



Hidrología de Conservación de Suelos y aAguas

Mauricio Francisco Lemus Vera

Octubre, 2019



DESERTIFICACIÓN - EROSIÓN (Conservación de Suelos y Agua)



Obras de Conservación Bonificadas (D.L. 701)

- 1.- Zanja de Infiltración
- 2.- Canal de Desviación
- 3.- Diques de postes
- 4.- Gaviones
- 5.- Empalizada
- 6.- Murestes de sacos
- 7.- Muretes de piedras
- 9.- Muro de Contención de Neumáticos
- 10.- Microterraza Manual
- 11.- Microterraza con Escarificado
- 12.- Biotecnias
- 13.- Subsolado con camellom



REGULACIÓN DE FLUJOS HÍDRICOS

Canal de Desviación de aguas

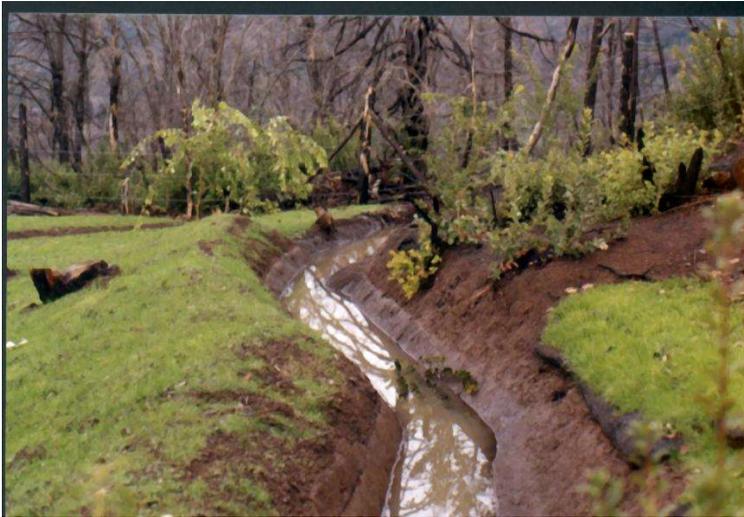
Obra de ingeniería de captura, aprovechamiento y evacuación de aguas lluvias, a nivel de ladera o cauce. Es una obra de recuperación de suelos, manual o mecanizada, que se sitúa preferentemente en la parte superior o en media ladera para capturar la escorrentía procedente de las cotas superiores. Permiten interceptar, desviar y conducir el agua de la escorrentía proveniente de las laderas altas hacia drenajes de almacenamiento de agua o hacia cursos permanentes de agua. Disminuir el escurrimiento superficial del área de cárcavas activas y disipar el agua retenida hacia laderas estabilizadas o zonas de seguridad (Francke *et al.*, 1998; Lemus *et al.*, 2001; Flores *et al.*, 2004)



Canal de desviación proyecto Restauración Sierras de Bellavista

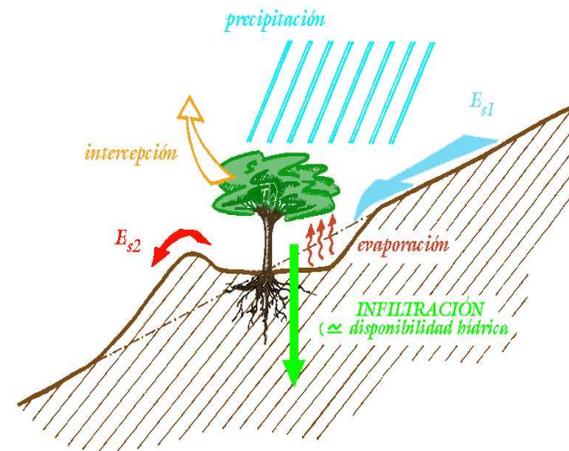


INCREMENTO DE INFILTRACIÓN



- Disminuir la velocidad de las aguas lluvias.
- Aumentar la infiltración del agua en el suelo
- Reducir la escorrentía superficial
- Retener los sedimentos removidos por el flujo hídrico.
- Acumular el agua de las lluvias para el riego

Fuente : CONAF, 1999



- Cosechar Agua
- Recolectar suelo y nutrientes
- Mejorar las condiciones de Humedad del Suelo
- Permitir el desarrollo de una vegetación forestal
- Revertir el proceso de Desertificación por Aridez edáfica : **OASIFICAR**

Fuente : Martínez de Azagra, 2005

INCREMENTO DE INFILTRACIÓN

Terrazas Forestales

Obra de regulación de flujo hídrico en laderas. Tratamiento apropiado en laderas de pendientes moderadas con erosión del tipo laminar y lineal incipiente

Favorece una mayor infiltración del agua en el suelo, reduce la escorrentía superficial, disminuye la velocidad de los flujos de las aguas lluvia y retiene los sedimentos transportados por los flujos hídricos (Francke et al., 1998; Lemus et al., 2001).



Terrazas forestales proyecto Restauración Sierras de Bellavista



INCREMENTO DE INFILTRACIÓN

Bordo de Piedra en Contorno

Para su implementación se debe establecer bordo de piedra en curvas de nivel (por medio de topografía visada por Inspección técnica en terreno), con una altura de aproximadamente 25 cm y una base de 30 cm de ancho. El camellón debe realizarse sobre una zanja poco profunda (aproximadamente 10 cm) que asegure la estabilidad de esta obra en terreno (Figura 4), esta zanja realizarse en forma manual o mecanizada (ejemplo: tractor con cincel). Posteriormente se establecen los camellones, utilizando como material principal las piedras presentes en el sector (nota: no se considera traer piedras de otros sectores) y se rellenará con la tierra proveniente principalmente de la excavación de la zanja de manera de alcanzar las dimensiones estimadas



Borde Piedra en contorno, Fundo La Aguada. Región de Coquimbo

INCREMENTO DE INFILTRACIÓN

Las micrcuencas Negarim son sistematizaciones con forma cuadrada o romboidal rodeadas por pequeños cabellones de tierra con un hoyo de infiltración en el vértice inferior de cada una, la escorrentía superficial se recolecta desde el interior de la microcuenca y se almacena en el hoyo de Infiltración.



OBRAS LINEALES DE LADERAS Y TALUDES

Empalizada de Postes de Madera

Se realizan principalmente en zonas de zanjas y quebradas, en laderas con pendientes moderadas y escarpadas. Éstos tienen por objetivo cumplir 3 condiciones particularmente sensibles en las áreas degradadas; resistir el desgaste del fondo de las cárcavas por efecto del arrastre ejercido por el agua, estabilizar eficientemente las pendientes del lecho en las cárcavas, y preparar las condiciones para la plantación y la siembra en cárcavas (Francke et al., 1998).



Empalizada de Postes de madera proyecto CONAF/JICA, 1998

OBRAS LINEALES DE LADERAS Y TALUDES

Fajinas

Obra de regulación de los flujos hídricos y de retención de sedimentos en taludes y laderas inestables. Favorecen la disminución de la erosión superficial en taludes, disipación de la escorrentía superficial en taludes, reducción de la velocidad del flujo hídrico y acumulación de sedimentos.

Se construyen con ramas de distintas especies arbóreas, aprovechando los tipos existentes en el lugar a intervenir, lo cual reduce sus costos (Francke *et al.*, 1998).



OBRAS LINEALES DE LADERAS Y TALUDES

Muro de Sacos de Tierra

Obra adecuada para estabilizar taludes y laderas de pendientes moderadas, medianas y escarpadas, erosionadas o susceptibles de sufrir erosión. Favorecen la protección y estabilización de la ladera, detención del escurrimiento superficial, acumulación de sedimentos y son complementarios a estructuras gavionadas y diques de madera.

Los muros se construyen con sacos dispuestos en forma de ladrillo, muy compactados con pisones de fierro y dispuestos igual que las curvas de nivel. Se puede realizar en dimensiones variables y tiene un costo relativamente bajo (Francke *et al.*, 1998; Lemus *et al.*, 2001).



Sacos rellenos de tierra complementarios con Terraza forestal, proyecto Restauración Sierras de Bellavista (Lemus, 2001)

REGULACIÓN DE FLUJOS HÍDRICOS

Dique de Postes

Éstos son barreras que cruzan un curso de agua o un conducto y se utilizan para controlar el nivel y velocidad del agua, estabilizar la pendiente del cauce y contener sedimentos transportados. Esta construcción se aplica en puntos localizados y es especialmente interesante para proteger algunas poblaciones y, singularmente, las vías de comunicación. Favorecen la estabilización de pendientes en lechos de cárcavas, resistencia a la socavación de las cárcavas y permiten preparar las condiciones para plantación y siembra dentro de cárcavas. Se construyen con postes impregnados de pino u otras especies (Francke *et al.*, 1998; Lemus *et al.*, 2001).



Diques de madera proyecto Restauración Sierras de Bellavista (Lemus, 2001)

REGULACIÓN DE FLUJOS HÍDRICOS

Dique de Gaviones

Obra de mampostería para la estabilización y protección de cursos de agua secundarios, generalmente temporales, tales como arroyos, esteros, quebradas y cárcavas, y contención de taludes. Permite regular los flujos hídricos en causas medianos y mayores, debido a su gran resistencia en periodos de crecidas. Favorece la disminución de la velocidad de las aguas, amortigua el impacto de los flujos hídricos en bruscos cambios de pendientes y las riberas de los cursos de agua y permite limpiar y filtrar los sedimentos de los flujos hídricos. Los gaviones de distintas dimensiones se construyen utilizando para el relleno de éstos bolones de río, piedras del lugar y fragmentos de rocas de diversos tamaños (Francke et al., 1998; Lemus et al., 2001).



Diques de Gaviones proyecto Restauración Sierras de Bellavista (Lemus, 2001)

¿Que Indicaciones Técnicas
para el Diseño de Zanjas de
Infiltración y Canales de
Desviación, entrega la Ley?



Obras de Conservación

ZANJA DE INFILTRACION: Obra de recuperación de suelos, manual o mecanizada, diseñada y construida para capturar y almacenar la escorrentía procedente de las cotas superiores. Se construye transversalmente a la pendiente, en la curva de nivel. La obra comprende un conjunto de zanjas continuas o individuales en tresbolillo. Presenta una sección con un ancho mínimo en la base de 0,2 metros, una altura efectiva mínima en la cara inferior **de 0,2 metros**.. Al construirse zanjas individuales en tresbolillo el largo fluctúa entre 3 y 8 metros y la separación o tabique entre zanjas, en la curva de nivel, varía entre 0,7 y 7 metros, según la altura y largo de ellas. Si las zanjas son continuas, en un rango de 5 a 15 metros se deberá dejar un **tabique de 0,3 metros** sin construir. Aguas abajo, adyacente a la excavación, se construye un camellón de altura y ancho similares a la profundidad de la zanja y a la anchura superior de la obra, respectivamente. Se excluye la construcción de zanjas en suelos no estructurados.



Obras de Conservación

CANAL DE DESVIACION: Obra de recuperación de suelos, manual o mecanizada, que se sitúa preferentemente en la parte superior o media de la ladera para capturar la escorrentía procedente de las cotas superiores. Se construye transversalmente a la pendiente con un **ligero desnivel (1%)** para transportar el agua a una salida estabilizada. Presenta una sección con un ancho mínimo en la base de **0,2 metros** y una **altura efectiva mínima de 0,2 metros**. Las dimensiones deben permitir evacuar un volumen de agua según la precipitación de diseño. Aguas abajo, adyacente a la excavación, se construye un camellón de altura y ancho similares a la profundidad del canal y a la anchura superior de la obra respectivamente. El largo máximo es de 100 metros. Las aguas del canal siempre deben evacuar en un área receptora estabilizada.

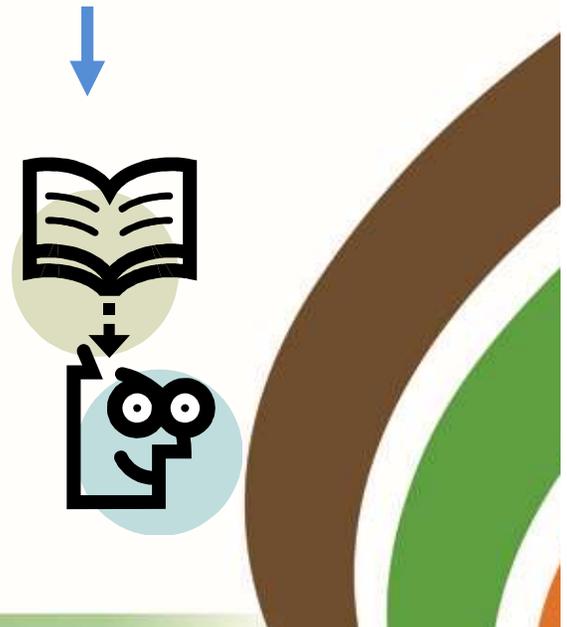




Chile País de Contrastes

- Clima (T° - Pp)
- Suelos
- Relieve
- Vegetación

¿ Que criterio debe aplicarse en el Diseño de las Obras de Conservación?



DISEÑO OBRAS
RESTAURACIÓN PROCESOS HIDROLÓGICOS



PERIODO DE RETORNO PARA DISEÑO

Conceptos :

Periodo de Retorno – Probabilidad de excedencia

Periodo de retorno, como el intervalo promedio de tiempo, dentro del cual cierta magnitud o intensidad de lluvia, se iguala o excede una vez.

Probabilidad de excedencia, es decir, la probabilidad anual de igualar o sobrepasar cierta magnitud del fenómeno

Ejemplo: Una zona con una precipitación máxima en 24 horas de 100mm, con periodo de retorno de 10 años, quiere decir, que cada 10 años es esperable la ocurrencia de una lluvia igual o superior, por otra parte existe la probabilidad de excedencia de un 10% anual, que se pueda igualar o exceder en 24 horas los 100 mm.



PERIODO DE RETORNO PARA DISEÑO

En la elección del periodo de retorno, frecuencia o probabilidad a utilizar en el diseño de una obra es necesario considerar la relación existente entre la probabilidad de excedencia de un evento, la vida de útil de la estructura y el riesgo de falla aceptable, dependiendo, este último, de factores económicos sociales, ambientales, técnicos y otros. (Manual de Carretera, 2012).

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

T: Periodo de retorno; n vida útil de la obra

PERIODO DE RETORNO Y RIESGO DE FALLA SEGUN VIDA UTIL

Riesgo (r, %)	Vida útil (n, años)			
	10	20	25	50
50	15	29	37	73
25	35	70	87	174
10	95	190	238	475
5	195	390	488	975
1	995	1.990	2.488	4.977



PERIODO DE RETORNO PARA DISEÑO

PERIODOS DE RETORNO PARA DISEÑO

Tipo de Obra	Tipo de Ruta	Período de Retorno (T, años)		Vida Util Supuesta (n; años)	Riesgo de Falla (%)	
		Diseño ⁽³⁾	Verificación ⁽⁴⁾		Diseño	Verificación
Puentes y Viaductos ⁽¹⁾	Carreteras	200	300	50	22	15
	Caminos	100	150	50	40	28
Alcantarillas ($S > 1,75 \text{ m}^2$) o H terrap. $\geq 10 \text{ m}$ y Estructuras Enterradas ⁽²⁾	Carreteras	100	150	50	40	28
	Caminos	50	100	30	45	26
Alcantarillas ($S < 1,75 \text{ m}^2$)	Carreteras	50	100	50	64	40
	Caminos	25	50	30	71	45
Drenaje de la Plataforma	Carreteras	10	25	10	65	34
	Caminos	5	10	5	67	41
Defensas de Riberas	Carreteras	100	-	20	18	-
	Caminos	100	-	20	18	-

S = Sección útil de la alcantarilla



DISEÑO DE OBRAS

Análisis de Precipitaciones



Determinar la magnitud de precipitación para un periodo de retorno dado
Calculo de Magnitudes e Intensidades para duraciones del tiempo de diseño

Calculo de Escorrentía crítica (Caudal)

Diseño de Obras

Diseño de Canales de Desviación

Diseño y dimensionamiento de canal de desviación

Diseño de Zanjas de Infiltración

Determinar Volumen de Zanja
Diseño y dimensionamiento de zanjas de infiltración

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Los datos necesarios para poder estimar los niveles escorrentía, caudales de avenida y proceder al diseño de obras hidráulicas son en principio.

- Precipitación más desfavorable en la zona
- Probabilidad que esta suceda
- Intensidad más desfavorable
- Probabilidad que esta suceda.



La gran escasez de datos pluviométricos disponibles para cada localidad de nuestro país, hace necesario métodos analíticos de estimación. En especial sobre intensidades o magnitudes de lluvia, para duraciones pequeñas.

