiempo igual al de escurrimiento del agua caída en los lugares más lejanos. Después la zona contribuyente puede arrojar un máximo que dure más o menos tiempo, también en relación con la mayor o menor extensión de A. Pero no se pasa de allí. El área A podrá ser muy grande pero el gasto acumulado y que proviene de la faja bbb-ddd que se va desalojando, no aumenta correlativamente.

Se puede, por tanto, decir que por D va pasando un gasto que aumenta hasta cierto valor, determinado por el agua llovida en sólo una parte del área total A. Y que si A disminuye, esta

parte tiende a ser el total A; y si aumenta, esta fracción tiende a disminuir.

Claro es que esto se ve con claridad palmaria en el análisis de los procedimientos racionales, pero aquí sólo se quiere hacer resaltar la noción en términos generales.

Supóngase que observaciones diversas en determinado lugar A, permitieron conocer los gastos acumulados. Los volúmenes llovidos serían:

$$Ai \qquad Ai' \qquad Ai'' \qquad \ldots\ldots\ldots$$

y los gastos medios:

$$\frac{Ai}{2} \qquad \frac{Ai'}{2} \qquad \frac{Ai''}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots$$

es decir, en el gasto acumulado sólo interviene la mitad del área. Supóngase además que en una fracción A' del anterior se observó el gasto acumulado y se encontró ser:

$$\frac{2A'i}{3} \qquad \frac{2A'i'}{3} \qquad \frac{2A'i''}{3} \qquad \ldots\ldots\ldots$$

que indica que en esta zona menor contribuyen a su concentración dos terceras partes de su superficie. Y que así sucesivamente se va encontrando lo anteriormente expuesto, es decir, que se observa que al disminuir A el gasto correspondiente proviene de una mayor porción de ella, y al contrario, al aumentar A el gasto resulta del agua caída en una parte cada vez menor.

Burkli-Ziegler notó tal vez una cosa semejante. No se puede decir que en sus observaciones tuviera la claridad de este concepto, pero sin duda sí cayó en cuenta que el retardo que sufre el agua lejana en llegar al punto de desfogue impide que se junte con la que escurre de sus cercanías. Llegó al mismo resultado que si hubiera hecho los razonamientos anteriores. La función Q=f(A) consiste en que sólo una fracción A contribuye al gasto Q y es menor en relación a medida que aumenta A.

Supóngase que esta reducción de área en el lugar de que se trata, Zurich, resultó para Burkli-Ziegler ser la originada por una potencia fraccionaria de A por ejemplo 3/4.

Es decir, si en A llueve, en el lugar de desagüe D sólo se reúne el agua caída en una fracción de A igual a $A^{3/4}$. La función Q=f(A) es entonces:

$$f(A)=A^{3/4}$$

En efecto, toda cantidad elevada a un exponente fraccionario es menor que ella. Si el valor de A es la unidad su potencia 3/4 es la misma unidad. Por lo tanto, el límite de la reducción en área corresponde al de la unidad de superficie, Burkli-

Ziegler tomó para esta unidad la hectárea, es decir, cuando la superficie llovida fuese de esta extensión no se reduciría el gasto total de A. A partir de una hectárea aparece la reducción. Por ejemplo para 3 hectáreas se tendría:

$$A^{3/4} = \sqrt[4]{27} = 2.28$$

es decir, que solamente 2.28 hectáreas contribuyen al máximo. Si la superficie vale 225 hectáreas, se tendrá:

$$A^{3/4} = \sqrt[4]{225^3} = 58.09$$

el aumento a 225 hectáreas reduce la parte contribuyente a sólo 58.09 hectáreas.

El exponente 3/4 va reduciendo la superficie tributaria a medida que la zona llovida aumenta.

Si el área captante del agua de lluvia vale menos que una hectárea, el valor de A será menor que la unidad y entonces su potencia 3/4 viene a producir una cantidad mayor

Esto indica que si se tiene un área pequeña, la concentración a que da lugar es tan rápida, que equivale a la concentración de otra área mayor. Por ejemplo si A = 0.15 hectárea.

$$A^{3/4} = \sqrt[4]{0.15^3} = 0.241$$

lo que equivale a considerar una superficie total contribuyente de 0.241 hectáreas, mayor que la real de 0.15.

Esta variación del caudal concentrado está en concordancia con la realidad, pues en zonas pequeñas los gastos máximos son más frecuentes, debido a que el tiempo de concentración casi siempre es inferior a la duración de la lluvia, de modo que es muy frecuente que las máximas intensidades de una lluvia acumulen los gastos íntegros llovidos en los lugares de desagüe de áreas pequeñas (menores que una hectárea).

Influencia de la pendiente del área.- La mayor o menor inclinación de una superficie A hacia el desagüe D tiene marcada influencia en el gasto Q. Se trata ahora de determinàr la función:

$$Q = f(s)$$

llamando s a la pendiente del terreno, la cual viene a ser otra de las características del área A.

Supóngase que el área A sobre la cual (fig. 3a) llueve es impermeable y completamente horizontal, e imagínese que el agua que va cayendo se almacena sin desbordarse. Como siempre, el volumen caído es Ai durante un tiempo t. Si en algún lugar de esta área, se dispone un desagüe D, el volumen Ai saldrá por él con una velocidad que depende de la altura i. El problema hidráulico es semejante al de vaciado del agua contenida en un recipiente, a través de un orificio. El gasto que pasa por D será variable con i y tardará más o menos tiempo hasta agotar el volumen Ai.

Lo ideal sería que este tiempo de vaciado fuese igual al de caída de la lluvia, para que a medida que esta corra por A se elimine por D y no haya estancamiento de ella. Por el retardo del agua lejana en llegar a D la eliminación del volumen Ai se hace en un tiempo mayor que el que tarda en caer del cielo. Entre los gastos que pasan por D existirá un máximo. Para éste se calcula la capacidad del desagüe D.

Si en lugar de que A sea horizontal, se supone una superficie con pendientes hacia D (fig. 3b), el agua escurrirá más aprisa a este lugar y en él se acumulará en un instante dado mayor volumen Ai, pero en menos tiempo y el gasto máximo es mayor. Este aumento lo provoca la pendiente de la superficie A. La capacidad del desagüe D tendrá que ser mayor, si se quiere evitar estancamientos.

Por tanto, se comprende que el máximo gasto acumulado en el desagüe D está influído por la pendiente s del área A. Es una función de ella.

Difícil es determinar la pendiente de una cuenca o sector urbanizado puesto que no son superficies planas y uniformes, y las depresiones naturales y diversos accidentes de ellas pueden ser fuertes o leves y estar dentro de una inclinación del terreno también leve o fuerte. En las ciudades se tiende, sin embargo, a uniformar la topografía y formar superficies suaves y de cierta continuidad, por lo cual se puede hablar de una pendiente general que sea una pendiente media, pero en que la pendiente promedio no sea el de valores extremos, sino más bien el predominante.

¿Cómo influye el valor de s en el gasto Q? Desde luego puede establecerse que a mayor pendiente mayor gasto, o que la primera varía directamente con el segundo.

