



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CURSO MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS

MATERIAL TEÓRICO
INGENIERÍA FORESTAL

UNIDAD DIDÁCTICA B3
Erosión Hídrica

2018

Se agradece particularmente la autorización del Ing. Agr. José Cisneros, a partir de cuya obra se elaboró la mayor parte de este texto

OBJETIVOS

- Conocer los componentes del ciclo hidrológico, su dinámica y variables reguladoras.
- Conocer las causas, la dinámica y la mecánica del proceso de erosión hídrica a los fines de predecir y mitigar sus efectos sobre la productividad del suelo mediante prácticas de prevención y control.
- Conocer los modelos de base empírica y física que describen este proceso a los fines de utilizarlos para predecir la magnitud del mismo y diseñar estrategias de manejo
- Conocer las diferentes prácticas de prevención y manejo de la problemática, brindando herramientas para el diseño de las obras

RESUMEN

Se analiza desde el punto de vista agronómico el ciclo hidrológico superficial suelo-planta que comprende los siguientes procesos: interceptación por la vegetación (varía con el cultivo y grado de cobertura), retención superficial (depende del microrrelieve natural o desarrollado por labranzas), detenimiento superficial (una vez puesta en movimiento superficial el agua puede detenerse cuando hay rugosidad en la superficie o vegetación viva o muerta que ejerce un rol de barrera), infiltración (varía con la textura y estado del suelo superficial) y escurrimiento superficial (varía con la pendiente y el caudal transportado). En la medida que aumenta la interceptación, la infiltración, la retención y detenimiento superficial, se reduce el escurrimiento y la capacidad erosiva del agua. La erosión es el desgaste y arrastre de material edáfico que se produce en la superficie del suelo por la acción de agentes externos como el viento o el agua. Puede ser natural o acelerada por la acción antrópica. La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce la desagregación, transporte y deposición de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes principales: energía cinética de la gota de lluvia, el escurrimiento y la acción de la gravedad. La intensidad del proceso depende del clima (intensidad y volumen de las lluvias), el relieve (longitud, grado y uniformidad de la pendiente) y la erodabilidad del suelo y el sistema de producción. Este proceso tiene como consecuencia la destrucción o pérdida de capacidad de tierras productivas, disminución de infiltración y reserva de agua, destrucción de obras viales y urbanas, destrucción de ecosistemas, contaminación en zonas de captación de los escurrimientos, colmatación de embalses y zonas deprimidas, entre otras. Los diferentes tipos de erosión hídrica son: por salpicadura, laminar, en surcos, en cárcavas, movimientos en masa y destrucción de riberas de cursos permanentes. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) permite estimar la pérdida anual a través de los siguientes factores: R = erosividad por la precipitación pluvial (energía cinética del total de lluvia y intensidad máxima en 30 min), K = erodabilidad del suelo (depende de la textura, el contenido de materia orgánica, la estructura superficial y la permeabilidad), LS = longitud y grado de la pendiente, C = manejo de cobertura (depende del tipo de labranzas y cultivo), y P = método de control de erosión (cultivos en contorno, en franjas, terrazas). Establecida una tolerancia de pérdida según la profundidad útil del suelo y calidad para el crecimiento en sus horizontes, pueden prevverse prácticas agronómicas o de control para que la pérdida este por debajo de la tolerancia. A los fines de diseñar estructuras de control de la erosión hídrica es necesario calcular el escurrimiento, lo que puede hacerse por la fórmula racional de Ramser, el método de la curva número y programas específicos. El método de Ramser calcula el pico de escurrimiento (m^3/s) a través del coeficiente de escurrimiento (adimensional, varia con la pendiente, forma del relieve, textura, vegetación e intensidad de la lluvia), la intensidad de la lluvia máxima horaria para un tiempo de concentración calculado (tiempo que tarda el agua en llegar desde el punto más distante a la desembocadura de la cuenca) y una recurrencia en años establecida según el tipo de obra a construir (cantidad de años que podrían transcurrir para que se produzca una lluvia de igual o mayor valor al calculado), y el área de la cuenca (ha).

Existen prácticas para la prevención de la erosión hídrica que básicamente pretenden disminuir el impacto de la gota de lluvia y mejorar la infiltración de agua donde cae, tales como la cobertura del suelo con residuos de cosechas, mulches, canopeos de cultivos en pie y aumento de la estabilidad estructural de los horizontes superficiales (abonos verdes, agregado de estiércoles, compost y lombricompost, rotaciones y labranzas, cultivos de cobertura, enmiendas cálcicas, decompactación mecánica de costras, control de tránsito de equipos agrícolas, manejo del pisoteo animal). Otras prácticas están dirigidas al control del escurrimiento, tales como cultivos cortando la pendiente, siguiendo curvas de nivel o en contorno, en fajas, y las terrazas (bancales, terrazas de desagüe y de absorción, de base ancha o cultivables y de base angosta). Las terrazas constan de un canal de desagüe y bordo para cada paño. Cuando no es posible controlar todo el escurrimiento es necesario construir canales de guarda o interceptores, estabilizados por su vegetación, que conducen en forma no erosiva el agua proveniente de las partes más altas no sistematizadas a lugares donde no causen daño. Tanto las terrazas como los canales de guarda deben ser dimensionados para la conducción de los caudales máximos en forma no erosiva para tiempos de concentración y recurrencia, establecidos a los fines de amortizar las obras sin elevar demasiado los costos. Además de prácticas de prevención, producida la erosión en cárcava pueden llevarse a cabo prácticas para su control: de cabeceras (saetín o tobogán, suavizado y albardonado, aleros o voladizos, albardón de desagües laterales) y de piso (albardonado del interior de la cárcava, rastrillo, parabolizado, praderización y forestación). Existen algunas prácticas para el control de los caudales máximos como los reguladores de escurrimiento o microembalses.

ÍNDICE

PROCESOS HIDROLÓGICOS BÁSICOS.....	- 4 -
<i>INTERCEPTACIÓN.....</i>	<i>- 5 -</i>
<i>RETENCIÓN SUPERFICIAL.....</i>	<i>- 6 -</i>
<i>DETENCIÓN SUPERFICIAL</i>	<i>- 6 -</i>
<i>INFILTRACIÓN.....</i>	<i>- 7 -</i>
<i>ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL</i>	<i>- 8 -</i>
<i>DINÁMICA DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS EN EL TIEMPO.....</i>	<i>- 8 -</i>
<i>CUESTINARIO GUÍA</i>	<i>- 9 -</i>
EROSIÓN HÍDRICA: DEFINICIÓN, PROCESO Y TIPOS	- 10 -
<i>GENERALIDADES DEL PROCESO.....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>PRINCIPALES CAUSAS</i>	<i>- 13 -</i>
<i>Clima.....</i>	<i>- 13 -</i>
<i>Relieve.....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Suelo.....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Sistema de producción.....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>CONSECUENCIAS DE LA EROSIÓN HÍDRICA</i>	<i>- 15 -</i>
<i>TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA</i>	<i>- 15 -</i>
<i>CUESTIONARIO GUÍA.....</i>	<i>- 20 -</i>
MODELOS DE ESTIMACIÓN DE EROSIÓN: ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (EUPS)-	21 -
<i>R: EROSIDAD POR LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL.....</i>	<i>- 23 -</i>
<i>K: ERODABILIDAD DEL SUELO.....</i>	<i>- 30 -</i>
<i>LS: LONGITUD Y GRADIENTE DE PENDIENTE.....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>C: MANEJO DE CULTIVOS</i>	<i>- 34 -</i>
<i>P: PRÁCTICAS DE CONTROL DE LA EROSIÓN</i>	<i>- 35 -</i>
<i>TOLERANCIA A LA PÉRDIDA DE SUELO.....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EUPS.....</i>	<i>- 36 -</i>
<i>CUESTIONARIO GUÍA.....</i>	<i>- 36 -</i>

PRÁCTICAS PARA LA PREVENCIÓN Y EL CONTROL DE LA EROSIÓN HÍDRICA	- 37 -
PRÁCTICAS DE MANEJO DE LA INFILTRACIÓN Y DE LA COBERTURA	- 38 -
a) Manejo de rastrojo de cosecha/mulches.....	- 38 -
b) Manejo del canopeo de cultivos en pie y rotaciones	- 40 -
c) Cultivos de cobertura	- 40 -
d) Manejo de la estabilidad estructural	- 41 -
e) Descompactación mecánica de costras	- 43 -
f) Manejo del pisoteo animal	- 43 -
CUESTIONARIO.....	- 44 -
PRÁCTICAS DEL MANEJO DEL ESCURRIMIENTO.....	- 44 -
Cálculo del escurrimiento superficial.....	- 44 -
(i) Método de la formula Racional o de Ramser	- 44 -
(ii) Método del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (Curva Número)	- 60 -
(iii) Modelos de simulación en Hidrología Superficial. Programa HEC-HMS 3.5.....	- 60 -
(iv) CUESTINARIO	- 61 -
Técnicas de manejo del relieve	- 62 -
(i) Cultivos cortando la pendiente.....	- 63 -
(ii) Cultivos en curvas de nivel o contorno	- 64 -
(iii) Cultivos en fajas o franjas a nivel.....	- 68 -
(iv) Terrazas de banco o bancales	- 70 -
(v) Terrazas de desagüe y terrazas de absorción	- 71 -
(vi) CUESTIONARIO.....	- 84 -
Canales	- 85 -
(i) Diseño y dimensionamiento de los canales empastados	- 87 -
(ii) Trazado y construcción	- 92 -
(iii) CUESTIONARIO.....	- 92 -
Técnicas de prevención y control de cárcavas.....	- 93 -
(i) Principios de control de cabeceras de cárcavas	- 93 -
(ii) Técnicas de recuperación del piso de cárcavas	- 98 -
Técnica de control de caudales máximos	- 100 -
CUESTIONARIO.....	- 101 -
BIBLIOGRAFÍA.....	- 101 -

PROCESOS HIDROLÓGICOS BÁSICOS

En la Figura 1 se ilustra esquemáticamente el ciclo hidrológico del sistema suelo- agua- planta- atmósfera.

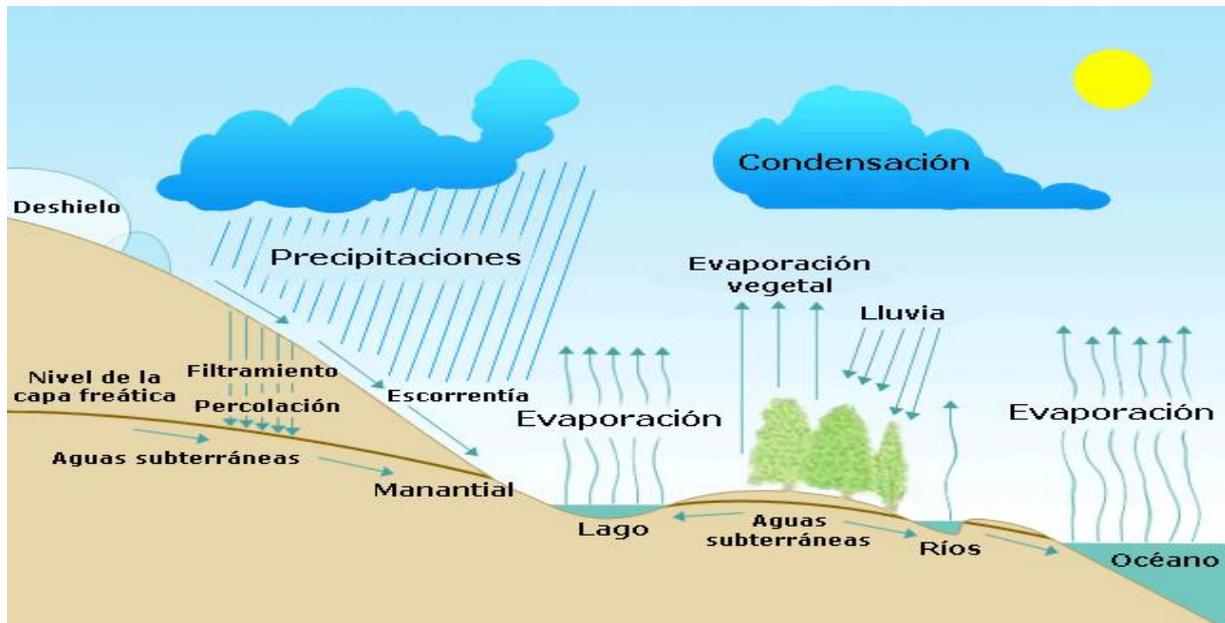


Figura 1. Ciclo hidrológico

En dicha figura pueden verse los componentes principales de la circulación del agua. A nivel suelo se indican los escurrimientos superficiales y subterráneos, ya sean estos libres (freáticos) o confinados (artesianos), las diferentes partes de las cuencas (altas, medias, bajas), y los elementos de almacenamientos y regulación (ríos, lagunas, mar abierto). El proceso de erosión hídrica está regido por 2 aspectos fundamentales, la energía cinética de la lluvia, con su capacidad de desagregar el suelo y el escurrimiento superficial capaz de movilizar las partículas desagregadas. En este primer apartado se desarrollarán conceptos relacionados con el escurrimiento superficial.

Dicho escurrimiento es la resultante de una serie de procesos hidrológicos dependientes unos de otros, que son los siguientes:

- · Interceptación por parte del vegetal,
- · Retención o almacenaje superficial,
- · Escurrimiento superficial,
- · Infiltración,
- · Detención superficial

Estos componentes pueden ser de muy distinta magnitud de acuerdo se trate de áreas planas, onduladas y hasta montañosas. A medida que aumenta la pendiente disminuye la retención y detención superficial y se incrementa el escurrimiento. Más adelante se cuantificará algunos de estos factores para diferentes situaciones topográficas.

INTERCEPTACIÓN

Es la parte de la precipitación que no llega al suelo directamente, ya que es el follaje de las plantas lo que intercepta las gotas de lluvia. Parte del agua interceptada es almacenada y más tarde perdida por evaporación no formando parte del escurrimiento superficial, mientras otra parte alcanza la superficie del suelo por escurrimiento desde las hojas y tallos.

Su magnitud se ve afectada por varios factores, entre ellos: tipo de vegetación, intensidad de la lluvia, estado de crecimiento, estación del año, velocidad del viento, prácticas culturales.

El tipo de vegetación y la intensidad de precipitación ejercen una marcada influencia en la cantidad de agua que pueden interceptar las hojas y tallos. Durante una lluvia, la interceptación aumenta exponencialmente hasta alcanzar un valor máximo (IC max), el cual es difícil de determinar, aunque se han podido establecer ciertos rangos de valores para diferentes tipos de vegetación (Tabla 1).

Tabla 1. Interceptación máxima (IC max) de diferentes tipos de cubiertas vegetales (Morgan y Rickson, 1995).

Tipo de Vegetación	IC máx (mm)
Festuca	1,2
Rye-Grass	2,5
Bosque de Pinos	1,0
Bosque Tropical	0,8-2,5
Soja	0,7
Trigo	3,0
Maíz	0,8
Alfalfa	2,8
Monte Frutal (manzano)	0,5

El otro factor que interviene en la interceptación es el estado de crecimiento en el momento de la lluvia. Estadíos iniciales ejercen poco efecto mientras que un mismo cultivo en su madurez puede interceptar una significativa proporción del agua caída.

Así asumiendo que la lluvia cae verticalmente, el volumen de lluvia interceptada (IC) puede calcularse a través de la siguiente relación:

$$IC = \text{lluvia} \times \% CC \text{ (cobertura por el canopeo)}$$

Paralelamente un mismo cultivo y estadío fenológico puede actuar de diferente manera según el tipo de precipitación, la intensidad de los vientos y la evaporación directa desde el canopeo debido a las temperaturas atmosféricas. El viento ejerce 2 efectos, por un lado puede acelerar la evaporación desde el follaje y en segundo lugar, por agitación del propio follaje, incrementar la caída al suelo de las gotas retenidas en él.

Las prácticas culturales tienen influencia directa sobre la interceptación. Es así que la densidad y dirección de siembra, el distanciamiento entre hileras, los genotipos vegetales utilizados, la labranza utilizada con su consecuente tipo de cubierta de rastrojo son factores que determinan la interceptación y las posibilidades de infiltración al suelo.

Desde el punto de vista del fenómeno erosivo, la vegetación provee una capa protectora o buffer entre la atmósfera y el suelo; por lo que la interceptación reviste especial importancia. El objetivo que se persigue es disminuir la energía cinética de la precipitación y su efecto desagregante sobre el suelo, evitando los encostramientos superficiales ("planchado") y posterior escurrimiento de agua y suelo.

RETENCIÓN SUPERFICIAL

Este proceso hace referencia al agua retenida en microdepresiones de la superficie del suelo. Al final de la lluvia, esta agua puede infiltrar, evaporarse o formar parte del flujo erosivo si el agua acumulada supera las dimensiones de la depresión y hay pendiente.