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Conceptos :

- Magnitud e Intensidad de Precipitaciones
- La información pluviométrica puede ser expresada de dos formas, según Espíldora (1979) magnitud de lluvia, lámina de agua (mm) que se produce en un cierto intervalo de tiempo o duración, o en términos de intensidad, es decir, lamina de agua por hora (mm/hr); por ejemplo es posible expresar la magnitud de lluvia de 10.36mm en 10 min., en términos de intensidad, que es igual a 62.16 mm/hr.:

$$i = \frac{P}{Td}$$



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Metodología para la determinación de valores máximos

- Distribución de Frecuencias Observada
- Método Estadístico

Precipitaciones máximas en 24 horas para las estación pluviométrica de Almagro

Año	Precipitación Máxima 24 Horas mm
1994	17.00
1995	47.00
1996	38.00
1997	40.00
1998	51.00
1999	63.00
2000	25.00
2001	18.00
2002	100.50
2003	31.10
2004	46.30
2005	53.00



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Metodología para la determinación de valores máximos

Distribución de Frecuencias Observada

Obtenida la muestra, ésta se ordena en sentido creciente asignando a cada valor una probabilidad. De esta forma se pueden obtener histogramas de frecuencias (relativas o acumuladas) que se corresponden con sus respectivas funciones de probabilidad (Martínez de Azagra y Navarro, 1996)

$$P(x \leq \xi) = F_{Ri} = \frac{2n-1}{2N}, \text{ o bien}$$

$$P(x \leq \xi) = F_{Ri} = \frac{n}{N+1}, \text{ donde:}$$

- n es el n° de orden (de la serie de valores muestrales ordenadas de menor a mayor)
- N es el n° de total de elementos de la muestra (tamaño de la muestra):



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Metodología para la determinación de valores máximos

Distribución de Frecuencias Observada

n	Año	Pmax 24 Horas	$F_{r_i} = \frac{n}{N+1}$	$F_{r_i} = \frac{2n-1}{2N}$
1	1994	17,00	0,077	0,042
2	2001	18,00	0,154	0,125
3	2000	25,00	0,231	0,208
4	2003	31,10	0,308	0,292
5	1996	38,00	0,385	0,375
6	1997	40,00	0,462	0,458
7	2004	46,30	0,538	0,542
8	1995	47,00	0,615	0,625
9	1998	51,00	0,692	0,708
10	2005	53,00	0,769	0,792
11	1999	63,00	0,846	0,875
12	2002	100,50	0,923	0,958



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Metodología para la determinación de valores máximos

Distribución de probabilidades

- Ajuste a una función de distribución: $F(x)$

Gumbel $F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$

Distribución Normal $F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * e^{-0,5\left(x-\frac{u}{\sigma}\right)^2}$

Log Normal $p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2} * \sigma_Y} * e^{-\frac{(Y-u_Y)^2}{\sigma_Y^2}}$

Log Pearson

$$\overline{\log(x)} = \frac{\sum \log(x)}{n} \quad S_{\log(x)} = \sqrt{\frac{\sum (\log(x) - \overline{\log(x)})^2}{n-1}}$$

$$g = \frac{n}{(n-1) * (n-2) * (S_{\log(x)})^3} * \sum (\log(x) - \overline{\log(x)})^3$$

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Distribución de Gumbel

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Función de distribución de probabilidad

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{(-\alpha-\beta)}]}$$

Función de densidad de probabilidad

n-1 años	μ_y	σ_y	n-1 años	μ_y	σ_y
2	0.4043	0.4984	9	0.4902	0.9288
3	0.4286	0.6435	10	0.4952	0.9497
4	0.4458	0.7315	11	0.4996	0.9676
5	0.4588	0.7928	12	0.5035	0.9833
6	0.469	0.8388	13	0.507	0.9972
7	0.4774	0.8749	14	0.51	1.0095
8	0.4843	0.9043	15	0.5128	1.0206

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s}; \quad \beta = x - \frac{\mu_y}{\alpha}$$

En donde :

- x : Promedio de Precipitaciones en 24 horas (mm).
- s : Desviación estándar de Precipitaciones en 24 horas.
- n : Número de registro (Pp máximas en 24 horas).

$$P_{max} = \beta - \left(\frac{1}{\alpha}\right) * \ln \left[\ln \left(\frac{R}{R-1} \right) \right]$$

P_{max} : Precipitación máxima en 24 horas asociado a un periodo de retorno R.

R : Periodo de retorno.

a, b : Parámetros de calculo (Ecuación N° 1 y 2)

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Distribución de Gumbel

Año	Precipitación Máxima 24
1994	17,0
1995	47,0
1996	38,0
1997	40,0
1998	51,0
1999	63,0
2000	25,0
2001	18,0
2002	100,5
2003	31,1
2004	46,3
2005	53,0
Promedio	44,2
Desviación estandar	22,7

n	μ_y	σ_y	n	μ_y	σ_y
3	0,4286	0,6435	10	0,4952	0,9497
4	0,4458	0,7315	11	0,4996	0,9676
5	0,4558	0,7928	12	0,5035	0,9833
6	0,469	0,8388	13	0,507	0,9972
7	0,4774	0,8749	14	0,51	1,0095
8	0,4843	0,9043	15	0,5128	1,0206
9	0,4902	0,9288	16	0,5157	1,0316

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s} = \frac{0.9676}{22.7} = 0.04$$

$$\beta = x - \frac{\mu_y}{\alpha} = 44.2 - \frac{0.4996}{0.04} = 32.04$$

$$P_{max} = \beta - \left(\frac{1}{\alpha}\right) * \ln \left[\ln\left(\frac{R}{R-1}\right) \right]$$

P_{max} : Precipitación máxima en 24 horas asociado a un periodo de retorno R.

R : Periodo de retorno.

a,b : Parámetros de calculo (Ecuación N° 1 y 2)

Periodo de retorno	Pp max
2	45,14
5	74,42
10	93,81
15	104,75
20	112,41

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Test de Bondad de Ajuste

¿El ajuste realizado es bueno o hay que desecharlo por poco preciso desde el punto de vista estadístico?

Kolmogorov SmirnovE

Es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.

n	Pmax	$F_{r_i} = \frac{n}{N+1}$	F(X) Gumbel	$|\Delta|$
1	17,0	0,077	0,145	0,068
2	18,0	0,154	0,158	0,004
3	25,0	0,231	0,254	0,023
4	31,1	0,308	0,347	0,039
5	38,0	0,385	0,454	0,070
6	40,0	0,462	0,485	0,023
7	46,3	0,538	0,575	0,036
8	47,0	0,615	0,584	0,031
9	51,0	0,692	0,635	0,057
10	53,0	0,769	0,659	0,110
11	63,0	0,846	0,762	0,084
12	100,5	0,923	0,946	0,023

$$F(x): \text{Gumbel} : F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

D max : 0,110

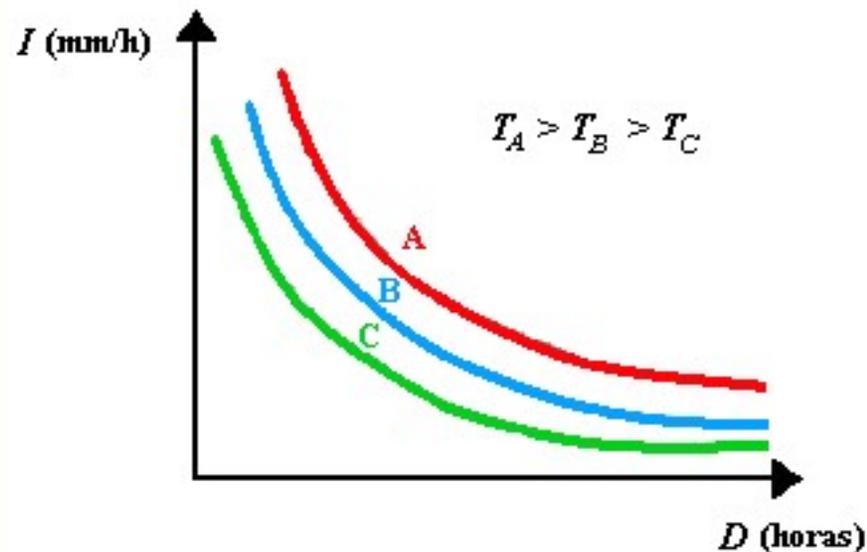
D tabla 95 : 0,375

Dmax (0,110) Dcalculado (0,375) el ajuste con la distribución de Gumbel es válido

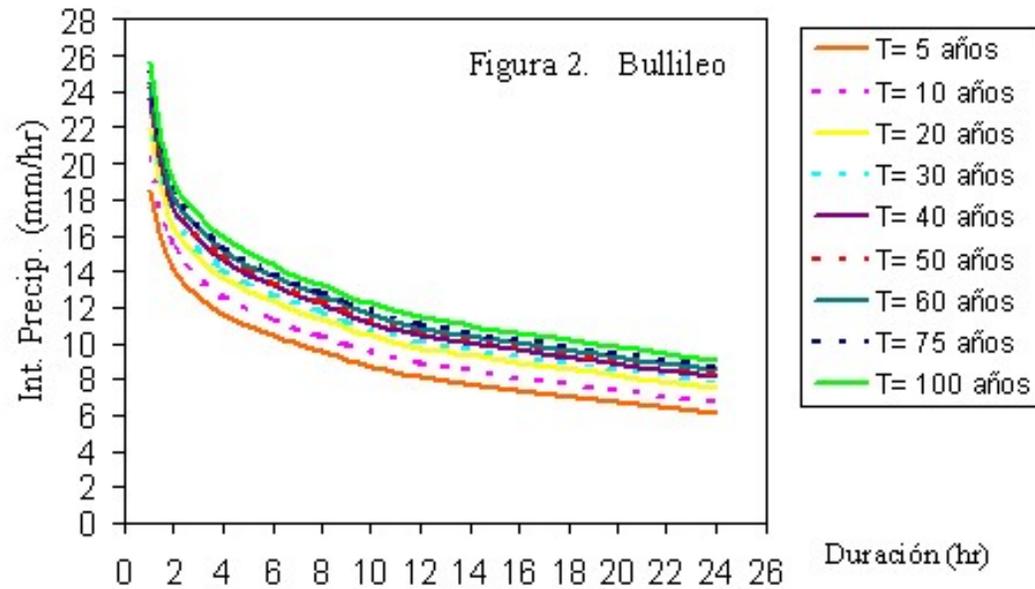
ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Curva de intensidad duración frecuencia

Un elemento importante, para la determinación de la intensidad de precipitación de diseño es la curva intensidad duración frecuencia. Por otro lado, según Mintegui *et al* (1990), se denominan Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a aquellas que representan duraciones en abscisas y alturas de precipitación en las ordenadas, en la cual, cada curva representada corresponde a una frecuencia (o período de retorno), de tal forma que las gráficas de las curvas IDF representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los de una misma curva, a un idéntico período de retorno.



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Análisis de Magnitudes e Intensidades de Lluvia para Duraciones Pequeñas

Grunsky
$$I^t = I_{24} x \left(\frac{25}{t} \right)^{1/2}$$

Aparicio
$$I = \frac{kT^m}{D^n}$$

Espildora
$$CD_t = \frac{P_t(mm)}{P_{60}(mm)}$$

Bell
$$I_t^T = \frac{1}{t} (cd_t)_1 x (cd_t)_{24} x P_{24}^T$$



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Análisis de Magnitudes e Intensidades de Lluvia para Duraciones Pequeñas

Coeficiente de Duración de Espíldora

Los coeficientes de duración propuestos por Espíldora, definidos como el cociente entre la precipitación caída en “t” min. y la precipitación correspondiente en 1 hora, asociadas a un mismo periodo de retorno. La mayor utilidad de los coeficientes de duración propuesto por Espíldora, se debe a que fueron calculados, a partir del régimen pluviométrico de Chile

$$CD_t = \frac{P_t (mm)}{P_{60} (mm)}$$

Duración t	Coeficiente CDt
5 min.	0.26
10 min.	0.4
15 min.	0.53
30 min.	0.7
45 min.	0.86
60 min.	1
120 min.	1.4
24 hrs.	4.04

CD_t : Coeficiente de duración para t min.

P_t : Precipitación para t min.

P_{60} : Precipitación en 60 min

$$P_t = \left(\frac{CD_t}{CD_{24}} \right) x P_{max}$$



ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Análisis de Magnitudes e Intensidades de Lluvia para Duraciones Pequeñas

$$P_t = \left(\frac{CD_t}{CD_{24}} \right) P_{\max} K$$

t	: Tiempo de precipitación en t min.
Pt	: precipitación en t min. con un periodo de retorno R años (mm).
Pmax	: precipitación en 24 hrs con periodo de retorno R años (mm). (Sec. 3.1.1)
CDt	: coeficiente de duración en t min.
CD 24	: Coeficiente de duración en 24 horas
K ; P24/Pd =1.1	: Cuociente entre la lluvia caída en 24 horas (P24) y la lluvia diaria (Pd) (Vargas y Sánchez, citado por Bonelli 1986).

La curvas de intensidad, duración y frecuencias estimadas por Espildora (Bonelli, 1986), y las calculadas con posterioridad por Varas y Sánchez , con un número superior de datos pluviométrico, tienen diferencias significativas en los coeficientes de duración para 24 horas (Cdt 24hr); Espíldora: 4.04 y Varas y Sánchez: 6.45 , diferencia superior al 60%, Bonelli (1986) explica que las estimaciones a partir del valor propuesto por Espíldora, exceden a la precipitaciones reales, en la mayoría de los casos. Ante esta situación se recomienda utilizar un coeficiente de duración intermedio (Montti , 2002) es decir 4.9 , valor propuesto por Grunsky.

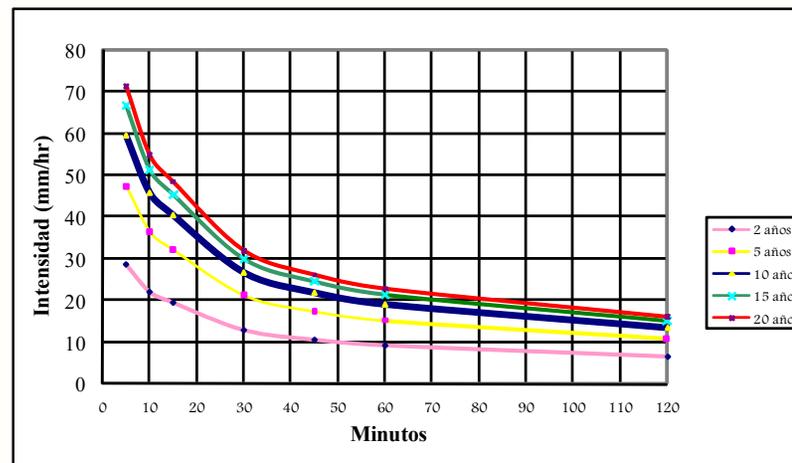


ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Determinación de curva intensidad duración frecuencia

$$I_t = \frac{1}{t} x \left(\frac{CD_t}{4.9} \right) x P_{\max} x K$$

Tiempo	5,000	10	15	30	45	60	120	24 Horas
Coef. De Duración	0,260	0,4	0,53	0,7	0,86	1	1,4	4,9
Periodo de retorno								
2	28,739	22,1072476	19,5280687	12,8958945	10,5623517	9,21135318	6,49400399	45,1356306
5	47,386	36,4504601	32,1979064	21,2627684	17,4152198	15,1876917	10,7073226	74,4196893
10	59,731	45,9469147	40,5864414	26,8023669	21,9524148	19,1445478	13,4969062	93,8082843
15	66,696	51,3047342	45,3191819	29,9277616	24,5122619	21,3769726	15,0707657	104,747166
20	71,573	55,0561421	48,6329255	32,1160829	26,3046012	22,9400592	16,1727417	112,40629



• MAUCO : ANALISIS DE LAS PRECIPITACIONES

	A	B	C	D	E
1	INGRESO DE REGISTRO DE PRECIPITACIONES				
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					

	AÑO	PP
1	1989	109.3
2	1990	80.1
3	1991	50.2
4	1992	103
5	1992	66.6
6	1994	52.5
7	1995	65.3
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
29	Numero de registros	7
30	Promedio	75.29
31	Desviación standard	23.35

CALCULO DE MAGNITUDES E INTENSIDADES

Magnitudes de precipitación máximas (mm) según el periodo y duración estimada (Espildora)

Tiempo	Duración							
	5	10	15	30	45	60	120	24 Horas
Coef. De Duración	0.26	0.4	0.53	0.7	0.86	1	1.41	4.9
Periodo de retorno								
2	4.23	6.50	8.62	11.38	13.98	16.26	22.93	79.68
5	6.07	9.34	12.37	16.34	20.08	23.34	32.91	114.39
							39.53	137.37
							43.26	150.33
							45.87	159.41

Estimación de máximas diarias para un Periodo de retorno T
Estadística de Gumbel

μ	0.4690
σ	0.9388
En donde	
α	0.04
β	62.23
T	10

120	24 Horas
1.4	4.9
11.46	79.68
16.46	114.39
19.76	137.37
21.63	150.33
22.94	159.41

Máxima 24 Horas 137.37 Periodo retorno

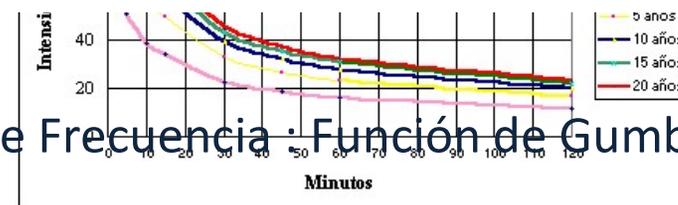
BONDAD DE AJUSTE (Funcion de Gumbel)