Supóngase que por condiciones observadas y medidas directas se notó que si la pendiente de A es 0.001, el gasto máximo que se registra en D es el total Ai, y que si aumenta s, es decir, si es mayor que 0.001 dicha concentración aumenta; al contrario que si s es menor que 0.001 el gasto máximo es menor. Supóngase que relacionando las pendientes s con los gastos correspondientes se encuentra que la función: $Q = f\ (s)$ que los liga está definida por la potencia fraccionaria 1/4 de s (consideración de Burkli-Ziegler)

$$F\ (s) = s^{1/4}$$

Se tendrá entonces que el gasto Ai resulta afectado de un factor:

$$Q = s^{1/4}\ Ai$$

Puesto que en el caso particular de que la potencia cualquiera de un número es el mismo número, cuando éste es la unidad, debe tenerse que:

$$s = 1 \qquad s^{1/4} = 1$$

y esto se verifica cuando la pendiente s vale 0.001.

Por lo cual se establece que esta magnitud debe expresarse en milésimos como unidad o más bien como número entero. Por tanto una pendiente de 0.002 en el caso que se estudia será simplemente 2. De acuerdo con Burkli-Ziegler la pendiente s del área A debe considerarse en milésimos como números enteros.

Si la pendiente es mayor que un milésimo, por ejemplo 0.002,

$$s = 2 \qquad s^{1/4} = \sqrt[4]{2} = 1.1$$

y por tanto

$$Q = 1.1\ Ai$$

el gasto acumulado es como si proviniera de una área 1.1 A mayor que A.

Si la pendiente es menor que un milésimo, por ejemplo 0.000236,

$$s = 0.236 \qquad s^{1/4} = \sqrt[4]{0.236} = 0.7$$

y el gasto

$$Q = 0.7\ Ai$$

sería menor; equivaldría al íntegro de una área menor de 0.7 A, más pequeña que la real A.

Influencia de la impermeabilidad.- Nada nuevo expresa Burkli-Ziegler a este respecto. Estima el gasto Ai disminuido por la porción de agua que se filtra, evapora, retiene, etc., por un coeficiente que llama c y que es el que se llamará K. Su máximo valor es 1, en caso de una superficie idealmente impermeable; disminuye al disminuir la impermeabilidad de la superficie. La función Q = f (K) será por tanto:

$$F(K) = K$$

Se pueden tomar para este coeficiente los siguientes valores:

Clase de superficie	valores de K (C)
Calles en los núcleos centrales de las ciudades	0,7 a 0,9
Calles circundantes de las anteriores	0,5 a 0.7
Calles en arrabales	0.25 a 0,5
Jardines y huertas	0,00 a 0,25

Función Total.- Sólo estos elementos extensión, pendiente e impermeabilidad del área llovida, se consideran en la fórmula de Burkli-Ziegler. La función de estos tres factores A, K y s queda definida por

$$F\ (K,A,s) = KA^{3/4}\ s^{1/4}$$

El área A sobre la cual llueve se modifica por los tres anteriores factores convirtiéndola en una porción de ella. El gasto Q derivado de A viene a ser cuando acontece una precipitación i

$$Q = KA^{3/4}\ s^{1/4}\ i \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

expresión simple de la fórmula de Burkli-Ziegler. El no la estableció en esta forma. Si se sustituyen los exponentes fraccionarios por los equivalentes radicales resulta:

$$Q = K\ \sqrt[4]{A^3}\ \sqrt[4]{s\ i} = K\ \sqrt[4]{A^3\ s}\ i$$

multiplicando y dividiendo por A, dentro del radical:

$$Q = K \sqrt[4]{\frac{A^4\ s}{A}}\ i$$

de donde aparece:

$$Q = K\ A\ i\ \sqrt[4]{\frac{s}{A}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

la forma presentada por el autor de esta fórmula.

Ejemplo. Se quiere conocer el gasto que arroja una superficie de 225 hectáreas. Siendo su pendiente de 0.0004 con una lluvia de intensidad de 0.6 milímetros por minuto. Se puede considerar un coeficiente de impermeabilidad de 0.6

Los datos son:

A = 225 hectáreas

s = 0.4

K = 0.6 = C

i = 0.6 milímetros/minuto

Tómese la expresión sencilla de la fórmula. Por extensión del área, la superficie de 225 hectáreas queda reducida a:

$$A^{3/4} = 225^{3/4} = 58.09 \text{ hectáreas.}$$

La reducción por pendientes = 0.4; $s^{1/4} = 0.4^{1/4} = 0.795$

Por tanto:

$$A^{3/4}\ s^{1/4} = 58.09 \times 0.795 = 46.18155 \text{ hectáreas.}$$

La reducción por impermeabilidad:

$$K\ A^{3/4}\ s^{1/4} = 0.6 \times 46.18155 = 27.7089 \text{ hectáreas.}$$

El gasto concentrado es el que proviene sólo de esta superficie. La altura de precipitación 0.6 milímetros por minuto viene a ser:

$\frac{0.6}{60}$ = 0.1 diezmilímetro por segundo, y 0.1 d.m/seg x

x hectárea = 0.0001 x 10000 = 1 m^3/seg.

Por tanto:

$K\ A^{3/4}\ i\ s^{1/4} = 27.7089 \times 0.1 = 2.771\ m^3/seg.$

¿Cuál sería el coeficiente c de escorrentía?

Considerando comprendida la impermeabilidad en este coeficiente será la relación entre el volumen concentrado y el llovido. Este último viene a ser:

$225 \times 0.1 = 22.5\ m^3/seg.$

$\frac{2.771}{22.50} = 0.12$

viene a ser el coeficiente buscado.

Supóngase ahora que se quiere saber el coeficiente que corresponde a una porción menor de la anterior superficie, por ejemplo, en 50 hectáreas.

El gasto concentrado se deduce de la siguiente manera:

$A^{3/4} = 50^{3/4} = 18.803$ hectáreas.

$s^{1/4} = 0.4^{1/4} = 0.795$

$K = 0.6$

$i = 0.1$ d.m./seg $= 0.1$ m^3/seg. hect.

$Q = KA^{3/4}\ i\ s^{1/4} = 0.6 \times 18.803 \times 0.1 \times 0.795$

$Q = 0.897$ m^3/seg.

El gasto llovido viene a ser:

50 hectáreas x 0.1 d.m./seg $=$ 5 m^3/seg.

y por tanto, el coeficiente buscado c es:

$$c = \frac{0.897}{5} = 0.18$$

mayor que el anterior.

Si se busca el valor de este coeficiente para una área más pequeña, Por ejemplo, de 2 hectáreas, se tendrá:

$Q = K\ A^{3/4}\ i\ s^{1/4} = 0.6 \times 1.682 \times 0.1 \times 0.795$

$Q = 0.080$ m^3/seg.

como volumen concentrado; para el volumen llovido;

$$2 \text{ hectáreas} \times 0.1 = 0.2 \ m^3/seg.$$

y para el coeficiente de escorrentía:

$$c = \frac{0.080}{0.2} = 0.40$$

Supóngase ahora que se trata de una zona muy pequeña, en los límites superiores de la cuenca por desaguar, donde la pendiente es mayor; una hectárea de superficie y 0.001 de pendiente, es decir, A=1 y s=1.

El gasto concentrado es:

$$Q = K\, A^{3/4}\, i\, s^{1/4} = 0.6 \times 1 \times 0.1 \times 1$$

$$Q = 0.060 \ m^3/seg.$$

y el gasto llovido:

$$1 \text{ hectárea} \times 0.1 = 0.1 \ m^3/seg.$$

y el coeficiente de escorrentía:

$$c = \frac{0.06}{0.10} = 0.6$$

Si todavía se supone una zona más pequeña, con una pendiente más fuerte se tendrá, A=0.3 hectáreas, pendientes de 0.002, o sea s=2.

$$Q = K A^{3/4} i s^{1/4} = 0.6 \times 0.405 \times 0.1 \times 1.189$$

$$Q = 0.0289 \ m^3/seg.$$

para el gasto concentrado. Y para el llovido:

$$0.3 \text{ hectáreas} \times 0.1 = 0.030 \ m^3/seg.$$

por tanto el coeficiente de escorrentía es:

$$c = \frac{0.0289}{0.03} = 0.99$$

Como se ve por este ejemplo, la reducción del caudal llovido va teniendo menos valor a medida que el área es más pequeña.