Los factores que controlan la cantidad de agua retenida son la microtopografía y la pendiente general del terreno. El microrelieve superficial deriva fundamentalmente del laboreo que produce rugosidad del terreno y del tipo de tapiz vegetal (pastizal, cultivos de escarda, en masa, bosques con cubierta del sustrato, etc). Cuando se trata de rugosidad derivada del laboreo, la orientación de la misma en relación a la pendiente del terreno tiene gran efecto en las posibilidades y magnitud del escurrimiento superficial.

El factor "pendiente general" del lugar influye a través de su gradiente, ya que a medida que esta aumenta a igualdad de rugosidad, disminuye el volumen de agua retenida en superficie.

El encharcamiento del suelo en 2 condiciones se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Encharcamiento del suelo en 2 condiciones a) con baja pendiente del terreno y b) con pendiente y laboreo a favor de la misma.

DETENCIÓN SUPERFICIAL

Es el agua detenida temporalmente sobre la superficie, es decir que una vez puesta en movimiento es frenada por obstáculos. Su movimiento es necesario para que ocurra el escurrimiento, por lo tanto podría ser considerada como una componente del escurrimiento, más que como un proceso separado, pero a los fines de clarificar el tema se discutirá por separado.

Los factores que controlan el detenimiento superficial son el microrelieve superficial, la vegetación, la pendiente general, la distribución de la lluvia y topografía general de la cuenca. El microrelieve superficial controla las formas de la sección de flujo de agua desde los "canales" pequeños hasta las vías principales de flujo de agua. De este modo todos los elementos que influyen sobre la retención (prácticas culturales, época del año y patrón de erosión), también pueden considerarse que afectan el detenimiento superficial.

La pendiente general influye fuertemente en el volumen de agua detenida en superficie; cuanto mayor es, más alta es la velocidad de escurrimiento y menor es el volumen de detención requerido para mantener un dado caudal de flujo.

La topografía general de la cuenca afecta la cantidad de agua que pasa de un área elemental hacia otras adyacentes. De este modo, el escurrimiento de un lugar es el producto del aportado por las precipitaciones locales y del que le aportan otras áreas. Son más evidentes en los límites de los lotes en los que se detiene el flujo y depositan sedimentos y rastros por la vegetación y alambrados perimetrales. Por el contrario, el escurrimiento se acelera al llegar a los caminos, en los cuales hay muy poca rugosidad.

INFILTRACIÓN

Para la mayoría de las cuencas, la infiltración es el componente hidrológico más importante y es determinante de la forma del hidrograma de una creciente (gráfico de coordenadas (x,y) en donde se representa el caudal escurrido en relación al tiempo).

Los principales factores que la controlan son la condición superficial (cubierta vegetal, estabilidad estructural, presencia de sellos o costras), características internas del perfil (humedad, textura, estructura, permeabilidad, tipo de límite entre horizontes, porosidad), así como cuestiones climáticas (estación del año, intensidad y distribución de la precipitación). La Figura 3 muestra la relación entre la velocidad de infiltración y la textura del suelo.

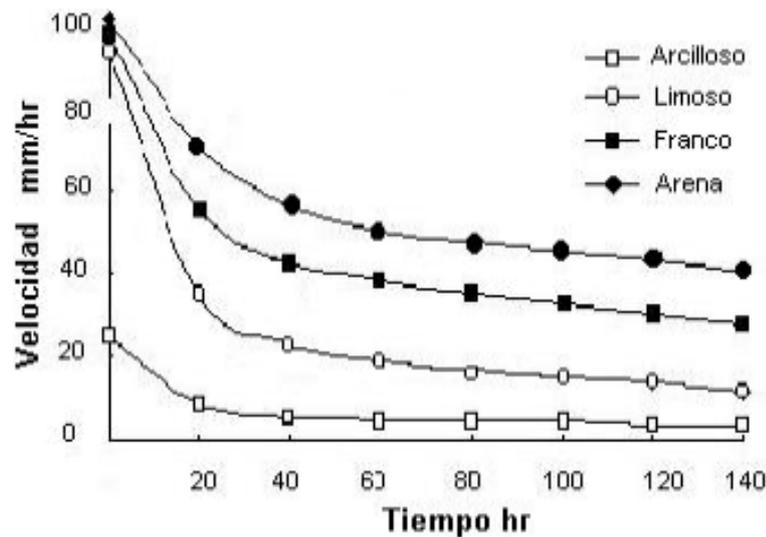


Figura 3. Curvas de infiltración para diferentes texturas de suelos.

La intensidad de la precipitación tiene un efecto marcado sobre la infiltración debido a su relación con el tamaño de gota de agua. Se ha comprobado que las tormentas más intensas tienen mayor proporción de gotas grandes y por lo tanto mayor energía cinética. Para intensidades de 50-100 mm/h es alta la proporción de gotas > a 4 mm. Con intensidades > 100 mm/h la proporción de gotas grandes disminuye debido a que las gotas > 5 mm se parten en gotas más finas, y por ende disminuye la energía cinética. Por el contrario, a intensidades mayores a 200 mm/h las gotas pequeñas sufren coalescencia y aumenta la cantidad de gotas grandes, alcanzándose un nuevo pico de energía cinética con intensidades de 250 mm/h.

No es fácil describir este aspecto a través de un parámetro único como el tamaño medio de las gotas. Se ha propuesto en este sentido el "diámetro del volumen mediano (D50)" o diámetro correspondiente a la mediana del volumen. Es decir, es el diámetro de gota para el que la mitad de la lluvia en volumen, cae en gotas menores y la otra mitad en mayores. El diámetro de gota del volumen mediano de lluvia tiende a aumentar con la intensidad de la misma para I_{max} en 30 min hasta 75 a 100 mm/h.

Al aumentar el tamaño de gota, aumenta la energía de impacto y por lo tanto, causa un mayor deterioro de la estructura superficial y consiguientemente las posibilidades de infiltración. Mayor detalle se verá en el punto II de este capítulo.

ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Es la resultante del balance de los procesos anteriores y por lo tanto es afectado por los mismos factores antedichos (Figura 4).

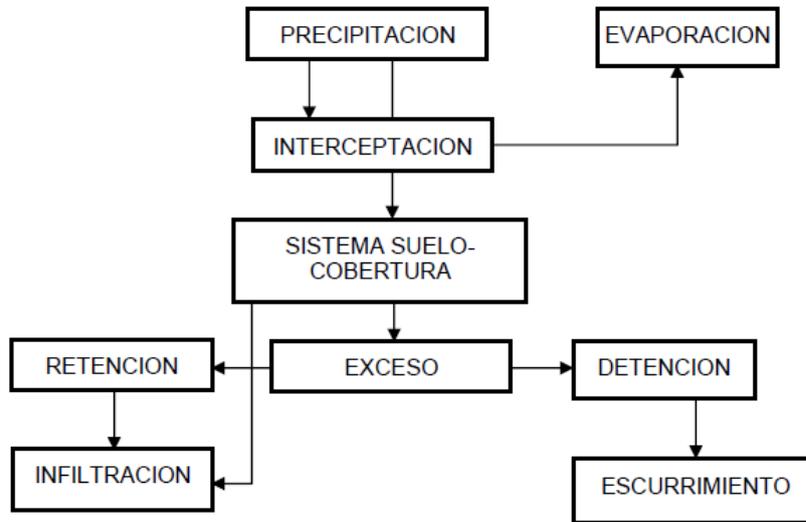


Figura 4. Esquema del ciclo hidrológico en un sistema suelo-planta

La diferencia entre la precipitación total y la interceptada es la precipitación que llega al suelo. Si ésta supera la capacidad de infiltración y retención superficial se forma una delgada lámina de agua que comienza a correr por gravedad a través de la pendiente (escurrimiento superficial).

DINÁMICA DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS EN EL TIEMPO

La variación en el tiempo de los procesos hidrológicos durante una lluvia constante se muestra en la Figura 5.

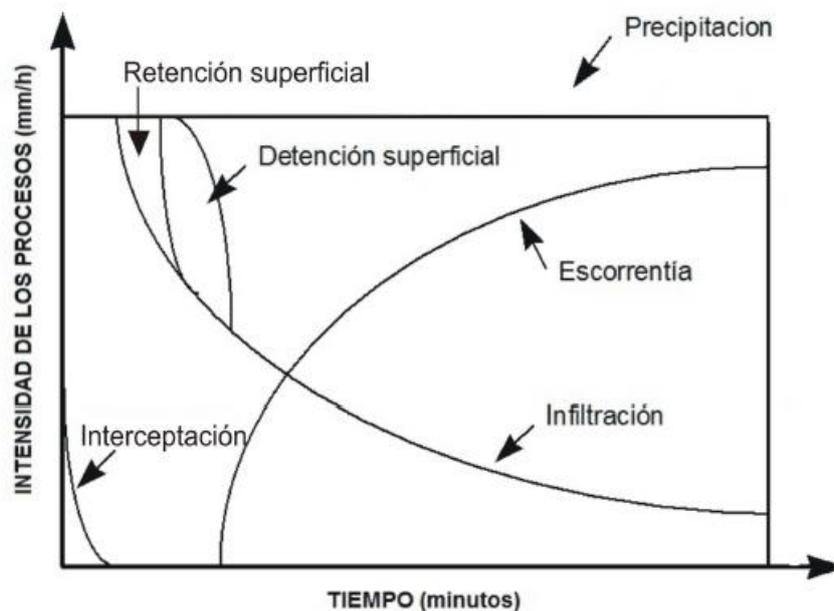


Figura 5. Esquema de la dinámica de los procesos hidrológicos a lo largo de una lluvia.

Tan pronto comienza la precipitación, la vegetación impide que una parte de ella llegue a la superficie; se denomina a este proceso interceptación. Si la cobertura no es completa, parte de la lluvia alcanza la superficie del suelo, una parte comienza a infiltrar y el resto comienza a llenar las depresiones del microrelieve. Una vez que las demandas de almacenaje en depresiones e infiltración han sido superadas, el agua comienza a acumularse en una condición de detención superficial, hasta que por efecto de la gravedad en un marco de pendiente, comienza el escurrimiento.

Como se desprende de la Figura 5, la intensidad máxima de escurrimiento es la diferencia entre la lluvia, interceptación, retención superficial y la velocidad de infiltración, siendo este factor quién define la cantidad de agua perdida y la intensidad del proceso erosivo.

CUESTINARIO GUÍA

1. ¿Cuáles son los procesos hídricos en la interfase suelo-planta que considera de importancia para decidir estrategias de prevención y control de la erosión hídrica?
2. ¿Describa de qué variables depende c/u de los procesos considerados en la pregunta 1 y analice si conoce prácticas agronómicas que pudieran modificar estos procesos? Si es así, indique en qué lugar geográfico y bajo qué producción/manejo los ha visto.

EROSIÓN HÍDRICA: DEFINICIÓN, PROCESO Y TIPOS

GENERALIDADES DEL PROCESO

La erosión (del latín *erosio*) es la desagregación de partículas del suelo que se produce en la superficie por la acción de agentes externos como el viento o el agua, con su posterior transporte y depositación. Puede ser natural o acelerada por la acción antrópica. La erosión hídrica es el proceso que se produce por acción de los siguientes agentes principales:

- **La energía cinética (EC) de la gota de lluvia:** esta energía se disipa sobre la superficie del suelo produciendo la ruptura de los agregados, generando una salpicadura (erosión por salpicadura). Las gotas de lluvia, al impactar sobre el suelo, producen un pequeño cráter y alrededor del mismo se eleva una especie de corona, formada por gotas mucho más pequeñas, las cuales están cargadas de partículas que se desprendieron del horizonte superficial del suelo. Estas partículas provienen de la rotura de los agregados y permanecen en suspensión. Al caer forman sobre el suelo una fina película de agua barrosa; parte del agua se infiltra y las partículas se depositan sellando los poros o migran dentro del suelo con el agua que infiltra, sobre todo en suelos con baja estabilidad estructural. Las gotas que continúan cayendo agitan la película barrosa, aumentando así la capacidad de mantener partículas suspendidas, cayendo en mayor proporción pendiente abajo, como lo ilustra la Figura 6.

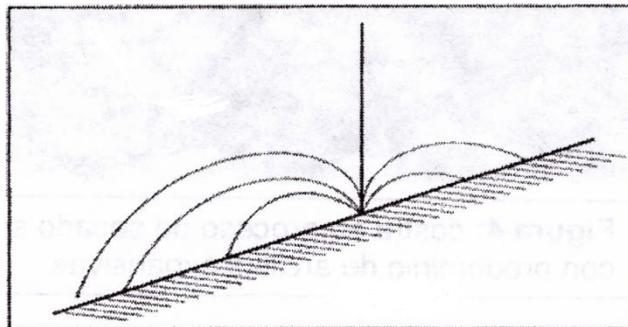


Figura 6. Salpicadura y trayectoria de las gotas barrosas pendiente arriba y abajo del sitio de caída.

Al finalizar la lluvia, y si el escurrimiento no es importante, las partículas se depositan en láminas o capas horizontales, originando el planchado o encostramiento del suelo. El efecto destructor de las gotas de lluvia sobre un suelo con poca cobertura vegetal se muestra en la Figura 7.

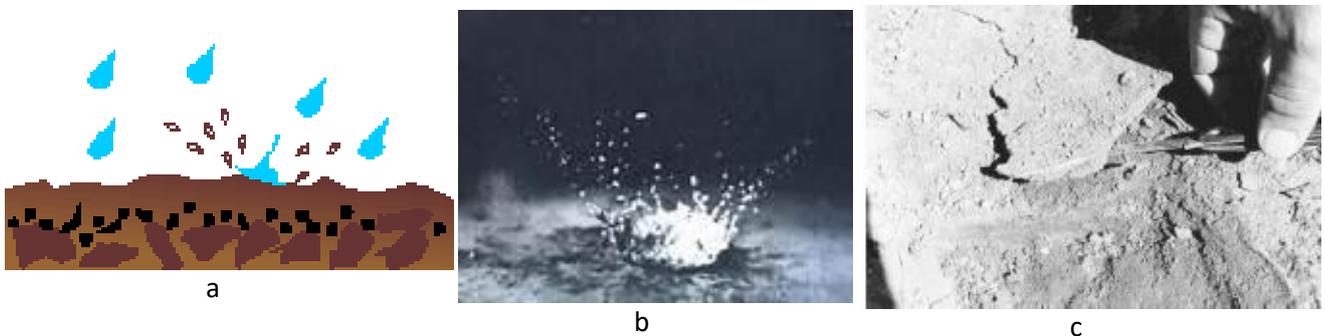


Figura 7. a) Esquema del efecto de la gota de lluvia sobre el suelo, b) Imagen real del proceso y c) encostramiento debido al impacto de la lluvia en un suelo descubierto de baja estabilidad estructural.

• **El escurrimiento:** las partículas suspendidas en el agua de escurrimiento en su trayectoria pendiente abajo pueden producir nuevos desprendimientos. El arrastre de las partículas es proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar/no concentrado (*erosión laminar o mantiforme*), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (*erosión en surcos*), con una velocidad que puede llegar a 4 m/s, y que es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos. La energía puesta en juego en cada tipo de erosión, y la magnitud del transporte de sedimentos generada por cada una de ellas se indica en la Tabla 2 y 3.

La energía cinética puesta en juego con una lluvia es 256 veces mayor que la energía cinética del escurrimiento (Hudson, 1982) (Tabla 2).

Tabla 2. Valores comparativos del impacto de la gota de lluvia y del escurrimiento.

	Gota de lluvia	Eskurrimiento
<i>Masa</i>	R	R/4 (suponiendo un 25% de escurrimiento)
<i>Velocidad</i>	8 m/s	1 m/s
<i>Energía cinética</i>	$\frac{1}{2} R (8)^2 = 32 R$	$\frac{1}{2} R/4 (1)^2 = R/8$

• **La gravedad:** en ambientes de altas pendientes y con suelo húmedo el suelo se puede mover en masa provocando deslizamientos de laderas o erosión lateral de meandros de ríos.

Tabla 3. Energía y eficiencia de cada forma de erosión hídrica (Morgan, 1995).

Forma de erosión	Masa*	Velocidad típica (m/s)	Energía cinética**	Energía para erosión***	Transporte de sedimentos observado (g/cm)****
Salpicadura (gota de lluvia)	R	9	40,5 R	0,081 R	20
Mantiforme (laminar)	0,5 R	0,01	$2,5 \times 10^{-5} R$	$7,5 \times 10^{-7} R$	400
Surcos (turbulento)	0,5 R	4	4 R	0,12 R	19000

* Se asume que la masa es igual a la lluvia R, y que el escurrimiento es el 50% de la lluvia (0,5 R)

** Basada en $\frac{1}{2} m v^2$

*** Se asume que el 0,2% de la energía de la gota y el 3% de la energía cinética del escurrimiento causa erosión

**** Valores medidos durante 900 días, para un suelo arenoso en una pendiente del 19%

Como se desprende de las Tablas 2 y 3 la mayor parte de la energía de las gotas de lluvia contribuyen al desprendimiento más que al transporte, con una alta energía puesta en juego en la salpicadura (40,5 R). Paralelamente el impacto de la gota de lluvia puede producir encostramiento superficial a posteriori del evento, cuando el suelo se seca. Esto es causado por una sedimentación diferenciada de las partículas desprendidas en función de su peso. Es así que las arcillas sellan la costra superficialmente por ser las últimas en sedimentar, reduciendo posteriores infiltraciones de agua. A pesar que el principal responsable de la desagregación es el impacto de la gota de lluvia, el flujo (laminar o en surcos) también puede ejercer este efecto, como se comentara. La erosión mantiforme tiene la menor energía cinética para desprender partículas, pero el flujo es capaz de transportar una mayor cantidad de los sedimentos desprendidos, mientras que el flujo concentrado en surcos, posee tanto alta energía para desprender partículas, como para poder transportarlas.