Coefficiente Correlacion R2

R2 : 0.9592

Test de Kolmogorov Smirnov

D supremo : 0.089
D tabla 95 : 0.486 Significativo al 95 %

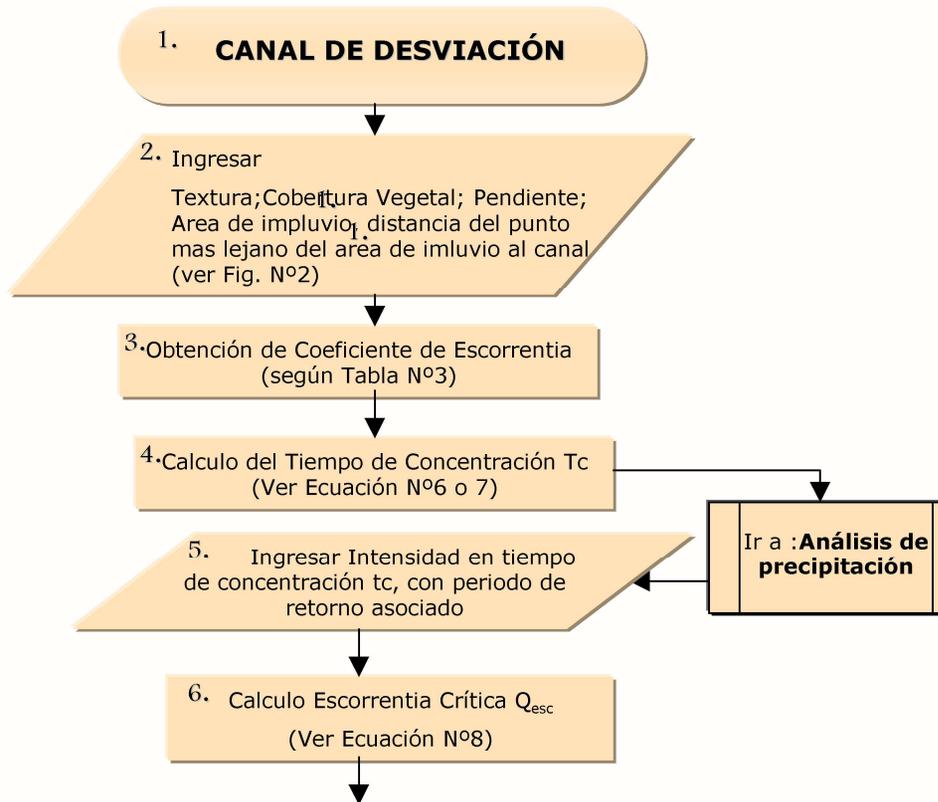


Análisis de Frecuencia : Función de Gumbel

Análisis de magnitudes e intensidades : Método Espildora

-
7. Definir técnicas u obras posibles de implementar en los sectores homogéneos.
 8. Calcular o definir intensidad de las obras.
- 
-

CALCULO DECAUDAL



CAUDALES MÁXIMOS

La correcta estimación de caudales punta originados por intensos aguaceros resulta fundamental para el ingeniero encargado de proyectar cualquier tipo de obra hidráulica en un cauce fluvial o torrencial. También constituye un requisito de partida indispensable para dimensionar estructuras de evacuación del escurrimiento superficial en laderas (zanjas de desviación) o en carreteras (canales de desviación, cunetas y obras de paso). Se trata de un tema muy amplio y complejo, que nosotros vamos a tratar de sintetizar en este documento de manera escueta pero precisa.

Los métodos de estimación de caudales máximos se clasifican en cuatro grupos:

- Métodos directos
- Métodos estadísticos
- Métodos empíricos
- Métodos hidrológicos



CAUDALES MÁXIMOS

A los **métodos directos** también se les conoce como métodos históricos. Se trata de recoger referencias históricas de los caudales y riadas acaecidos (hablando con testigos del evento, buscando marcas de niveles alcanzados por el agua, etc.). A partir de la ecuación de continuidad: $Q = v \cdot S$ (el caudal es igual a la velocidad por la sección mojada), si se consigue estimar la velocidad del agua (por ejemplo, mediante la ecuación de Manning) y la sección mojada del cauce durante la avenida, se puede deducir el caudal líquido máximo que ha circulado por ese cauce.

$$Q = v \cdot S = \frac{1}{n} \cdot (R_h)^{2/3} \cdot \sqrt{\text{sen}(\beta)} \cdot S$$

siendo: Q = caudal volumétrico (m^3/s); S = sección transversal (m^2); n = coeficiente de rugosidad de Manning (tabulado); R_h = radio hidráulico (m; cociente entre la sección mojada y el perímetro mojado); β = ángulo que forma el Talweg del cauce con la horizontal ($\text{sen}(\beta) \approx \text{tg}(\beta) = I$ = pendiente geométrica del cauce)



CAUDALES MÁXIMOS

Los **métodos estadísticos** requieren de una serie temporal de registros de caudales (caudales máximos diarios, o caudales máximos instantáneos), como punto de partida. Se precisa, en consecuencia, de una estación de aforos que ofrezca estos datos de forma fiable y para una serie extensa de años (cincuenta o treinta años mejor que veinte años). El procedimiento consiste en ajustar una ley de distribución de valores máximos a los datos muestrales y –posteriormente y si el ajuste es confiable– pronosticar caudales máximos asociados al periodo de retorno deseado. Las funciones de distribución ($F(x)$) que se vienen utilizando para este tipo de ajustes son variadas. Gumbel, Log Pearson tipo III, Valores extremos generalizados (GEV) y SQRT-ET máx son las más citadas en la bibliografía. La función de distribución de Gumbel sigue siendo la más utilizada pese a que numerosos estudios otorguen a las otras leyes de distribución una mayor fiabilidad para periodos de retorno altos.

Una vez ajustada la función de distribución a los valores muestrales y aceptado el ajuste (mediante un test de bondad estándar; como pueden ser el test χ^2 o el de Kolmogorov-Smirnov), se está en condiciones de fijar (pronosticar) un caudal punta con su periodo de retorno asociado. Para ello, hay que aplicar la conocida ligazón existente entre la función de distribución ajustada ($F(x)$) y el periodo de retorno (T):

CAUDALES MÁXIMOS

Los **métodos empíricos** son fórmulas que relacionan el caudal máximo con el área de la cuenca vertiente en estudio. Se trata de métodos muy sencillos de aplicar, pero que encierran una excesiva simplificación del fenómeno de la crecida. Esta sencillez lleva emparejada una limitación en la validez de sus predicciones, que únicamente pueden considerarse atinadas en la región donde se ha ajustado la fórmula. Su exportación a otras regiones es siempre arriesgada.

Una expresión general para estos métodos empíricos es la siguiente:

$$Q_{\max} = a \cdot S^x$$

siendo: Q_{\max} el caudal punta, a y x los parámetros regionales de ajuste y S la superficie de la cuenca.



CAUDALES MÁXIMOS

Métodos hidrológicos

Consisten en procedimientos o fórmulas que transforman la precipitación del aguacero de cálculo en escorrentía superficial (=lluvia neta) y en un caudal punta, basándose en el fenómeno hidrológico que rige la transformación de lluvia en escorrentía.

Modelo hidrológico aconsejado	Superficie de la cuenca (km ²)	Método de cálculo
Método racional	≤ 2,5 km ²	calculadora
Método racional modificado	≤ 75 km ²	calculadora o programa
Método de las isocronas	≤ 500 km ²	calculadora o programa
Hidrograma unitario	≤ 2000 km ²	calculadora o programa
Dividir en subcuencas y combinar sus hidrogramas parciales	> 2000 km ²	paquete informático



CAUDALES MÁXIMOS

El método racional es el modelo más antiguo que establece una relación directa entre la lluvia y los caudales

$$Q = c \cdot i \cdot S$$

- Fórmula:
- Q = caudal (en l/min)
- c = coeficiente de escorrentía (tablas) (adimensional)
- i = intensidad de lluvia (curvas I – D – F) (en l/m²/min)
- S = superficie de la cuenca (SIG, planímetro) (en m²)



CAUDALES MÁXIMOS

Estimación de precipitación directa (caudal o descarga peak), en una cuenca (Método racional).

Apta para cuencas uniformes, de no más de 1000 ha, y en donde la lluvia dura, al menos, el tiempo de concentración.

$$Q_p = \frac{CIA}{K_m}$$

mm/hr

ha

m³/s

- 360 (unidades métricas)
- 1 (inglesas)

Tipo de suelo/ Uso	Cultivos	Pastoreo	Bosque
Tasas de infiltración superiores a la media; usualmente suelos arenosos o gravosos	0.2	0.15	0.1
Tasas de infiltración promedios; sin panes arcillosos; suelos franco o similares	0.4	0.35	0.3
Tasas de infiltración inferiores a la media; suelos arcillosos pesados o bien con un pan arcilloso cercano a la superficie; suelos delgados sobre roca impermeable	0.5	0.45	0.4

CAUDALES MÁXIMOS

Coeficiente de Escorrentía

Cobertura Vegetal	Tipo de suelo	Rango de pendiente				
		>50%	20-50%	5-20%	1-5%	0-1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.55	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, Veg. Ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque, densa veg.	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Coeficiente de escorrentía (Benites *et al*, 1980, citado por Navarro *et al*, 2001).



CAUDALES MÁXIMOS

Coeficiente de Escorrentía

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronun- Ciada	Alta	Media	Suave	Despre- ciable
			50%	20%	5%		1%
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
Vegetación ligera	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba, grama	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosques	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
Vegetación densa	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Nota: Para zonas que se espera puedan ser quemadas se deben aumentar los coeficientes así:

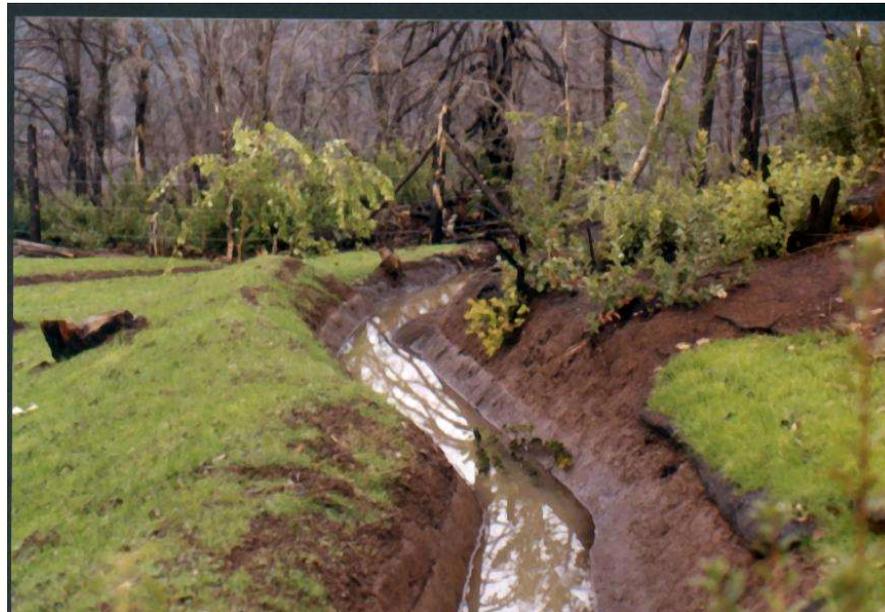
- ◆ Cultivos: multiplicar por 1,10
- ◆ Pastos y vegetación ligera, hierba y grama, bosques y vegetación densa: multiplicar por 1,30



CAUDALES MÁXIMOS

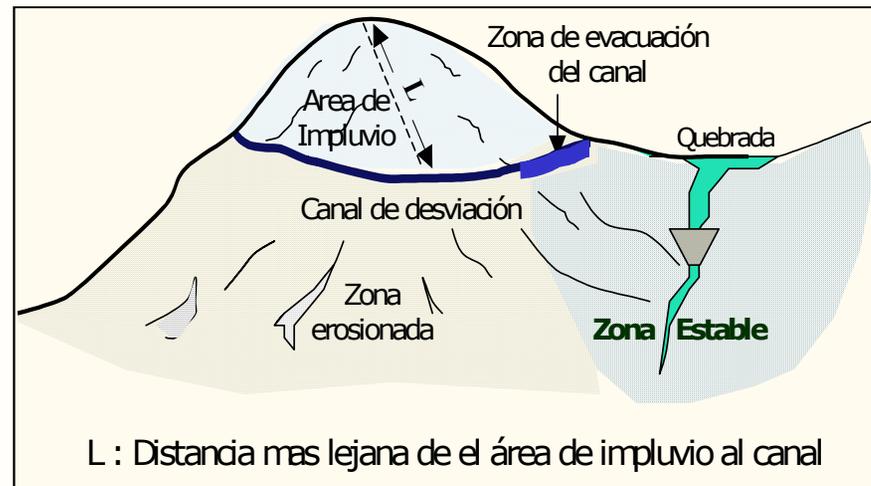
Coeficiente de Escorrentía

$$\bar{C} = \frac{(P - P_0)(P + 23 \cdot P_0)}{(P + 11 \cdot P_0)^2}$$



CAUDALES MÁXIMOS

Un canal debe ser capaz de encauzar las aguas vertidas en él, originadas de la máxima escorrentía que pueda ocurrir en el área de impluvio, en un tiempo determinado, **escorrentía crítica**.



$$Q = \frac{CIA}{360}$$

DISEÑO DE CANAL

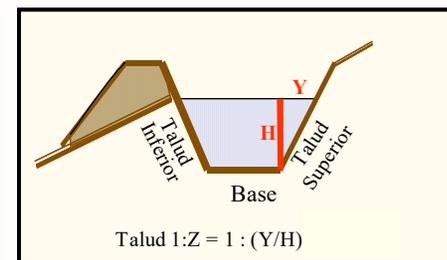
Un canal de desviación adecuado debe contener la escorrentía crítica y según el terreno, conducir el caudal a una velocidad menor que la máxima permitida para que la estructura del canal no se socave. Obtenida la escorrentía crítica y máxima velocidad permitida, se determina el **área mínima** que deberá poseer la sección transversal, a partir de la cual el canal podrá cumplir con las características anteriormente señaladas.



DISEÑO DE CANAL

El canal de desviación debe tener un área de sección mínima que debe soportar la esorrentía crítica Q_c y la velocidad máxima a la que puede circular el agua en el canal (V_{max})

$$A_{\min} = \frac{Q_c}{V_{\max}}$$



Dependiendo del material, la V_{max} es:

DISEÑO CANAL

V_{max} permisible en el canal (Suárez de Castro, 1979)

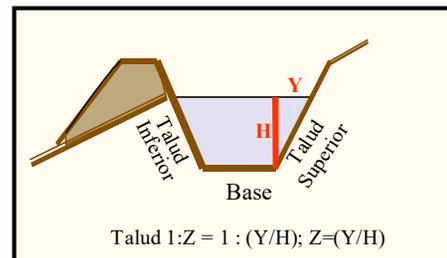
Material	Velocidad media (m/seg)
Suelo arenoso muy suelto	0.3 - 0.45
Arena gruesa o suelo arenoso suelto	0.45 - 0.6
Suelo arenoso promedio	0.6 - 0.75
Suelo franco arenoso	0.75 - 0.83
Suelo franco de aluvión o ceniza volcánica	0.83 - 0.9
Suelo franco pesado o franco arcilloso	0.9 - 1.2
Suelo arcilloso o cascajoso	1.2 - 1.5
Conglomerado, cascajo cementado, pizarra blanda, hard pan, roca sedimentaria blanda	1.8 - 2.4
Roca dura	3 - 4.5
Hormigón	4.5 - 6

DISEÑO CANAL

Obtenida entonces A_{min} , se debe comenzar a iterar para definir bien la sección transversal. Se supone entonces los valores de pendiente del canal y del radio hidráulico R_h (usando al menos A_{min}), iterándose mediante las ecuaciones de Manning:

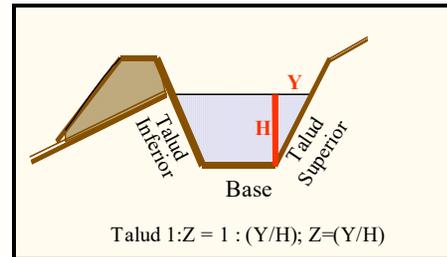
$$V = (R_h^{2/3} * S^{1/2}) / n \quad \text{y} \quad Q = (A * R_h^{2/3} * S^{1/2}) / n$$

El Q resultante debe ser mayor que el de escorrentía crítica; la V debe ser menor que la V_{max} .



$$r : \text{Radio - hidraulico} : \frac{\text{Area - transversal}}{\text{Perimetro - mojado}} : \frac{Ac}{(b + L_{sup} + L_{Inf})}$$

DISEÑO CANAL



$$r : \text{Radio - hidraulico} : \frac{\text{Area - transversal}}{\text{Perimetro - mojado}} : \frac{Ac}{(b + L_{\text{sup}} + L_{\text{Inf}})}$$

$$V = (R_h^{2/3} * S^{1/2}) / n$$

y

$$Q = (A * R_h^{2/3} * S^{1/2}) / n$$

V_c : Velocidad media del agua en el canal (m/seg)

Q_c : Caudal del canal en (m³/seg)

n : coeficiente de fricción (condición del canal Ver Tabla N°8)

r : radio hidráulico (área transversal del canal, en metros cuadrados dividida por el perímetro mojado, en metros; Ecuación N°15).

s : pendiente del canal.