Nota: En este ejemplo se ha considerado como coeficiente c de escorrentía la relación del gasto Q acumulado en un segundo, al total llovido en toda el área durante ese mismo tiempo. Si se tiene en cuenta que la impermeabilidad es la relación entre el volumen concentrado y el capaz de correr, es decir, sólo parte del total llovido (lo que queda al disminuirlo por impermeabilidad), dicha relación es:

$$c = \frac{Q}{KAi}$$

en cuyo caso, por la estructura de la fórmula, el coeficiente de escorrentía resulta mayor que la unidad en áreas menores de una hectárea y también con pendientes mayores de un milésimo. En el caso anterior de una superficie de una hectárea, y un milésimo de pendiente, esta relación es:

$$\frac{Q}{KAi} = \frac{0.06}{0.06} = 1$$

y para el caso de A = 0.3 de hectárea, pendiente de 0.002, el gasto llovido se reduce a 0.03 x 0.6 = 0.018 m^3/seg., por tanto:

$$\frac{Q}{KAi} = \frac{0.0289}{0.0180} = 1.6$$

FIGURA 2

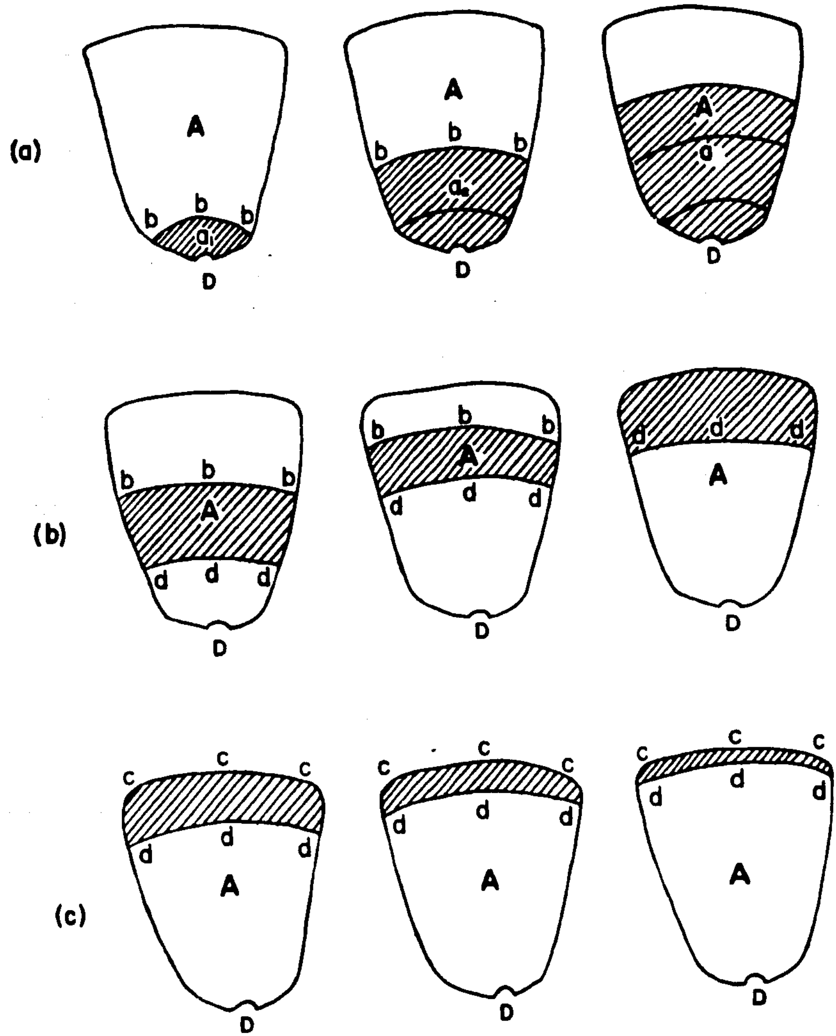
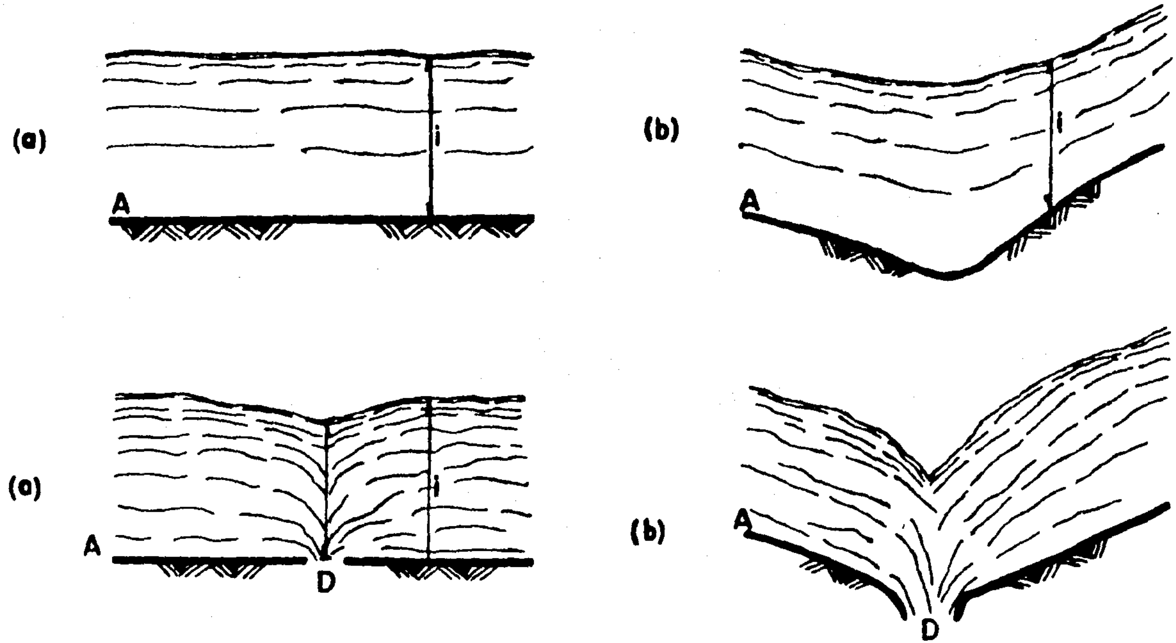

(a)
A
b b b
a_1
D
A
b b b
a_2
D
A
a
D
(b)
b b b
A
d d d
D
b b b
A
d d d
D
d d d
A
D
(c)
c c c
d d d
A
D
c c c
d d d
A
D
c c c
d d d
A
D

FIGURA 3



CAPITULO IV.- UNIDADES.

La fórmula fué establecida por su autor para el sistema métrico. Se expuso que la unidad de superficie que consideró fué la hectárea, y un milésimo de pendiente como cifra entera.

Las unidades del gasto Q derivado de la fórmula

$$Q = K\,A\,i\,\sqrt[4]{\frac{s}{A}}$$

dependerán del producto Ai, es decir, de la combinación de esta magnitud de superficie: hectáreas con las unidades en que está dada i, precipitación. La pendiente no interviene por ser un número abstracto. Asimismo K es un número abstracto.

