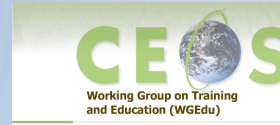




UN-OOSA  
UN-SPIDER



**I ESCUELA DE PRIMAVERA SOBRE SOLUCIONES ESPACIALES PARA EL  
MANEJO DE DESASTRES NATURALES Y RESPUESTAS DE EMERGENCIAS-  
INUNDACIONES**

# **EL CÁLCULO DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN ÁREAS URBANAS UTILIZANDO GEOPROCESSAMIENTO**

Prof. Alfonso Risso

Eng. Civil Lidiane Souza Gonçalves

Eng. Civil Ferdnando Cavalcanti da Silva

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

08 a 12 de Septiembre de 2008

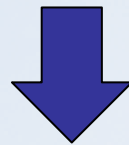


# Introducción

Caudal de Diseño – Escurrimiento  
Potencial



~~Datos observados en cuencas  
urbanas~~



Métodos sintéticos de  
transformación lluvia-caudal



# Introducción

- Modelo SCS (*Soil Conservation Service*) → Simulación del hidrograma diseñado.



conceptos



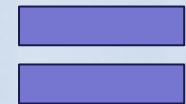
ecuaciones



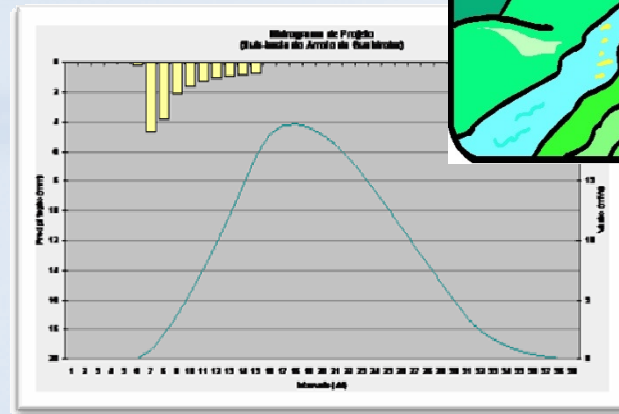
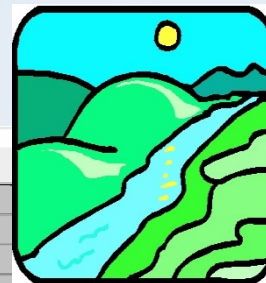
Observada/Diseño



CN



Características de la cuenca



# Introducción

CN – inexistencia de datos → estimativas sin calibración, basadas en datos disponibles en mapas de uso, fotografías aéreas, imágenes de satelitales.

Teledetección y SIG con sus ventajas (evaluación espacial, espectral y temporal, manipulación de datos en grandes áreas e inaccesibles) → herramienta común para estimar parámetros hidrológicos.

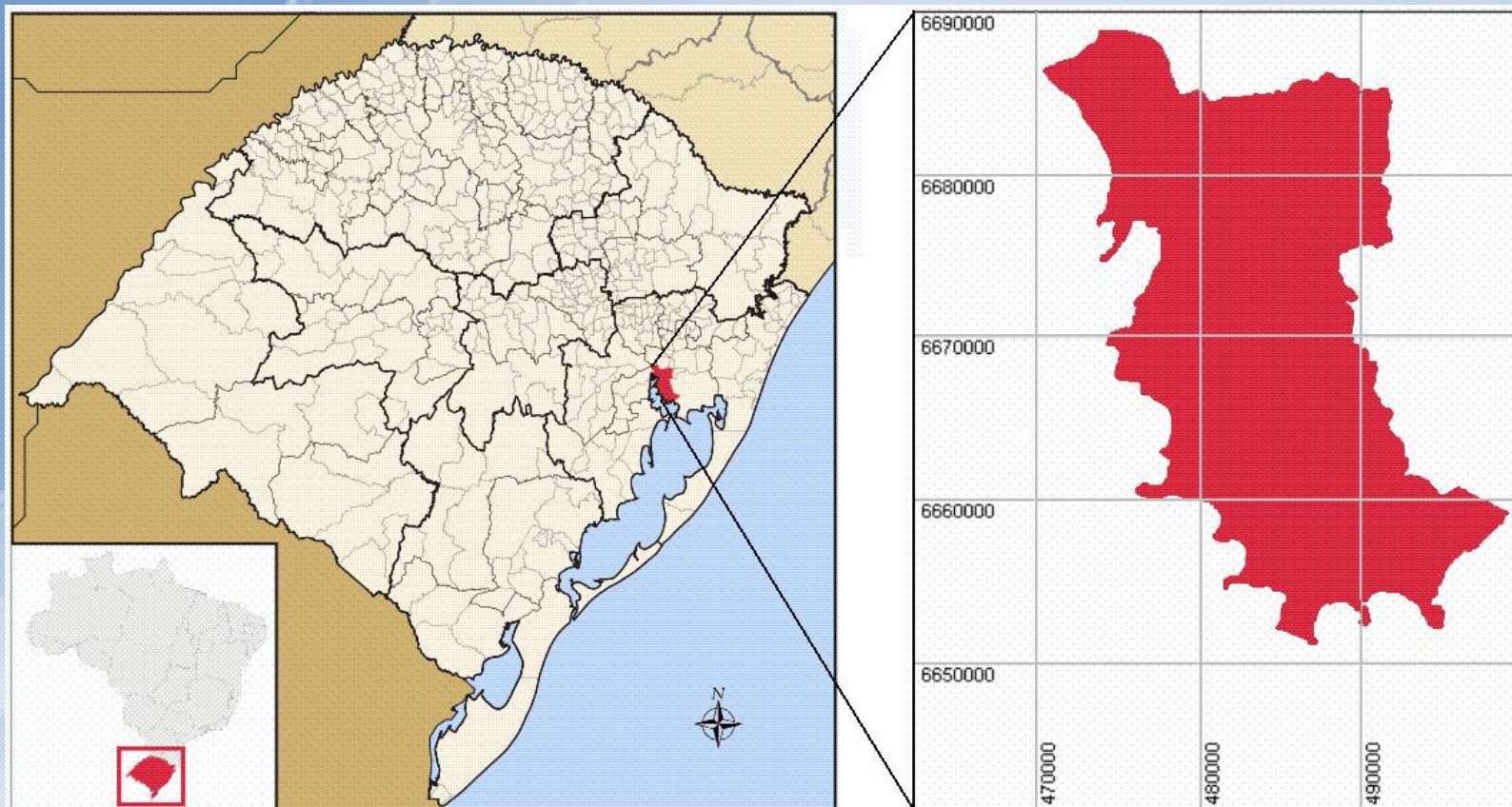
Mapa con valores del parámetro CN distribuido para la ciudad de Porto Alegre – RS/Brasil

→ Evaluar rapidez y exactitud.

→ Herramienta para simulación de escenarios y gestión territorial.

# Metodología

- Área de estudio: Porto Alegre – RS/Brasil



- Área total: 476 km<sup>2</sup>

08 a 12 de Septiembre de 2008



# Metodología

SIG-SR

- Elaboración del mapa de CN
  - Uso/ocupación del suelo
  - Tipo de suelo

Digitalización y clasificación de imágenes satelitales:

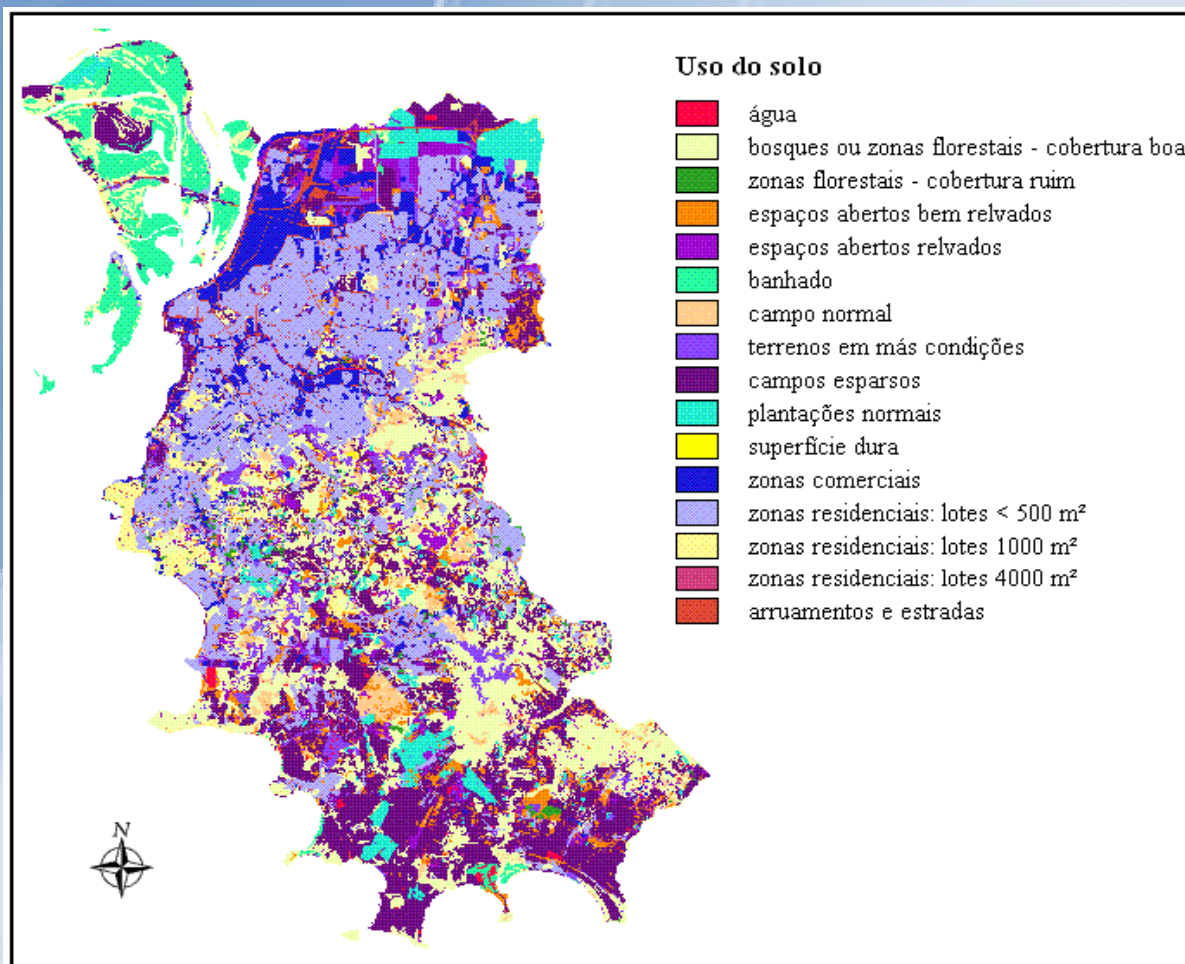
LABGEO - Centro de Recursos IDRISI del Centro de Ecología de la UFRGS