A : Área del canal (como mínimo Ecuación N° 10) A min.

DISEÑO CANAL

Valores del coeficiente de fricción n (Suárez de Castro, 1979).

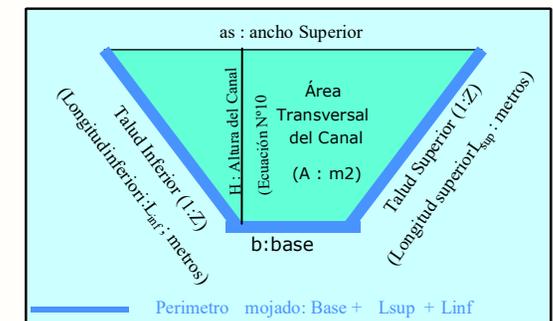
Valores de n Canales y Zanjas	Condición de paredes		
	Malo	Regular	Bueno
En tierras, alineados y uniformes	0.02	0.0225	0.025
En rocas lisos y uniformes	0.03	0.033	0.035
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.025	0.0275	0.03
Dragados en tierra	0.0275	0.03	0.033
Con lecho pedregoso y bordes de tierra enhierbados	0.03	0.035	0.04
Fondo (plantilla de tierra, taludes ásperos)	0.03	0.033	0.035

DISEÑO CANAL

No olvidar recomendaciones técnicas de CONAF:

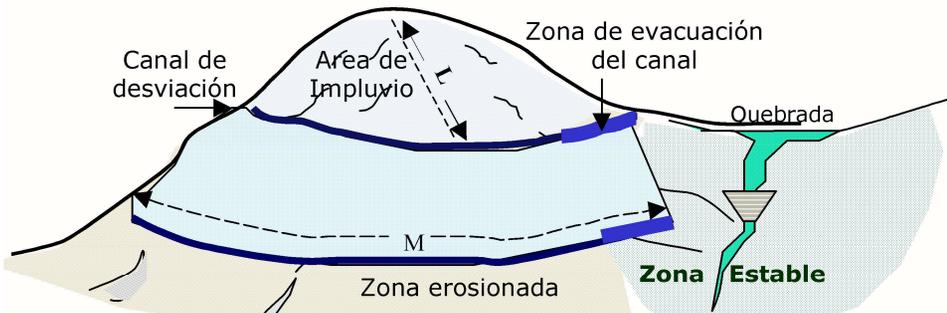
- Desnivel de 1% en contorno
- Trapezoidal; Base mínima de 0,2 m ; Altura mínima 0,3 m
- Pendiente taludes 1:1 (1:Y/H) (1:base/altura)
- Camellón aguas abajo (mismas dimensiones)
- 100 m máximo longitud
- Último tramo a nivel, sin camellón y sección un 25-35% mayor.

Terreno	Talud (Z)
Roca	Casi vertical
Turba	0,25
Arcilla y revestido de hormigón	0,5 - 1
Tierra	1
Suelo arenoso	2



• CALCULO CAUDAL

Esquema Canal de Desviación



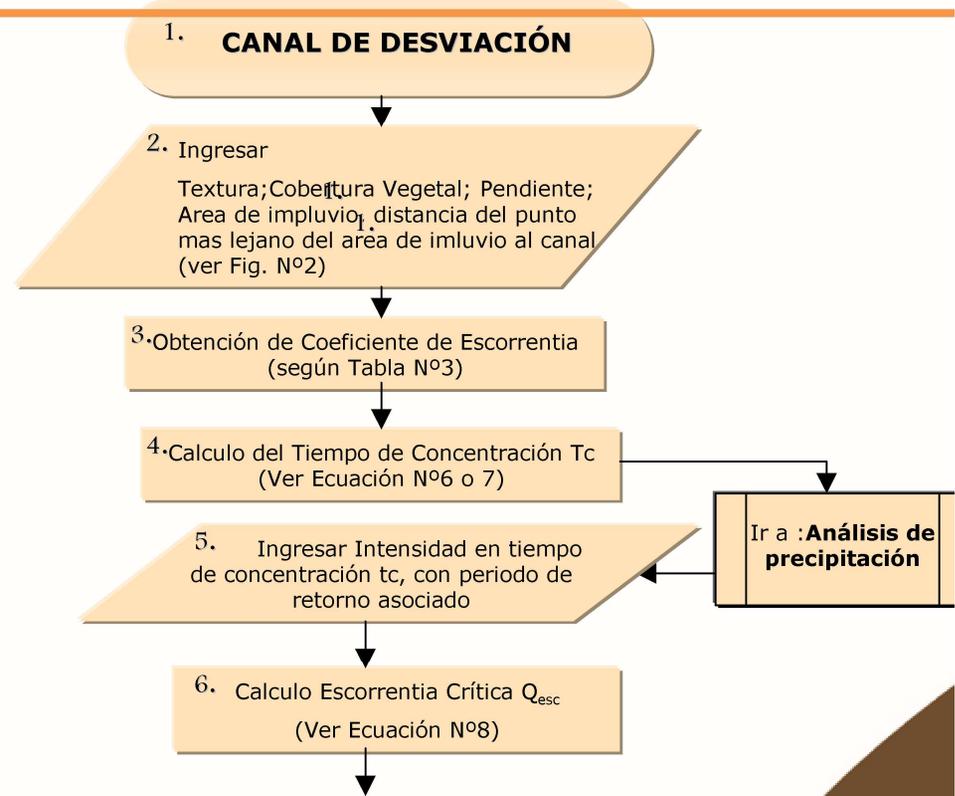
L : Distancia mas lejana de el área de impluvio al canal
M : Largo del Canal

$$Q_{esc} = \frac{C \times I \times A}{360}$$

C : Coeficiente de Escorrentia (Descripción de terreno)

I : Intensidad máxima (Curva IDF)

A: Area (Medición de terreno)

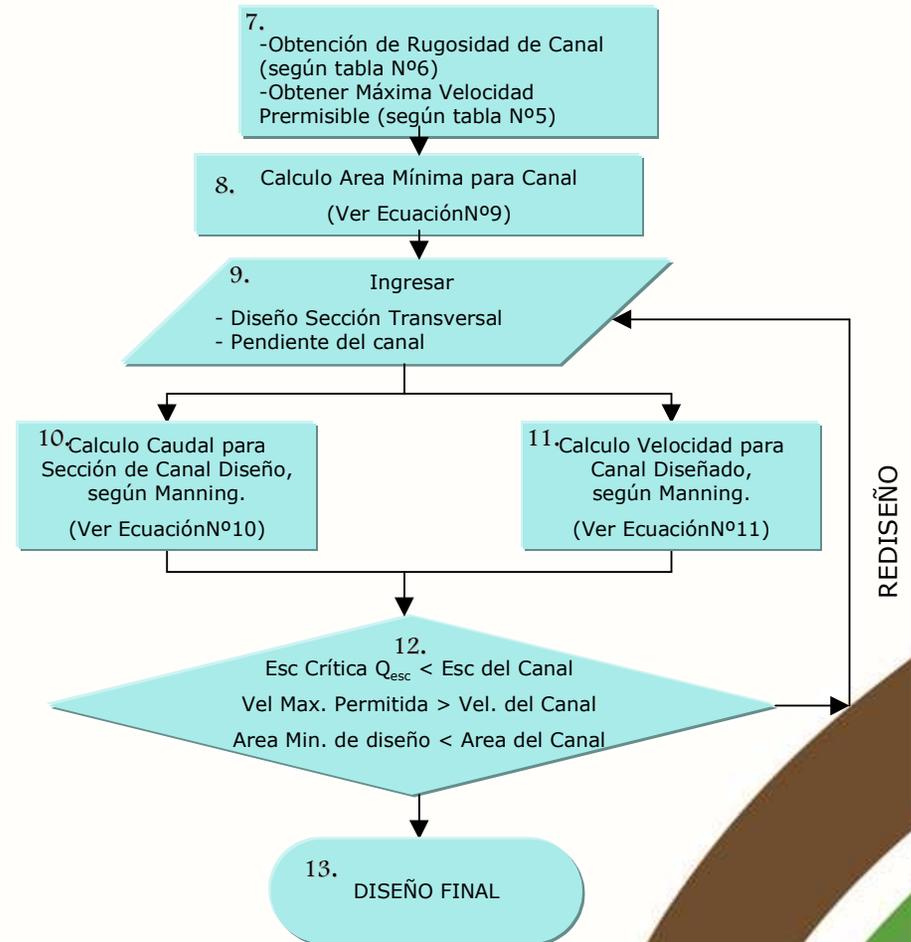


DISEÑO DE CANAL

$$A_{min} = \frac{V_{max}}{Q_{esc}}$$

$$Q = \frac{1}{n} ar^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} =$$

$$V = \frac{1}{n} r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} =$$



DISEÑO DE CANAL

Coef. Escorrentía 0.7 (porcentaje de precipitaciones a ocurrir)

INTENSIDAD DE LA LLUVIA : I

Calculo de Tiempo de Concentración (Giandotti)

A: Superficie en Km²

0.8

$$T = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{60}$$

DISEÑO DEL CANAL

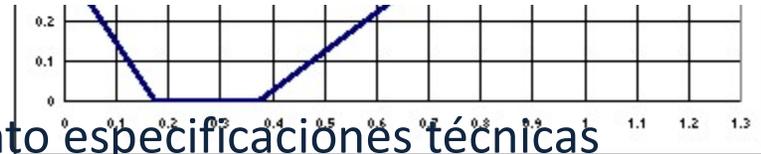
Longitud Canal de Desviación	Base (m)	Altura (m)	Ancho Superior (m)	Talud superior (sacar arriba)			Talud inferior (sacar al	
				1:2	Angulo (grados)	Longitud	1:2	Angulo (grados)

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS		CARACTERÍSTICA CANAL DISEÑADO		CONTROL	COMPROBACIÓN DE CONDICIONANTES TÉCNICAS	
Área Mínima (Q/V)	0.121	Área de diseño	0.162	ACEPTADO	Área Mínima	<
Q (esc. crítica): V (vel. Max. Permitida)	0.1457	Q caudal artimada	0.1517	ACEPTADO	Escorrentía Crítica (Mínima)	<
Caudal mínima del canal	1.2	V: Velocidad artimada	0.937	ACEPTADO	Máxima Velocidad (Vmax)	>
Máxima Velocidad permitida (seg. Tabla)						V: velocidad artimada

CALCULO CARAC. Y DIMENS. DEL CANAL

Verificación cumplimiento especificaciones técnicas

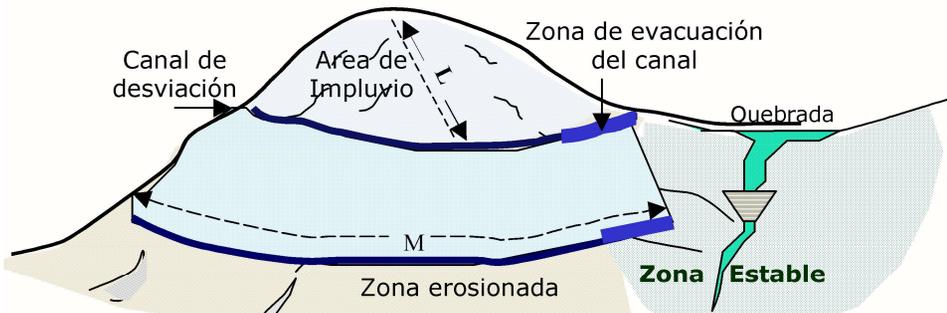


Q (m³/seg) Escorrentía crítica 0.1988

Dimensionamiento de canal de desviación
Ingreso de Información

• CALCULO CAUDAL

Esquema Canal de Desviación



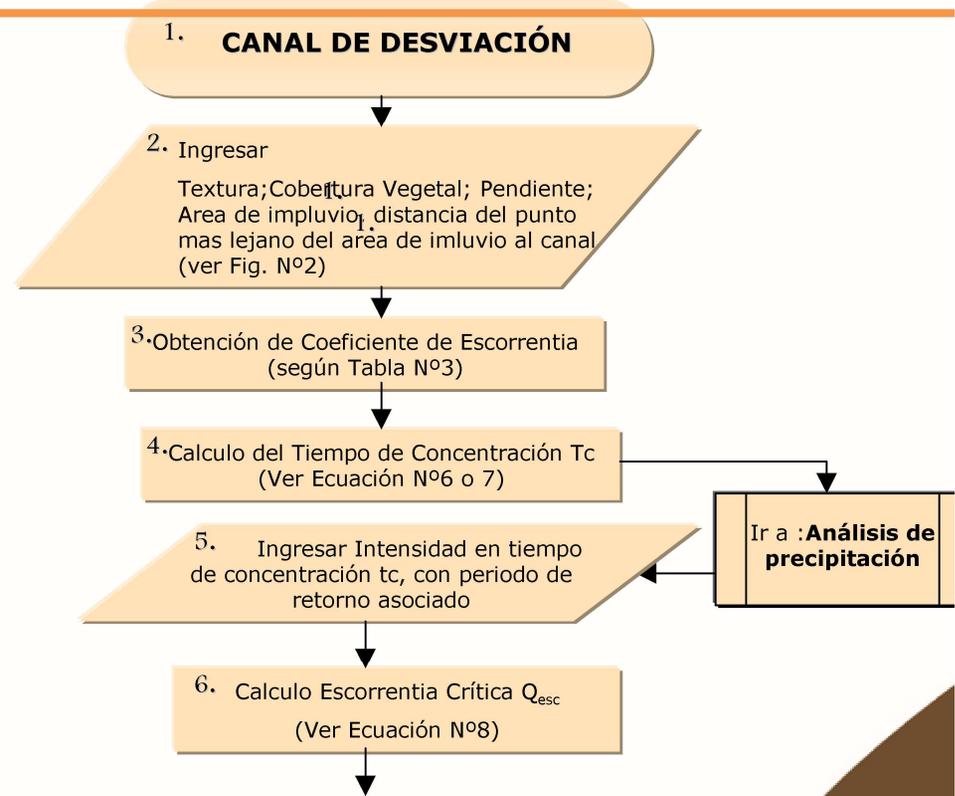
L : Distancia mas lejana de el área de impluvio al canal
M : Largo del Canal

$$Q_{esc} = \frac{C \times I \times A}{360}$$

C : Coeficiente de Escorrentia (Descripción de terreno)

I : Intensidad máxima (Curva IDF)

A: Area (Medición de terreno)

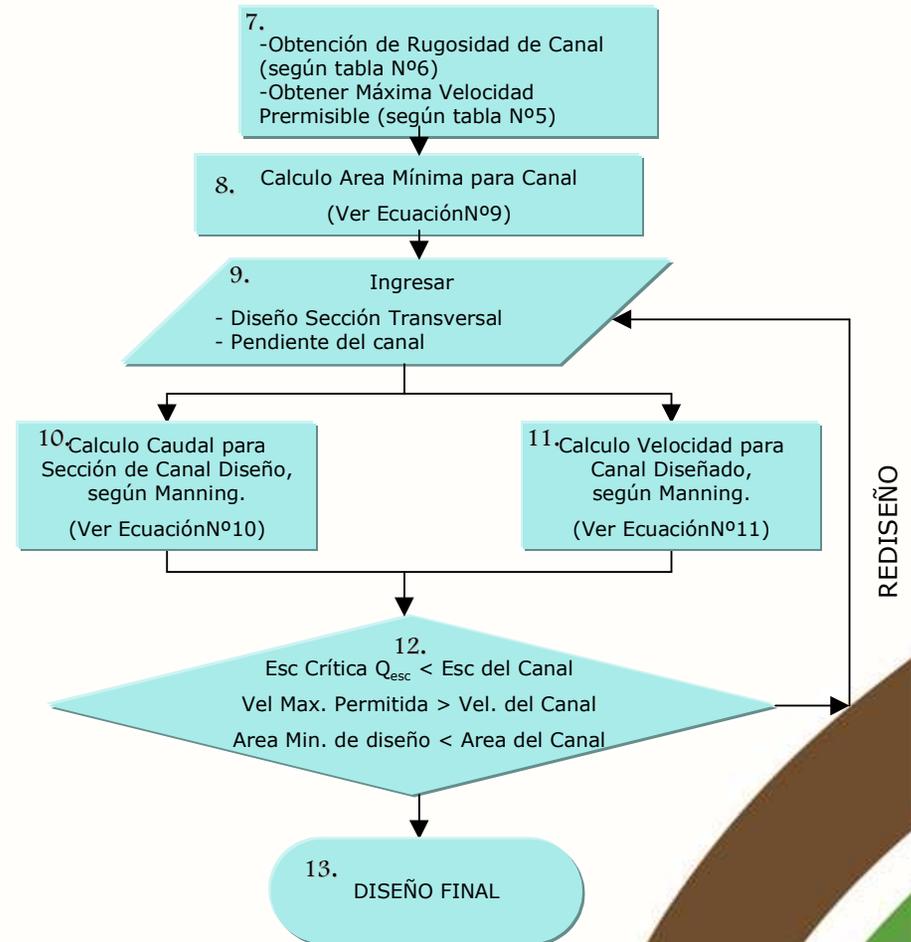


DISEÑO DE CANAL

$$A_{min} = \frac{V_{max}}{Q_{esc}}$$

$$Q = \frac{1}{n} ar^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} =$$

$$V = \frac{1}{n} r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} =$$



DISEÑO DE CANAL

Coef. Escorrentía 0.7 (porcentaje de precipitaciones a ocurrir)