Si se expresa la altura i en milímetros por minuto, se tiene que la altura de 1 milímetro de lámina de agua sobre una superficie de una hectárea vale:

$$1 \text{ hectárea} \times 1 \text{ milímetro} = 10000 \text{ metros}^2 \times 0.001 \text{ metro} = 10 \text{ m}^3$$

y por tanto:

$$1 \text{ hectárea} \times 1 \frac{\text{diezmilímetro}}{\text{minuto}} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = \frac{1}{60} \text{ m}^3/\text{seg} = 167 \text{ litros/seg}$$

Por tanto la fórmula de Burkli-Ziegler proporciona un gasto en litros por segundo, expresando A en hectáreas e i en diezmilímetros por minuto, siempre que se afecte del coeficiente numérico 167.

$$Q \text{ (litros/seg)} = 167 \text{ KA (hectáreas) i (d.m./min)} \sqrt[4]{\frac{s}{A}}$$

o bien:

$$Q \text{ (litros/seg)} = 167 \text{ KA}^{3/4} \text{ (hectáreas) i (d.m./min) } s^{1/4}$$

Cuando se designa la lluvia por centímetros por hora, se tiene:

$$1 \text{ hectárea x cm/hora} = \frac{10000 \times 0.01}{60 \times 60} = 27.78 \text{ litros/seg.}$$

por lo que el gasto Q resulta en litros por segundo, si A está dado en hectáreas e i en centímetros por hora, siempre que se afecte la fórmula del coeficiente 27.78.

Sistema inglés.- Al adaptarse la fórmula al sistema inglés, se modifica el concepto anterior de área. En lugar de considerar una hectárea se toma un acre; el límite de concentración íntegra se refiere ahora a menor superficie, puesto que:

1 acre = 4047 metros cuadrados o sea

1 hec = 2.47 acres.

El valor de la pendiente s y el del coeficiente K no sufren modificación, por lo cual el gasto Q depende de la altura i de la precipitación. Una pulgada de lluvia alcanzada durante una hora, produce un escurrimiento de un pie por segundo y por acre:

$$1 \text{ acre} = 43600 \text{ ft}^2$$

$$\frac{1'' \times 1 \text{ acre}}{1 \text{ hora}} = \frac{1 \text{ ft} \times 43600 \text{ ft}^2}{12 \times 60 \times 60 \text{ seg}} = \frac{43600}{43200} = 1 \text{ ft}^3/\text{seg}$$

prácticamente.

Por tanto el gasto Q, derivado de la fórmula de Burkli-Ziegler en el sistema inglés, estará dado en pies cúbicos por segundo, si el área A se toma en acres y la altura i de precipitación en pulgadas por hora.

Nota. Es de advertirse que al tomar en el sistema inglés el área A en acres como unidad, se altera una de las suposiciones básicas que estableció su autor. Burkli-Ziegler indica que en su fórmula debe considerarse la superficie A en hectáreas, por lo que, cuando se trata del agua llovida sobre una hectárea el volumen concentrado en ella es el total caído sobre toda la hectárea, puesto que, siendo A = 1 hectárea.

$$A^{3/4} = 1^{3/4} = 1 \text{ hectárea.}$$

y para un acre que vale 0.4047 hectáreas el volumen concentrado es mayor que el que correspondería a esta superficie, ya que

$$A^{3/4} = 0.4047^{3/4} = 0{,}5074 \text{ de hectárea.}$$

Al tomar el acre como unidad el agua concentrada es sólo la correspondiente a él, y entonces tomando las hectáreas en acres, se tiene, pues que 1 hectárea = 2.47 acres.

$$A^{3/4} = 2.47^{3/4} = 1.97 \text{ de acre.}$$

que corresponde a

$$0.4047 \times 1.97 = 0{,}7973 \text{ de hectárea.}$$

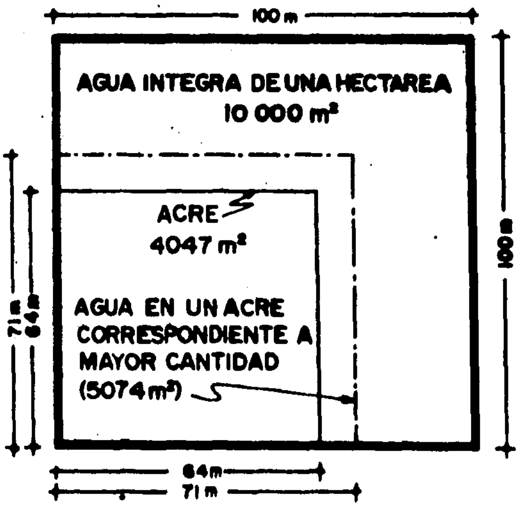
es decir, menor cantidad que la que Burkli-Ziegler estima.

Claro está que siendo una fórmula empírica y cuestión de apreciación el considerar que una hectárea es la superficie que entrega íntegra toda el agua que sobre ella escurre, bien se puede suponer que este volumen íntegro se verifica en menor y mayor superficie que una hectárea y por tanto, cuando en el sistema inglés se dice que la fórmula debe usarse tomando A en acres, se establece una condición especial que tiene como resultado el proporcionar menores gastos que los que se deducen de la fórmula tal y como su autor la estableció.

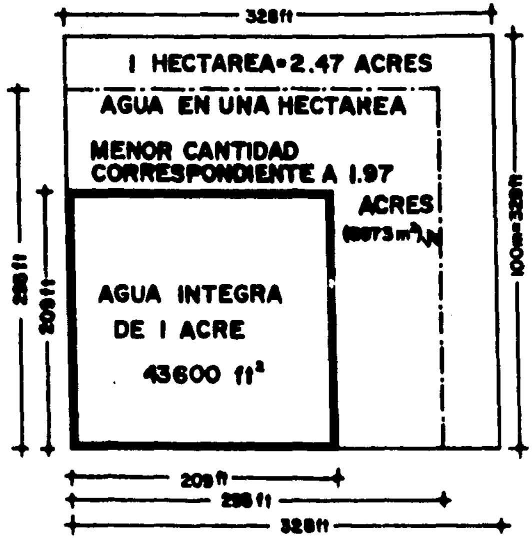
La siguiente figura muestra la diferencia de las dos suposiciones. Si pues se respeta el origen de la fórmula para usarla en el sistema inglés debe de afectársele de un coeficiente de conversión de unidades. Y si se considera la forma modificada que se le ha dado en dicho sistema, al adaptarse al métrico debe de calcularse el coeficiente respectivo del cambio de unidades, pero resulta ilógico emplear en este último sistema una fórmula traducida de una adaptación de la misma, y que fué establecida para unidades métricas.

FORMULA DE BURKLI-ZIEGLER: $Q = KAi\sqrt[4]{\frac{S}{A}}$

SISTEMA METRICO



SISTEMA INGLES



CAPITULO V.- DISCUSION DE LA FORMULA.

La fórmula de Burkli-Ziegler como empírica que es, no puede considerársele un carácter general y solamente se justifica su empleo en lugares semejantes a aquellos para los que la dedujo su autor.

Por otra parte, la dificultad de cuantificación de tanto fenómeno caprichoso que interviene en la afluencia de aguas superficiales a un conducto eliminatorio, hace en extremo difícil la adaptación de una fórmula genérica, no solamente sencilla, sino ni siquiera complicada, e indica que las expresiones empíricas pueden conducir a error si no se tiene cuidado en su aplicación.