- Uso/ocupación : 30 clases → reclasificado en 16 clases
- Tipo suelo: 16 tipos → agrupados: 4 grupos hidrológicos (A,B,C,D) según la clasificación de Sartori *et al.*, 2006

# Metodología

- Elaboración del mapa de CN

- Uso/ocupación del suelo



Uso do solo

Uso do solo	frequência
Água	0,62%
•Bosques o zonas forestales buena cobertura	22,09%
•Zonas forestales mala cobertura	•0,63%
•Espacios abiertos, buena cobertura de gramíneas	•3,86%
•Espacios abiertos, mediana cobertura de gramíneas	•4,00%
•Humedales	•5,40%
•Campo normal	•2,62%
•Terrenos en malas condiciones	•3,87%
•Campo sucio	19,83%
•Plantación normal	3,95%
•Superfície dura	0,10%
•Zonas comerciais	6,66%
•Zonas residenciais: lotes < 500 m <sup>2</sup>	21,16%
•Zonas residenciais: lotes 1000 m <sup>2</sup>	2,07%
•Zonas residenciais: lotes 4000 m <sup>2</sup>	0,47%
•Calles y caminos	2,67%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

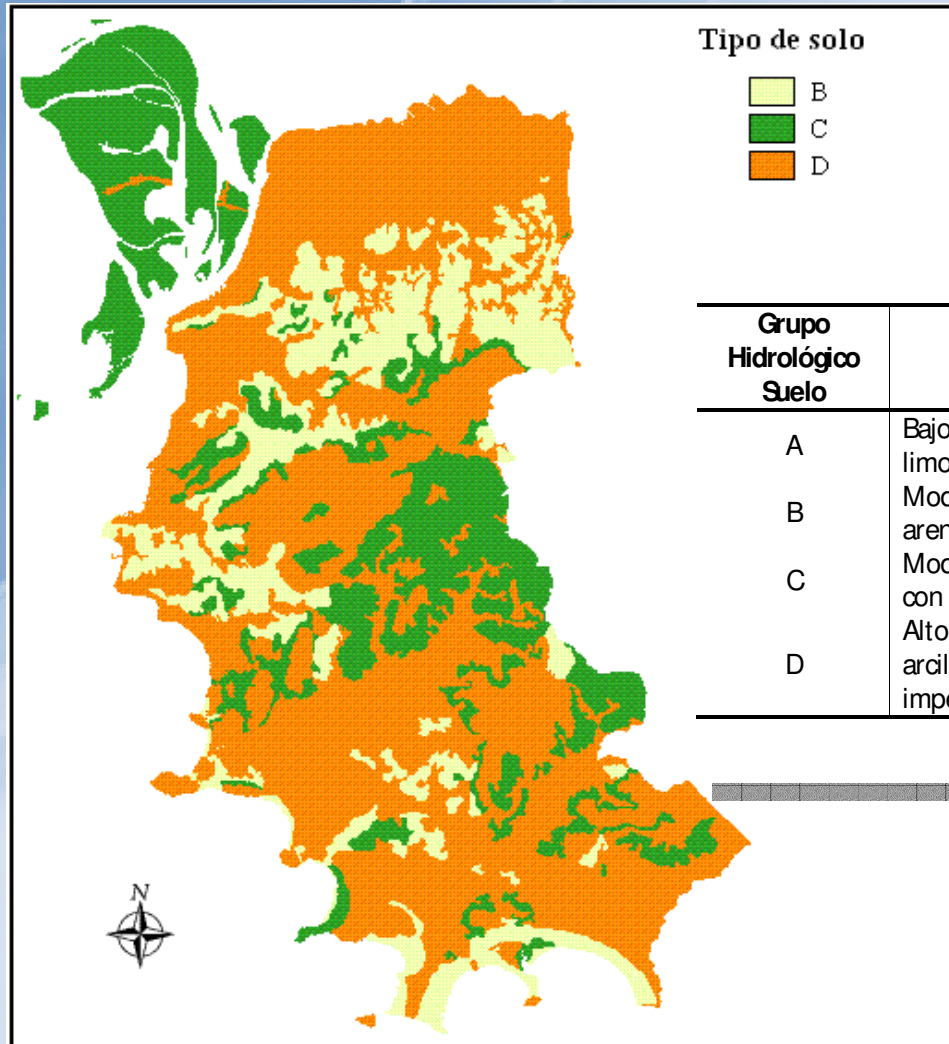


# Metodologia

- Elaboración del mapa de CN

- Uso/ocupação do solo

- Tipo de suelo



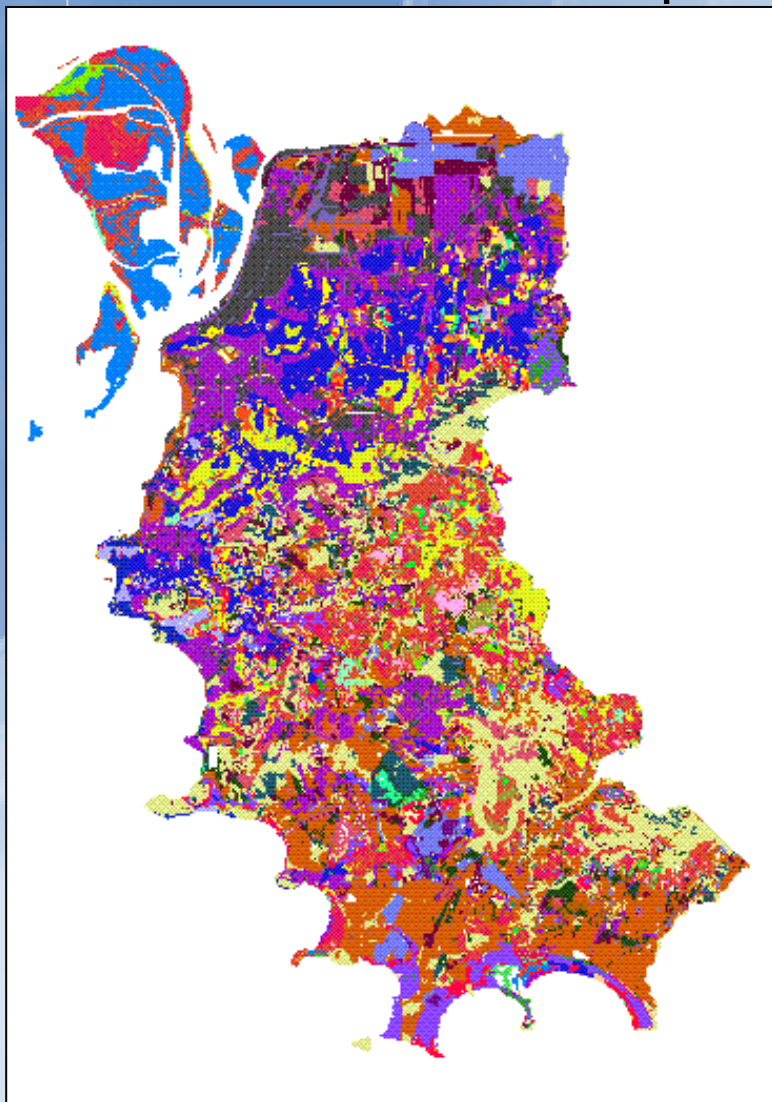
Grupo Hidrológico Suelo	Descripción del Suelo	Conductividad Hidráulica (mm/h)
A	Bajo potencial de escurrimiento. Suelos arenosos con poco limo y arcilla. Suelos muy arenosos	8 - 12
B	Moderado a bajo potencial de escurrimiento. Suelos arenosos y francos, menos profundos que A	4 - 8
C	Moderado a alto potencial de escurrimiento. Suelos rasos con significativa cantidad de arcilla.	1 - 4
D	Alto potencial de escurrimiento. Suelos con gran cantidad de arcillas expansivas 2:1 y suelos con camada inferior impermeable.	0 - 1