INTENSIDAD DE LA LLUVIA : I

Calculo de Tiempo de Concentración (Giandotti)

A: Superficie en Km2

0.8

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{60}$$

para un coef. de precipitación

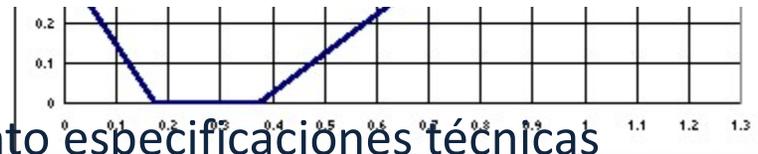
DISEÑO DEL CANAL

Longitud Canal de Derivación	Base (m)	Altura (m)	Ancho Superior (m)	Talud superior (sacar arriba)			Talud inferior (sacar el	
				1:2	Angulo (grados)	Longitud	1:2	Angulo (grados)

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

.565

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS		CARACTERÍSTICA CANAL DISEÑADO		CONTROL	COMPROBACIÓN DE CONDICIONANTES TÉCNICAS		
Área Mínima (Q/V)	0.121	Área de diseño	0.162	ACEPTADO	Área Mínima	<	Área de Diseño
Q (esc. crítica): V (vel. Max. Permitida)	0.1457	Q caudal artimada	0.1517	ACEPTADO	Escorrentía Crítica (Mínima)	<	Q caudal artimada
Caudal mínima del canal	1.2	V: Velocidad artimada	0.937	ACEPTADO	Máxima Velocidad (Vmax)	>	V: velocidad artimada



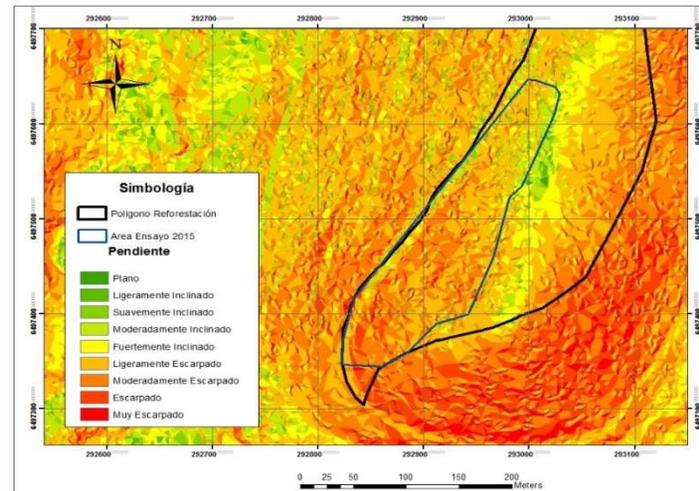
CALCULO CARAC. TÉCNICAS DEL CANAL

Verificación cumplimiento especificaciones técnicas

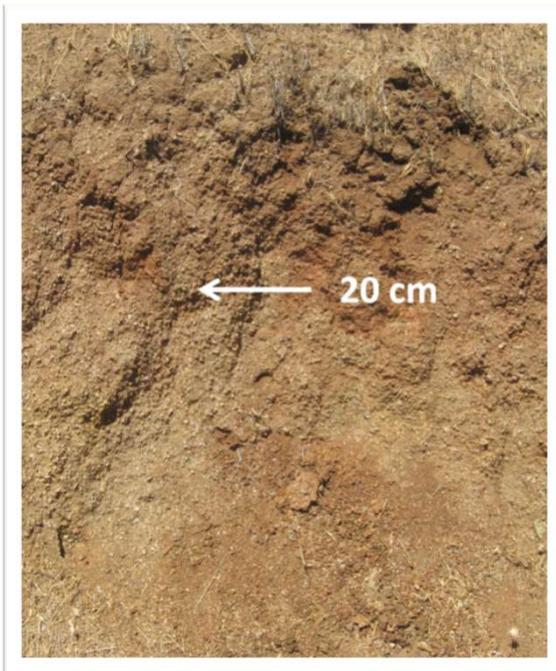
Q (m3/seg) Escorrentía crítica 0.1988

Dimensionamiento de canal de desviación
Ingreso de Información

DISEÑO DE OBRAS



DISEÑO DE OBRAS



Profundidad (cm)	Descripción)
0 – 20	Pardo en seco (7 YR 4/4), Pardo muy oscuro en húmedo (7 YR 2.5/3 franco arenoso con gravas, moderadamente adhesiva, moderadamente plástica, moderadamente duro y firme, estructura bloques subangulares medias a gruesas, raíces finas moderada, poros finos medios comuna pedregosidad ligera. Limite ondulado gradual.
> 20	Pardo amarillento oscuro en seco (10 YR 4/6), Pardo amarillento oscuro en húmedo (10 YR 3/6), franco arenoso con gravas, ligeramente adhesiva ligeramente plástica, moderadamente duro, moderadamente firme estructura bloques subangulares medios, raíces finas escasas, poros finos comunes, pedregosidad ligera.

DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN

$$P_{ef} = P_1^{10} * C$$

P_{ef} : Precipitación efectiva (o agua que efectivamente escurre superficialmente, mm); P_1^{10} : pp máxima en **1 hora** con T de 10 años (mm); C: coeficiente de escorrentía.

Recordemos las normas CONAF:

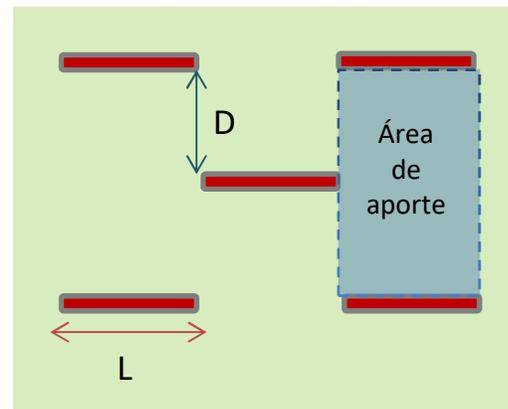
Zanjas continuas o en tresbolillo.

- Sección trapezoidal; Base mínima 0,2 m.; Altura mínima 0,3 m.; Taludes 1:1.
- Camellón aguas abajo, misma profundidad y ancho similar a sección superior.
- Largo entre 3 y 8 metros, si es en tresbolillo. Separación entre 0,7 y 7 m.
- Largo entre 5 y 15 metros, si es en continuo. Separación de tabique de 0,3 m.

A partir de esto, tenemos dos alternativas de cálculo:

1. Calcular el distanciamiento entre zanjas a partir del volumen de almacenamiento (requiere valores para longitud de zanja L (m); y área de la sección transversal (A_z)). El distanciamiento D (m) se calcula como:

$$D = 1000 * \frac{A_z}{L * P_{ef}}$$



DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN

2. Calcular las dimensiones de las zanjas a partir de un distanciamiento D pre-fijado :

$$A_z = \frac{D * P_{ef}}{1000}$$

Calculándose entonces el resto de los parámetros.

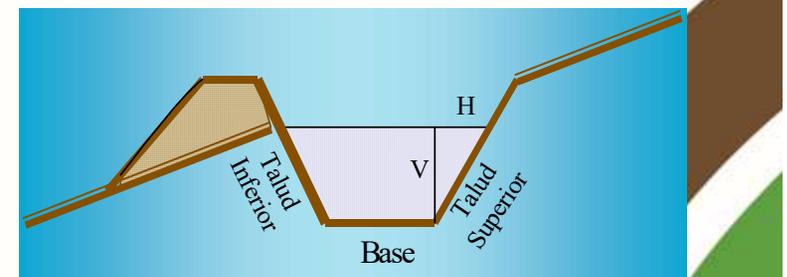
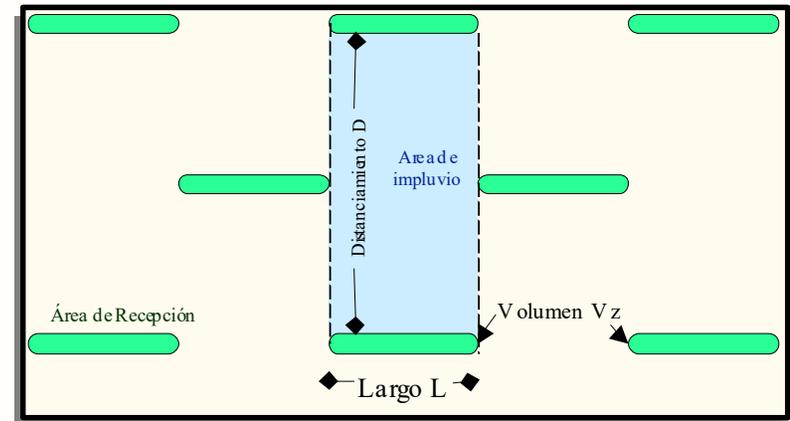
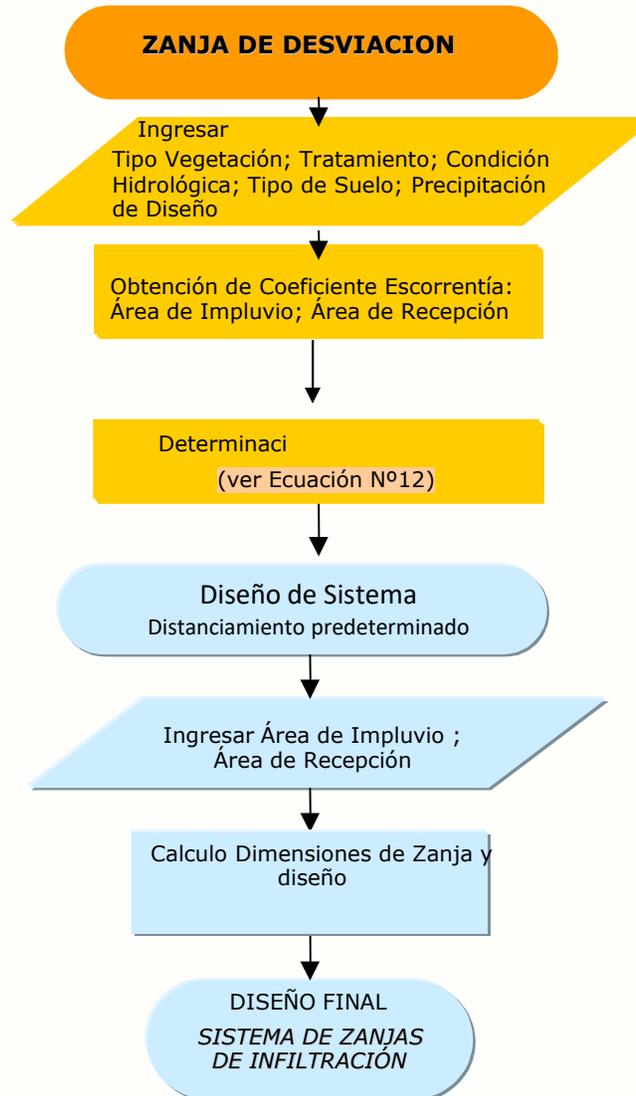
Taludes recomendables según naturaleza del material de excavaciones

Material	Inclinación de taludes 1:Z (Y/H)
Roca firme	1:1/4
Hard pan duro con fisuras	1:1/2
Grava cementada, arcilla y hard pan ordinario	1:3/4
Arcilla con grava, suelos francos	1:1
Limo arcilloso	1:1
Suelos francos arenosos	1:2
Suelos muy arenosos	1:3

Ejemplo: Calcular las dimensiones de zanjas para controlar escorrentía producida en la zona de Cachapoal, en terrenos de cultivo, con permeabilidad moderada, con 15% de pendiente. El distanciamiento entre zanjas será de 5 metros y la longitud de 8 metros. ¿Cuántas requiere por hectárea?.



DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN



Determinación Coeficiente de Escorrentía

CI : Coeficiente Área Impluvio
CR : Coeficiente Área de Recepción

Martínez de Azagra, A. 2006 Método de los coeficiente de escorrentía:
Mauco Generalizado. Documento inedito. 29 p. Universidad de Valladolid. España.

Coeficiente de Escorrentía

$$C = \frac{E_s}{P}$$

Escorrentía Superficial

$$E_s = \frac{(P - P_o)^2}{P + 4 * P_o}$$

P0 (es función del
numero de curva)

$$P_0 = 0.2 * \left(\frac{25400 - 254 * N}{N} \right) = \frac{5080 - 50.8 * N}{N}$$

Coeficiente de Escorrentía
(en función del numero de curva)

$$C = \frac{(P - P_o)}{P^2 + 4 * P * P_o} = \frac{\left(P - \frac{5080 - 50.8 * N}{N} \right)^2}{P^2 + P * \left(\frac{20320 - 203.2 * N}{N} \right)}$$

si $P_d > P_0$

Determinación Coeficiente de Escorrentía

CI : Coeficiente Área Impluvio
CR : Coeficiente Área de Recepción

Martínez de Azagra, A. 2006 Método de los coeficiente de escorrentía:
Mauco Generalizado. Documento inedito. 29 p. Universidad de Valladolid. España.

Tipo de Vegetación

Tratamiento

Condición Hidrológica

Tipo de Suelo

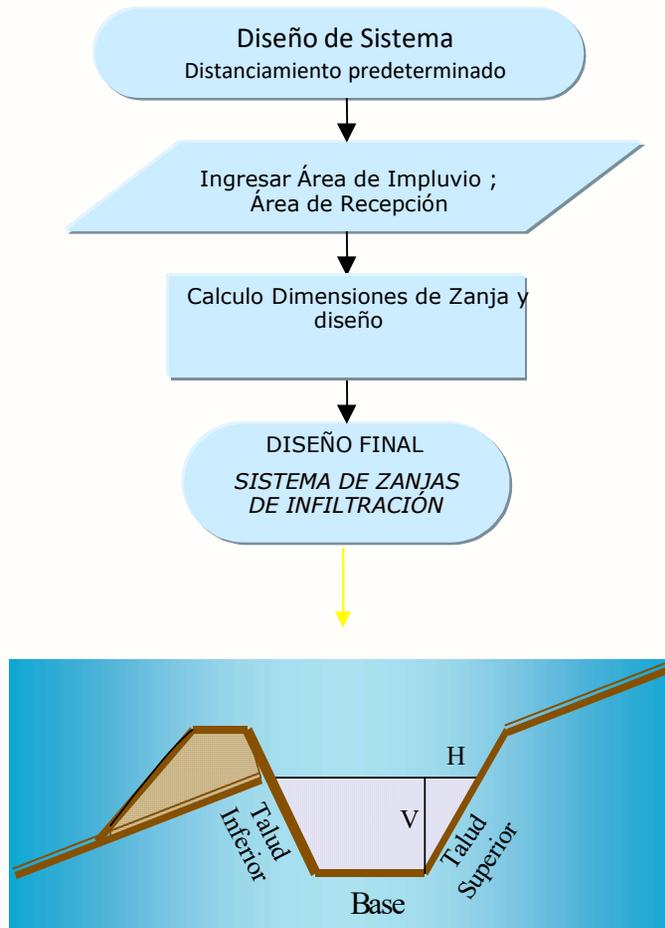
Se basa en una combinación de factores que afectan a la
Cultivos Alineados
Pastizales
Matorrales
Bosques...