Sin embargo, la asimilación de la estructura de la fórmula a los lineamientos racionales del fenómeno, indica que vale la pena discutirla, analizar sus defectos y las objeciones que se le puedan poner, para saber hasta qué punto puede aceptarse la generalidad que se le ha dado.

Camino del escurrimiento.- En la fórmula de Burkli-Ziegler interviene el área A, y según sea la extensión de ésta, se tiene una mayor o menor reducción del total de lluvia Ai caído sobre ella. No influye en ella la forma de la corriente, lo cual es causa de error, pues según sean las longitudes de las corrientes se tendrá un mayor o menor gasto concentrado. En efecto, en la Fig. 4

se representan dos áreas de igual forma y superficie (a) y (b), pero en las que es diferente el lugar D de desagüe. Se supone que las aguas escurren naturalmente en cada caso al lugar D, es decir, que las pendientes del terreno convergen hacia este desagüe. En la primera superficie el agua recorre caminos más largos y es lógico suponer que el agua lejana tiene menos probabilidades de unirse a la inmediata a D, que en el caso de la segunda superficie en que los caminos de las venas líquidas son más cortos. Según sea, por tanto, la longitud de las corrientes habrá una mayor o menor concentración.

Forma del área.- Supóngase que se tienen iguales superficies en extensión pero de diferente forma (figura anterior, caso c). También la forma puede aumentar o disminuir la concentración y de esto nada indica la fórmula.

Puede suponerse o establecerse que la fórmula se verifica para el caso en que las partículas líquidas recorren caminos iguales de la periferia o parteaguas al desagüe, es decir que el área sea un círculo con su desfogue en el centro y que a medida que se aparta el área A de esta forma se incurre en error. Un cuadrado, por tanto, no diferirá mucho de la forma circular, pero a medida que se trate de un rectángulo la concentración será mayor si el desagüe está hacia el medio del lado mayor; y al revés, menor si el desagüe se encuentra en el lado menor. En otras palabras, cuencas largas y angostas proporcionarán menores volúmenes de concentración que cuencas de anchuras mayores.

Retardo arbitrario.- La reducción del caudal, por el hecho físico de que las aguas lejanas no se reúnen a las inmediatas al desfogue, se involucra en el exponente 3/4 del área. En general se ve que es lógico suponer las reducciones en esta forma, pero se ocurre pensar que bien pudiera ser mayor o menor esta reducción, es decir que en lugar de ser la raíz 3/4 fuese otro número fraccionario. En efecto Mac Math, estudió minuciosamente los escurrimientos de aguas llovedizas en las alcantarillas de la ciudad de San Luis Missouri y estableció la fórmula:

$$Q = K A i \sqrt[3]{\frac{s}{A}}$$

que equivale a considerar en lugar de A, $A^{4/3}$ y $s^{1/3}$.

Puede decirse por tanto, que la elección de un exponente fraccionario es lógica, puesto que a mayor área menor reducción relativa. Pero que el valor numérico de este exponente depende de condiciones locales.

Pendiente.- Lo mismo puede decirse acerca de la influencia de la pendiente s, convirtiéndola en $s^{1/4}$. Puede que convenga para un lugar, tomar este exponente u otro mayor o menor. Mac Math considera 1/5 en lugar de 1/4.

No hay motivo para que la pendiente s influya siempre de acuerdo con la modificación del área, es decir que si ésta se reduce por el exponente 3/4 ó 4/5 la s se reduzca por 1/4 ó 1/5. Lógico es suponer la influencia de la pendiente afectada por un exponente fraccionario, pero como en el caso del área, el valor numérico dependerá de condiciones locales, o al menos no siempre estará ligado a la reducción del área.

Puede, por tanto, considerarse la fórmula de Burkli-Ziegler, buena en su estructura fundamental como sigue:

$$Q = K\,A\,i\,\frac{s^n}{A^m}$$

en que se desligan s y A e intervengan afectados de un exponente que pueda ser variable. Y en efecto ya se han establecido fórmulas semejantes. Hering aconseja la fórmula:

$$Q = K\,A\,i\,\frac{s^{0.27}}{A^{0.15}}$$ (para los mismos valores de K,A,i y s).

Unidad de superficie.- De las condiciones establecidas en la fórmula de Burkli-Ziegler se tiene que en una superficie de una hectárea con un milésimo de pendiente el agua llovediza llega a concentrarse íntegra en un lugar de desagüe. Se explica que, teniendo presente que en áreas pequeñas, el tiempo de concentración es oorto y muy probable que la lluvia dure más que dicho tiempo, por lo cual habrá oportunidad de la reunión momentánea del próximo volumen Ai.

Supóngase un área cuadrada de una hectárea, Fig. 5, es decir, un cuadrado 100 metros por 100. Supóngase que la diagonal de este cuadrado A es un canal al cual escurren las aguas llovedizas sobre él, y que a su vez el lugar más bajo de dicho canal es D. La gota más lejana de D será la caída en B; recorrerá una distancia BD que vale:

$$DB = \sqrt[2]{100^2 + 100^2} = \sqrt[2]{20000} = 141 \text{ metros.}$$

puede decirse que en un canal de barro vitrificado, con una pendiente de 0.001, de sección equivalente a la de un tubo de 30 centímetros de diámetro (mínimo que se usa en un alcantarillado para aguas de lluvia) la velocidad del agua es de 0.50 metros por segundo. Por tanto la distancia BD se recorrerá en estas condiciones en:

$$\frac{141 \text{ metros}}{0.50 \text{ m/seg.}} = 282 \text{ segundos} = 4 \text{ min. } 42 \text{ seg.}$$

(5 min. prácticamente)

Los momentos culminantes de lluvia máxima duran o pueden durar mayor tiempo.

En los tramos iniciales de una red de atarjea el tiempo de concentración varía entre 5 y 15 minutos.

Parece, por tanto, justificado que la superficie de una hectárea permita siempre, en todo caso de lluvias, concentrar el volumen íntegro llovido. Menor superficie tiene concentración más rápida.

En el sistema inglés el área es más pequeña para este límite de reunión íntegra del gasto, por lo cual en igualdad de condiciones se considera mayor concentración en el sistema métrico.

Comparación con los métodos racionales.- La fórmula fundamental que sirve para determinar los escurrimientos del agua de lluvia sobre una superficie es:

$$Q = K A i$$

que se verifica en caso particular para la fórmula de Burkli-Ziegler cuando: $A = 1$ hectárea, $s = 1$.

En los procedimientos americanos se considera la variación del gasto Q escurrido sobre el llovido, variando i; es decir, las variaciones de A se traducen en variaciones del tiempo t de concentración de A y éstas a su vez se convierten en variaciones de la precipitación i, conforme una función $i = F(t)$ que liga a estas magnitudes. En general a mayor valor de A menor de i por lo cual el gasto Q crece con A pero decrece con i, y el crecimiento total, sigue una ley de disminución. En los procedimientos gráficos, no varía i, queda constante. Al variar A, Q varía en forma directamente proporcional con ella. La reducción del crecimiento de Q con A se determina gráficamente por el desalojamiento de los diagramas parciales de la red que cubre la total superficie A.

En la fórmula de Burkli-Ziegler, la disminución del crecimiento está dada por las potencias 3/4 y 1/4 de A y de s respectivamente.

Analizada la fórmula como se ha hecho, se ve que su estructura no es irracional en sus fundamentos, y bien pudiera servir de base para encontrar fórmulas de constitución semejante para diversos lugares.