A escala de lote la erosión hídrica puede estar limitada por la capacidad de desprendimiento o por la capacidad de transporte. Tanto la lluvia como el escurrimiento tienen ambas capacidades, siendo aquel proceso que ocurra en menor medida el que finalmente determine cuanto suelo se pierde.

La cantidad de suelo desprendido por la lluvia es directamente proporcional a la energía cinética del evento y a la pendiente, e inversamente proporcional a la lámina de agua sobre la superficie (efecto protector del agua acumulada). Este proceso de erosión es el que predomina en las partes altas de las pendientes.

El desprendimiento por escorrentía comienza cuando se han superado la tasa de infiltración en condiciones de pendiente. La capacidad de desprendimiento de la escorrentía está determinada por el tipo de flujo: laminar o turbulento. En el flujo laminar cada capa de flujo se mueve uniformemente, a una velocidad lenta (Tabla 3), mientras que en el flujo turbulento el agua forma un complejo patrón y las capas de agua se mezclan unas con otras, debido a su velocidad. El desprendimiento por escorrentía comienza cuando las fuerzas de tracción del agua superan la resistencia al corte del suelo. La resistencia tractiva del agua depende de su velocidad y viscosidad, mientras que la resistencia al corte del suelo depende del grado y estabilidad de la estructura y del tamaño de partículas. Existe un tamaño de partículas de máxima susceptibilidad al desprendimiento, de alrededor de 200 micrones (arena muy fina y fina), es decir, en la cual la velocidad del agua necesaria es mínima. Partículas de mayor tamaño son más pesadas y aunque suelen tener menor estabilidad estructural, en general están asociadas a suelos de alta tasa de infiltración por lo que el caudal que escurre es bajo. Por otro lado las partículas más finas suelen tener mayor fuerza de cohesión por lo que se limita la capacidad de desprendimiento. En el caso de los suelos limosos o franco arenosos finos, las tasas de erosión son máximas ya que, por un lado las partículas pueden ser fácilmente desprendidas por su tamaño y relativamente baja estabilidad estructural, y por otro son suelos que, al sufrir encostramiento, pueden generar grandes volúmenes de escorrentía, con lo cual la erosión no estará limitada por ninguno de ambos procesos.

La velocidad del escurrimiento superficial en el flujo concentrado (V) está regida por la **ecuación de Manning**, y depende de un coeficiente de rugosidad (n) dado por las características de la superficie, del radio hidráulico (R) que depende del espesor de la capa de escorrentía, y de la pendiente (S) del terreno.

$$V = \frac{RH^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

V= velocidad de flujo en m/s
n= coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
RH= radio hidráulico en m
S = pendiente del canal en m/m

$$RH = \frac{A}{PM}$$

RH= radio hidráulico en m
A= sección transversal de flujo en m²
PM= perímetro mojado en m

La capacidad de transporte de la escorrentía es proporcional al caudal escurrido (Q), determinado por el volumen y la velocidad de la corriente (V). Cuando la velocidad llega a un umbral mínimo, en la que las partículas de suelo no pueden mantenerse dentro del flujo, comienza el proceso de sedimentación. Inversamente, cuando un flujo erosivo tiene colmada su capacidad de transporte de sedimentos, estos comienzan a depositarse y el flujo no produce un desprendimiento adicional. En otras palabras, cuanto menos sedimento lleva un flujo de escorrentía, mayor es su capacidad de desprendimiento, el cual se va reduciendo paulatinamente hasta que se colma la capacidad de transporte (el flujo se satura de sedimento).

PRINCIPALES CAUSAS

La erosión hídrica es un proceso complejo, multicausal, dinámico, de tipo episódico y sujeto a un conjunto de causas que ocurren en el ámbito de una cuenca hidrográfica (Figura 8).

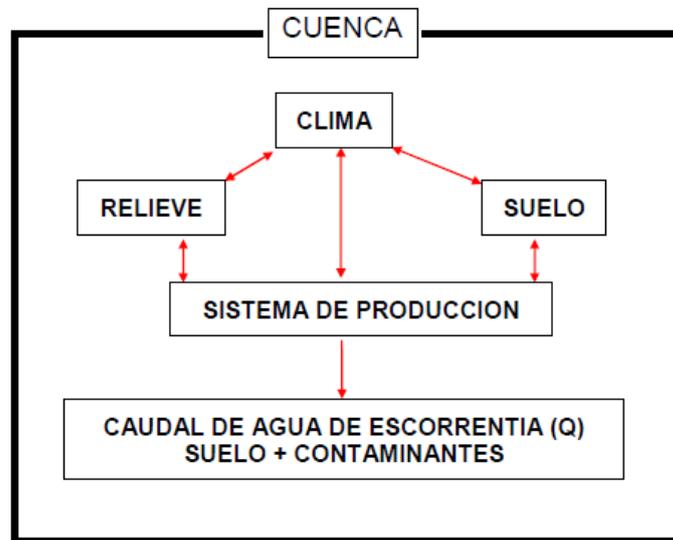


Figura 8. Factores que regulan en el proceso de erosión hídrica (Cisneros et al., 2012).

La complejidad de este proceso episódico deriva del grado de probabilidad ocurrencia de tormentas de alta energía (factor climático) y su coincidencia con momentos de alta susceptibilidad del suelo (tipo de suelo y manejo), en condiciones de pendiente del lote (relieve). A medida que avanza el proceso erosivo, la erosión puede incrementarse si los horizontes subyacentes son menos estables o reducirse si por el contrario, son más estables. Un ejemplo de aceleración del proceso es el que ocurre con la erosión en cárcavas, que van creciendo en profundidad, en ancho y en ramificaciones, a medida que el proceso avanza.

Según la escala espacial, la erosión puede ser considerada a escala de lote o parcela, o a nivel de cuenca. En una escala de cuenca pueden visualizarse otros procesos erosivos como cárcavas y erosión de márgenes de ríos y arroyos, y es necesario considerar una visión más amplia del problema, no registrable sólo a escala de lote. La resolución de estos procesos requiere una mayor participación de los involucrados en la cuenca, como así también el conjunto de decisores con incumbencia en el ámbito de la misma (poblaciones, organismos públicos, consorcios, etc.), ya que a este nivel pueden producirse fenómenos como la ruptura de redes viales, puentes, etc., a la vez que su control suele requerir de obras de envergadura como represas, entre otras, que deben ser afrontadas por estamentos públicos.

Detallaremos a continuación diferentes aspectos de los agentes causales.

Clima

El principal factor climático que influye en la erosión hídrica es la precipitación, y su energía cinética. En relación a su origen, las tormentas pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- **Ciclónicas:** son las provocadas por los frentes de masas de aire con diferente temperatura y humedad y se caracterizan por abarcar grandes extensiones de territorio.
- **Convectivas:** se producen por el ascenso repentino de masas de aire caliente, son las tormentas de verano, son de extensión más localizada y frecuentemente de alta intensidad.
- **Orográficas:** se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa. Su distribución también es errática, y de alta intensidad.

Dentro de la caracterización de las lluvias interesa conocer:

- Cantidad y distribución: puede obtenerse de estaciones del ferrocarril, servicio meteorológico, aeropuertos, estaciones experimentales, etc. La precipitación media y su distribución nos indica los períodos críticos en cuanto a la ocurrencia de tormentas erosivas.
- Intensidad: esta definida por la energía cinética que desencadena los procesos de desprendimiento y escurrimiento.

Relieve

Los parámetros a tener en cuenta en los procesos de erosión hídrica son:

- Grado o inclinación de la pendiente, la que se puede expresar en porcentaje o en grados sexagesimales, siendo el porcentaje de pendiente igual a la tangente del ángulo de inclinación de la misma (una pendiente del 5 % corresponde a un ángulo de inclinación de aproximadamente 3°; una pendiente de 100 % corresponde a una inclinación de 45°).
- Longitud de la pendiente que define el volumen de escurrimiento.

Principalmente el grado, pero también la longitud de la pendiente, afectan la velocidad terminal de la escorrentía.

- Complejidad de la pendiente que hace referencia a la mayor o menor uniformidad de gradientes, direcciones y longitudes, y es un parámetro importante de considerar al momento de planificar el control de la erosión mediante técnicas de manejo del relieve.

Suelo

La erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad al desprendimiento y transporte por los agentes erosivos. Surge de una serie de factores que afectan la infiltración de la lluvia y la resistencia de las partículas del suelo al arranque y posterior transporte. El tamaño de partículas, tipo de estructura y su estabilidad, el contenido y tipo de materia orgánica, el tipo de arcillas y la naturaleza del complejo de cambio, son características edáficas que afectan la erodabilidad.

Sistema de producción

En un sentido amplio, los sistemas de producción son las formas en que la sociedad hace uso de los recursos naturales de una cuenca. Cada sistema de producción incide de manera distinta sobre los demás componentes del sistema, pudiendo responder a las condiciones ecológicas del área, o estar definido por otros factores: económicos, de mercados, gustos personales, asesoramiento técnico, etc., que pueden hacer que la intensidad del proceso de erosión se vea modificada.

El aspecto más directo del uso y manejo de los suelos sobre la erosión se relaciona con el efecto de protección de la superficie por la vegetación o restos de ella. La eliminación de la vegetación, el sobrepastoreo o la quema indiscriminada son factores que aceleran los procesos erosivos, e incrementan las tasas de sedimentación de tierras. La sobreexplotación de áridos (arena para la construcción) o la minería a cielo abierto en ambientes serranos, son otros de los factores que implican serios impactos ambientales negativos por el posible incremento en las tasas de erosión, entre otras externalidades negativas.

CONSECUENCIAS DE LA EROSIÓN HÍDRICA

De manera sintética, las consecuencias pueden visualizarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Consecuencias de los procesos erosivos y su consecuente sedimentación (Cisneros et al., 2012)

Erosión – escurrimiento	Sedimentación
Destrucción de tierras productivas (cárcavas)	Pérdida de capacidad productiva de los suelos (por deposición de sedimentos)
Pérdida de capacidad productiva del suelo (erosión laminar y en surcos)	Tapado y desborde de canales por obturación con sedimentos
Pérdida de agua para los cultivos (productividad de corto plazo)	Colmatación de embalses (reducción de vida útil y funcionalidad)
Destrucción de infraestructura vial y urbana (puentes, alcantarillas, caminos, rutas, etc)	Sedimentación de depresiones naturales (pérdida de funcionalidad)
Deterioro de ecosistemas de ribera (bordes de ríos y arroyos)	Contaminación de aguas por sedimentos (mayores costos de potabilización)
Contaminación de aguas superficiales (P, herbicidas, insecticidas)	Pérdida de la calidad visual y paisajística
Inundación de depresiones, poblaciones, caminos y tierras productivas	Aumento de costos de dragado de puertos
Mayor inestabilidad y riesgos productivos	Aislamiento de poblaciones

TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA

Los procesos de erosión hídrica pueden clasificarse en:

- a) salpicadura
- b) erosión laminar
- c) erosión por surcos
- d) en cárcavas
- e) erosión por remoción o movimientos en masa
- f) erosión de cursos permanentes

a) Erosión por salpicadura: se debe al impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados de un suelo desnudo. Se producen pequeños cráteres de impacto, con liberación de partículas, que se desplazan en un radio máximo de 150 cm, siendo las arenas finas y limos las más afectadas. Se relaciona directamente con la intensidad de la lluvia y su energía cinética (Tabla 2), e inversamente con la estabilidad de los agregados superficiales y la cobertura de residuos o canopeo. La presencia de vegetación arbórea puede incrementar este tipo de erosión por la formación de gotas más grandes a partir del flujo de hojas (Morgan y Rickson, 1995).

En la Figura 9 pueden verse los efectos de este tipo de erosión.



Figura 9. Erosión por salpicadura (Cisneros et al, 2012)

b) Erosión laminar: es una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficie del suelo en forma de lámina (Figura 10). Este proceso produce una mayor pérdida neta de suelo que la erosión por salpicadura (Tabla 1). Algunos autores postulan que el flujo laminar no existe, y que en realidad son flujos turbulentos poco perceptibles, que van organizándose e incrementando su potencial erosivo a medida que se incrementa la velocidad del escurrimiento (Morgan, 1995). Es poco perceptible por el productor, no obstante es una importante vía de pérdida de suelo en condiciones de baja pendiente y suelos con infiltración disminuida.



Figura 10. Manifestaciones de erosión laminar (Cisneros et al., 2012)

La ecuación básica que describe este tipo de erosión fue propuesta por Watson y Laflen, (1986) citado por Fangmeier et al. (2006).

$$D_i = K_i \times i^2 \times S_f$$

D_i = Tasa de erosión laminar en $\text{kg/m}^2 \text{s}$

K_i = Erodabilidad del suelo para erosión laminar en kg s/m^4

i = Intensidad de la lluvia en m/s , S_f : factor de pendiente en grados. $S_f = 1,05 - (0,85 \exp(-4 \text{ sen } \theta))$, siendo θ : pendiente en grados

c) Erosión por surcos: es el desprendimiento y transporte de partículas de suelo por el agua de escurrimiento (flujo concentrado) en pequeños surcos, anchos y de poca profundidad. En la parte alta de las lomas el agua escurre en forma mantiforme o laminar. Pendiente abajo (media loma alta y baja) el agua comienza a concentrarse en canaliculos o pequeños surcos, aumentando su velocidad y la capacidad de desprendimiento y transporte. Este tipo de esorrentía concentrada, produce la pérdida por 3 mecanismos: la energía cinética propia del flujo, la abrasión de las partículas transportadas sobre la pared del surco y la rotura de los agregados que están siendo transportados. Suele denominarse a la erosión en surcos como aquella que el productor puede "borrar" con los implementos de labranza (Figura 11), luego de que ocurre, definición que intenta clarificar la diferencia entre erosión en surcos y en cárcavas.



Figura 11. Manifestaciones de erosión en surcos

El mecanismo de erosión en surcos, al igual que en la erosión en cárcavas, requiere la formación de una *pequeña* "cabecera" que produce una erosión retrocedente (en sentido contrario al flujo), de mucha menor magnitud que lo que ocurre en la formación de cárcavas. La erosión en surco es la predominante en la mayor parte de los suelos. Es una función de la fuerza de corte del escurrimiento (ζ) concentrado en surcos y de dos propiedades del suelo: la erodabilidad del suelo para erosión en surcos (K_r), y la resistencia al corte crítica del suelo (ζ_c) es decir aquella resistencia del suelo debajo de la cual el desprendimiento es despreciable. De acuerdo a esta relación, sólo habrá erosión si la fuerza de corte del escurrimiento (ζ) supera la resistencia crítica (ζ_c). La relación entre estas variables se indica en la siguiente expresión (Fangmeier et al., 2006):

$$D_r = K_r(\zeta - \zeta_c) \left(1 - \frac{Q_s}{T_c}\right)$$

D_r = Tasa de erosión en surcos en kg/m^2s

K_r = erodabilidad del suelo para erosión en surcos en s/m

ζ_c = resistencia al corte crítica, debajo de la cual no hay desprendimiento en Pa

Q_s = contenido de sedimentos en el flujo de escorrentía por surcos en $kg/m s$

T_c = capacidad de transporte de sedimentos en los surcos en $kg/m s$

ζ = fuerza de corte hidráulica del escurrimiento en $Pa = \rho \times g \times r \times s$

ρ = densidad del agua en kg/m^3

g = aceleración de la gravedad en m/s^2

r = radio hidráulico del surco en m

s = gradiente hidráulico del flujo en surcos (similar a la pendiente del terreno).

El término $1 - Q_s/T_c$ nos indica que cuando el contenido de sedimentos en el flujo Q_s es igual a la capacidad de transporte T_c , el flujo está saturado y la erosión se hace cero, inversamente cuando el contenido de sedimentos en el flujo es bajo ("agua clara") la capacidad de erosión es máxima.

d) Erosión en cárcavas: las cárcavas son la manifestación más visible y llamativa del proceso erosivo. Se desarrollan a partir de la acción del escurrimiento concentrado sobre la superficie, luego de que se alcanza un cierto caudal y velocidad del flujo, y se considera una cárcava como aquella forma de erosión que no puede ser borrada por las labranzas (Figura 12).



Figura 12. Manifestaciones de erosión en cárcavas

La tasa de erosión en cárcavas depende del potencial de generación de escurrimiento de la cuenca, del área de drenaje que recibe la cárcava, del material del suelo y subsuelo, de la forma que toma la sección y de la pendiente del terreno (Fangmeier et al., 2006).

La forma y profundidad que adoptan las cárcavas está determinada por el tipo de material del suelo y su grado de cohesión. Para materiales poco cohesivos, la forma tiende a ser en “U”, mientras que para materiales más resistentes la forma típica es en “V”.