# Metodología

- Elaboración del mapa de CN      Uso/ocupación X Tipo de suelo

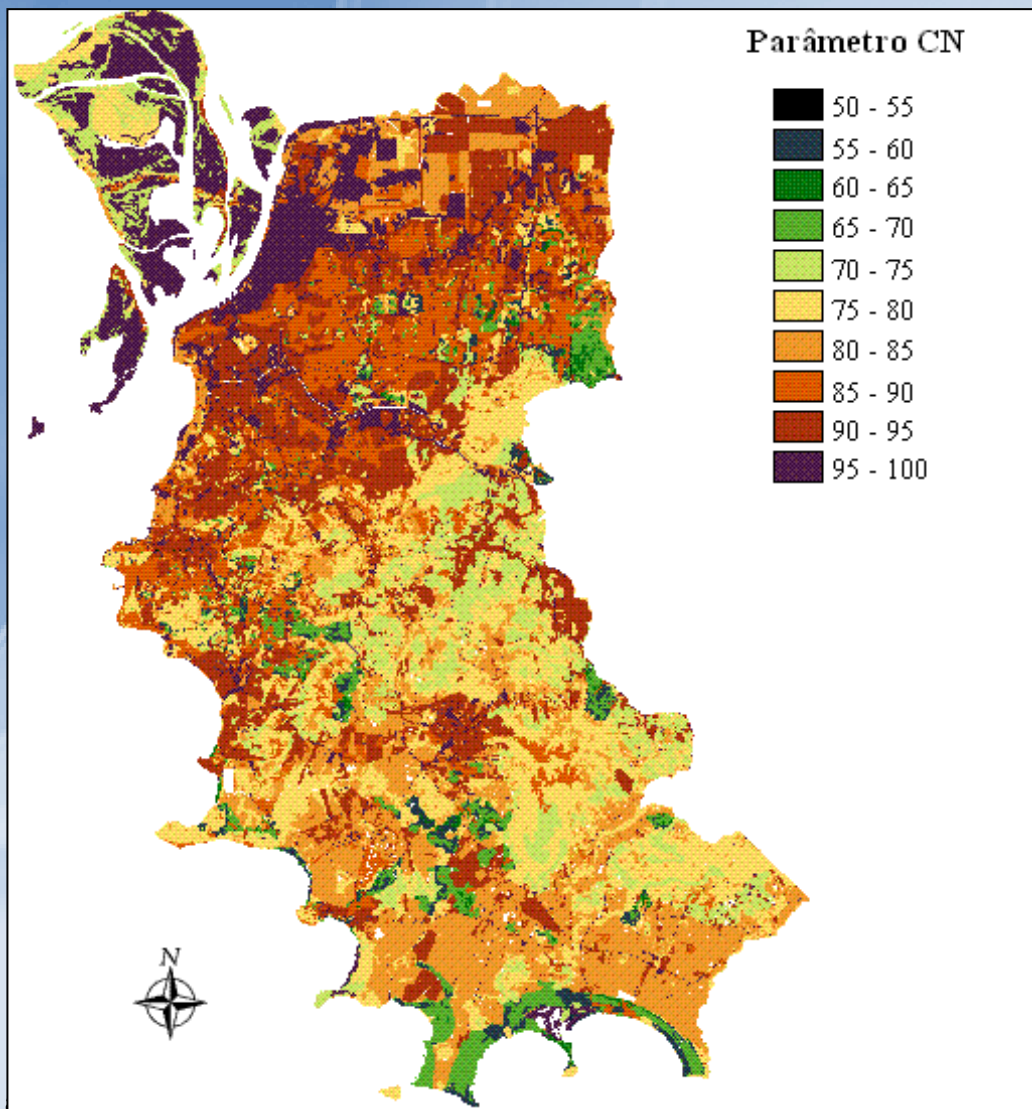


## Tipo de solo x uso do solo

	Solo B - Bosques ou zonas florestais cobertura boa		Solo C - Arruamentos e estradas
	Solo B - Zonas florestais cobertura ruim		Solo D - Bosques ou zonas florestais cobertura boa
	Solo B - Espaços abertos, bem relvados		Solo D - Zonas florestais cobertura ruim
	Solo B - Espaços abertos, relvados		Solo D - Espaços abertos, bem relvados
	Solo B - Banhado		Solo D - Espaços abertos, relvados
	Solo B - Campo normal		Solo D - Banhado
	Solo B - Pastagens ou terrenos em más condições		Solo D - Campo normal
	Solo B - Campos esparsos		Solo D - Pastagens ou terrenos em más condições
	Solo B - Plantações normais		
	Solo B - Superfície dura		
	Solo B - Zonas comerciais		
	Solo B - Zonas residenciais: lotes < 500 m <sup>2</sup>		
	Solo B - Zonas residenciais: lotes 1000 m <sup>2</sup>		
	Solo B - Zonas residenciais: lotes 4000 m <sup>2</sup>		
	Solo B - Arruamentos e estradas		
	Solo C - Bosques ou zonas florestais cobertura boa		
	Solo C - Zonas florestais cobertura ruim		
	Solo C - Espaços abertos, bem relvados		
	Solo C - Espaços abertos, relvados		
	Solo C - Banhado		
	Solo C - Campo normal		
	Solo C - Pastagens ou terrenos em más condições		
	Solo C - Campos esparsos		
	Solo C - Plantações normais		
	Solo C - Superfície dura		
	Solo C - Zonas comerciais		
	Solo C - Zonas residenciais: lotes < 500 m <sup>2</sup>		
	Solo C - Zonas residenciais: lotes 1000 m <sup>2</sup>		
	Solo C - Zonas residenciais: lotes 4000 m <sup>2</sup>		



# Resultado



## • Mapa de CN

Parâmetro CN	área (km <sup>2</sup> )	freqüência
50 - 55	9,14	1,92%
55 - 60	1,80	0,38%
60 - 65	3,51	0,74%
65 - 70	57,72	12,13%
70 - 75	9,10	1,91%
75 - 80	107,25	22,53%
80 - 85	115,66	24,30%
85 - 90	39,99	8,40%
90 - 95	93,57	19,66%
95 - 100	38,26	8,04%
<b>Total</b>	<b>476,00</b>	<b>100%</b>

# Aplicación

Utilizando el programa IPHS1 → Subcuenca del Arroyo Guabiroba – POA

<http://www.iph.ufrgs.br/iphs1/>

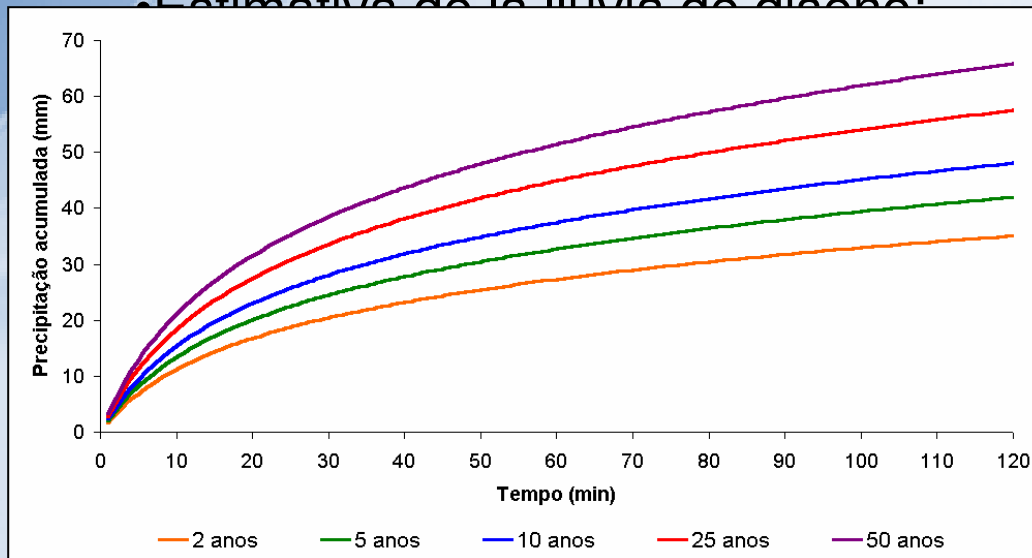
- Levantamiento de las características físicas de la cuenca:

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Largo de Talvegue (km)	Desnivel (m)	Pendiente (m/m)	Tiempo de Concentración (min)
Arroyo Guabiroba	10,47	4,43	7,4	0,00167	147

$$tc = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Kirpich

Estimativa de la lluvia de diseño:



Relación IDF puesto IPH (POA):

$$i = \frac{509,859 \times Tr^{0,196}}{(t + 10)^{0,72}}$$

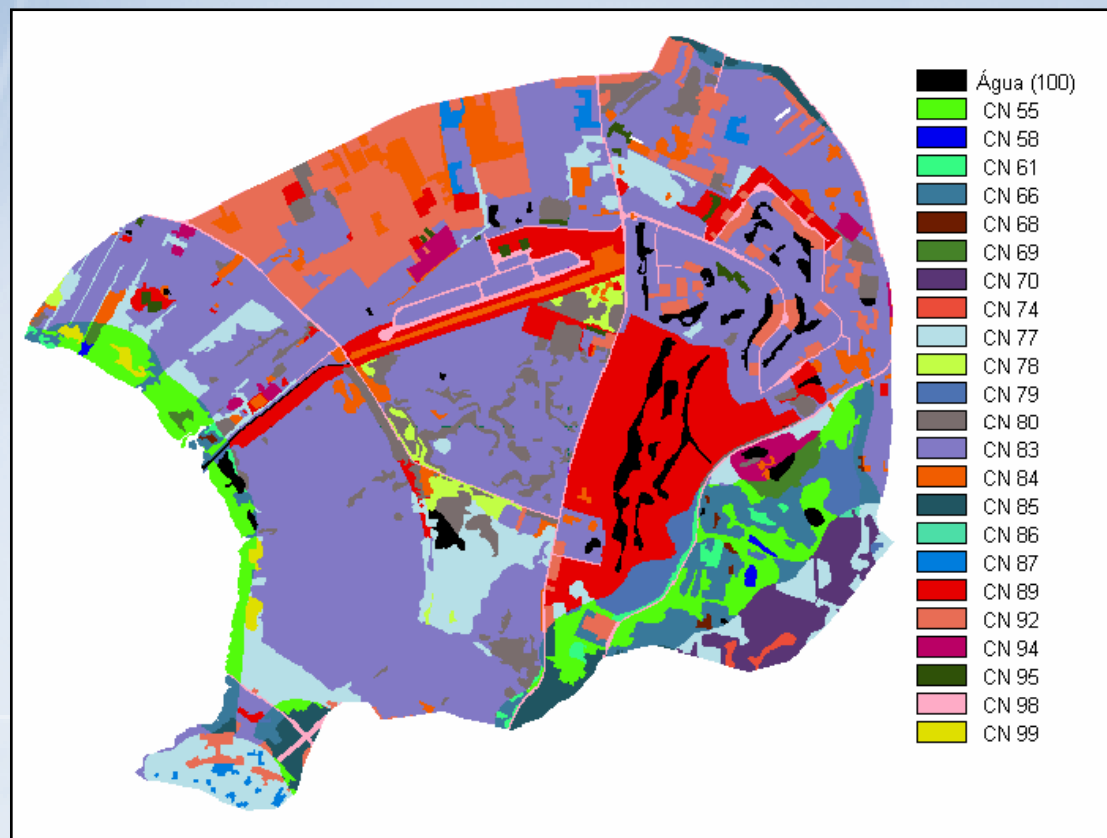


# Aplicación

- Cálculo del escurrimiento directo o precipitación efectiva – SCS:

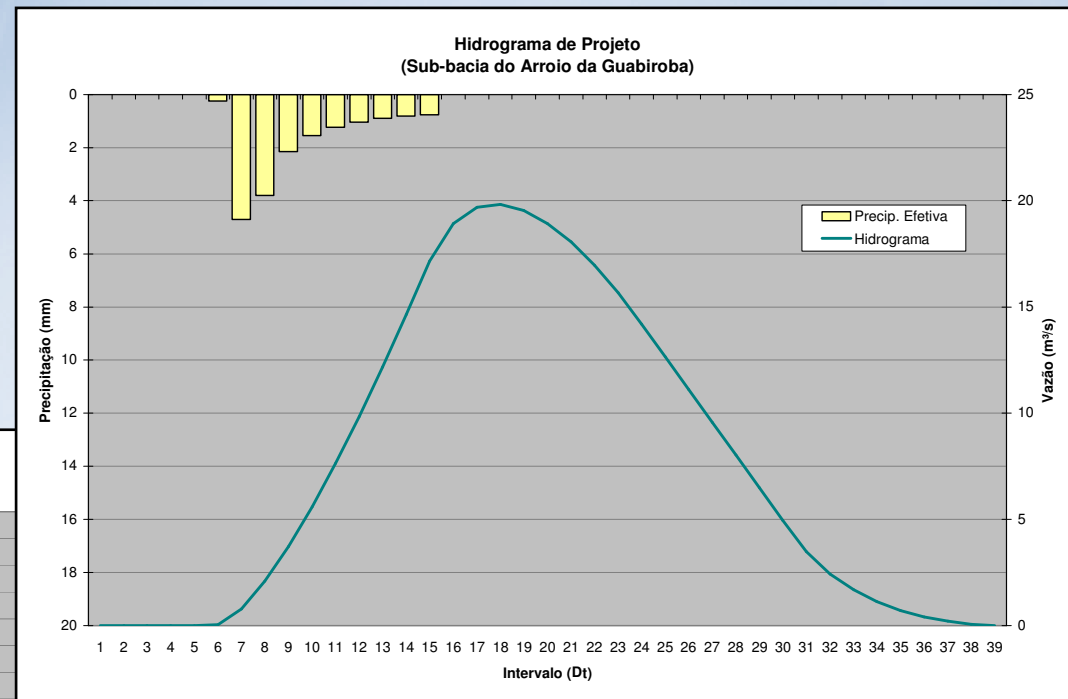
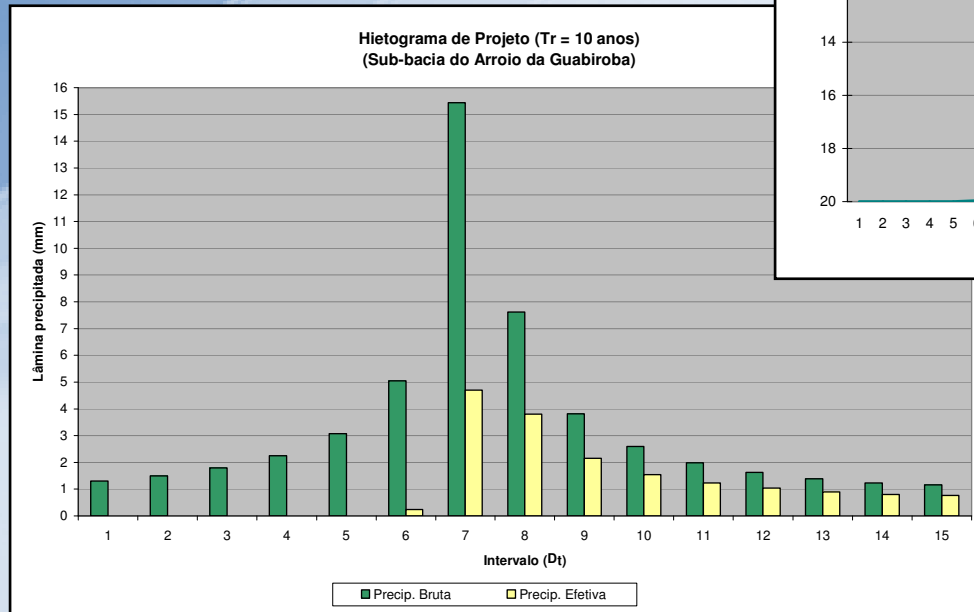
$$CN_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times CN_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

CN <sub>i</sub>	Área A <sub>i</sub> (km <sup>2</sup> )	A <sub>i</sub> x CN <sub>i</sub>
55	0,475	26,13
58	0,012	0,70
61	0,052	3,17
66	0,37	24,42
68	0,012	0,82
69	0,05	3,45
70	0,217	15,19
74	0,016	1,18
77	0,814	62,68
78	0,084	6,55
79	0,159	12,56
80	0,507	40,56
83	4,393	364,62
84	0,393	33,01
85	0,142	12,07
86	0,003	0,26
87	0,064	5,57
89	1,087	96,74
92	0,886	81,51
94	0,104	9,78
95	0,04	3,80
98	0,222	21,76
99	0,031	3,07
100	0,334	33,40
Σ	10,467	862,99
<b>CN promedio</b>		<b>82,449</b>



# Aplicación

- Estimativa del hidrograma de diseño – Hidrograma Unitario Triangular (HUT) SCS.



# Conclusiones

- Metodología simple que resulta en importante subsidio para simulaciones con el modelo SCS.
- Reducción en la cantidad de informaciones necesarias al hidrólogo de diseño.
- Uniformidad en la estimativa del parámetro CN, evitando subjetividad en esta etapa.
- Mapa CN de Porto Alegre disponible en:  
**Diagnóstico ambiental de Porto Alegre – Pref. Municipal de Porto Alegre - SMAM**  
<http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/ClimaRH/noticias/noticias.htm>

# Agradecimentos

- Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS
- LABGEO/UFRGS (Prof. Heinrich Hasenack)
- Prefeitura Municipal de Porto Alegre
- Secretaria Municipal de Meio Ambiente
- CNPq

Gracias por su atención!

Contacto: [risso@iph.ufrgs.br](mailto:risso@iph.ufrgs.br)



# Modelo Lluvia/Caudal de SCS o CN

## Lluvia Efectiva





Es un modelo utilizado para:

- determinar la **lluvia excedente** a partir de un valor de lluvia total dado (observada o estimada);
- calcular, a partir de la lluvia excedente, **el hidrograma de escurrimiento superficial directo.**



Fue desarrollado en 1972 por el **Soil Conservation Service** y es uno de los modelos mas utilizados en aplicaciones prácticas debido a su simplicidad, facilidad de aplicación y calidad de sus resultados.