Las variables que cuantifica son la extensión del área y la pendiente. Desatiende la forma del área y la disposición del escurrimiento.

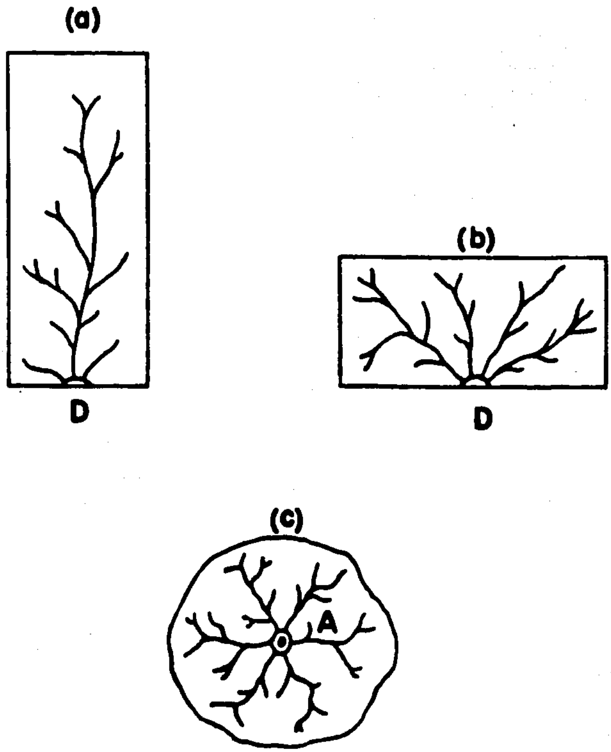


FIGURA 4

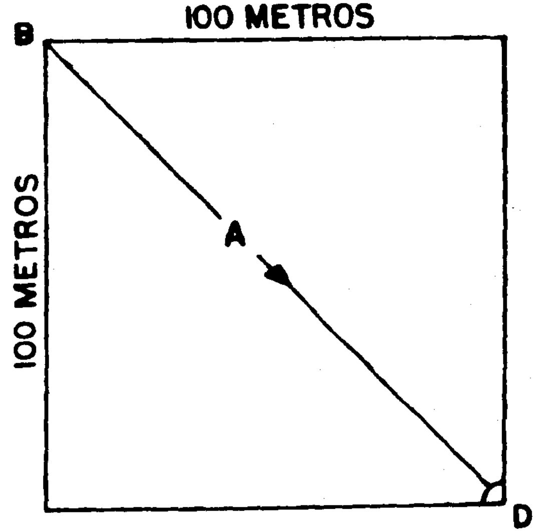


Fig.5

CAPITULO VI.- GENERALIDAD DE LA FORMULA.

De la discusión anterior se desprende que se le puede dar a la fórmula un carácter genérico. Puesta bajo la forma:

$$Q = K A^{3/4} i s^{1/4}$$

y observando que los denominadores de los exponentes fraccionarios son iguales, y que el numerador del correspondiente a A es una unidad menor que su denominador, se puede tomar una expresión general

$$Q = K A^{\frac{n-1}{n}} i s^{1/n} = K A i \sqrt[n]{\frac{s}{A}}$$

en la que deben determinarse los valores de n para cada lugar. Si por ejemplo se toma n = 5, se tendrá:

$$Q = K A^{4/5} i s^{1/5} = KAi \sqrt[5]{\frac{s}{A}}$$

fórmula encontrada prácticamente, como ya se dijo, por Mac-Math para la ciudad de San Luis Missouri.

Generalizando aún mas, se desligan los exponentes de A y s, conservando:

$\frac{n-1}{n}$ para A y poniendo 1/m para s

$$Q = KA^{\frac{n-1}{n}}\ i\ s^{1/m} \quad ....(1)$$

o bien:

$$Q = K\ A\ i\ \frac{s^{1/m}}{A^{1/n}} \quad ....(1')$$

supóngase que se encontró para n y m, los siguientes valores:

$$n = 6.7 \qquad m = 3.7$$

Las fórmulas (1) y (1') se convierten en:

$$Q = KA^{\frac{5.7}{6.7}}\ i\ s^{\frac{1}{3.7}} = K\ A\ i\ \frac{s^{0.27}}{A^{1/6.7}}$$

$$Q = K\ A\ i\ \frac{s^{0.27}}{A^{0.15}}$$

fórmula establecida por Hering.

Se ve en estas dos fórmulas (Mac-Math y Hering) que se conserva la estructura fundamental de la de Burkli-Ziegler.

La reducción del área A por la potencia fraccionaria de la misma, equivale a multiplicar el valor de A por un factor F que vale:

$$A^{\frac{n-1}{n}} = \sqrt{\frac{A^{n-1}\quad A}{A}} = A \frac{1}{A^{1/n}}$$

$$F = \frac{1}{A^{1/n}}$$

Y en efecto se toma este factor para reducir el área por el retardo en la concentración, aconsejando para n los siguientes valores:

n =	8	para terrenos de fuertes pendientes.
n =	6 a 5	para terrenos de pendientes medias,
n =	4	para terrenos de pendientes suaves.

CAPITULO VII.- APLICACION DE LA FORMULA A LA CIUDAD DE MEXICO BAJO PROCESOS COMPARATIVOS.

La fórmula de Burkli-Ziegler se dedujo para la ciudad de Zurich. Las condiciones de la ciudad de México, ciudad plana en que las pendientes de su mayoría de calles pueden tomarse como de 0.001, se estimaron muy semejantes a la de la ciudad suiza por el ingeniero Roberto Gayol, por lo cual aplicó en el cálculo del alcantarillado de México la expresión de Burkli-Ziegler.

Posteriormente se hicieron estudios para simplificar esta fórmula. Se tomó en el cálculo del proyecto una lluvia de intensidad:

$$i = 2.5 \text{ cms/hora.}$$

posteriormente al establecimiento del alcantarillado, después del estudio de más amplios datos meteorológicos, se aconsejó que las extensiones del alcantarillado se calculasen con una lluvia de:

$$i = 3.0 \text{ cms./hora}$$

La pendiente que se consideró en toda la ciudad fué de 0.001, es decir, $s = 1$. Por tanto, la fórmula de Burkli-Ziegler, quedó para el caso especial de la ciudad de México.

$$Q \frac{\text{litros}}{\text{segundo}} = 27.78\ KA\ (\text{hectáreas})\ i\ \frac{\text{cms}}{\text{hora}} \sqrt[4]{\frac{1}{A}}$$

$$Q \frac{\text{litros}}{\text{segundo}} = 27.78\ Ki\ \frac{\text{cms}}{\text{hora}}\ A^{3/4}\ (A \text{ en hectáreas})$$

Cerca de 30 años después de estar en uso la red de alcantarillado, se simplificó la expresión anterior en la siguiente forma:

Se tenían datos de aforo de la corriente en el lugar de desfogue de la red, es decir donde se concentraba el máximo volumen proveniente de las aguas llovedizas. Se encontró que la cifra más alta que debía considerarse era un gasto de 10.3 metros cúbicos por segundo. La superficie a la cual daba servicio la red era por aquel entonces de 2,400 hectáreas. Se conocían, por tanto, el gasto Q y el término $A^{3/4}$, los demás factores K (permeabilidad) e i (precipitación) podían englobarse en un solo cociente C.

$$Q \frac{\text{litros}}{\text{segundo}} = C\ A^{3/4}\ (\text{hectáreas})$$

$$Q = 10300 \text{ litros/seg};\ A = 2400 \text{ hectáreas};\ A^{3/4} = 342.89$$

por tanto:

$$10300 = C\ 342.89$$

$$C = \frac{10300}{342.89} = 30 \text{ prácticamente}$$

por tanto, se llegó a una fórmula muy simple:

$$Q = \frac{\text{litros}}{\text{segundo}} = 30\ A^{3/4} \quad \text{(A en hectáreas)}$$

Esta fórmula da cuenta de la concentración en el punto final de la red, pero ya se ha visto que las concentraciones en los diversos lugares de entronques del sistema, van obedeciendo a una concentración relativa cada vez mayor. Por tal motivo se aumentó el anterior coeficiente a 40 y se estableció que para colectores se tomase la anterior expresión, y para atarjeas:

$$Q\ \frac{\text{litros}}{\text{segundo}} = 40\ A^{3/4}$$

Para emplear estas fórmulas con suficiente aproximación deberían haberse hecho medidas o aforos de las corrientes en diversos puntos de la red y establecer valores del coeficiente C relacionados con las longitudes de la red aguas arriba del punto en que se hicieron las medidas.