ir
L
v
C
P
C



aterrazados

Zanjas de Infiltración



$$V_z = P_d * (CI * S_1 + CR * S_2)$$

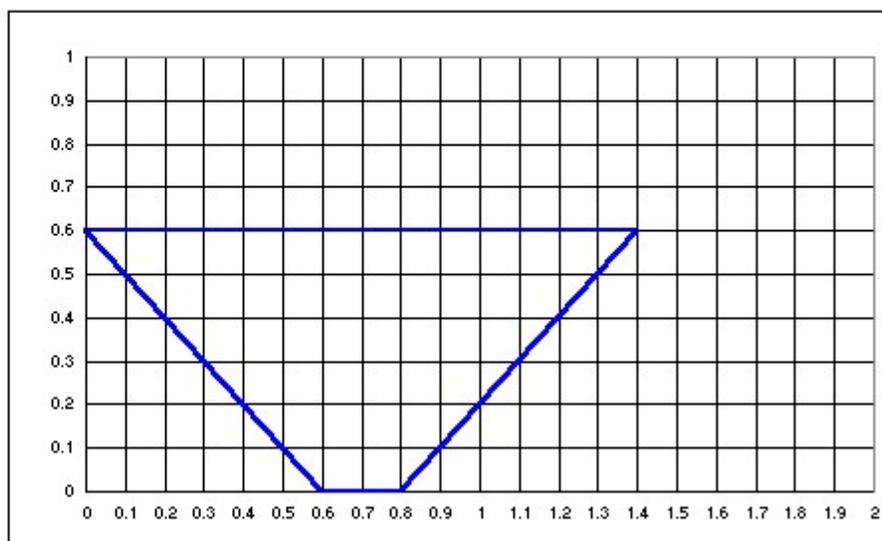
$$A_z = P_d * (CI * d + CR * a_s)$$

Diseño de Zanjas de Infiltración

Determinación de la longitud de la zanja

Longitud Zanjas de Infiltración	Base (m)	Altura (m)	Ancho Superior (m)	Talud superior (aguas arriba)			Talud inferior (aguas abajo)		
				1:Z	Angulo (grados)	Logitud	1:Z	Angulo (grados)	Logitud
3	0.20	0.60	1.400	1.0	45.000	1.131	1.0	45.000	1.131

Área Zanja de Desviación Sección Transversal (m ²)	0.640
Volumen Zanja de Desviación (m ³)	1.92



Talud Inferior 1:Z=(Y/H) 1

Talud Superior 1:Z=(Y/H) 1

Ingreso de Información

Diseño de Zanja de Infiltración

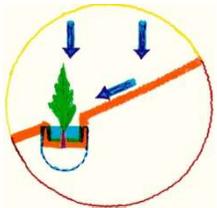


Convenio de Colaboración
Mº de Medio Ambiente – Universidad de Valladolid



Presentación del modelo hidrológico MODIPÉ

Andrés Martínez de Azagra Paredes
Catedrático de Hidráulica e Hidrología Forestal
Dr. Ingeniero de Montes



Trabajo desarrollado para del Proyecto LUCDEME

(Palencia, octubre de 2005 // revisado en enero de 2012 para Campina Grande)

www.oasificacion.com

Ideas generales sobre el modelo

- MODIPÉ: Acrónimo de **MOD**ificación de **P**recipitaciones por **E**scorrentía
- MODIPÉ: Es un modelo sobre recolección de agua basado en el método del número de curva.
- MODIPÉ estima la infiltración (o disponibilidad hídrica) en una ladera degradada antes y después de la intervención proyectada.
- MODIPÉ distingue entre zonas receptoras y exportadoras de escorrentía (áreas de recepción y de impluvio, respectivamente), promediando la infiltración de ambas zonas.
- MODIPÉ contempla la posibilidad de crear trampas de agua en la ladera para que las unidades sistematizadas puedan retener toda la lluvia y escorrentía que produzca el aguacero de cálculo. Objetivo: conseguir endorreísmo
- MODIPÉ permite analizar tres tipos de aguacero de cálculo: un único chubasco, una serie de aguaceros o un año característico
- MODIPÉ está especialmente indicado para el diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas o semiáridas.
- MODIPÉ sirve a la arboricultura de secano, a la viticultura y a la selvicultura en montes protectores, cuando la conservación de aguas, nutrientes y suelos resulte prioritaria.



¿Para qué sirve MODIPÉ?

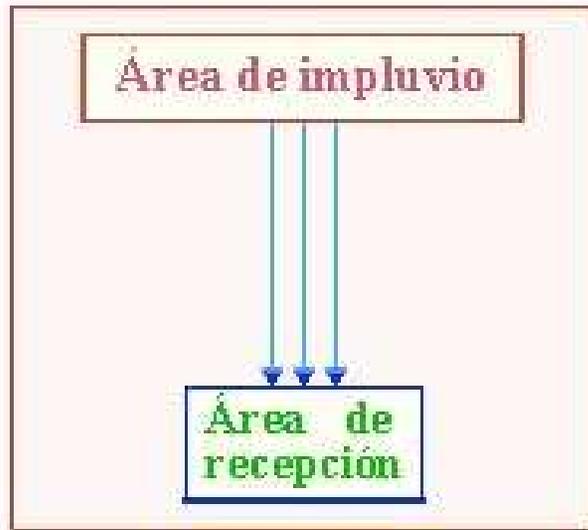
- Para establecer unas pautas razonadas en el diseño de la preparación del suelo (Ingeniería de detalle), respondiendo a las siguientes preguntas:
- ¿Conviene perfilar una sistematización primaria en la ladera a restaurar?
 - ¿Tiene que ser plena o puede ser incompleta la sistematización primaria?
 - ¿Cuánta agua recolecto en el área de recepción?
 - ¿Qué relación de tamaños (área de impluvio/área de recepción; S_1/S_2) debo elegir para conseguir una determinada cantidad de agua en el área de recepción?
 - ¿Qué densidad de plantación satisface las necesidades hídricas objetivo?
 - ¿Qué tamaño debo dar a los alcorques (**CAPA**) y a los caballones (**H**) para conseguir endorreísmo?
 - ¿Qué tolerancias son admisibles? - ¿Qué precisión conviene exigir?
 - ¿Qué riesgo/garantía tiene la intervención en cuanto a disponibilidades hídricas?

BASES E HIPÓTESIS DEL MODELO

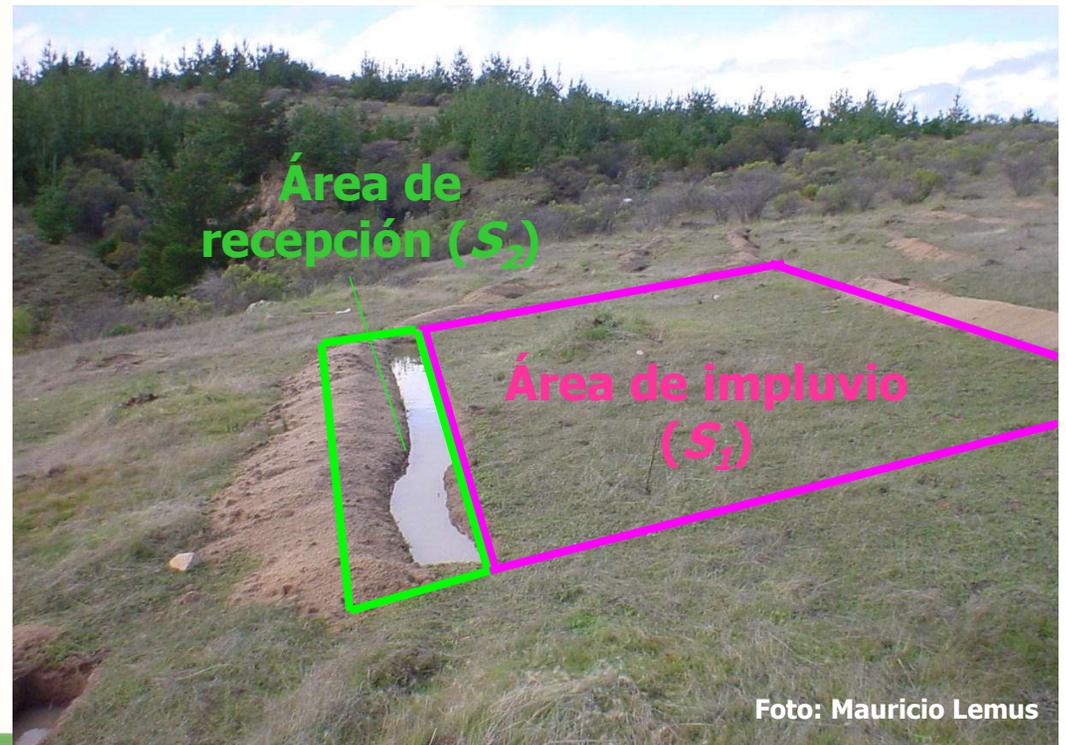
- La interceptación (I_t) y la evaporación directa (E) son magnitudes desdeñables en terrenos degradados y yermos.
- Con el método del número de curva se puede estimar la infiltración, como diferencia entre la precipitación caída y la escorrentía superficial generada: $I \approx P - E_s$
- Cada unidad sistematizada se divide en dos partes: el área de impluvio y el área de recepción: $S = S_1 + S_2$
- Las unidades sistematizadas se suponen independiente entre sí.
- Interesa que las unidades sistematizadas funcionen como cuencas endorreicas (recolección y economía del agua)



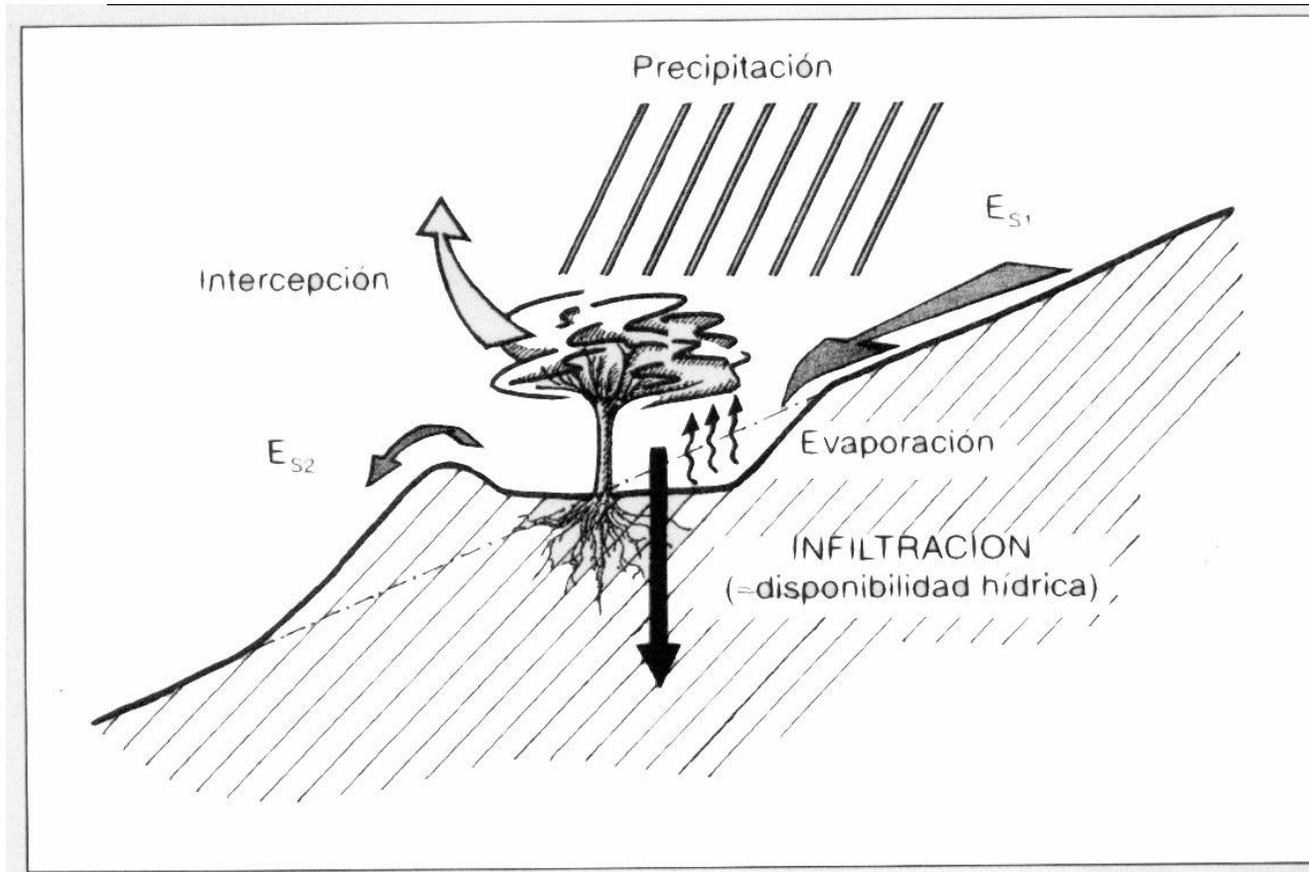
Área de impluvio y área de recepción



Zanja de infiltración



BALANCE HÍDRICO DE PARTIDA



$$I = P + E_{s1} - E_{s2}$$

Ecuaciones generales

$$ANTES = P - \Delta Es$$

$$PIMP = P - E_{S1}$$

$$DESP = P + E_{S1} - E_{S2}$$

$$PROM = \frac{S_1 \cdot PIMP + S_2 \cdot DESP}{S_1 + S_2}$$

P = Precipitación del aguacero analizado

$ANTES$ = Disponibilidad hídrica en la ladera degradada

ΔEs = Escorrentía superficial sin sistematización (ladera degradada)

$DESP$ = Disponibilidad hídrica del área de recepción

$PIMP$ = Disponibilidad hídrica del área de impluvio

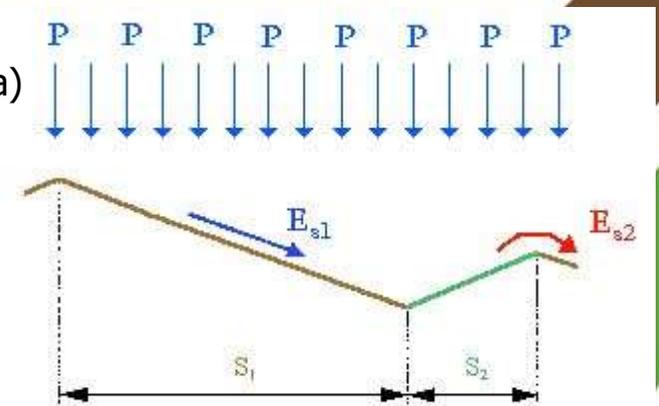
$PROM$ = Disponibilidad hídrica media de la ladera

E_{S1} = Escorrentía superficial que se produce en S_1

E_{S2} = Escorrentía superficial que escapa de la ud. sistematizada

S_1 = Superficie correspondiente al área de impluvio

S_2 = Superficie del área de recepción



MODIPÉ & Método del Número de Curva

- Las ecuaciones generales de la diapositiva anterior se han particularizado para el método del número de curva (por su gran sencillez y su amplia validez).
- La elección de los números de curva de la ladera a restaurar se realiza a partir de las tablas convencionales del método, o a través del programa informático NUMCUR.
- El número de curva (**N**) siempre está comprendido entre 0 y 100.
- Números de curva altos implican escorrentías elevadas (es decir: infiltraciones bajas).
- Números de curva bajos aseguran bajas escorrentías superficiales y altas infiltraciones.
- El número de curva (**N**) de un complejo hidrológico depende de:
 - Tipo de cubierta vegetal (**CV**)
 - Tratamiento (o explotación del terreno) (**TT**)
 - Condiciones hidrológicas de la superficie del suelo (**HH**)
 - Tipo de suelo (**TS**) {**A, B, C, D** // 4 tipos de suelo}
 - Grado de humedad antecedente (**J**) {**1, 2, 3** // 3 posibilidades}

$$N = F(CV, TT, HH, TS, J)$$



Método del Número de Curva

$$E_s = \frac{(P - P_0)^2}{P - P_0 + S}$$

E_s = escorrentía superficial; P = precipitación del chubasco; P_0 = umbral de escorrentía; S = retención máxima posible

Si se admite que $P_0 = 0,2 \cdot S$ se llega al modelo uniparamétrico habitual:

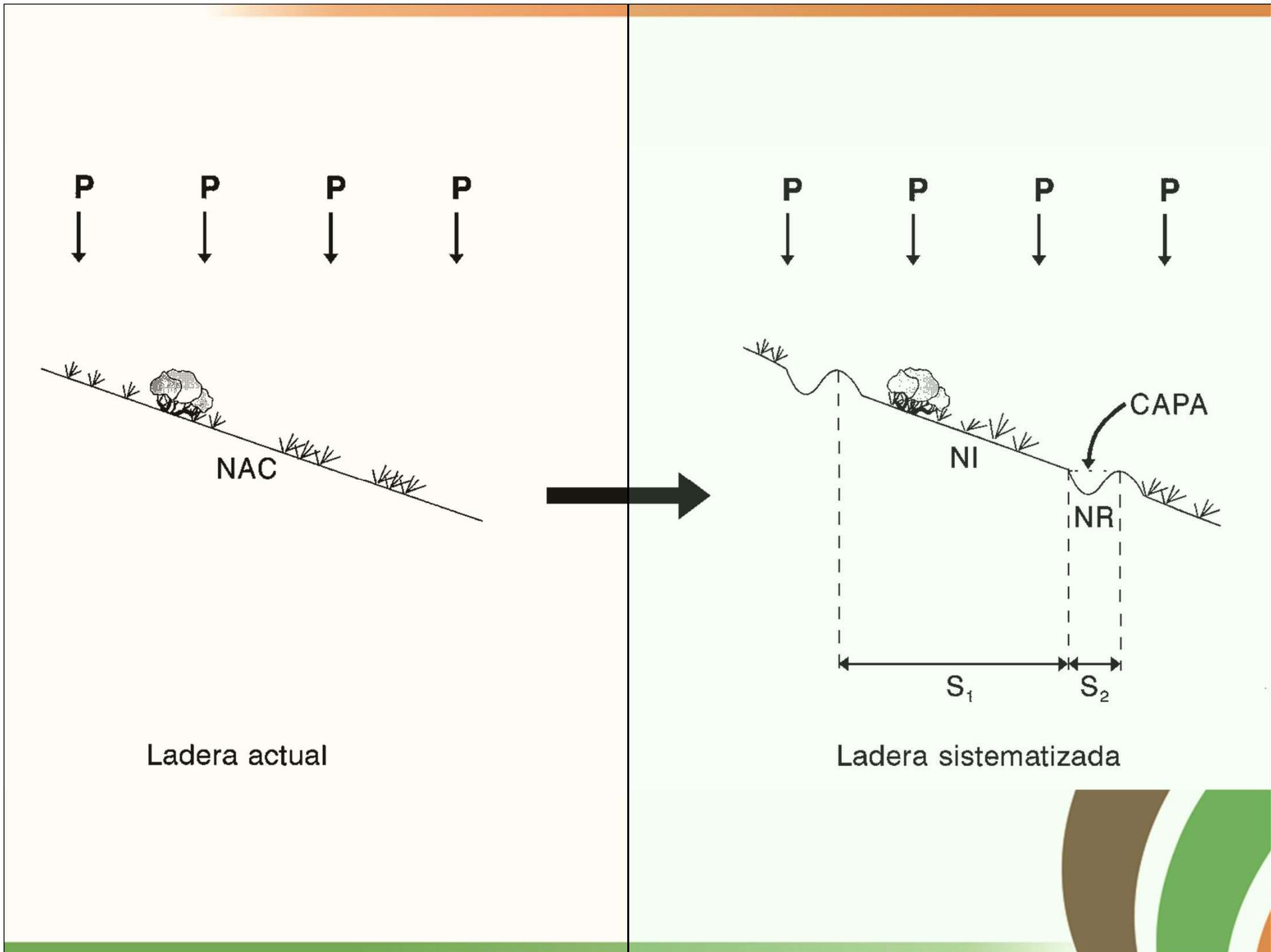
$$E_s = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \Leftarrow \quad !!$$

con $P_0 = \frac{5.080 - 50,8 \cdot N}{N}$ y N = número de curva (tablas o NUMCUR)



Datos de entrada del modelo

- Número de curva de la ladera actual: NAC
 - Área de impluvio: S_1
 - Área de recepción: S_2
 - Número de curva del área de impluvio: NI
 - Número de curva del área de recepción: NR
 - Capacidad de embalse: $CAPA$
 - Datos sobre precipitaciones: P
- 



Número de curva de la ladera actual (NAC)

Nota : El número de curva puede tomar valores comprendidos entre 0 y 100.

NAC se deduce a partir de tablas.

$NAC = 0 \Rightarrow$ El terreno es totalmente permeable, no escurre agua ante ninguna lluvia.
Situación extrema teórica (pues $NAC \geq 6$)

$NAC \approx 100 \Rightarrow$ El terreno es totalmente impermeable, por ejemplo: tejados, carreteras



Ladera degradada; en claro proceso de desertificación :

Según tablas: ¡ NAC \approx 90 !

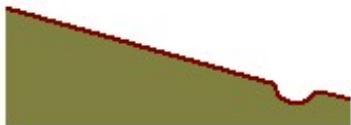
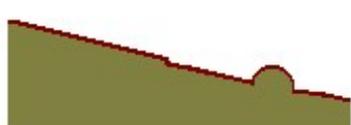
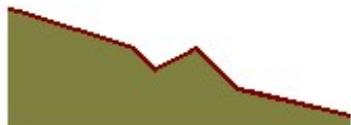
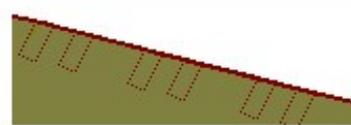
Tabla general del número de curva (considera que $J = 2$; condiciones medias de humedad)

TIPO DE VEGETACIÓN	TRATAMIENTO	CONDICIÓN	TIPO DE SUELO			
		HIDROLÓGICA	A	B	C	D
Barbecho	Desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93
	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	...	...	...	...	...	...
Cultivos no alineados	...	...	...	...	...	...
Cultivos densos de leguminosas	...	...	...	...	...	...
Pastizales o pastos naturales	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
Pastizales	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	-	Pobres	48	67	77	83
	-	Regulares	35	56	70	77
	-	Buenas	≤ 30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	-	Pobres	57	73	82	86
	-	Regulares	43	65	76	82
	-	Buenas	32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastorales)	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
Bosques	-	I Muy pobre	56	75	86	91
	-	II Pobre	46	68	78	84
	-	III Regular	36	60	70	76
	-	IV Buena	26	52	63	69
	-	V Muy buena	15	44	54	61

Elección de los números de curva para la unidad sistematizada

- Los números de curva del área de impluvio (NI) y del área de recepción (NR) se obtienen en función de la preparación del suelo que proyectemos, y del tempero que tenga el terreno al realizar la intervención.
- Como punto de partida para fijar NI y NR , debemos considerar el número de curva de la ladera actual (NAC).
- La situación más favorable para la economía del agua se produce cuando se verifican las siguientes desigualdades:
$$NAC > NR \quad \text{y} \quad NI > NR \quad \text{y} \quad NI < NAC$$
- En las situaciones en que el número de curva del área de recepción resulte mayor que el número de curva del área de impluvio el perfilado de alcorques es obligado (pues de lo contrario se invertirán las tornas).

Relaciones entre los números de curva ($NI - NR - NAC$) para diferentes preparaciones del terreno

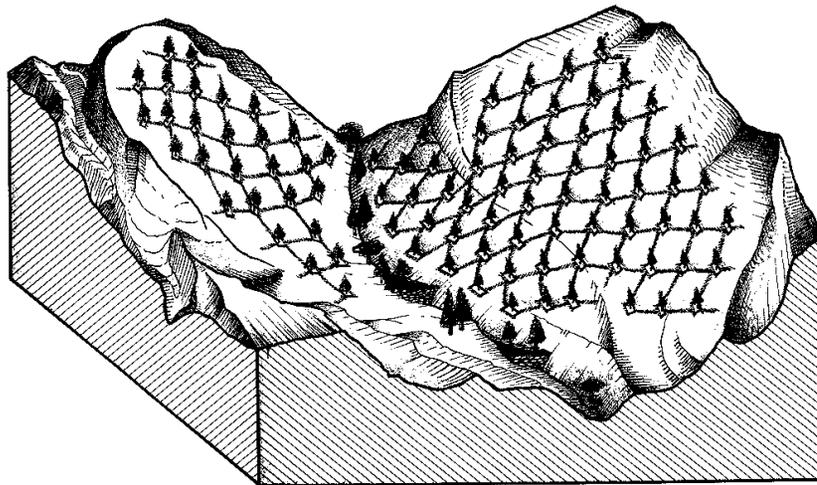
LABOR	ESQUEMA	NÚMERO DE CURVA	CAPA
Ladera inalterada		$NI = NR = NAC$	0
Ahoyado con alcorque; Microcuencas		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Acab allonado según curvas de nivel; Subsolado con rejón modificado		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Acab allonado superficial		$NI > NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Aterrazado en contrapendiente		$NI > NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Zanja de infiltración		$NI = NAC$ $NR \neq NAC^1$	> 0
Subsolado lineal; Subsolado pleno		$NI = NAC$ $NR < NAC^2$	≈ 0
Laboreo pleno según curvas de nivel		$NI = NR > NAC^3$	≈ 0

¹ A falta de ensayos de campo y para estar del lado de la seguridad: $NR > NAC$
² En litosuelos y estando el terreno seco (a tempero)
³ El efecto hidrológico global es negativo, pues el aumento del número de curva predomina sobre CAPA (≈ 0)

Identificación de los datos de entrada

Ejemplo: microcuencas

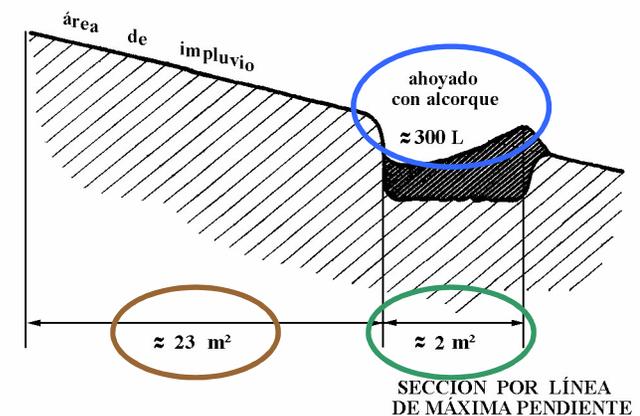
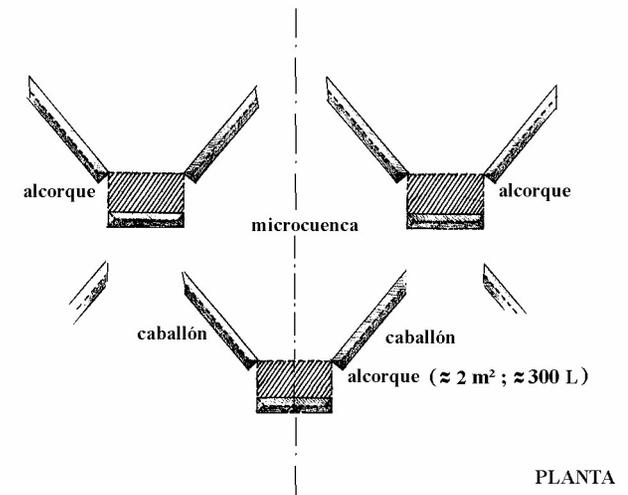
ASPECTO DE LA PREPARACIÓN DEL TERRENO



Área de impluvio S_1

Área de recepción S_2

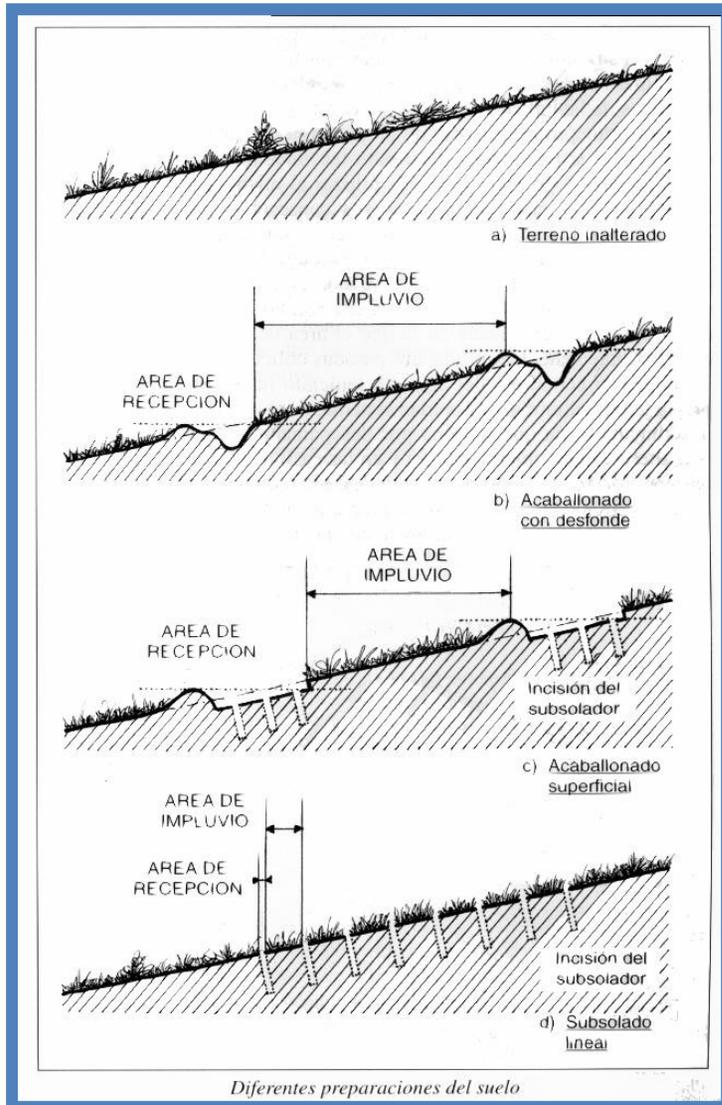
Capacidad del microembalse



INDIVIDUALIZACIÓN DE UNA MICROCUENCA

Diferentes preparaciones del suelo

Identificación de las áreas de impluvio y recepción



BARBECHO CON SURCO



MICROTERRAZA FORESTAL

SUBSOLADO CON CABALLÓN



Fotos: Mauricio Lemus

Resultados de MODIPÉ

- Resultado principal: las **disponibilidades hídricas** que origina un aguacero (o una serie de aguaceros) ...
 - en la ladera actual (**ANTES**)
 - en la ladera sistematizada:
 - en el área de impluvio (**PIMP**)
 - en el área de recepción (**DESP**)
 - en las dos áreas (de promedio) (**PROM**)
- Otros resultados importantes:
 - Umbrales de escorrentía y números de curva asociados (para las tres condiciones de humedad que contempla el número de curva)
 - Tamaño mínimo del microembalse para lograr endorreísmo



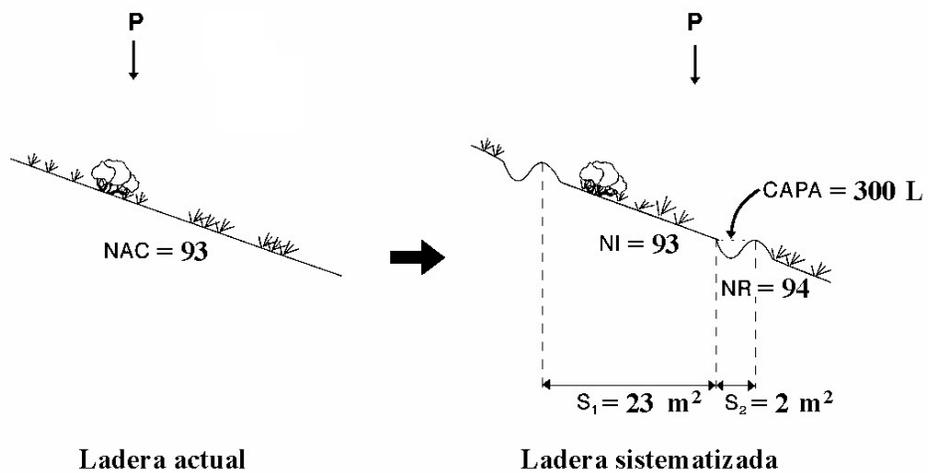
Ejemplo ilustrativo

- **Situación actual:**
Pasto natural pobre y muy degradado sobre un litosuelo arcilloso : $NAC = 93$
- **Situación objetivo (en 50 años):**
Dehesa arbolada (con 250 a 400 árboles/ha) \Rightarrow proceso de oasificación
Número de curva objetivo: $N_{futuro} \approx 70$ (monte con pastos en buenas condiciones hidrológicas bajo suelo de tipo C) \Rightarrow Serie progresiva de N : $93 \rightarrow \rightarrow \rightarrow 70$
- **Intervención proyectada:**
Microcuencas de 25 m² (sistematización completa)
 - Ahoyado formando una banqueta de 2 m² ($S_2 = 2$ m²)
 - Alcorque con 300 L de capacidad mínima ($CAPA = 300$ L)
 - Área de impluvio de 23 m² ($S_1 = 23$ m²) con caballones guía para conducir la escorrentía
 - Número de curva del área de impluvio, similar al de la ladera actual: $NI \approx 93$
 - Número de curva del área de recepción: $NR = 94$ (correspondiente a un barbecho desnudo y suelo de tipo D)

Nota: Se ha elegido un número de curva mayor ($NR > NAC$) para estar del lado de la seguridad en el diseño. En realidad, una buena preparación del suelo reducirá el número de curva del área de recepción ($NR < NAC$).
 - Plantación de encinas, quejigos y jerbos con tubos protectores (400 plantas/ha)
- **Aguacero de cálculo: $P = 30$ L/m² (correspondiente a una tormenta primaveral con periodo de retorno de 10 años) y condición de humedad inicial del suelo: media ($J = 2$)**



Datos de entrada del ejemplo



Datos de entrada de MODIPÉ

Métodos de preparación del terreno --->

Datos de la sistematización del terreno

Nº de curva de la ladera actual en condición II: [Tablas de N](#)

Área de impluvio (m²):

Área de recepción (m²):

Área de impluvio

Simple

Formada por más de un complejo hidrológico

Nº de curva del área de impluvio en condición II:

Nº de curva del área de recepción en condición II:

Capacidad de embalse del área de recepción (l):

Cálculos

Resultados de MODIPÉ: Números de curva y umbrales de escorrentía

Relación entre los números de curva

NAC = NI	Ladera actual y área de impluvio presentan la misma escorrentía
NAC < NR	Ladera actual tiene un umbral de escorrentía MAYOR que el área de recepción
NAC < N	Ladera actual tiene un umbral de escorrentía MAYOR que la unidad sistematizada
NI < NR	Área de impluvio con MAYOR capacidad de infiltración que el área de recepción [2]

La creación de trampas de agua resulta indispensable.