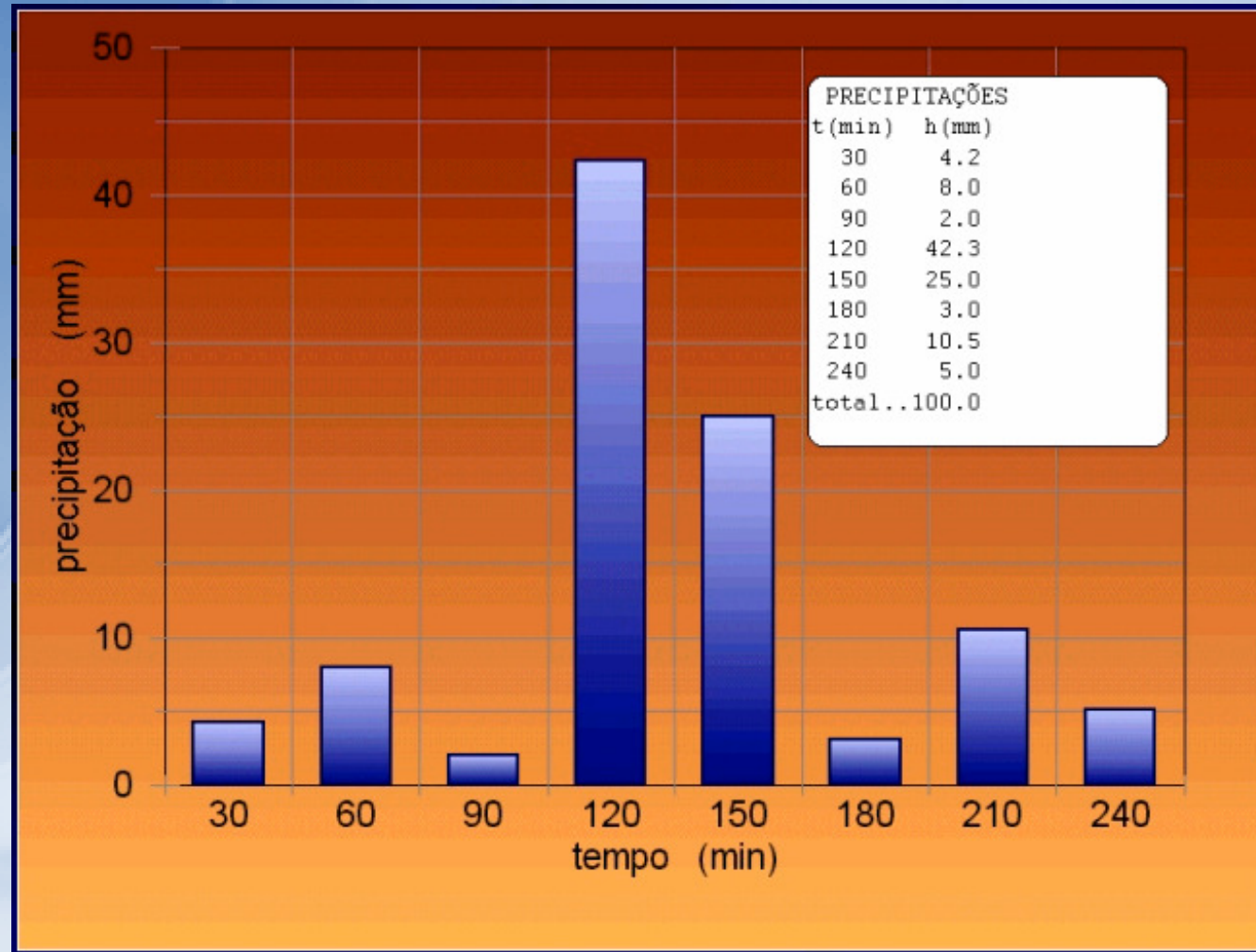


# Lluvia Total

08 a 12 de Septiembre de 2008



# Ejemplo de entrada manual:



# Estimativa de una lluvia de diseño

## Relación Intensidad-Duración-Frecuencia

Fornecen la intensidad pluviométrica ( $i$ ) (mm/min) o lamina precipitada (mm) como función de la duración de la lluvia ( $t$ ) y de su periodo de retorno ( $Tr$ )

## Duración de la lluvia de diseño (t):

- Cuencas pequeñas (hasta 5 km<sup>2</sup>)  $t = t_c$   
( $t_c$  = tiempo de concentración de la cuenca)
- Cuencas mayores  $t = 24$  horas

**Observación:** con los modelos computacionales disponibles (IPHS1) es muy rápido variar los valores de (t) y evaluar los caudales resultantes.

## Periodo de Retorno o Recurrencia ( $T_r$ ):

- es el intervalo promedio de ocurrencia (**en años**) entre eventos que igualan o superan una dada magnitud
- el inverso do periodo de retorno ( $1/T_r$ ) es la probabilidad de que un evento sea igualado o superado en un cualquier año



## Periodo de Retorno (T): valores usuales

Tipo de Ocupación de la Cuenca	Diseño	T (años)
Residencial	micro	2
Comercial, Aeropuertos, etc.	micro	5
Grandes arterias de transito	micro	5-10
Residenciales y comerciales	macro	50-100
Áreas especiales	macro	>500





# Distribución Temporal

- La distribución temporal de los volúmenes precipitados condicionará el volumen infiltrado y la forma del hidrograma de escurrimiento superficial directo originado por la chuva excedente.
- Formas mas utilizadas para distribuir la lluvia temporalmente: Método de los Bloques Alternados y Método de Chicago.

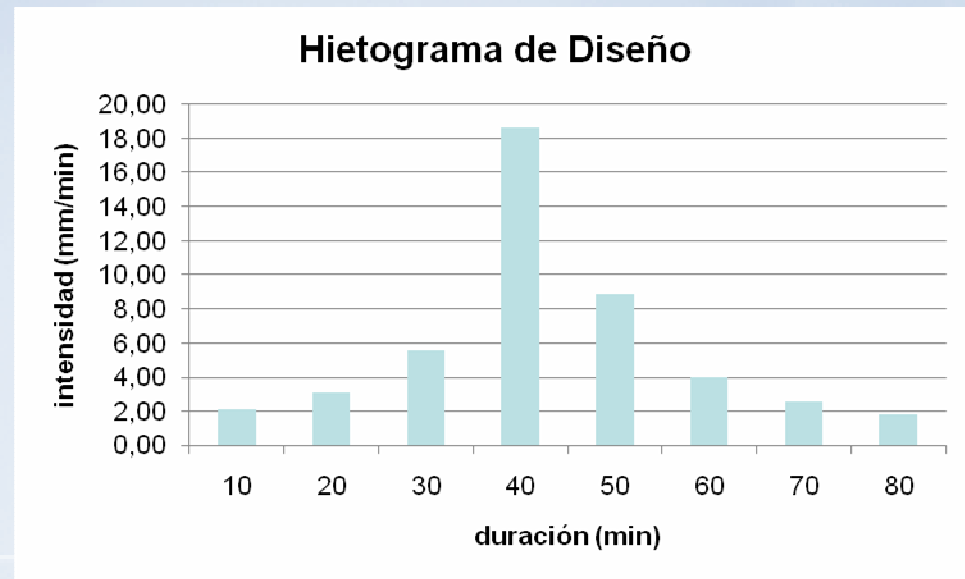


## Ejemplo: Método de los bloques alternados

- Ejemplo: tormenta de diseño para la ciudad de Porto Alegre, con duración de 80 minutos ( $t_c$ ), con intervalos de tiempo de 10 minutos y periodo de retorno ( $T_r$ ) de 5 años (relación intensidad-duración-frecuencia para POA).

$$i = \frac{1265,67 \cdot T_r^{0,052}}{(12+t)^{\left(\frac{0,88}{T_r^{0,05}}\right)}} \rightarrow \text{relación intensidad-duración-frecuencia para POA}$$

$\Delta t$	$i$	$h(ac)$	$h_n - h_{n-1}$	altern.
10	111,86	18,64	18,64	2,13
20	82,52	27,51	8,86	3,10
30	66,17	33,08	5,58	5,58
40	55,63	37,09	4,00	18,64
50	48,23	40,19	3,10	8,86
60	42,72	42,72	2,52	4,00
70	38,44	44,84	2,13	2,52
80	35,01	46,68	1,83	1,83
				46,68



# Infiltración

08 a 12 de Septiembre de 2008



# Conceptos

- **Infiltración:** penetración del agua en el suelo
- **Tasa de Infiltración:** velocidad o intensidad de la penetración del agua en el suelo (mm/hora, mm/día, etc.)
- **Infiltración acumulada:** cantidad de agua total infiltrada al final de un determinado tiempo (mm)

## Factores que influyen en la infiltración:

- humedad del suelo
- geología
- ocupación del suelo
- topografía

# Infiltração

Variación de la tasa de infiltración con la humedad del suelo



# Lluvia Excedente Modelo SCS

08 a 12 de Septiembre de 2008



## Conceptos:

- **P**: lluvia total
- **Pe**: lluvia excedente
- **Ia**: infiltración inicial
- **Fa**: infiltración después del inicio del escurrimiento superficial directo
- **S**: potencial máximo de infiltración



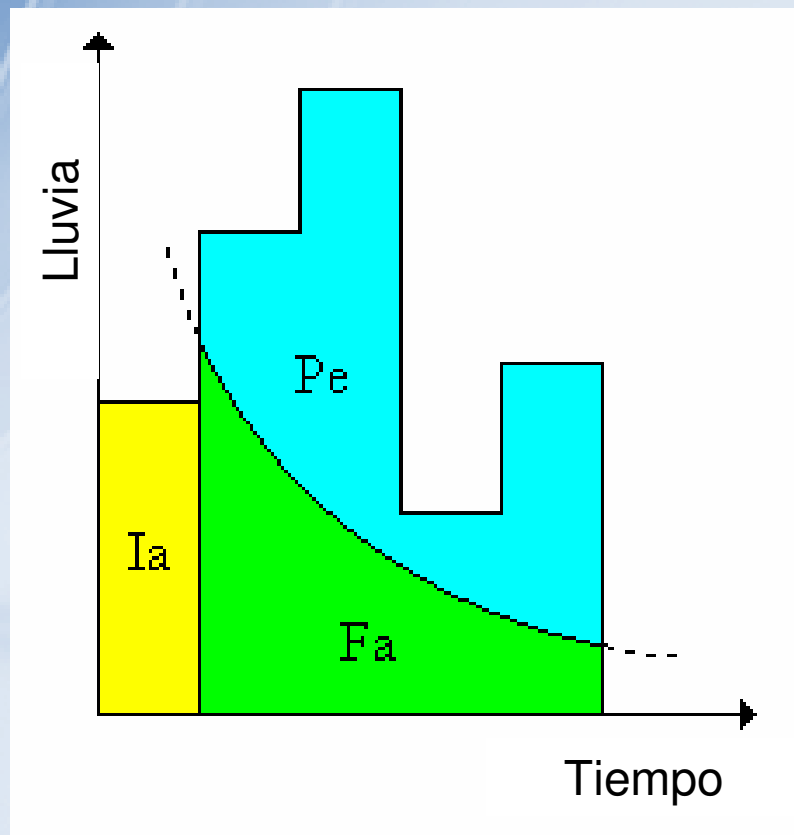


Hipótesis del SCS:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a$$



Combinando las dos ecuaciones e aislando  $P_e$ :