Las cárcavas se encuentran localizadas normalmente en aquellos sectores del relieve con una concentración de escurrimiento muy importante (vaguadas o desagües naturales). Al aumentar el caudal transportado en estos sectores debido, entre otras causas, a un cambio de uso en el área de aporte, obras hidráulicas, o alteración de la cubierta vegetal en el mismo cauce, se produce un desequilibrio por el aumento de la velocidad y el volumen del escurrimiento, lo cual genera un pequeño surco de erosión en el eje del cauce, localizado aguas abajo de la media loma. En el pequeño surco comienza a producirse un pequeño salto hidráulico y va creciendo en forma retrocedente, es decir en forma opuesta al escurrimiento, pues el salto de agua va aumentando de altura y por lo tanto de energía, debilitando el suelo subyacente y provocando la caída de bloques en la cabecera (Figura 13). A diferencia de la erosión en pequeños surcos en este proceso, debido a la magnitud del mismo, se generan zanjas o cárcavas de grandes dimensiones, que no pueden ser borradas por el laboreo. Estas formaciones pueden llegar a secciones de decenas de m y longitudes de km. Estas cárcavas pueden ramificarse mientras permanecen activas.



Figura 13. Vista de una cabecera de cárcava con proceso de debilitamiento y crecimiento en el sentido de la flecha

La ciencia ha desarrollado algunos modelos de predicción de la erosión en cárcavas (Kirby y Morgan, 1994). La expresión siguiente considera el tamaño de la cuenca y la precipitación mínima como factores que regulan el avance de las cárcavas (SCS, 1966, citado por Kirby y Morgan, 1994):

$$R = (5,25 \times 10^{-3}) \times A^{0,46} \times P^{0,2}$$

R = avance promedio anual de la cabecera en m

A = área de desagüe de la cuenca por encima de la cabecera en m² y

P = precipitación total de lluvias de 24 horas igual o mayor a 12,7 mm para un período determinado, convertida a una base anual promedio en mm.

Utilizando este procedimiento para una cuenca representativa de las condiciones del sur de Córdoba, se estimaron avances promedio del orden de 28 m/año, con máximos de 80 y mínimos de 6 m/año (Cisneros et al., 2005).

Este tipo de erosión alarma a los productores agropecuarios por su dinámica y los daños que implica, no sólo en los lotes sino también en los caminos rurales.

e) Erosión por movimientos en masa: implica el desplazamiento de grandes volúmenes de material, frecuentemente en suelos someros asentados sobre un material impermeable, como rocas graníticas, bajo fuertes pendientes. En estas condiciones el material “fluye” sobre la interfase suelo-roca por un efecto mecánico de disminución de la resistencia al corte, aumento del peso y lubricación del contacto entre ambas capas.

El desmonte y el sobrepastoreo pueden ser causas desencadenantes. Este tipo de fenómeno ha dado lugar a eventos catastróficos en cuencas torrenciales de todo el mundo, en donde recibe variadas denominaciones: coladas de barro, flujos de lodo, desprendimientos de ladera, aluviones, remoción en masa o volcanes en el NO argentino, región donde es muy frecuente (Figura 14).



Figura 14. Manifestaciones de erosión por movimientos en masa

f) Erosión de cursos permanentes: los bordes y fondos de ríos y arroyos son las zonas de la cuenca más susceptibles a la erosión en virtud de su proximidad al cauce, y a que deben soportar la máxima energía de las crecientes. La erosión de márgenes se produce en el pie del río debido a la acción erosiva de la corriente que desestabiliza la base y produce el desmoronamiento del resto de la margen, en forma similar al mecanismo descrito para la erosión en cárcavas. Este mecanismo se da típicamente en los sectores cóncavos de meandros o curvas de ríos de llanura (Figura 15).



Figura 15. Erosión de margen de ríos

Es un fenómeno relacionado estrechamente a la eliminación de la vegetación de la zona de riberas de la mayor parte de los ríos de la región central de Argentina, causada por el avance de la frontera agrícola y la sobreexplotación de recurso forestal, arbustivo y herbáceo de los denominados bosques en galería. Otros aspectos que regulan la magnitud de este tipo de erosión son la presencia de materiales poco cohesivos en las márgenes y la frecuencia y caudal de las crecientes ocurridas en la cuenca de aporte.

Este tipo de erosión puede producirse como erosión transversal en todas aquellas secciones donde se reduce el ancho del río, erosión en las curvas que profundiza el cauce en la zona cercana a la orilla cóncava (meandro), erosión al pie de obras realizadas en el lecho del río, erosión local en estribos o al pie de obras unidas a la margen: similar a la anterior para obras en la margen, erosión aguas abajo de presas por reducción de la carga de sedimentos, erosión local aguas debajo de obras de desagüe, erosión aguas arriba de cortes de meandros y rectificaciones, erosión bajo tuberías que se colocan en el lecho del río, entre las más comunes.

CUESTIONARIO GUÍA

1. Qué es erosión natural y acelerada. Defina erosión hídrica.
2. Cuáles son los agentes principales que producen el desprendimiento y transporte de las partículas en la erosión hídrica
3. Compare la energía para el desprendimiento y la capacidad de transporte de sedimentos de la gota de lluvia del escurrimiento laminar y en surcos cuando el 50% de la lluvia escurre.
4. Qué tipo de textura es más susceptible a este proceso.
5. De qué depende la velocidad del escurrimiento superficial.
6. Explique las razones de esta afirmación: tanto la lluvia como el escurrimiento tienen la capacidad de desprendimiento y transporte, siendo aquel proceso que ocurra en menor medida el que finalmente determine cuanto suelo se pierde.
7. Cuáles son los factores que regulan la erosión hídrica.
8. Cuáles son las principales consecuencias de este tipo de erosión.
9. Describa lugares del país donde es factible encontrar erosión hídrica, en cada caso especifique tipo de erosión. Cuáles cree que son las principales causas en los casos descritos.
10. Describa cuáles son los tipos de erosión hídrica, por qué se produce c/u y cuál es su consecuencia.
11. Cuáles son las variables que se han considerado en modelos utilizados para la predicción de la erosión laminar y en surcos. Explique la incidencia de estas variables en el proceso.

MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN: ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (EUPS, UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION, USLE)

Estos modelos permiten evaluar mediante un indicador cuantitativo el grado de erosión presente, y visualizar las principales causas del proceso y sus relaciones, lo que orienta acerca de las técnicas de manejo más apropiadas.

Desde el punto de vista de su concepción y su base de cálculo, los modelos de erosión pueden clasificarse en (Morgan, 1995):

- a) Modelos físicos: son modelos a escala (maquetas), desarrollados en laboratorio, que asumen una similitud entre el modelo y el mundo real
- b) Modelos analógicos: usan analogías entre el modelo a simular y modelos mecánicos o eléctricos
- c) Modelos digitales: basados en el uso de computadoras para procesar grandes cantidades de datos.

Dentro de los modelos digitales existen dos tipos de modelos: los *modelos de base física* y los *modelos empíricos*. Los modelos de base física se desarrollan aplicando ecuaciones matemáticas que describen los procesos, con base en leyes fundamentales de la física, en este caso la ley de conservación de la masa y la energía y la ecuación de continuidad. El modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project, Nearing et al., 1989) es un modelo de este tipo.

Los modelos empíricos se desarrollan a partir de relaciones estadísticas entre procesos basados en el tratamiento de grandes bases de datos. Los modelos empíricos pueden ser “*de caja negra*” en los cuales sólo se estudian relaciones entre entradas y salidas, “*de caja gris*”, cuando algunas relaciones entre procesos se conocen y “*de caja traslúcida*” cuando se dan detalles de cómo se relacionan las variables del modelo.

Un ejemplo de este último tipo de modelo es la **Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS)**, también conocida como USLE, por sus siglas en inglés del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, a partir de la década del 50 del siglo pasado. Este modelo se genera a través de relaciones estadísticas desarrolladas a partir de una amplia base de datos experimentales de más de 8.000 parcelas distribuidas en el territorio (Wischmeier y Smith, 1978), que combina diferentes condiciones climáticas, de suelo, pendiente y sistemas de uso y manejo del suelo. Es el método de uso más generalizado para la predicción de la pérdida promedio anual de suelo por erosión hídrica para una determinada rotación de cultivos. Este modelo ha sido utilizado para estimar la erosión en varias situaciones argentinas, por ejemplo en la provincia de Córdoba por Cisneros et al. (2004), de Prada et al. (2008) y Marelli (2012).

La ecuación básica del modelo EUPS es la siguiente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

A= pérdida anual de suelo (Dimensión: masa/área tiempo)

R= factor de erosividad por la precipitación pluvial

(Dimensión: longitud fuerza longitud/área tiempo tiempo), siendo el producto “longitud fuerza” una medida de energía. Es decir que R es la energía de una determinada lluvia por unidad de superficie y tiempo (long fuerza/área tiempo) por la intensidad de dicha lluvia (longitud/tiempo).

K= factor de erodabilidad del suelo (Dimensión: masa área tiempo/área longitud fuerza longitud). Es la pérdida de suelo por unidad de área y año, por cada unidad de R.

L= factor de longitud de la pendiente

S= factor de gradiente de pendiente

(LS: factor combinado (adimensional))

C= factor de manejo de cosechas (adimensional)

P= factor del método de control de erosión (adimensional)

Las unidades de expresión de A, R, K y L varían de acuerdo al sistema de medidas utilizado, como se ve a continuación (Tabla 5).

Tabla 5. Unidades de los factores de la EUPS según sistema de medidas.

FACTOR	DIMENSIÓN	SISTEMA ANGLOSAJÓN	SISTEMA MÉTRICO INTERNACIONAL	SISTEMA MÉTRICO DECIMAL
A	$\frac{\text{masa}}{\text{area tiempo}}$	$\frac{\text{t cortas}^{(1)}}{\text{acre año}}$	$\frac{\text{t métricas}}{\text{ha año}}$	$\frac{\text{t métricas}}{\text{ha año}}$
R	$\frac{\text{long fuerza longitud}}{\text{área tiempo tiempo}}$	$\frac{\text{pies} - \text{t pulg}}{\text{acre h año}}$	$\frac{\text{MJ mm}}{\text{ha h año}}$	$\frac{\text{J mm}}{\text{m}^2 \text{ h año}}$ $\frac{\text{kg m mm}}{\text{m}^2 \text{ h año}}$ $\frac{\text{t métrica m mm}}{\text{ha h año}}$
K	$\frac{\text{masa área tiempo}}{\text{área long fuerza long}}$	$\frac{\text{t cortas acre h}}{\text{pies t pulg acre}}$	$\frac{\text{t métrica ha h}}{\text{MJ mm ha}}$	$\frac{\text{kg m}^2 \text{ h año}}{\text{m}^2 \text{ J mm}}$

⁽¹⁾: t corta equivale a 907,18 kg

La EUPS puede utilizarse para (Kirby y Morgan, 1994):

- estimar la pérdida anual promedio de suelo de una pendiente, en un campo con condiciones específicas de uso y manejo de la tierra
- apoyar la toma de decisiones en la selección de sistemas de uso y manejo, y de prácticas de conservación para condiciones específicas de suelos y pendientes
- estimar el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio en el uso o de las técnicas de conservación sobre una situación dada
- determinar cómo pueden aplicarse o alternarse las prácticas de conservación para permitir un uso más intensivo de las tierra, manteniendo una pérdida de suelo tolerable
- estimar las pérdidas de suelo en áreas con un uso de suelos distinto del agrícola
- obtener estimaciones de pérdida de suelo para que los organismos ejecutivos responsables de la Conservación de Suelos determinen las necesidades de conservación

Los factores de la ecuación se desarrollaron mediante una unidad de evaluación llamada parcela estándar; la misma posee una longitud de 22,13 m sobre una pendiente uniforme de 9 % en sentido longitudinal. La parcela fue laboreada a favor de la pendiente y estuvo bajo barbecho continuo durante por lo menos dos años. Esta parcela se tomó como base para definir la variación en L, S, C y P. La Estación Experimental INTA Paraná posee parcelas de este tipo que se ilustran en la Figura 16.



Figura 16. Parcelas para evaluar los parámetros de la USLE. INTA Paraná

Los términos de la ecuación EUPS, son los siguientes:

R: EROSIVIDAD POR LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Se define como la capacidad potencial de la lluvia para provocar erosión. Las precipitaciones son el agente activo del proceso erosivo. Éstas pueden caracterizarse por la cantidad de agua caída, su distribución, duración, frecuencia e intensidad.

- Cantidad: es la precipitación media anual. Este factor no siempre afecta al proceso erosivo, pues el valor de precipitación anual podría ser alto y no haber, incluso, erosión, si esta suele ser de baja intensidad. No interesa cuánta agua cae, sino cómo lo hace.
- Distribución: puede ser uniforme en el año (clima templado), unimodal con una sola estación húmeda (clima tropical) o bimodal con 2 estaciones húmedas separadas por un período seco (clima subtropical).
- Duración: lluvias suaves menos prolongadas pueden ser menos erosivas que lluvias cortas e intensas.
- Frecuencia: incide sobre la erosión de manera indirecta. El suelo saturado y “planchado” por una lluvia precedente tiene disminuida su capacidad de infiltración. Por esta razón la mayor parte de la lluvia escurrirá si hay pendiente. Es decir, las lluvias frecuentes son más erosivas que las aisladas.
- Intensidad: es la característica más importante y está estrechamente relacionada con la erosión potencial.

La *erosividad de la lluvia (R)* es una función de dos características de las lluvias intensas: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos.

A continuación se presenta la ecuación de regresión que describe la energía cinética de una lluvia en función de la intensidad del evento:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I$$

E_c = energía cinética de la lluvia (Mj/ha mm)

I = intensidad de la precipitación (mm/h)

También la Energía cinética puede calcularse como:

$$E_c = \frac{m \times V^2}{2}$$

m: masa

V: velocidad

El tamaño de las gotas de lluvia varía entre 0,2 mm en una llovizna hasta tamaños de 5-6 mm en una tormenta intensa. Mientras las gotas caen están sometidas a la aceleración de la gravedad y a la fuerza de fricción del aire. Cuando un cuerpo cae libremente por efecto de la gravedad se acelera hasta que la resistencia que opone el aire se iguala con la atracción gravitatoria. De ahí en más continúa cayendo a velocidad constante. Esta velocidad se denomina **velocidad límite** y depende del tamaño y forma del objeto. Las gotas más grandes tienen una velocidad límite mayor (9 m/s) y por lo tanto una energía cinética mucho mayor (velocidad es término cuadrático) (Figura 17).

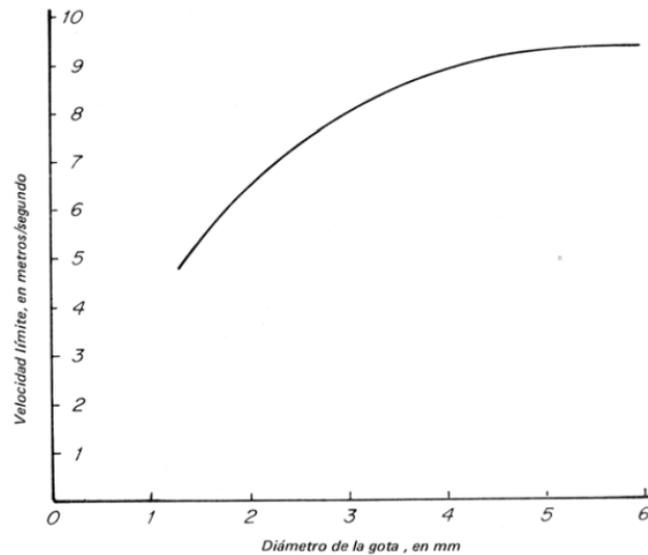


Figura 17. Velocidad límite de las gotas de lluvia

Para intensidades entre 50 y 100 mm/h es alta la proporción de gotas con tamaños superiores a los 4 mm y existe un pico en la Ec de la tormenta (Figura 18). Con intensidades superiores a 100 mm/h la proporción de gotas grandes disminuye, debido a que las gotas de más de 5 mm se parten en gotas más finas, y también lo hace la Ec (Figura 19). Pero, a intensidades mayores a 200 mm/h las condiciones favorecen la coalescencia de gotas pequeñas, aumenta la proporción de gotas grandes y la Ec alcanza un nuevo pico con intensidades de 250mm/h.