Se presentan aquí, estas fórmulas, sólo como un ejemplo de la fácil adaptación de esta fórmula a determinado lugar, sacando provecho de su relativa simplicidad.

Para facilitar el manejo de esta fórmula se construyen tablas y nomogramas que permiten encontrar rápidamente el gasto Q en función de los datos A, K e i.

A continuación se proporcionan unas tablas que expresan las potencias 3/4 de los números desde 0.005 hasta 3,000. Por lo tanto, facilitan el cálculo de la fórmula cuando se tiene una pendiente de 0.001, pues basta multiplicar el valor correspondiente de A tomado de las tablas y multiplicarlo por K y por i para tener el gasto. Esta tabla sirve tanto para el sistema inglés como para el métrico decimal, pues en el primero se toman acres y en el segundo hectáreas. Asimismo se inserta una pequeña relación de la raíz cuarta de los valores de algunas pendientes para usarse como factor en lugares de diversa pendiente.

Existen gran variedad de fórmulas, más o menos complicadas, más o menos sencillas que permiten encontrar el valor del gasto Q proveniente del agua llovida sobre una superficie A. Como ya se dijo, estas fórmulas tienen interés local y muchas veces su cálculo, aparte de laborioso, conduce a resultados erróneos si no se las sabe adaptar a la localidad de que se trate. Por lo general ha cen referencia a los volúmenes de agua recogidos en las cuencas de los ríos. Su aplicación a las aguas de lluvia que corren en las alcantarillas, provenientes de los sectores de una ciudad, debe hacerse con suma cautela.

Los valores que proporcionan diversas fórmulas para el mismo lugar tienen discrepancias a veces notables.

A continuación, y para fines comparativos, apuntaremos brevemente algunas características del método de Burkli-Ziegler, ya antes estudiadas, y de algunos otros métdos que existen para el mismo fin, esto es, la determinación del gasto.

Comenzaremos por establecer comparaciones entre el método de Burkli-Ziegler y el método racional, que son los más empleados en México:

1) Burkli-Ziegler se usa para terrenos planos, así como para áreas grandes (mayores de 500 Ha.)

La fórmula racional se emplea en áreas pequeñas (menores de 500 Ha) con lomeríos, lo cual implica pendientes variables, obviamente.

2) En cuanto a la evaluación del gasto, con el método racional se obtendrían valores más altos, ya que en este caso el gasto se calcula con la expresión:

$$Q = 27.78\ CiA$$

para la cual:

C = Adimensional

i = cm/hr.

A = Ha.

mientras que con Burkli-Ziegler:

$$Q = 27.78\ CiS^{1/4}A^{3/4}$$
$$= KA^{3/4}$$

En donde:

$$K = 27.78\ CiS^{1/4}$$

Notándose fácilmente la diferencia.

3) En la fórmula del método racional, la intensidad de lluvia i es variable, mientras que en la de Burkli-Ziegler se considera constante.

Es posible combinar ambas fórmulas en algún problema específico. (En México ya se ha hecho).

Otros métodos están basados en la teoría del hidrograma unitario. Existen dos técnicas principales para la estimación de caudales máximos; una que toma en cuenta el hidrograma unitario obtenido a partir de avenidas registradas y otra que considera las características físicas de la cuenca para sintetizar un hidrograma unitario.

El hidrograma unitario puede definirse como el hidrograma de escurrimiento directo, debido a una tormenta con lámina de precipitación en exceso de un centímetro, repartido uniformemente sobre la cuenca y con una intensidad constante durante un periodo específico de tiempo.

Por considerarse también de importancia, y como complemento de nuestros fines comparativos, se hacen a continuación unos comentarios del método gráfico alemán, también usual en el estudio de precipitaciones y escurrimiento.

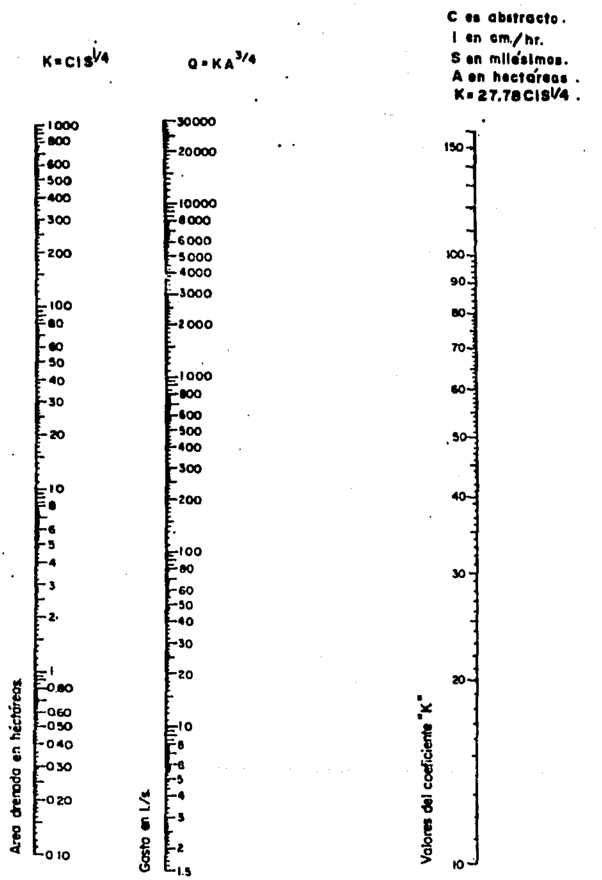
La metodología que en general se sigue para aplicar este método en una cuenca formada por varias subcuencas se puede reducir a lo siguiente:

Mediante una relación para estimar los escurrimientos en cuencas pequeñas, usualmente la fórmula racional, se obtiene el gasto asociado al área de cada subcuenca y a una intensidad correspondiente a toda la zona analizada. Este gasto se mantiene hasta un tiempo igual al tiempo de concentración de toda la región considerada, ya que se supone que el tiempo de duración de la lluvia es igual al tiempo de concentración.

La forma en que se incrementa el gasto hasta llegar al máximo en las subcuencas depende del tiempo de concentración de cada subcuenca individualmente. Se considera que el gasto crece linealmente desde un tiempo to hasta uno to + tp, donde to es un tiempo que es función de los tiempos de concentración (tp) en las subcuencas aguas abajo de la sección considerada.