$$P = P_e + I_a + \frac{P_e \cdot S}{P - I_a}$$

$$P - I_a = P_e \cdot \left( \frac{P - I_a + S}{P - I_a} \right)$$

$$\therefore P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

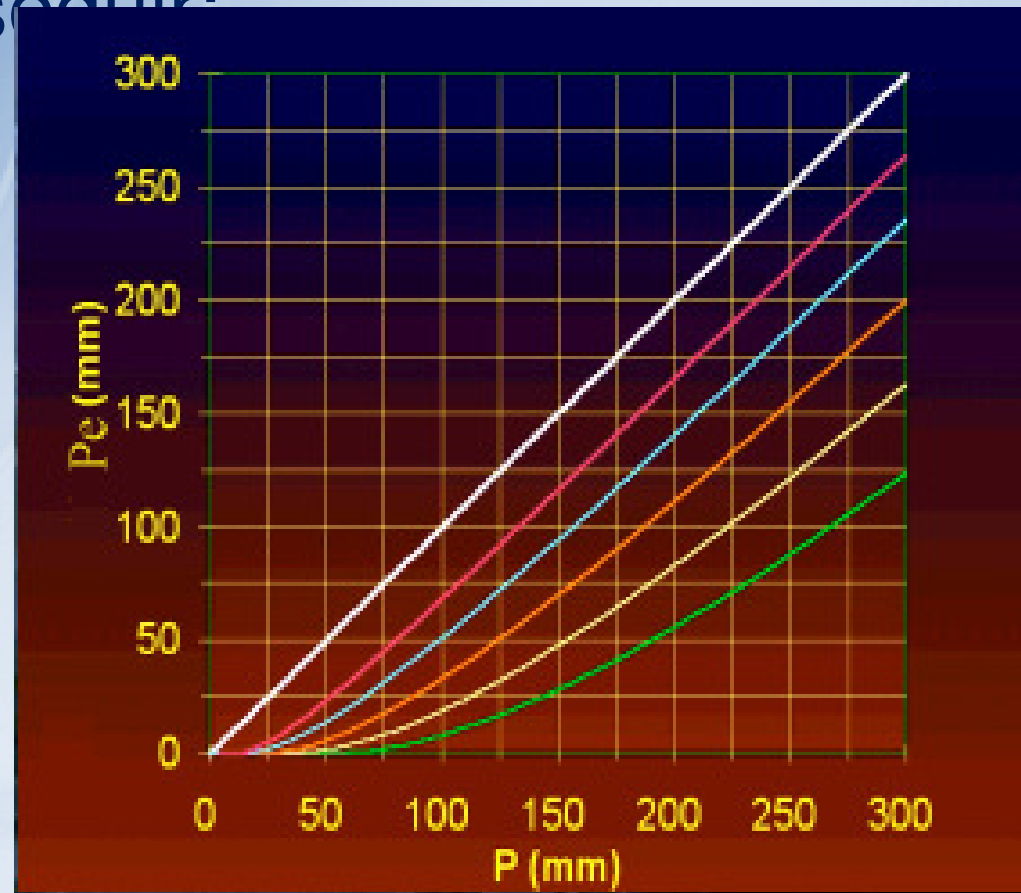
Estudiando los resultados de diversas cuencas, el SCS llego a esta relación:

$$Ia = 0,2 \cdot S \quad \text{Si } P \leq Ia, Pe = 0$$

Substituyendo en la ecuación anterior:

$$Pe = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}, P > (0,2 \cdot S)$$

Graficando los valores de  $P$  y  $P_e$  para diversas cuencas, SCS obtuvo las relaciones mostradas en la figura a seguir:



Para parametrizar estas curvas, SCS crió un adimensional denominado CN (“curve number”), que posee las siguientes propiedades:

- $0 \leq CN \leq 100$
- para áreas impermeables  $CN = 100$
- para otras superficies  $CN < 100$

El número de la curva **CN** y la infiltración potencial **S** están relacionados a través de la expresión:

$$S(mm) = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

# Valores de CN

Tipo de uso do solo / Tratamento / Condições hidrológicas	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
Uso Residencial				
Tamanho médio do lote    % Impermeável				
até 500 m <sup>2</sup> 65	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup> 38	61	75	83	87
1500 m <sup>2</sup> 30	57	72	81	86
Estacionamentos pavimentados, telhados	98	98	98	98
Ruas e estradas:				
pavimentadas, com guias e drenagem	98	98	98	98
com cascalho	76	85	89	91
de terra	72	82	87	89
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)	89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeável)	81	88	91	93
Espaços abertos, parques, jardins:				
boas condições, cobertura de grama > 75%	39	61	74	80
condições médias, cobertura de grama > 50%	49	69	79	84
Terreno preparado para plantio, descoberto	77	86	91	94
Plantio em linha reta				

## Grupos Hidrológicos de Suelos

Grupo Hidrológico Suelo	Descripción del Suelo	Conductividad Hidráulica (mm/ h)
A	Bajo potencial de escurrimiento. Suelos arenosos con poco limo y arcilla. Suelos muy arenosos	8 - 12
B	Moderado a bajo potencial de escurrimiento. Suelos arenosos y francos, menos profundos que A	4 - 8
C	Moderado a alto potencial de escurrimiento. Suelos rasos con significativa cantidad de arcilla.	1 - 4
D	Alto potencial de escurrimiento. Suelos con gran cantidad de arcillas expansivas 2:1 y suelos con camada inferior impermeable.	0 - 1



# Condiciones Antecedentes de Humedad del Suelo

Condición I

suelos secos: las lluvias en los últimos 5 días no superaron 15mm

Condición II

situación promedio en la época de crecidas: las lluvias en los últimos 5 días totalizaron entre 15 y 40mm

Condición III

suelo húmedo (saturado): las lluvias en los últimos 5 días fueron superiores a 40mm y las condiciones meteorológicas fueron desfavorables a altas tasas de evaporación

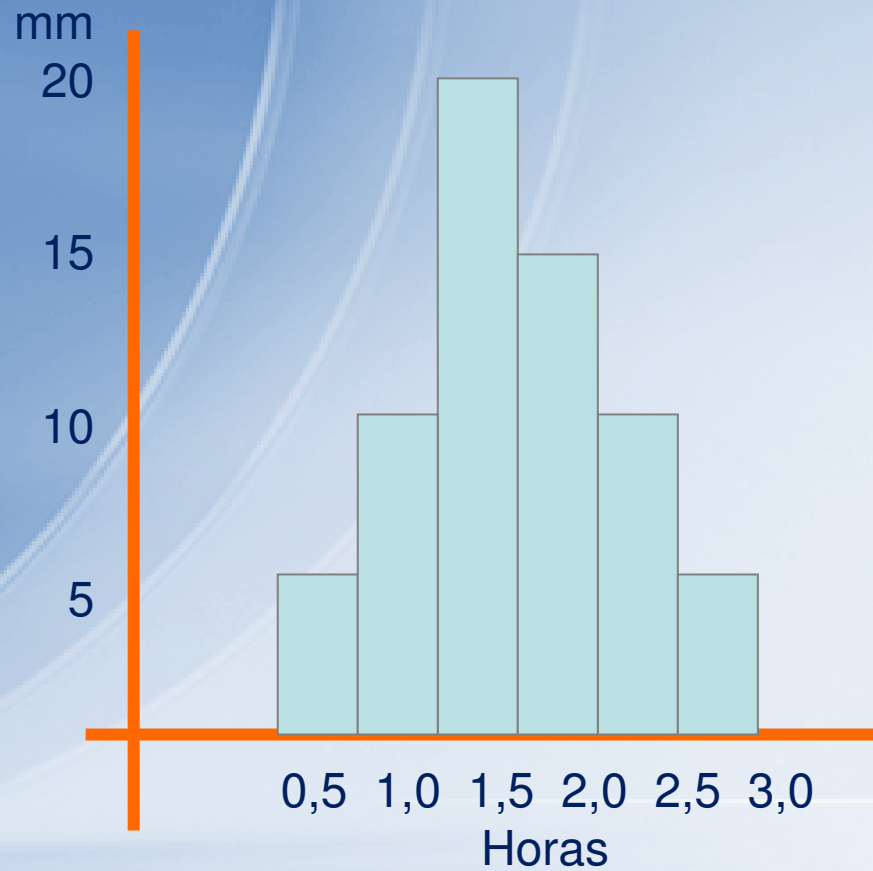
# Condiciones de Humedad del Suelo

Los valores de CN comúnmente presentados en las tablas se refieren a la condición II. Para convertir el valor de CN para las condiciones I y III existen las siguientes expresiones:

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,13 \cdot CN(II)}$$

# Ejemplo: dado o hietograma de diseño ...



Horas	mm
0,5	5
1,0	10
1,5	20
2,0	15
2,5	10
3,0	5

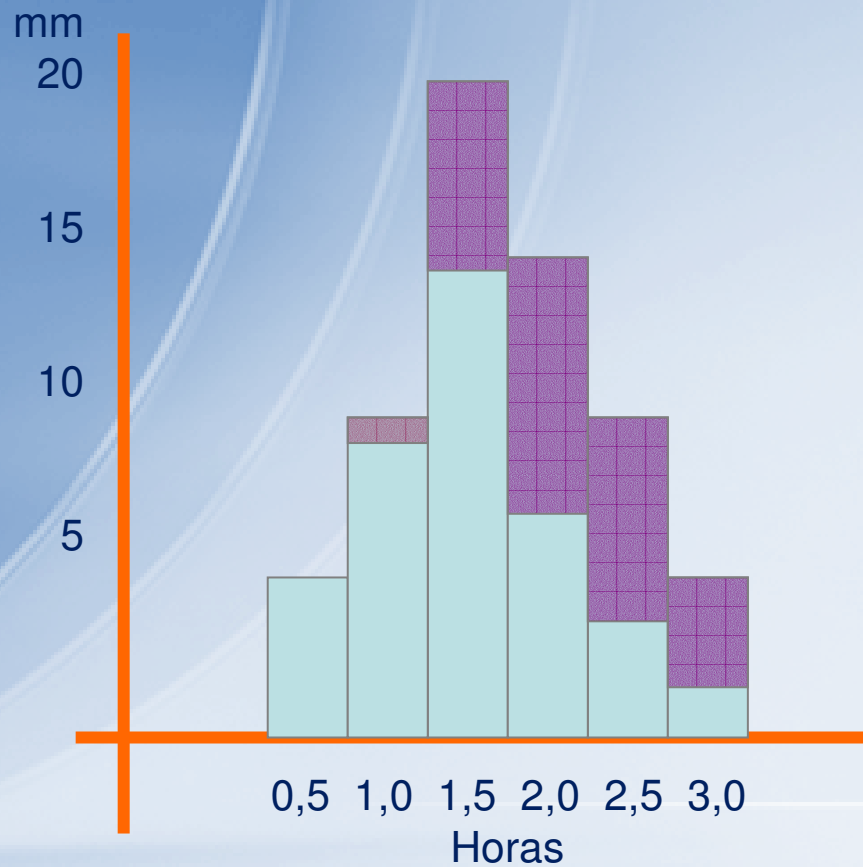
y adoptando el valor de CN (por ejemplo, CN= 65), se debe aplicar la fórmula de SCS de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

Horas	Lluvia	Ll. Acum.	Ll. Exc. Acum.	Hietogr. Exc.
0,5	5	5	0,0	0,0
1,0	10	15	0,08	0,08
1,5	20	35	5,80	5,72
2,0	15	50	13,81	8,01
2,5	10	60	20,20	6,39
3,0	5	65	23,63	3,43

1. Se acumulan las lluvias del hietograma
2. Se aplica la fórmula a las lluvias acumuladas
3. Se desagregan para obtener el hietograma excedente

## Hietograma excedente:



Horas	Ptot	Pexc
0,5	5	0
1,0	10	0,08
1,5	20	5,72
2,0	15	8,01
2,5	10	6,39
3,0	5	3,43

# Hidrograma de Esguurrimimiento Superficial Directo

08 a 12 de Septiembre de 2008

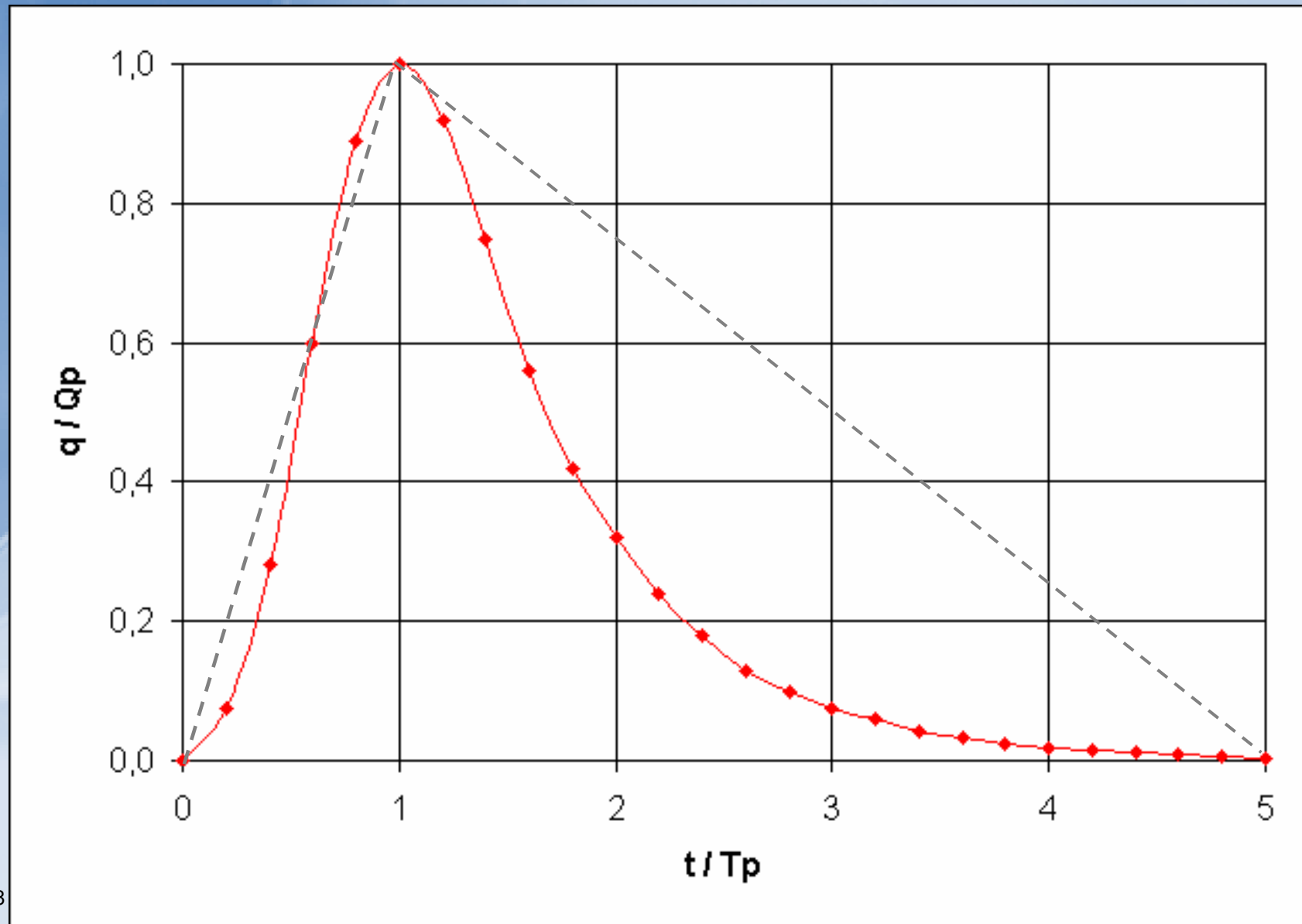


## El Hidrograma do SCS:

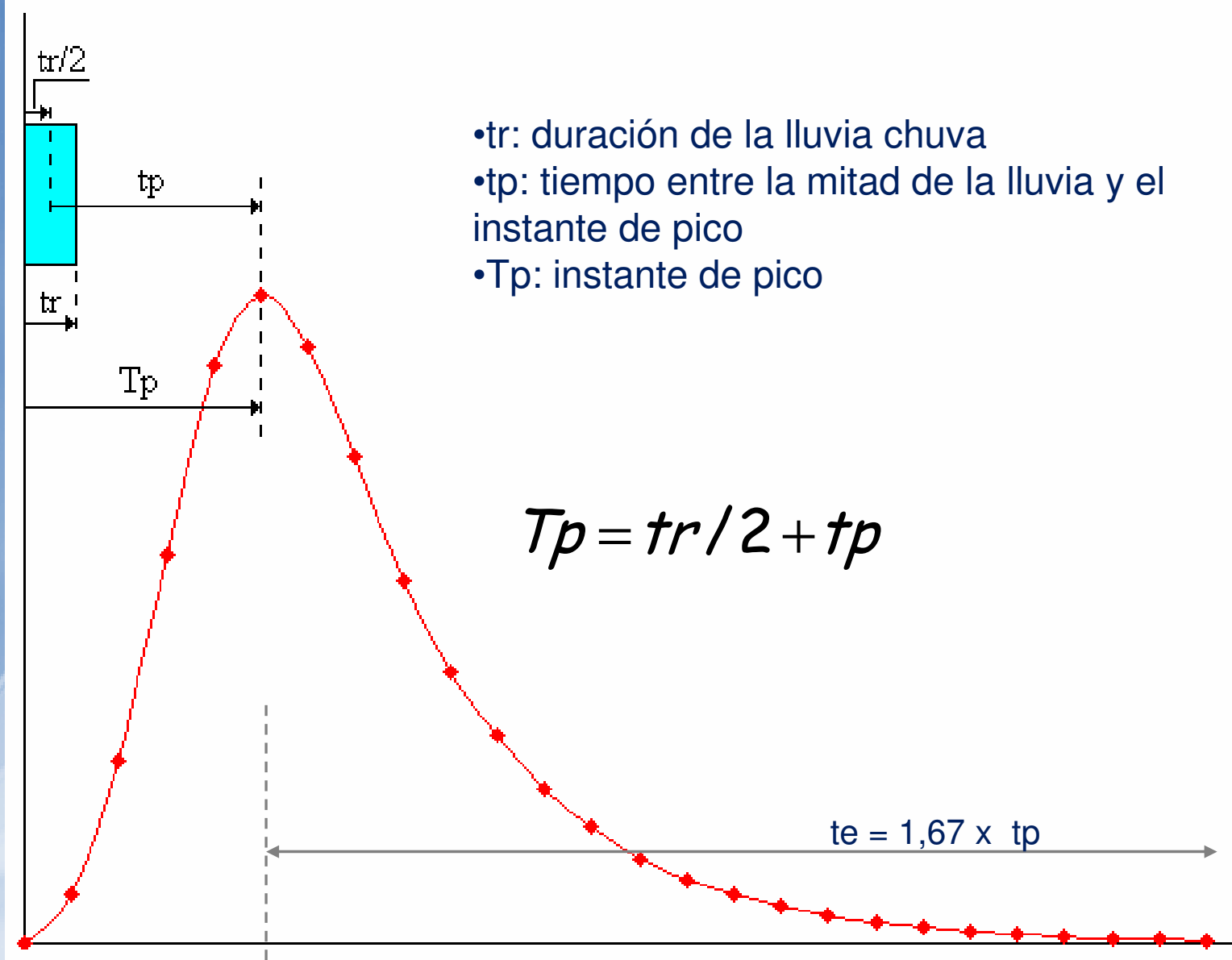
- método sintético desarrollado para pequeñas cuencas rurales en los EUA
- formas del hidrograma: triangular (simplificado) y adimensional
- ampliamente utilizado en cuencas urbanas