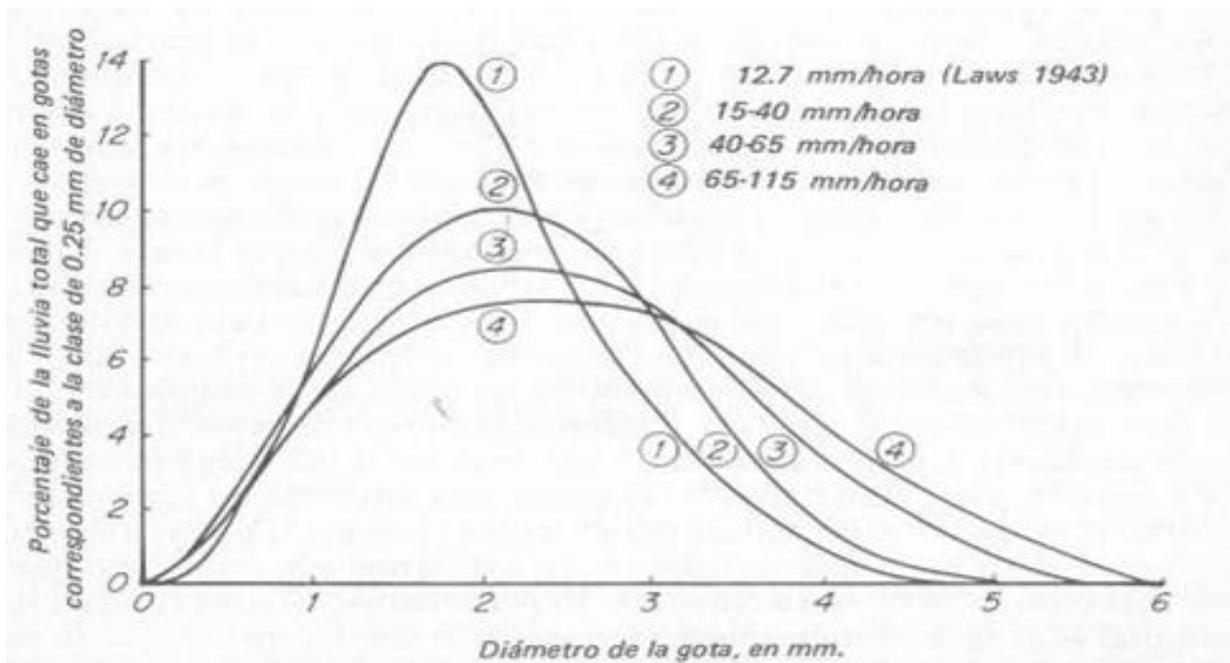


Figura 18. Distribución del tamaño de gotas en intensidades medias y bajas

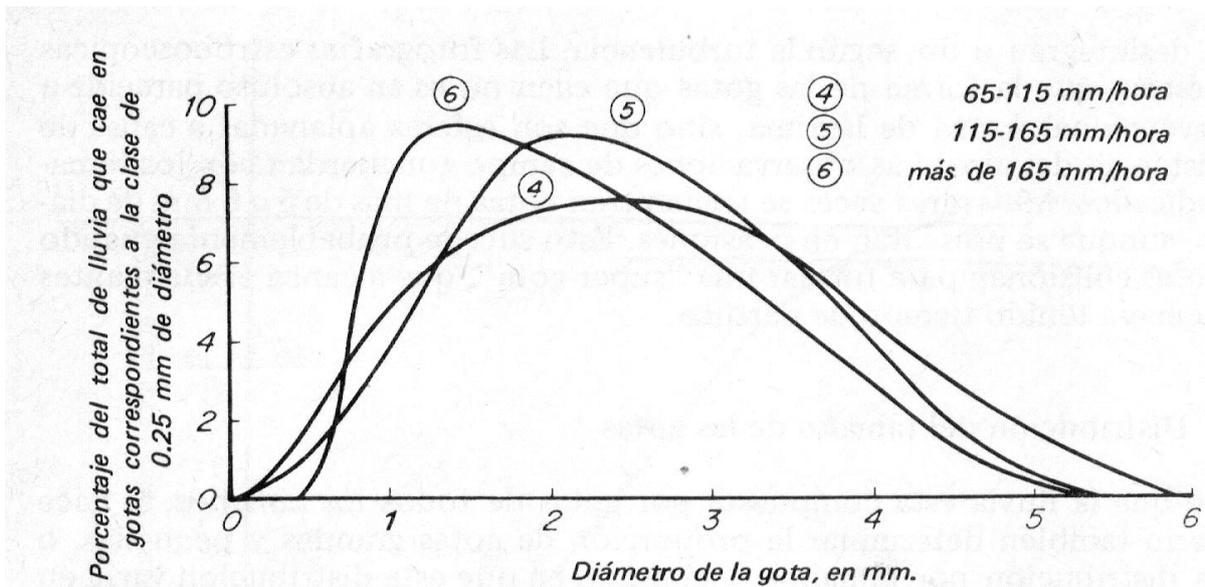


Figura 19. Distribución del tamaño de gotas en intensidades altas

El mejor índice para conocer la distribución del tamaño de gotas es el volumen mediano (D50) (Figuras 20 y 21).

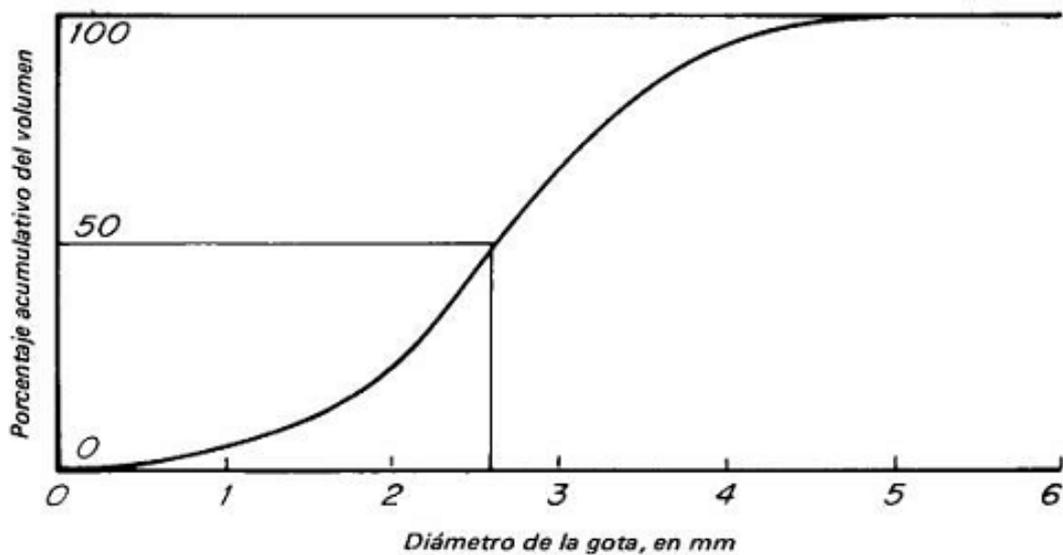


Figura 20. Determinación del diámetro de gota correspondiente al volumen mediano (V50).

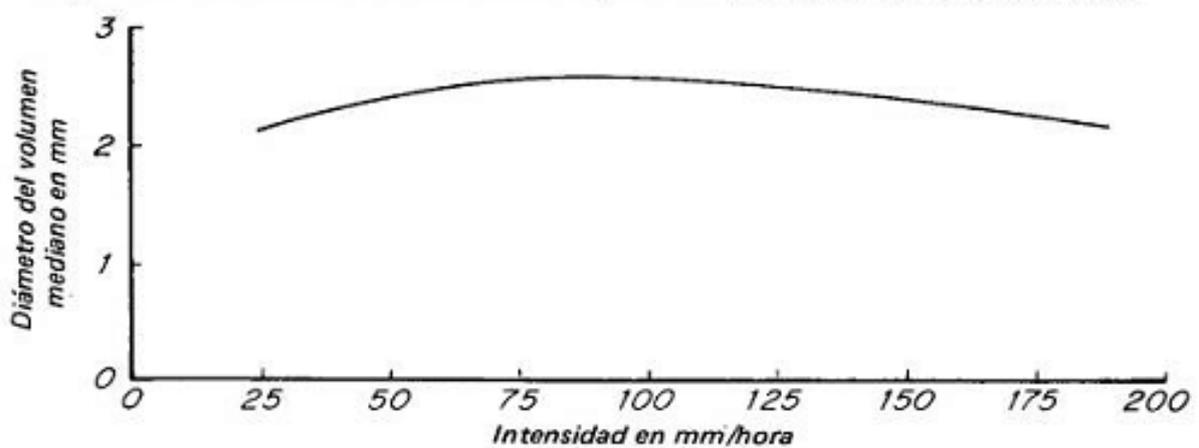


Figura 21. Relación del diámetro de gota correspondiente al volumen mediano y la intensidad

El factor R de la EUPS, corresponde a la sumatoria de los productos de la energía cinética total de la tormenta (EcT) por la intensidad *horaria* de una lluvia de duración igual a 30 minutos (I30), lo que se denomina **EI30** ($EI30 = EcT \times I30$).

$$R = \sum_i^n EI30_i$$

R: energía cinética erosiva anual (MJ mm/ha h año)

EI30i: energía cinética erosiva de cada tormenta en el año (MJ mm/ha h)

n: número de tormentas anuales

Se trata de una medida de la manera en que se combinan estas variables y define los efectos conjuntos del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de la escorrentía, con el transporte de las partículas del suelo procedentes de un campo. Esta variable se obtuvo originalmente a través de intensa experimentación en parcelas de EEUU.

En los primeros estudios se comprobó que a bajas intensidades de lluvias éstas poseen escasa energía cinética, no provocando erosión. Por ello se considera lluvia erosiva a precipitaciones superiores a 12,7 mm a 25 mm/h, de acuerdo a la fuente bibliografía, separada por al menos 6 h de los eventos anteriores y posteriores. La intensidad de 30 minutos de la tormenta se calcula a través de los registros de los pluviógrafos, localizando en ellos la mayor cantidad de lluvia caída en 30 minutos y multiplicando esta cantidad por 2 para expresarla en forma de intensidad horaria. En la Figura 22 se ilustran registros de pluviógrafos.

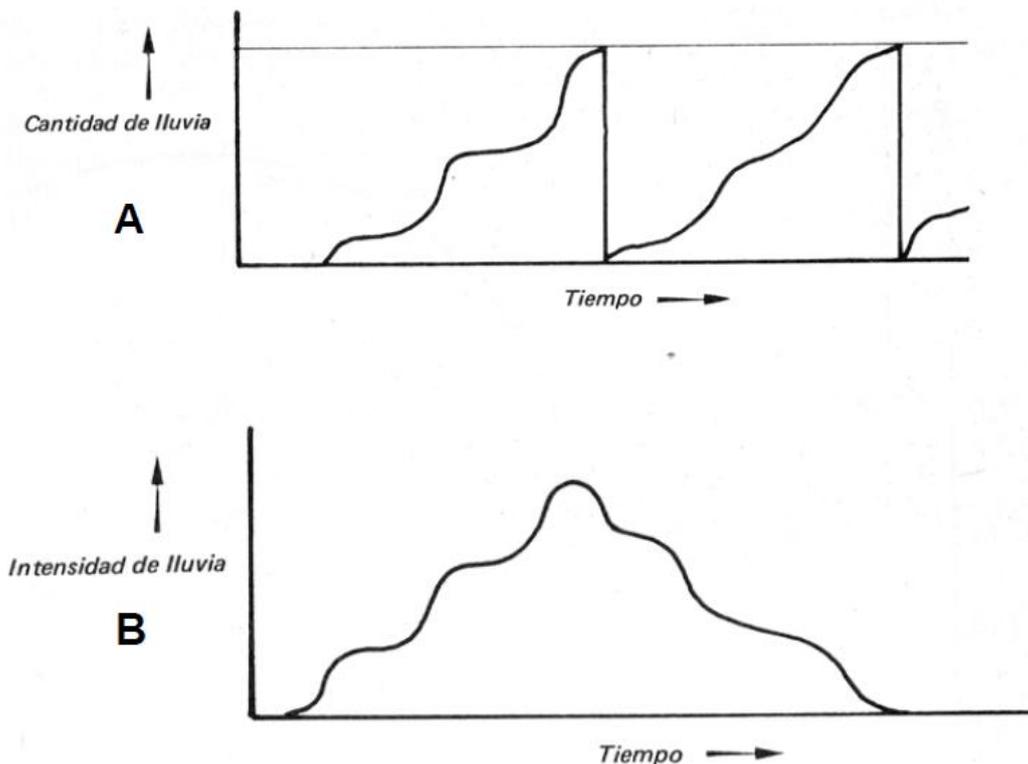


Figura 22. Mediciones de la intensidad de una lluvia. A) forma indirecta a través de la pendiente de la gráfica. B) directa en la ordenada de la gráfica (el área bajo la gráfica es la cantidad de lluvia caída)

Para el cálculo de la **energía cinética total (EcT)** de una tormenta se establecen intervalos de intensidades, por ej.

- 0-25 mm/h
- 25-75 mm/h
- > 75 mm/h

Para cada intervalo se calcula la energía cinética de cada mm de agua caída (e_i) aplicando la fórmula

$$e_i = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I_M$$

e_i : energía cinética por mm (MJ/ha mm)

I_M : intensidad de lluvia para dicho intervalo (mm/h).

Cabe aclarar que existen muchas otras formulaciones calibradas en distintos lugares del mundo. Algunos ejemplos se ilustran en la Figura 23.

El resultado obtenido se multiplica por el total de mm de agua caída en ese intervalo de intensidad (E_i):

$$E_i = e_i \times p_i$$

E_i : energía total del intervalo (MJ/ha)

e_i : energía/mm para ese intervalo (MJ/ha mm)

p_i : total de mm de lluvia caído en ese intervalo (mm)

Para determinar la energía cinética total (E_{cT}) de la tormenta, se suman las E_i de cada intervalo, siendo n el número de intervalos.

$$E_{cT} = \sum_i^n E_i$$

E_{cT} : energía cinética total (MJ/ha)

E_i : energía total del intervalo (MJ/ha)

n : número de intervalos

Finalmente se efectúa el producto de la energía total del evento (E_{cT}) por I_{30} obtenida de los pluviógrafos, para calcular el **EI30** de la tormenta.

A continuación un **EJEMPLO** en unidades del Sistema Métrico Internacional

Clase de intensidad (mm/h)	Valor representativo de la clase	e_i ⁽¹⁾ (MJ/ha mm)	Cantidad de lluvia ⁽²⁾ (mm)	E_i ⁽³⁾ (Mj/ha)
0-25	-	0 (no erosiva)	30	0
25-50	37,5	0,256	20	5,13
50-75	62,5	0,276	10	2,76
>75	75	0,283	5	1,41
total			65	$E_{cT}=9,30$ ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Se obtiene aplicando: $e_i = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I_M$

⁽²⁾ Se obtiene de pluviógrafos o pluviómetro

⁽³⁾ Producto de columnas 2 x 3

⁽⁴⁾ Sumatoria de columna 4

Suponiendo por ejemplo para esta tormenta un $I_{30} = 22,5/30$ min, por ende 45mm/h (a partir de pluviógrafo). Luego: **EI30** = $E_{cT} \times I_{30} = 9,30 \text{ MJ/ha} \times 45 \text{ mm/h} = 418,48 \text{ MJ mm/ha h}$.

Es así que el **EI30** se calcula para cada tormenta y la sumatoria permite tener los valores semanales, mensuales y anuales de erosividad. Para establecer isolinéas de R, se hacen estos cálculos para períodos de entre 10-20 años, los cuales se promedian.