Debe hacerse notar que la aplicación del método gráfico alemán determina las características de escurrimiento en colectores, para lo cual, con el objeto de tener en cuenta la distribución del drenaje al obtener el gasto para toda la zona considerada, se toma en cuenta lo siguiente:

a) Si los colectores son concurrentes, se supone que empiezan a contribuir con el gasto simultáneamente.
b) Si los colectores son consecutivos, se considera que la subcuenca de aguas arriba comienza a aportar gasto inmediatamente.
c) En cuanto a atarjeas, el empleo del método gráfico alemán no es común aplicarlo en virtud de que los gastos en estas son pequeños.



NOMOGRAMA DE BÜRKLI-ZIEGLER.

TABLA I

POTENCIAS 3/4 DE LOS NUMEROS 0.05 A 3000

A	A 3/4	A	A 3/4	A	A 3/4	A	A 3/4	A	A 3/4	A	A 3/4
0.05	0.106	2.80	2.165	45	17.374	100	31.623	375	85.22	860	158.81
0.10	0.178	2.85	2.193	46	17.663	105	32.801	380	86.07	870	160.19
0.15	0.241	2.90	2.222	47	17.950	110	33.980	385	86.92	880	161.57
0.20	0.299	2.95	2.251	48	18.236	115	35.120	390	87.70	890	162.95
0.25	0.351	3.00	2.280	49	18.520	120	36.260	395	88.60	900	164.32
0.30	0.405	3.25	2.421	50	18.803	125	37.380	400	89.44	910	165.68
0.35	0.455	3.50	2.559	51	19.084	130	38.500	410	91.11	920	167.05
0.40	0.503	3.75	2.695	52	19.364	135	39.610	420	92.78	930	168.41
0.45	0.549	4.00	2.828	53	19.643	140	40.700	425	93.60	940	169.76
0.50	0.595	4.50	3.090	54	19.920	145	41.790	430	94.43	950	171.12
0.55	0.639	5.00	3.344	55	20.196	150	42.860	440	96.07	960	172.47
0.60	0.682	5.50	3.591	56	20.471	155	43.930	450	97.70	970	173.81
0.65	0.721	6.00	3.834	57	20.745	160	44.990	460	99.33	980	175.15
0.70	0.765	6.50	4.071	58	21.017	165	46.040	470	100.9	990	176.49
0.75	0.806	7.00	4.304	59	21.288	170	47.080	475	101.75	1000	177.83
0.80	0.846	7.50	4.532	60	21.558	175	48.11	480	102.5	1050	184.46
0.85	0.885	8.00	4,757	61	21.827	180	49.14	490	104.1	1100	191.00
0.90	0.925	8.50	4.978	62	22.095	185	50.16	500	105.7	1150	197.48
0.95	0.962	9.00	5.196	63	22.362	190	51.18	510	107.2	1200	203.89
1.00	1.000	9.50	5.411	64	22.627	195	52.18	520	108.89	1250	210.22
1.05	1.037	10	5.623	65	22.892	200	53.18	525	109.68	1300	216.50
1.10	1.074	11	6.040	66	23.156	205	54.18	530	110.46	1350	222.72
1.15	1.110	12	6.447	67	23.418	210	55.17	540	112.02	1400	228:87
1.20	1.147	13	6.846	68	23.680	215	56.15	550	113.57	1450	234.98
1.25	1.182	14	7.238	69	23.941	220	57.12	560	115.12	1500	241.03
1.30	1.217	15	7.622	70	24.200	225	58.09	570	116.66	1550	247.03
1.35	1.252	16	8.000	71	24.459	230	59.06	575	117.42	1600	252.98
1.40	1.287	17	8.372	72	24.717	235	60.02	580	118.19	1650	258:89
1.45	1.321	18	8.739	73	24.974	240	60.98	590	119.71	1700	264.75
1.50	1.355	19	9.100	74	25.230	245	61.93	600	121.23	1750	270.57
1.55	1.389	20	9.457	75	25.486	250	62.77	610	122.74	1800	276.35
1.60	1.423	21	9.810	76	25.740	255	63.81	620	124.25	1850	282.08
1.65	1.456	22	10.158	77	25.994	260	64.75	630	125.75	1900	287.78
1.70	1.489	23	10.503	78	26.246	265	65.68	640	127.24	1950	293.44
1.75	1.522	24	10.843	79	26.498	270	66.61	650	128.73	2000	299.07
1.80	1.554	25	11.180	80	26.750	275	67.53	660	130.21	2100	310.22
1.85	1.586	26	11.514	81	27.000	280	68.45	670	131.69	2200	321.23
1.90	1.618	27	11.845	82	27.250	285	69.36	680	133.16	2300	332.12
1.95	1.650	28	12.172	83	27.498	290	70.27	690	134.66	2400	342.89
2.00	1.682	29	12.497	84	27.747	295	71.18	700	136.09	2500	353.55
2.05	1.713	30	12.819	85	27.994	300	72.08	710	137.54	2600	364.11
2.10	1.744	31	13.138	86	28.241	305	72.98	720	139.00	2700	374.56
2.15	1.776	32	13.454	87	28.487	310	73.88	730	140.44	2800	384.92
2.20	1.806	33	13.768	88	28.732	315	74.77	740	141.88	2900	395.18
2.25	1.837	34	14.090	89	28.976	320	75.66	750	143.32	3000	405.36
2.30	1.868	35	14.390	90	29.220	325	76.54	760	144.75		
2.35	1.898	36	14.697	91	29.463	330	77.43	770	146.17		
2.40	1.928	37	15.002	92	29.706	335	78.30	780	147.59		
2.45	1.958	38	15.305	93	29.948	340	79.18	790	149.01		
2.50	1.988	39	15.606	94	30.189	345	80.05	800	150.42		
2.55	2.018	40	15.905	95	30.429	350	80.92	810	151.83		
2.60	2.048	41	16.203	96	30.669	355	81.78	820	153.24		
2.65	2.077	42	16.498	97	30.909	360	82.65	830	154.64		
2.70	2.106	43	16.792	98	31.147	365	83.51	840	156.03		
2.75	2.135	44	17.084	99	31.385	370	84.36	850	157.42		

TABLA II

PENDIENTE	S	S 1/4	PENDIENTE	S	S 1/4
0.0001	0.1	0.562	0.0060	6.0	1.565
0.0002	0.2	0.669	0.0070	7.0	1.627
0.0003	0.3	0.740	0.0080	8.0	1.682
0.0004	0.4	0.795	0.0090	9.0	1.732
0.0005	0.5	0.841			
			0.01	10	11.778
0.0006	0.6	0.880	0.02	20	2.115
0.0007	0.7	0.915	0.03	30	2.340
0.0008	0.8	0.945	0.04	40	2.515
0.0009	0.9	0.974	0.05	50	2.659
0.0010	1.0	1.000	0.06	60	2.783
0.0020	2.0	1.189	0.07	70	2.893
0.0030	3.0	1.316	0.08	80	2.991
0.0040	4.0	1.414	0.09	90	3.080
0.0050	5.0	1.495			
			0.10	100	3.162

BIBLIOGRAFIA

1) Guzman, Anastasio — Ingeniería Hidráulica en México, (1955)

2) Domínguez Mora, Ramón; Domínguez Gil, José A.; Zurutuza Vera, Ernesto — Efectos Hidrológicos de la Urbanización (primera etapa). (abril, 1976).

3) Acosta Rodríguez, Julio S.; Ortíz Rojas, Carlos R.; Pineda Blancarte, Victor M. — Los Estudios Hidrológicos en un Proyecto de Riego. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería UNAM. 1973.