NAC: Número de curva de la ladera actual
 NI: Número de curva del área de impluvio
 NR: Número de curva del área de recepción
 N: Número de curva promedio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto del alcorque

Resultados

	S (m ²)	N1	PO(1) (mm)	N2	PO(2) (mm)	N3	PO(3) (mm)
Ladera actual	----	84,8	9,1	93,0	3,8	96,8	1,7
Área de Impluvio	23,000	84,8	9,1	93,0	3,8	96,8	1,7
Área de Recepción	2,000	86,8	7,7	94,0	3,2	97,3	1,4
Unidad Sistematizada	25,000	56,6	39,0	66,2	26,0	72,6	19,2

- Con que lluevan 3,8 L/m² en condiciones medias de humedad se produce escorrentía en el pastizal degradado (PO(2) = 3,8 mm).
- Con las microcuencas proyectadas, han de caer más de 26 L/m² para superar la precipitación límite y que se pierda parte de la lluvia por escorrentía superficial.

Chubasco de 30 L/m² ($P = 30$ mm)

Condiciones medias de humedad en el suelo ($J = 2$)

Los resultados que ofrece el modelo MODIPÉ son los siguientes:

Aguacero aislado

Datos

Precipitación del aguacero (mm):

Condición previa de humedad en el suelo:

Calcular

Datos Resumen

Anterior

Resultados

Precipitación disponible sin sistematización (l/m ²):	14,9
Precipitación disponible en la banqueta con sistematización (l/m ²):	163,3
Precipitación promedio en la ladera sistematizada (l/m ²):	26,7
Precipitación disponible en el área de impluvio (l/m ²):	14,9
Precipitación máxima disponible en la banqueta con alcorque (l/m ²):	204,0
Capacidad mínima del alcorque para retener toda la escorrentía de una unidad sistematizada (l):	381,3
Altura mínima de las represas del alcorque (mm):	190,6
Precipitación máxima disponible en la banqueta (área de impluvio impermeable y alcorque de tamaño adecuado) (l/m ²):	375,0
Capacidad del alcorque para recoger toda la escorrentía del área de impluvio (si fuese impermeable) (l):	690,0

Interpretación rápida de los resultados

← ¡Se pierden 15,1 mm por escorrentía! ($30 - 14,9$)

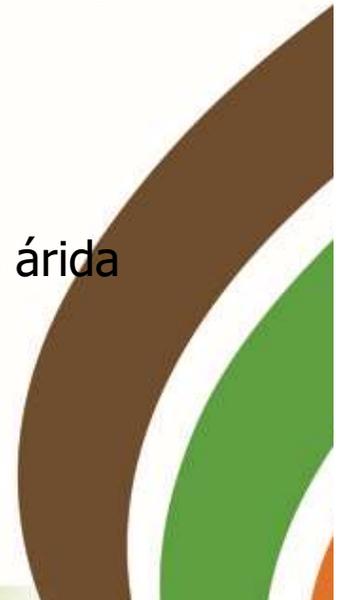
← ¡Se obtiene una sustanciosa cosecha de agua.

← No se aprovecha toda la lluvia:

$PROM = 26,7$ mm < $P = 30$ mm, pues la trampa de agua proyectada es inferior a la necesaria: $CAPA = 300$ litros; frente a los 381,3 litros calculados por MODIPÉ.

Algunas utilidades de MODIPÉ

- 1) Caracterizar microclimas de ladera
- 2) Comprender los procesos de desertificación por aridez edáfica
- 3) Simular el comportamiento hidrológico de una unidad sistematizada
- 4) Diseñar preparaciones del suelo y evaluar su efecto hídrico
- 5) Calcular el volumen mínimo de tierras a remover en una ladera degradada para propiciar su oasisificación
- 6) Progresar en el desarrollo de la Ecohidrología
- 7) Tecnificar el sector forestal de las repoblaciones forestales en zona árida





Convenio de Colaboración
Mº de Medio Ambiente - Universidad de Valladolid



Dirección General
para la Biodiversidad

Proyecto
LUCDEME

MODELO SOBRE RECOLECCIÓN DE AGUA PARA LA RESTAURACIÓN FORESTAL

MODIPÉ

(Modificación de Precipitaciones)



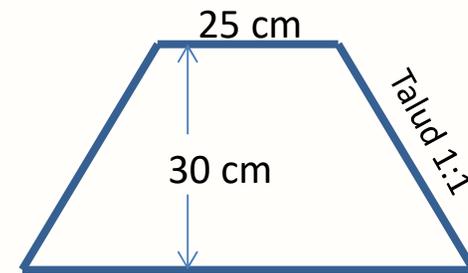
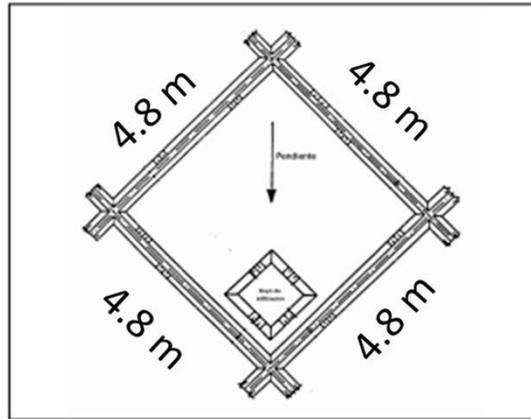
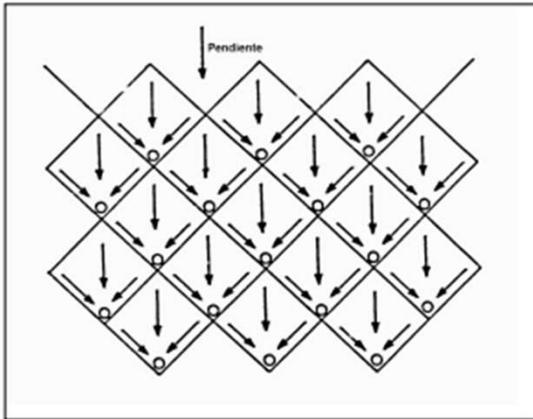
Autor: **Andrés Martínez de Azagra Paredes**

Programación: **José Miguel Hospital Villacorta**
Andrés Martínez de Azagra

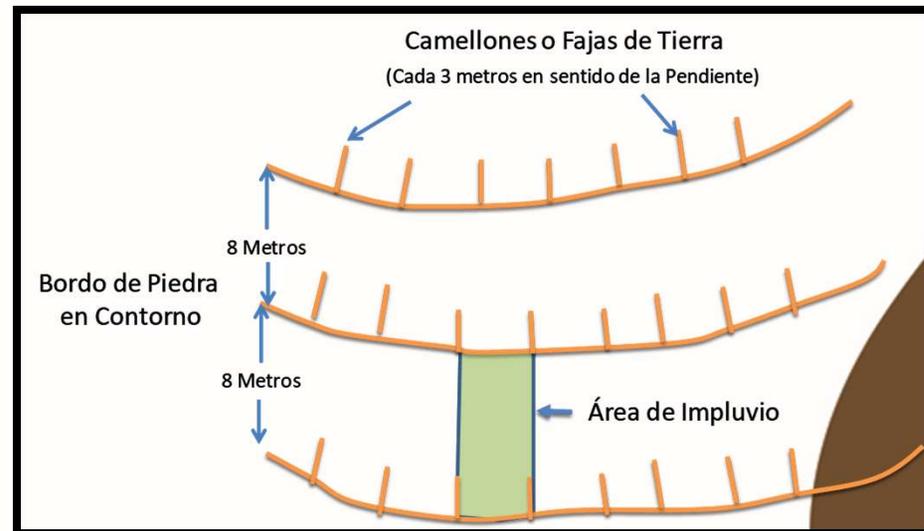
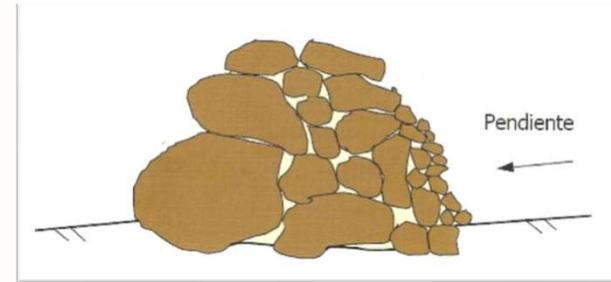
Año 2004

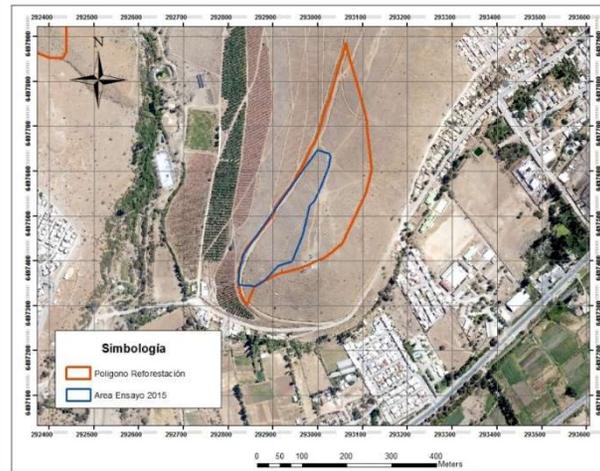
Versión 2.0

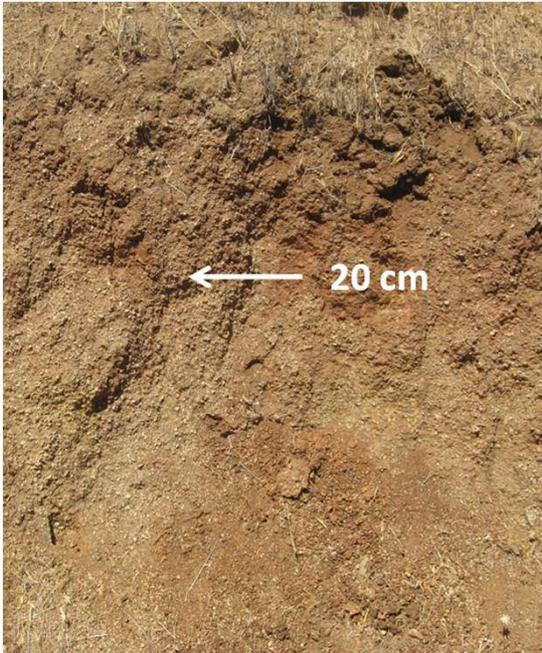
DISEÑO DE OBRAS



DISEÑO DE OBRAS



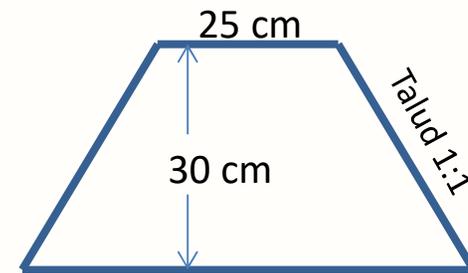
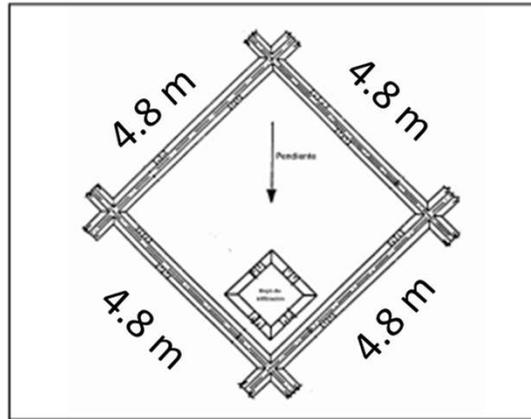
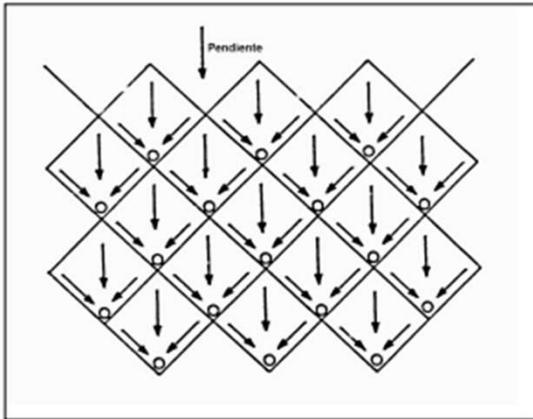




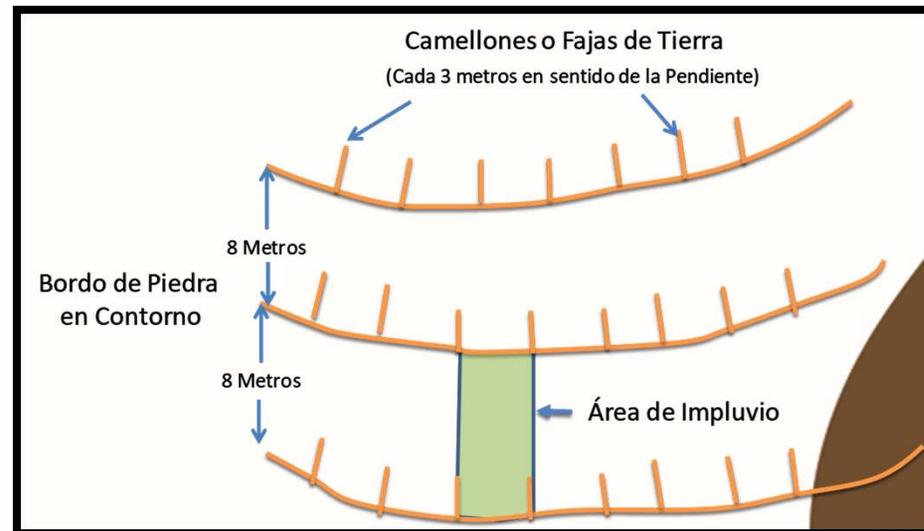
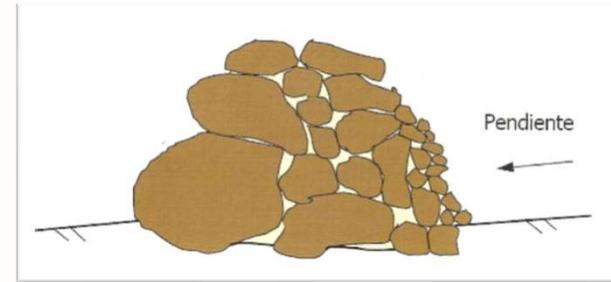
Profundidad (cm)	Descripción)
0 – 20	Pardo en seco (7 YR 4/4), Pardo muy oscuro en húmedo (7 YR 2.5/3), franco arenoso con gravas, moderadamente adhesiva, moderadamente plástica, moderadamente duro y firme, estructura bloques subangulares medias a gruesas, raíces finas moderada, poros finos medios comunes, pedregosidad ligera. Limite ondulado gradual.
> 20	Pardo amarillento oscuro en seco (10 YR 4/6), pardo amarillento oscuro en húmedo (10 YR 3/6), franco arenoso con gravas, ligeramente adhesiva y ligeramente plástica, moderadamente duro, moderadamente firme, estructura de bloques subangulares medios, raíces finas escasas, poros finos comunes, pedregosidad ligera.



DISEÑO DE OBRAS



DISEÑO DE OBRAS



**Registro de precipitaciones Máximas en 24
hrs, Estación Illapel DGA**

	Año	Pp (mm)
1	1991	36.5
2	1992	57
3	1993	45
4	1994	30
5	1995	21
6	1996	47
7	1997	83
8	1998	7
9	1999	22
10	2000	60
11	2001	47.5
12	2002	78
13	2003	38
14	2004	33
15	2005	14.5
16	2006	34.5
17	2007	28
18	2008	41.5
19	2009	33
20	2010	13
21	2011	35.5
22	2012	32.5
23	2013	31.5
24	2014	40.5
25	2015	50.0
26	2016	44.4
Promedio		39.7
Desviación standard		22.2



Características Suelos



Cobertura Vegetacional de Pradera degradada, condición hidrológica Pobre, textura Franco Arenosa. Precipitación de Diseño: 59,8 mm.

Durante el año 2016, se han observado las siguientes precipitaciones máximas en 24 hrs:

Evento	Precipitación diaria (mm)	Fecha ocurrencia
1	2	05-abr
2	2,7	16-abr
3	0,8	17-abr
4	19,4	18-abr
5	3,6	11-may
6	1,9	14-may
7	13,6	29-may
8	10,1	30-may
9	26,4	02-jun
10	44,4	03-jun
11	0,9	04-jun
12	1,6	12-jun
13	5,7	11-jul
14	7,3	13-jul
15	2,9	14-jul
16	10,8	24-jul
17	16,3	25-jul
18	11,3	15-sep
19	13,3	17-sep
20	5,6	18-oct