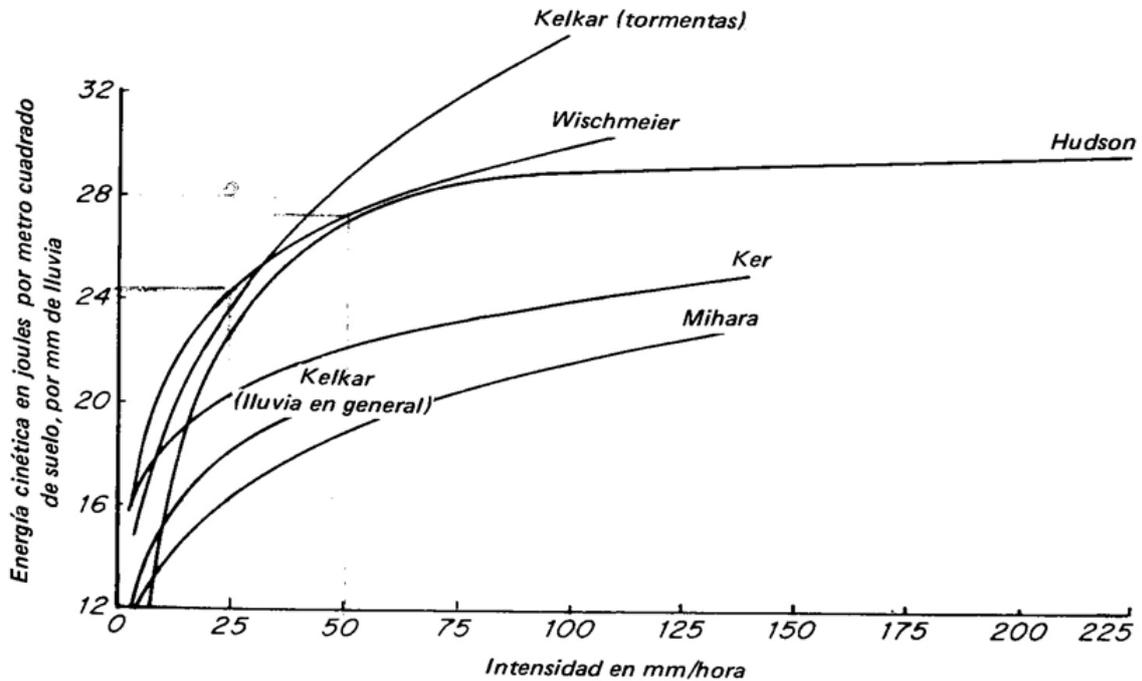
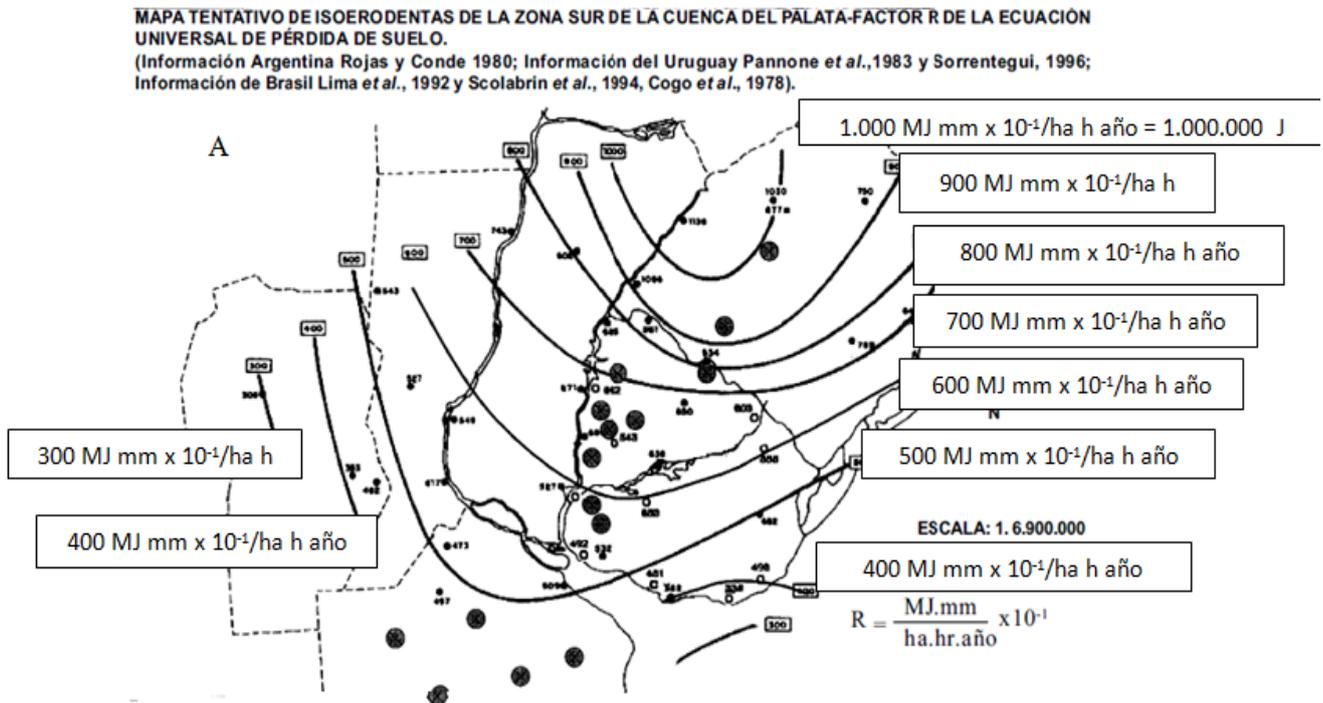


Figura 23. Relación entre la energía cinética ($J/m^2 mm$) de la lluvia y su intensidad (mm/h). (Cada curva llega hasta la máxima intensidad registrada. Los estudios se llevaron a cabo en los siguientes países: Hudson (Rodhesia), Kelkar (India), Ker (Trinidad), Mihara (Japón), Wishmeier (EEUU).

Existen mapas confeccionados con datos para diferentes localidades como los que se ilustran en las Figuras 24 y 25.



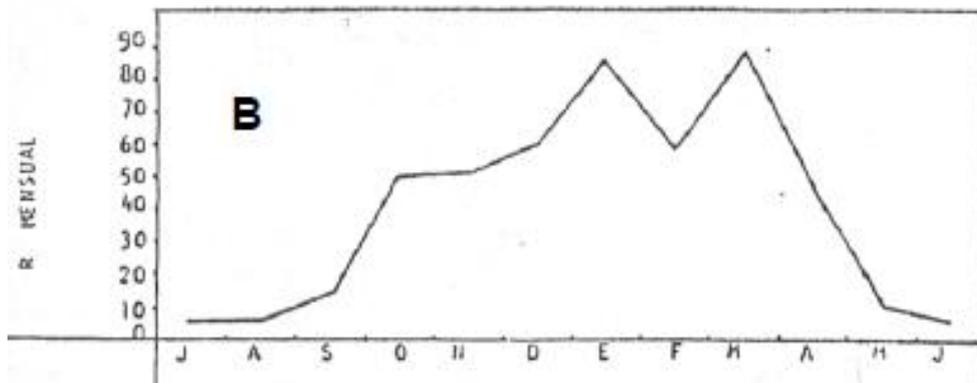


Figura 24. A) Isolinias de igual potencialidad erosiva de la lluvia ($\text{MJ mm}/\text{ha h a} \times 10^{-1}$) (Sistema de unidades métrico internacional). B) Valores de erosividad de la lluvia mensuales

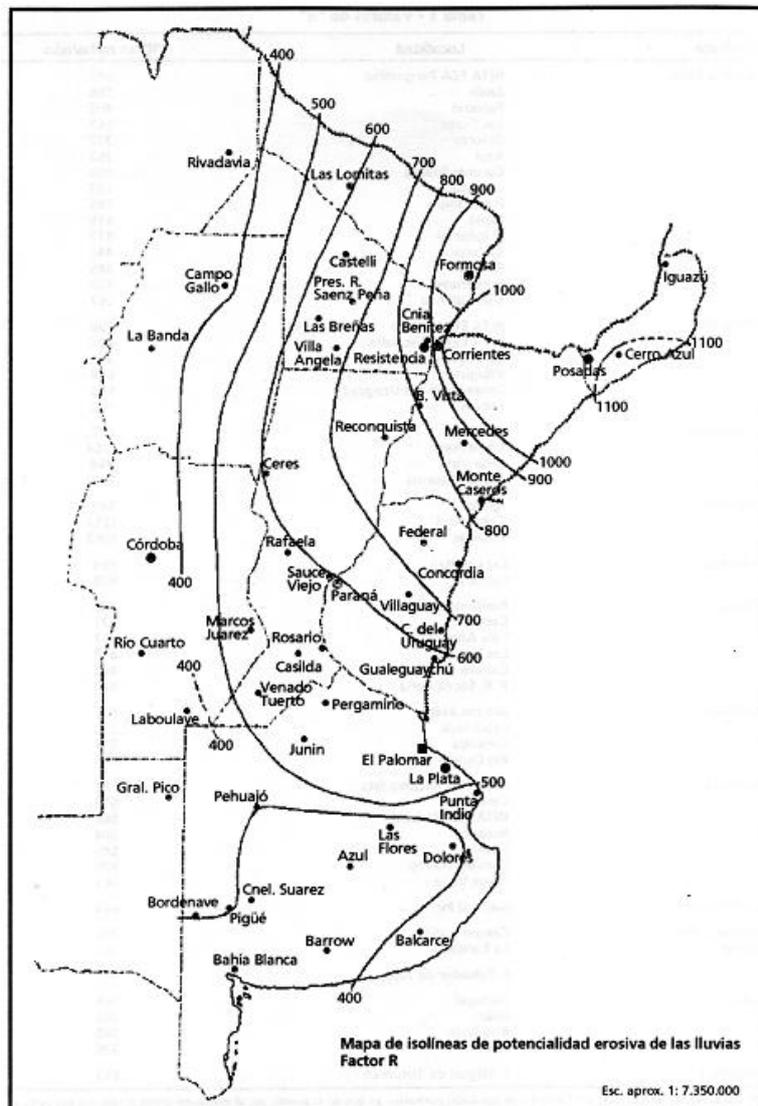


Figura 25. Mapa de isoerodentas expresado en $\text{t métrica-m mm}/\text{ha h a}$ (sistema de unidades métrico decimal) (Scotta et al, 1989).

Para la región pampeana se han investigado los valores de R (Rojas y Conde, 1985), cuyas magnitudes oscilan entre 10.000 $\text{MJ mm}/\text{ha h a}$ para el Norte de Misiones, y 3.000 para el Oeste de Córdoba. La estación experimental Paraná del INTA, cuenta con una aplicación web que permite la utilización de la ecuación USLE, para cada uno de los departamentos de la provincia (en <http://inta.gov.ar/unidades/631000>).

K: ERODABILIDAD DEL SUELO

Se define como la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión, expresada en unidades de pérdida de suelo (t/ha año) por cada punto de R (J/ ha año), por lo que el factor K puede quedar expresado en t/J. Este factor refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas cuando los demás factores que afectan a la erosión son los mismos. Como se discutió precedentemente, la susceptibilidad de un suelo a la erosión es mayor en texturas intermedias, en suelos con bajos tenores orgánicos, y con degradación estructural. Un suelo con alto porcentaje de arcilla tiene una elevada cohesión con agregados estables, en términos generales, poco proclives al desprendimiento. Por el contrario su capacidad de infiltración es reducida, especialmente cuando el suelo está saturado y tienen alta capacidad de ser transportados a distancia. Por el contrario, las arenas son de baja cohesión y por lo tanto susceptibles al desprendimiento, pero con gran capacidad de infiltración y poca susceptibilidad al arrastre por su peso. Es decir, en ambos extremos texturales, existen factores que controlan el proceso erosivo. Por lo tanto, los problemas más graves aparecen en texturas intermedias, con elevados contenidos de limo y arenas finas, que comparte los aspectos negativos de las arcillas y las arenas más gruesas, sin cualidades que controlen el proceso. Es así que el factor K es función de cinco parámetros del suelo: porcentaje de limo más arena fina, porcentaje de arena, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

En nuestro país solo la EEA de INTA Paraná tiene instaladas parcelas experimentales funcionando que permiten obtener datos aceptables, para suelos con menos del 70% de limo, aplicando la siguiente ecuación:

$$100 K = 2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3)$$

(si se utilizan unidades anglosajonas)

$$100 K = 1,292 x [2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3)]$$

(si se utiliza sistema métrico decimal y R se expresa en ton-m mm/ha h año)

$$100 K = 0,1019 x 1,292 x [2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3)]$$

(si se utiliza sistema métrico internacional y R se expresa en MJ mm/ha h año)

- M = (fracción de 0.002 a 0.1 mm) x (100- % de arcilla)
- a = % de materia orgánica
- b = estructura superficial según:
 - * 1 – granular muy fina (Mf); ag. de – 1mm
 - * 2 – granular fina (fi); ag. de 1-2 mm
 - * 3 – granular media a gruesa (me a gr); ag.de 2-10 mm
 - * 4 bloques, laminar o masiva; ag. de todos los tamaños
- c = permeabilidad en la capa menos permeable del perfil (Tabla 6)

Tabla 6. Valor C de permeabilidad para el empleo de la ecuación de erodabilidad (INTA Paraná).

Valor de C	Clase de permeabilidad	Permeabilidad de la capa menos permeable (cm/h)
1	Rápida	> 12,5
2	Moderadamente rápida	6,25-12,5
3	Moderada	2 - 6,25
4	Moderadamente baja	0,5 - 2
5	Baja	0,12 – 0,5
6	Muy baja	< 0,2

Existen formas gráficas y aplicaciones web para obtener el parámetro K. En la Figura 26 se presenta el nomograma para la obtención de K. Los valores obtenidos corresponden a unidades del sistema anglosajón, que deben ser consistentes con el uso de unidades de R (Tabla 7). La versión revisada de la USLE permite la estimación de K automáticamente.

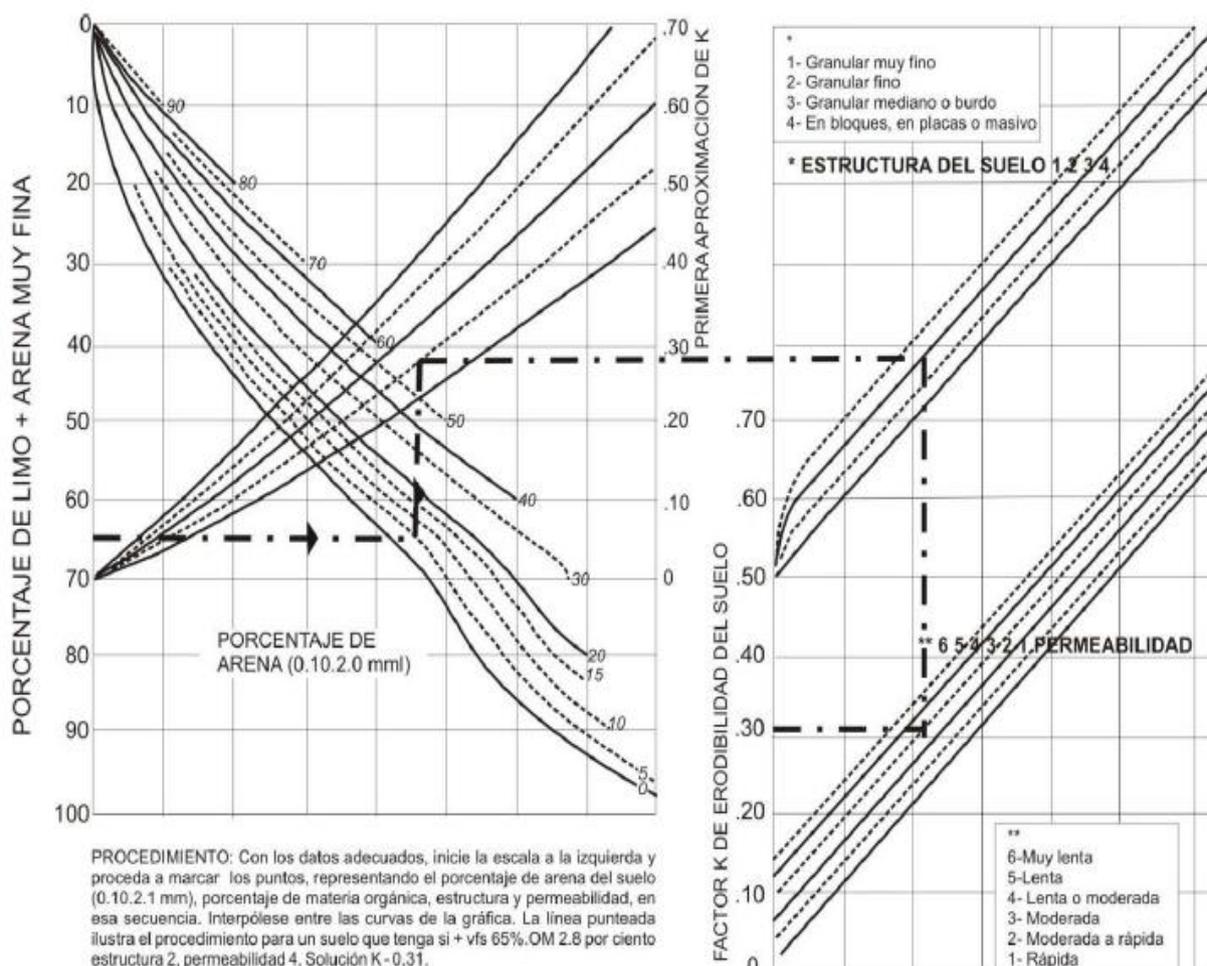


Figura 26. Nomograma para la obtención del factor K de la USLE (Sistema anglosajón).

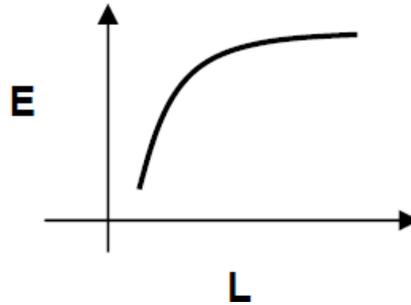
Tabla 7. Factores de conversión del sistema anglosajón al métrico decimal y métrico internacional.

Factor	Sistema Anglosajón (SA)	Sistema métrico decimal (SMD)		Sistema métrico internacional (SMI)	
	Unidad	Factor	Unidad	Factor	Unidad
A	$\frac{t \text{ cortas}^{(1)}}{\text{acre año}}$	2,242	$\frac{t \text{ métricas}}{\text{ha año}}$	1	$\frac{t \text{ métricas}}{\text{ha año}}$
R	$\frac{\text{pies } t^{(2)} \text{ pulg}}{\text{acre h año}}$	1,735	$\frac{t \text{ métrica m mm}}{\text{ha h año}}$	9,81	$\frac{\text{MJ mm}}{\text{ha h año}}$
K	$\frac{t \text{ cortas acre h}}{\text{pies t pulg acre}}$	1,292	$\frac{t \text{ métricas ha h}}{t \text{ métricas m mm ha}}$	0,1019	$\frac{t \text{ métrica ha h}}{\text{MJ mm ha}}$

t corta= 907,18 kg;

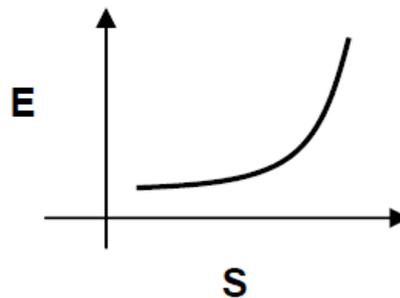
LS: LONGITUD Y GRADIENTE DE PENDIENTE

La longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante como para que ocurra la deposición o hasta el punto en el que el escurrimiento entra en un canal definido. La longitud de la pendiente condiciona un mayor volumen de escurrimiento y la pérdida de suelo puede ser expresada mediante la siguiente relación exponencial: **E (pérdida de suelo) = L^{0.6}**.