# Hidrograma Unitario Adimensional de SCS







## Cálculo del hidrograma unitario adimensional:

- adoptar un valor de  $t_r$  (duración de la lluvia)
- calcular  $t_p$  ( $t_p = 0,6 T_c$ ), donde  $T_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca

- calcular

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p$$

- calcular

$$Q_p = \frac{0,208 \cdot A(\text{km}^2)}{T_p(\text{h})}$$

**Atención:**  $Q_p$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) es el caudal de pico para una lluvia excedente de 1mm sobre la cuenca.

# ¿Como transformar el hidrograma unitario adimensional en hidrograma de escurrimiento superficial directo de la cuenca?

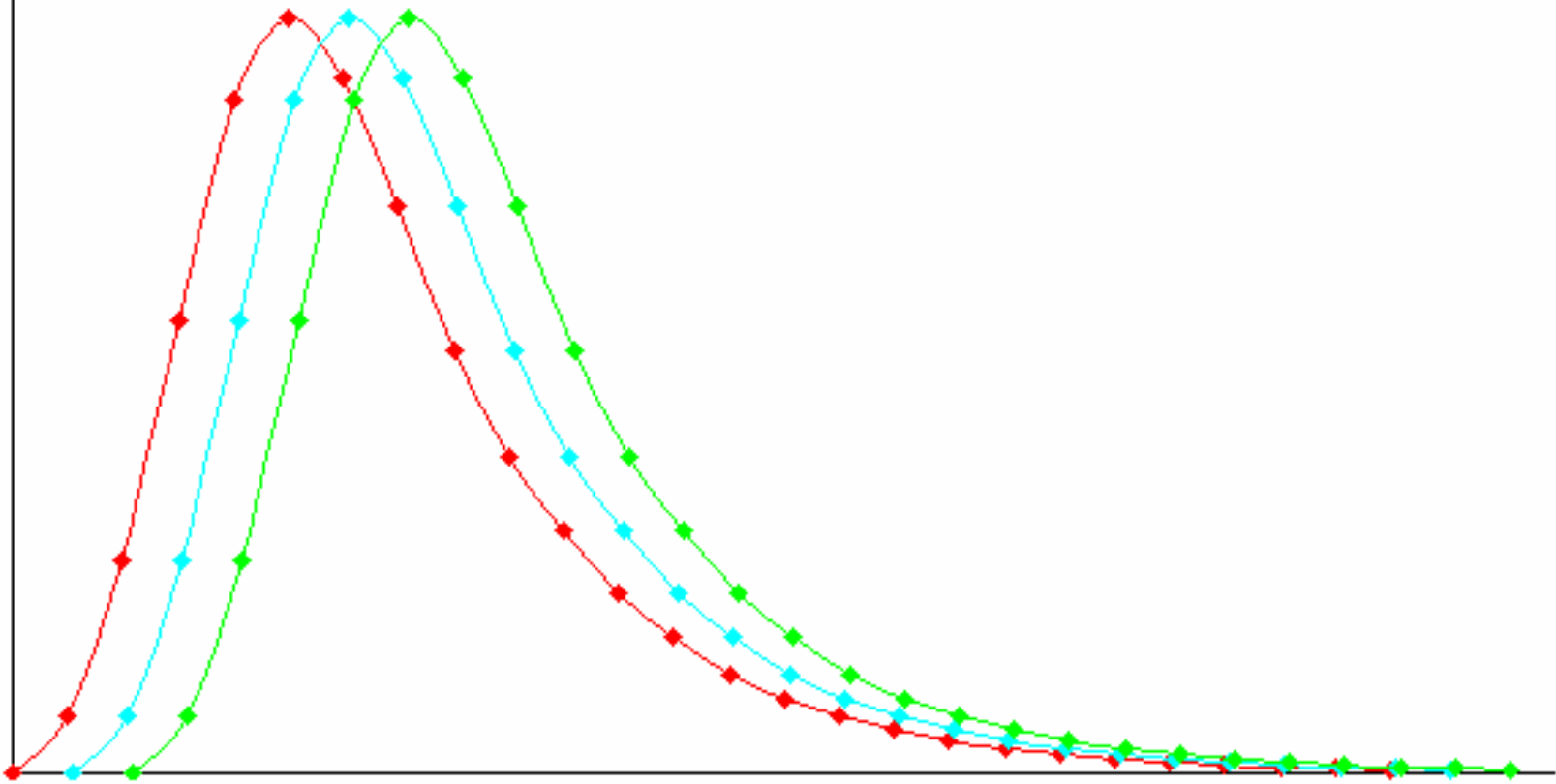
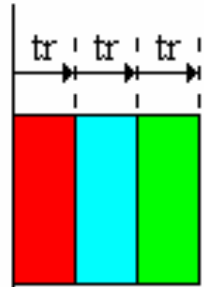
- **Lluvia con duración  $t_r$  y altura excedente de 1 mm:**

basta multiplicar los valores del eje horizontal del hidrograma unitario por  $T_p$  y los valores del eje vertical por  $Q_p$ .

- **Lluvia con duración  $t_r$  y altura excedente de  $H$  mm:**

basta multiplicar los valores del eje horizontal del hidrograma unitario por  $T_p$  y los valores del eje vertical por  $(Q_p \times H)$





# Estimativa de CN:

CN depende de dos (2) planes de información:

- Tipo de suelo → cartografía digital → digitalización → reclasificación
- Cobertura Vegetal y Ocupación del Suelo

Este plan de información se puede obtener de tres (3) formas:

1. Fotointerpretación → digitalización → reclasificación
2. Clasificación multiespectral dicotómica
3. Clasificación multiespectral con mescla


# 1. Fotointerpretación

## Pasos:

- Digitalizar las imágenes (orbitales o suborbitales) (caso producto analógico) } Scanner  
Mesa (formato vectorial directo)
- Registro espacial
- Vectorizar (rutina de segmentación de imágenes de SPRING)
- Generar topología
- Atribuir clases temáticas a cada polígono (**única clase**)
- Cruzar con el plan temático de suelos para generar CN.

## 2. Clasificación multispectral dicotómica

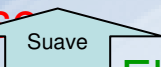
### Pasos:

- Registro espacial
- Toma de muestras de diferentes clases de cobertura y uso
- Evaluar las estadísticas de las muestras (evitar sobre posición)
- Elegir una función discriminante adecuada
  - Mínima distancia
  - Máx. Verosimilitud
  - Otras
- Clasificar → cada pixel posee una **única clase**  

- Cruzar con el plan temático de suelos para generar CN.

### 3. Clasificación multispectral con mezcla

#### Pasos:

- Registro espacial;
- Toma de muestras de diferentes clases de cobertura y uso (pixel puro);
- Evaluar las estadísticas de las muestras (evitar sobre posición);
- Elegir una función discriminante adecuada
  - Mínima distancia;
  - Máx. Verosimilitud;
  - Otras.
- Clasificador → para cada pixel se **estima la probabilidad de ocurrencia de cada clase**



El sumatorio de las probabilidades de cada clase en el pixel es 1.

- Para cada tipo de suelo se estima CN **ponderando la probabilidad de cada clase** de cobertura por pixel.



## Ponderación de CN:

$$CN_j = \sum_{i=1}^n (CN_{j,i} \cdot P_{j,i})$$

*Para:*

$CN_j$  → Grado de permeabilidad de la celda “j”;

$i$  → número de clases puras;


$CN_{j,i}$  → Grado de permeabilidad de la proporción de la clase “i” en la celda “j”;

$P_{j,i}$  → Proporción de la clase “i” en la celda “j”.

*Obs.: Esta análisis debe ser hecha separadamente para cada tipo de suelo.*



# Propagación:

<u>32</u>	<u>64</u>	<u>128</u>
<u>16</u>		<u>1</u>
<u>8</u>	<u>4</u>	<u>2</u>

- Estimativa de las direcciones de flujo sobre un MDT
- Cálculo del número de celdas que aportan con escurrimiento en cada punto del MDT
- Propagación de los valores de CN acumulados.
- Valor de CN promedio de la cuenca de aporte a cada celda
- Balancete hídrico por celda en diferentes instantes.