Al aumentar la longitud también el flujo es más rápido y se produce abrasión. En la región pampeana las pendientes suelen ser largas y de escaso gradiente.

El gradiente de pendiente se expresa en porcentaje (diferencia de cota en 100 m de distancia horizontal). El gradiente afecta a la velocidad del escurrimiento según la siguiente expresión exponencial mayor que la unidad: **E = S^(1.35-1.41)**, siendo **S** el grado de la pendiente y **E** la pérdida de suelo.



En la subregión Pampa Ondulada existe susceptibilidad a la erosión aún cuando las pendientes no superan el 1% (debido a las condiciones climáticas y de suelo).

En cuanto a las posiciones, la media loma alta y media loma son las más desfavorables ya que en ellas las pérdidas de suelo suelen ser netas. En la media loma baja, y en algunos sectores medios, existen procesos simultáneos de pérdida y ganancia de material. En los bajos, y a veces en sectores de la media loma baja, se producen procesos de sedimentación, asociados a la disminución de la velocidad del flujo. Finalmente, por la forma las pendientes se clasifican en **cóncavas** y **convexas**. Estas últimas provocan mayores pérdidas de suelo, por coincidir el mayor grado de pendiente aguas abajo con el mayor volumen de escurrimiento.

Por su grado de complejidad, las pendientes se clasifican en **simples o uniformes** y **compuestas o desuniformes**. En las simples el flujo es de tipo mantiforme que se va concentrando en pequeñas vaguadas; erosionan más que las desuniformes, ya que no hay posibilidades de sedimentación. No obstante, es más fácil realizar prácticas estructurales. En las desuniformes no son constantes ni el gradiente ni la dirección y resultan más complicadas las prácticas tendientes a cortar los escurrimientos.

El método gráfico de la Figura 27 agrega ambos valores para la obtención del factor "LS" adimensional.

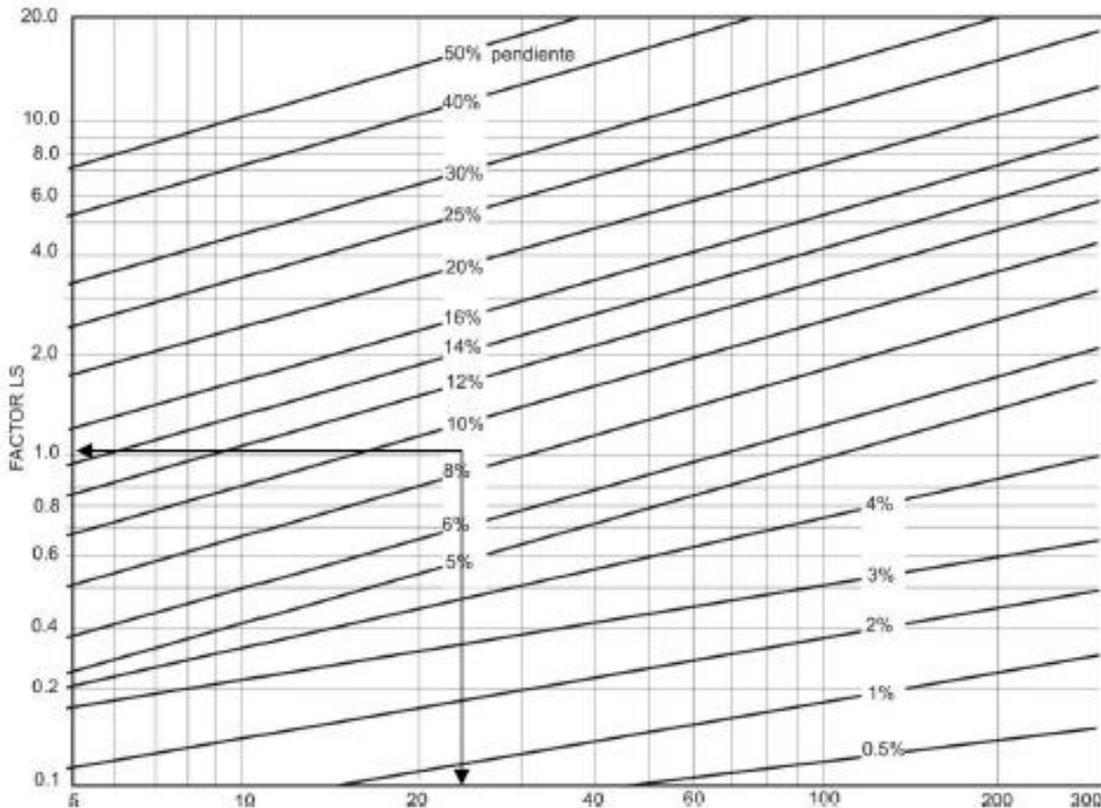


Figura 27. Factor LS calculado sobre la base de longitud (m) y el grado (%) de la pendiente. (USDA, Handbook 537)

El desarrollo de la EUPS se basó en la longitud de una parcela estándar de 22,13 metros, y 9 % de pendiente, por lo tanto el factor de longitud de la pendiente se definió como:

$$L = \left(\frac{x}{22,13} \right)^m$$

L = factor de longitud de pendiente;

x = longitud de la pendiente [m]

m = coeficiente

Según:

$m = 0,5$ si la pendiente $> 5\%$

$m = 0,4$ si la pendiente $< 5\%$ y $> 3\%$

$m = 0,3$ si la pendiente $< 3\%$ y $> 1\%$

$m = 0,2$ si la pendiente $< 1\%$

Las investigaciones determinaron que la pérdida de suelo estaba correlacionada también con una función parabólica del efecto de la inclinación de la pendiente o gradiente:

$$S = 0,065 + 0,045 x s + 0,0065 x s^2$$

S = factor de gradiente de la pendiente;

s = gradiente de la pendiente [%]

Por lo tanto, los valores de LS pueden computarse a partir de la siguiente ecuación:

$$L \times S = \left(\frac{x}{22,13} \right)^m \times (0,065 + 0,045 x s + 0,0065 x s^2)$$

Ambas ecuaciones se encuentran resueltas gráficamente en la Figura 27. Obsérvese que el valor $LS=1$ coincide aproximadamente con la parcela estándar del SCS: 22,3 m y 9 % de gradiente. Situaciones con valores menores o mayores de L y S , darán como resultado menores y mayores valores del factor LS respectivamente.

C: MANEJO DE CULTIVOS

Representa la relación de pérdida del suelo a partir de una condición específica de cultivo o cobertura, con la pérdida del suelo a partir de un estado de barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación pluvial. La condición de barbecho desnudo, laboreado a favor de la pendiente toma el valor C=1.

Este factor incluye los efectos interrelacionados de la cubierta de canopeo o rastrojos, la secuencia y tipo de cultivos, el nivel de productividad, la duración de la estación de crecimiento, las prácticas de cultivo, el manejo de residuos, los sistemas/operaciones de labranza, todo en relación a la distribución estacional de la erosividad de la lluvia. Cada una de las condiciones del suelo se distribuye anualmente y se integra con la erosividad de la lluvia, dando como resultado el factor C de la rotación establecida. Es el factor de mayor complejidad de estimación de la USLE, debido a las a las múltiples combinaciones de los sistemas de cultivo y de manejo. En la Tabla 8 se indican algunos valores orientativos de C, para cultivos, usos y manejos tradicionales de la región central argentina.

Tabla 8. Valores de C para diferentes cultivos, rotaciones y sistemas de labranza (Marelli et al., 2012).

Cultivo-Secuencia	Sistema de Labranza	
	<i>Convencional</i>	<i>Siembra Directa</i>
Barbecho desnudo, a favor de la pendiente	1	0
Trigo-Soja 2º	0,15	0,09
Soja 1º-Trigo	0,49	0,07
Soja-Maíz	0,34	0,1
Soja-Soja	0,55	0,15
Girasol-Girasol	0,40	0,10
Maní	0,55	0
Sorgo-Soja	0,44	0,13
Campo Natural	0,02	0
Gramíneas Perennes	0,05	0,02
Pasturas Alfalfa+Gramíneas	0,05	0,02
Verdeo de Invierno	0,15	0,09
Forestación Artificial (Eucaliptus de 8 años)	0,006	0

P: PRÁCTICAS DE CONTROL DE LA EROSIÓN

Se define como la proporción de la pérdida de suelo que se obtiene mediante alguna técnica de manejo del relieve en comparación con la pérdida de suelo cuando se cultiva en laderas con 9% de pendiente, a favor de la pendiente (Tabla 9).

Tabla 9. Factor del método de control de la erosión utilizado (P).

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en Contorno	Cultivo en Franjas en Contorno	Terrazas ^(a)
1-2	0,6	0,30	0,12
3-8	0,5	0,25	0,10
9-12	0,6	0,30	0,12
13-16	0,7	0,35	0,14
17-20	0,8	0,40	0,16
21-25	0,9	0,45	0,18

^(a) este valore es para la predicción de la pérdida total fuera del campo. Si se desea realizar el cálculo para un intervalo entre terrazas, deberá utilizarse la distancia entre una y otra terraza para el factor L y el valor de cultivo en contorno para P.

Otro de los efectos más importantes de estas prácticas, además de la reducción en la pérdida de suelo, es en la retención de sedimentos en el campo, en especial en la porción superior de los bordes de las fajas de cultivo, o en los canales de las terrazas. Este efecto se cuantifica a través de la relación entre la pérdida de suelo unitaria, y la cantidad de esa pérdida que sale del lote en consideración, y se denomina Tasa de Transporte de Sedimentos (Sediment Delivery Ratio, o SDR, por sus siglas en inglés). Esta tasa es un parámetro importante en los estudios sobre contaminación por sedimentos o groquímicos transportados por los escurrimientos. Las nuevas versiones del programa (RUSLE2) discutidas a continuación, permiten estimar este parámetro.

TOLERANCIA A LA PÉRDIDA DE SUELO

En términos pragmáticos, la tolerancia de pérdida de suelo es la tasa máxima de erosión de suelo que permite que se sostenga un alto nivel de productividad. En relación a la génesis del suelo, una tasa de erosión tolerable sería aquella pérdida de suelo anual equivalente a la tasa de formación del mismo suelo.

No existe un acuerdo general en la bibliografía sobre cuál es la tasa de erosión tolerable. Tradicionalmente se ha considerado esta pérdida fluctuando entre 4 a 20 t/ha/año (Kirby y Morgan, 1994), aunque otros autores proponen una pérdida menor: 2 a 10 t/ha/año (Troeh, et al., 1991), o 1-2 t/ha/año (Walter y Stutzel, 2009).

Este rango de variación depende de la génesis de los suelos, correspondiendo los valores mayores a los suelos profundos, de textura franca, moderadamente permeables y que tienen características del subsuelo favorables para el crecimiento de las plantas y los menores a los suelos con las características opuestas. Este valor se utiliza como una guía para la planificación en la conservación de suelos.

El criterio utilizado por FAO y el SCS americano para establecer la tolerancia, es tener en cuenta la profundidad explorable por las raíces (profundidad máxima hasta la cual no se presenta ningún impedimento mecánico como horizontes petrocálcicos, duripanes, fragipanes, etc) y la calidad del sustrato u horizonte subsuperficial:

-)favorable: cuando el horizonte subsuperficial presenta una calidad similar al horizonte superior perdido por erosión. Ejemplo: A-AC-C

-)desfavorable: cuando el horizonte subsuperficial presenta una calidad notablemente inferior al horizonte superior perdido por erosión. Ejemplo: A-Bt-C

Valores orientativos pueden verse en la Tabla 10.

Tabla 10. Tolerancia de pérdida de suelo (T)

Profundidad explorada por las raíces (cm)	Pérdida tolerable (t/(ha año))	
	Sustrato subsuperficial favorable	Sustrato subsuperficial no favorable
< 25	2,2	2,2
25-50	4,5	2,2
50-100	6,7	4,5
100-150	9	6,7
> 150	11,2	11,2

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EUPS

Hasta acá se ha descrito el modelo USLE original, usado ampliamente para estimar la pérdida de suelos por erosión laminar y en surcos, a escala de lote. Las sucesivas revisiones del modelo dieron lugar al desarrollo de RUSLE 2, (Revised Universal Soil Loss Equation, versión 2). RUSLE2 estima pérdida de suelo, producción de sedimento y características del sedimento proveniente de la erosión originada por las precipitaciones y el consecuente escurrimiento superficial. Para ello, utiliza factores que representan los efectos del clima (erosividad, precipitación y temperatura), erodabilidad del suelo, topografía, cobertura-manejo y prácticas de sistematización de las tierras. Se trata de un modelo matemático que utiliza un sistema de ecuaciones implementado en un programa de computadora para estimar las tasas de erosión. Este programa es usado para evaluar las tasas de erosión potencial en sitios específicos, guiar el planeamiento de la conservación y control de la erosión, inventariar las tasas de erosión sobre grandes áreas geográficas y estimar la producción de sedimentos en las tierras altas que pueden pasar a ser sedimentos en las cuencas. RUSLE2 puede ser utilizado en cultivos extensivos, pasturas, ambientes naturales y todas aquellas áreas donde el suelo está expuesto al impacto de la gota de lluvia y al escurrimiento superficial producido cuando la intensidad de precipitación excede a la infiltración.

CUESTIONARIO GUÍA

12. ¿Qué es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), cuál es su origen y aplicabilidad?
13. ¿Cuales son los factores que determinan la pérdida anual de suelo y qué unidad se puede expresar esta última? A qué se denomina "parcela standart". ¿Existen en Argentina?
14. ¿Explique porque la ecuación es multiplicativa?
15. ¿Respecto del factor erosividad de la lluvia, cómo se define y de qué depende.Cuál es su unidad. Cómo puede calcularse?
16. ¿Respecto del factor erodabilidad del suelo, cómo se define y de qué depende.Cuál es su unidad. Cómo puede calcularse?
17. ¿A qué se denomina factor "LS". De qué depende. Cómo puede calcularse. Qué valores puede tomar y por qué. Por qué es adimensional?
18. ¿A qué se denomina factor de cultivo "C". Por qué es adimensional. Qué valores puede tomar. De qué depende?
19. ¿A qué se denomina factor de prácticas de control "P"? ¿Por qué es adimensional? ¿Qué valores puede tomar? ¿De qué depende?
20. ¿Qué se entiende por tolerancia a la pérdida de suelo? ¿De qué depende el valor? ¿Qué valores puede tomar? ¿Por qué es adimensional?
21. ¿Conoce actualizaciones del modelo?
22. ¿Sabe si en Argentina se ha utilizado esta ecuación?

PRÁCTICAS PARA LA PREVENCIÓN Y EL CONTROL DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Las prácticas para el tratamiento de la erosión hídrica pueden agruparse de distintas maneras. A título de ejemplo como prácticas agronómicas y estructurales, o de prevención y control, ó de manejo de la infiltración y del escurrimiento, etc.

1.- Agronómica y estructurales

a) Agronómicas:

- Rotaciones
- Labranzas conservacionistas
- Forestación
- Praderización y pastoreo racional
- Cultivo en contorno
- Cultivo en franjas

b) Estructurales:

- Terrazas de desagüe
- Terrazas de absorción
- Desague vegetado
- Canal de desvío o guarda
- Diques y presas
- Rastrillos y fainadas

2.- Prevención y control

a) Prevención

- Rotaciones
- Labranzas conservacionistas
- Forestación
- Praderización y pastoreo racional

b) Control

- Cultivo en contorno
- Cultivo en franjas
- Terrazas de desagüe
- Terrazas de absorción
- Desague vegetado
- Canal de desvío o guarda
- Diques y presas
- Rastrillos y fainadas

3.- Manejo de la infiltración/cobertura y escurrimiento

a) Infiltración/Cobertura

- Manejo de rastrojos de cosecha/mulches
- Manejo del canopeo de cultivos en pie y rotaciones
- Cultivos de cobertura
- Manejo de la estabilidad estructural
- Descompactación mecánica de costras
- Manejo del pisoteo animal

b) Escurrimiento

- Manejo del relieve
- Cultivos cortando la pendiente
- Cultivos siguiendo curvas de nivel o contorno
- Cultivos en fajas
- Terrazas de banco
- Terrazas de desagüe
- Terrazas de absorción
- Canales
- de guarda e interceptores
- de desagüe vegetado
- Prevención y control de cárcavas
- Control de caudales máximos de escurrimiento
- Técnicas de bioingeniería
- Fajas buffer
- Forestación de riberas
- Forestación de cárcavas
- Rastrillos
- Estacas vivas
- Colchón de ramas
- Gavión de roca y pared de piedra vegetado
- Espigones

En muchas ocasiones se utilizan simultáneamente más de una técnica de manera complementaria. A continuación se describirán prácticas que se enmarcan en el criterio descrito como tercero.

PRÁCTICAS DE MANEJO DE LA INFILTRACIÓN Y DE LA COBERTURA

Como se ha visto en el Capítulo *Concepto de Hidrología de Superficie y Cálculo de Escurrimiento* la infiltración es el componente hidrológico más importante en la mayoría de las cuencas, capaz de modificar el volumen y caudal de escurrimiento. Cuando la velocidad de infiltración es elevada, menos agua escurrirá y menor será el riesgo de erosión. La magnitud de esta variable se expresa en unidades de longitud por unidades de tiempo, normalmente mm/hora.

Tanto la velocidad de infiltración inicial (inmediatamente comenzado el proceso) como la velocidad de infiltración final o base (luego de la estabilización del valor de velocidad de infiltración), constituyen las válvulas que regulan el ingreso de agua al perfil y consecuentemente las pérdidas de agua por escurrimiento.

Cualquier impedancia mecánica que modifique la estructura porosa del suelo y altere el ingreso y movimiento del agua afecta la velocidad de infiltración. Estos obstáculos disminuyen la conductividad hidráulica del suelo, actuando como retardadores del ingreso de agua, debido a que la conductividad hidráulica es función del diámetro efectivo de poros.

a) Manejo de rastrojo de cosecha/mulches

Los residuos de cosecha actúan fundamentalmente sobre el proceso hidrológico de interceptación, y en menor medida sobre la detención y retención superficial. Esta cobertura protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento, generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo. De esta manera evitan el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas con probabilidad de encostramientos que disminuyen drásticamente la infiltración. Paralelamente los rastrojos aumentan la rugosidad en superficie disminuyendo las pérdidas de agua por escurrimiento. El efecto protector que genera el rastrojo es función de la proporción de suelo cubierto por el mismo, de su distribución, de la cantidad y del tamaño de los residuos, ya que residuos grandes tardan más en descomponerse que residuos de menor tamaño, generando de esta forma una protección duradera en el tiempo. Es conveniente que el residuo este anclado en el suelo para que no sea arrastrado por el viento y/o el agua. La cantidad de rastrojo, su tamaño y la proporción de suelo cubierto dependen del rendimiento de los cultivos, de la rotación o secuencia establecida, de las condiciones de manejo del suelo y del cultivo como sistemas de labranza y de cosecha utilizados, así como de las condiciones ambientales imperantes.

Merrill et al. (2002) estimaron el potencial relativo de erosión en relación a la cobertura superficial (Figura 28). Como se aprecia el riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial.

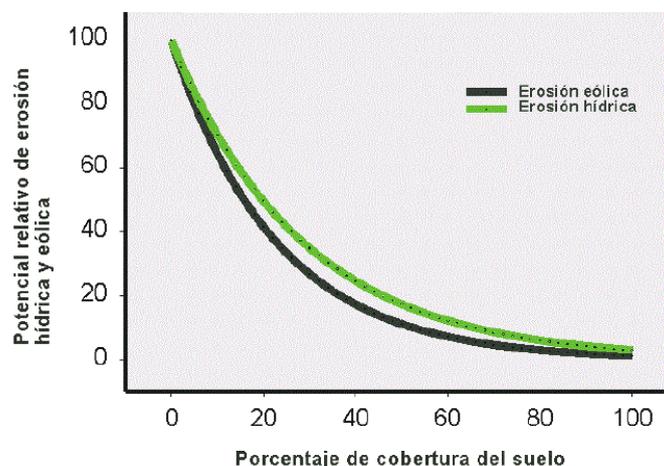


Figura 28. Efecto de cobertura del suelo con residuos de cultivos sobre el potencial relativo de erosión hídrica y eólica. La función para la erosión eólica fue tomada del modelo RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) y la función para la erosión hídrica proviene del modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). (Merrill, et al, 2002)

En la Figura 29 se aprecia cómo disminuye el % de escurrimiento a medida que se incrementa la proporción de superficie cubierta, asociado fundamentalmente al mantenimiento de la velocidad de infiltración inicial al no haberse alterado la estructura de la capa superficial del suelo.

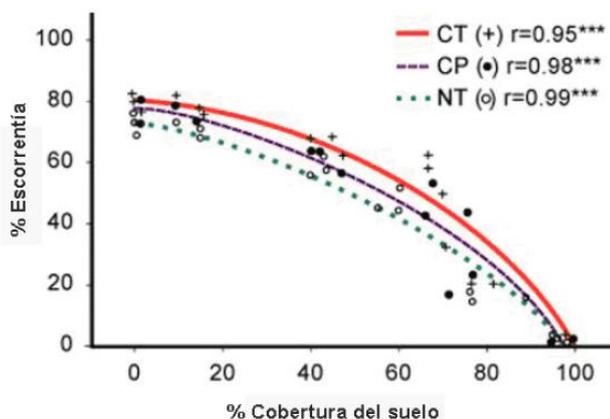


Figura 29. Escorrentía total después de 60 minutos de lluvia simulada de acuerdo con el porcentaje de cobertura y preparación del suelo (CT = Preparación Convencional, CP = Labranza mínima con Escarificador, NT = Siembra Directa) (Roth, 1985).

El manejo de los residuos puede generar grandes impactos en las propiedades dinámicas del suelo, pero la magnitud de los cambios dependerá del tipo de suelo, cantidad de residuos, sistema de laboreo y clima. En suelos de textura franco arenosa y franco limosa que presentan vulnerabilidad natural al deterioro por su baja estabilidad estructural, estas prácticas cobran especial importancia.

En una experiencia con simulador de lluvia en Argiudoles típicos de Marcos Juárez, Marelli *et al.* (2006) evaluaron el efecto de la cantidad de rastrojos superficiales sobre las pérdidas de agua por escurrimiento y pérdida de suelo debida a la erosión (Figura 30). Como puede apreciarse, la importancia de la cantidad de rastrojos está asociada a la proporción de cobertura que esa cantidad genera. Nótese que 4 t/ha y 8 t/ha de rastrojo sobre la superficie producen similar efecto sobre el escurrimiento superficial. Sin embargo cuando se aplica un sistema de laboreo que produce un cierto grado de enterramiento o incorporación del rastrojo (indicado como 4 incorporado y 8 incorporado), la condición con mayor cantidad de rastrojo puede permitir mantener o generar condiciones de bajo escurrimiento y especialmente de baja pérdida de suelo.

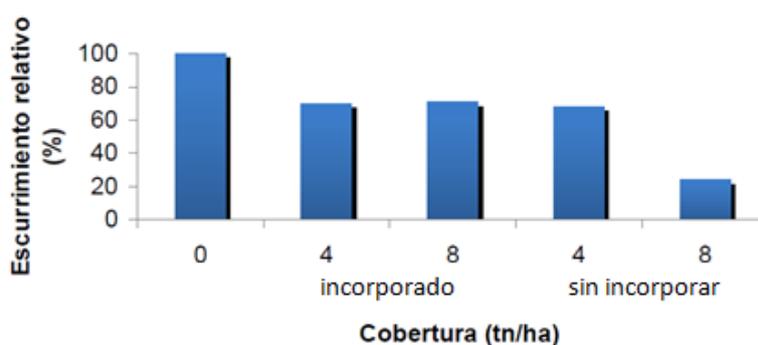


Figura 30. Relación entre Pérdida de suelo relativa (%) y cantidad de rastrojo en superficie. Adaptado de Marelli *et al.* (2006).

Los mulchs orgánicos son usados generalmente en explotaciones intensivas como las frutihortícolas. Actúan cubriendo al suelo con algún tipo de material vegetal como pueden ser las cáscaras de arroz, maní, paja de trigo o de pastos, restos y hojarasca de especies forestales, turba, entre otros. Además pueden generarse naturalmente como ocurre en situaciones bajo monte o bosque implantado en donde los aportes de hojarasca, restos de corteza y ramas va conformando un colchón de materiales orgánicos sobre la superficie del suelo. Producen un aporte de materia orgánica al suelo a partir de su descomposición gradual y generan una protección mecánica contra el efecto desagregante de las gotas de lluvia.

b) Manejo del canopeo de cultivos en pie y rotaciones

Al igual que los rastrojos, el canopeo de los cultivos es capaz de interceptar la gota de lluvia, disminuyendo su energía cinética. Esta interceptación será mayor a medida que el vegetal crece y se desarrolla. En relación a la época de crecimiento del cultivo, es importante la coincidencia entre el periodo de mayor cantidad e intensidad de precipitaciones con las etapas del cultivo en la que ofrezca cobertura al suelo, de modo de disminuir la incidencia de los agentes erosivos. Los cultivos que cubren el entresurco en un período corto, ofrecen una rápida protección de la superficie del suelo. Un manejo cultural de la siembra, asociado a la velocidad de crecimiento de la especie a implantar, la selección del distanciamiento entre hileras, de modo que los cultivos de crecimiento lento se siembren con un menor distanciamiento que aquellos de crecimiento rápido, son aspectos a considerar.

La asociación de cultivos (ej. intersembrado de pasturas, cultivos anuales intercalados, cultivos en fajas) ofrece una alternativa para la protección del suelo al producirse una ocupación simultánea del terreno de cultivos que ejercen protección con otros que lo hacen en menor medida, ya sea por su velocidad de crecimiento o por encontrarse en diferente estadio de desarrollo. Por otro lado, el diferente aporte de materia orgánica que realizan cultivos de gramíneas y leguminosas, producirá un incremento de la estabilidad estructural superficial en los sectores que recibieron un mayor aporte de residuos y de mejor calidad (relación C/N elevada), lo que hará necesario realizar una adecuada planificación de las rotaciones de los cultivos dentro del lote.

Rotaciones que generen grandes cantidades de residuos (ej. incorporación de maíz o sorgo en la rotación agrícola) y mayor grado de cobertura (ej. pasturas perennes consociadas, forestación), junto con sistemas de labranza conservacionistas que no produzcan gran enterramiento de los residuos, son alternativas para este manejo de la cobertura superficial en zonas susceptibles a la erosión. En sentido opuesto, el monocultivo de especies que producen escaso aporte de rastrojo (ej. soja, girasol) y cobertura a lo largo del año, junto con sistemas de laboreo con intensa remoción superficial, exponen la superficie del suelo a la acción de los agentes erosivos.

c) Cultivos de cobertura

Son cultivos que se instalan en el periodo de barbecho entre dos cultivos de cosecha con el objetivo de mantener cobertura, incorporar carbono al suelo, evitar la pérdida de nutrientes móviles, mejorar la eficiencia del uso del agua y disminuir los riesgos de erosión. Desde el punto de vista físico, disminuyen la energía cinética de la gota de lluvia, como así también brindan estabilidad al suelo a través de su sistema radical y por el aporte de carbono orgánico a través de la biomasa aérea. Resultan una alternativa de manejo interesante en ambientes con precipitaciones que se concentran en un período del año y con elevada intensidad y, que generan desestabilización de la estructura superficial, escurrimiento y procesos de erosión hídrica.

Gramíneas de invierno tales como centeno (*Secale cereale*), avena (*Avena sativa*) o raigrás anual (*Lolium multiflorum*) son utilizadas como cultivos de coberturas para la protección de los suelos contra la erosión debido a su elevada acumulación de biomasa. Podrían incluirse entre cultivos consecutivos de soja para incrementar los aportes de carbono orgánico a los sistemas productivos y así contribuir al mantenimiento de la materia orgánica del suelo, (Wander y Traina 1996, Ding et al., 2005).

Mayor desarrollo de este tema podrá verse en el Capítulo de Manejo para la sustentabilidad de los sistemas productivos (Curso Manejo y Conservación de Suelos)

d) Manejo de la estabilidad estructural

La estructura del suelo es una propiedad fundamental que influye sobre las condiciones de infiltración y conductividad hidráulica.

La incorporación de los residuos, en forma variable de acuerdo a sus propiedades (C/N, presencia de taninos, lignina, etc) y a las cantidades aportadas, a través del proceso de humificación puede afectar favorablemente e importantemente la estabilidad estructural. Generalmente, la semiincorporación de los residuos favorece el proceso de humificación por la inoculación de microorganismos edáficos que desarrollan el proceso. El aumento de la materia orgánica humificada mejora un conjunto de propiedades físicas del suelo tales como porosidad, densidad aparente, diámetro medio ponderado, estabilidad estructural, conductividad hidráulica saturada, entre otras, responsables directa o indirectamente del ingreso y movimiento del agua en el suelo.

La **rotación** de cultivos influye sobre la estabilidad de la estructura, asociado fundamentalmente a su efecto sobre el contenido orgánico del suelo. En rotaciones agrícolas, el contenido de carbono orgánico en el suelo es función del aporte de carbono que realizan los cultivos y la tasa de mineralización de la materia orgánica humificada. En este sentido, cuando en la rotación se incorporan cultivos que producen elevada proporción de biomasa aérea y radical, con relaciones C/N elevadas (ej. maíz, sorgo, trigo) y se realiza fertilización incrementando la producción de biomasa o se incluye más de un cultivo en el año, el aporte de compuestos orgánicos puede generar un balance positivo en el carbono orgánico al superar las pérdidas por mineralización de la materia orgánica humificada del suelo. Por lo tanto el efecto de la rotación sobre la estructura edáfica dependerá entonces del balance.

En rotaciones agrícola-ganaderas el incremento de materia orgánica se produce especialmente durante la fase de pastura. Esto es debido al aporte de residuos y a una disminución de la intensidad de mineralización por ausencia de labranzas (Alvarez y Steinbach, 2006).

La **labranza** afecta la acumulación y distribución de materia orgánica en el perfil. Aquellos sistemas de labranza que producen mínima remoción superficial del suelo (ej. siembra directa, laboreos reducidos que incluyen el pasaje de herramientas de labranza vertical), provocan un incremento de la materia orgánica de la capa superficial, observándose una estratificación de la misma debido al aporte gradual que realizan los restos orgánicos que yacen en superficie. Este comportamiento impacta directamente sobre la estabilidad de la estructura y en la distribución de tamaños de agregados estables.

Mayor desarrollo de este tema podrá verse en el Capítulo de Manejo para la sustentabilidad de los sistemas productivos (Curso Manejo y Conservación de Suelos Y Manejo de la Fertilidad Física) y material didáctico del curso de Mecanización agraria.

Los **abonos verdes** son cultivos que se realizan en el propio terreno que se desea mejorar y cuya masa vegetativa es incorporada al suelo. Su objetivo principal es mejorar la condición química de los suelos a modo de fertilización orgánica o biofertilización (disponibilidad de nutrientes orgánicos, NO₃-principalmente), para la posterior implantación de algún cultivo de cosecha. Un objetivo adicional es el aumento temporario de la estabilidad de agregados superficiales del suelo. Preferentemente se emplean leguminosas por su capacidad de fijación de N atmosférico y porque sus residuos poseen una relación C/N más estrecha que el de gramíneas. Esta característica genera una rápida descomposición de los residuos del abono verde y estabilización de los agregados, pero con un efecto de corta duración.

Los **compost** son productos que en general tienen el carácter de material humificado y en este sentido su mayor valor reside, en las modificaciones que producen en la condición física, biológica, físico-química e inclusive en la condición química de los suelos.

El **estiércol** de origen vacuno constituye una fuente importante de material orgánico, con cierto contenido de nutrientes. Su calidad depende de la alimentación de los animales, así aquellos cuya alimentación se base en pasturas mas fibrosas, con una alto contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, generaran estiércoles con una relación C/N más elevada que aquellos que se alimentan con altos contenidos de almidón y compuestos más simples, siendo los primeros más propicios para la incorporación

al suelo con el objetivo de incrementar la estabilidad estructural. Su uso queda limitado prácticamente a cultivos intensivos sobre superficies relativamente chicas.

Más detalles de este apartado puede verse en el capítulo de Abonos orgánicos.

El uso de **enmiendas cálcicas**, yeso o minerales carbonatados de Ca y/o Mg (caliza, dolomita, conchilla, etc.) como enmiendas podría ser apropiado para favorecer la agregación por su acción floculante (Vázquez y Pagani, 2013). De esta manera se producen mejoras en el comportamiento hidrológico de los suelos, por un aumento en la estabilidad del espacio poroso produciendo incrementos en la velocidad de infiltración. En la Figura 31 puede verse el efecto de 2 dosis de dolomita sobre la infiltración/escorrimento en un suelo Argiudol típico platense al cabo de 2 años del encalado (Vázquez et al, 2009).

Tabla 11. Velocidad de infiltración luego de 6 años de aplicación de diferentes tratamientos de descompactación subsuperficial y enmienda cálcica (Iruetia *et al.*, 2008).

Infiltración	Unidad	Testigo Año 2001	Testigo Año 2008	Subsolador + yeso Año 2008	Subsolador Año 2008
Infiltración Media	mm	30,5	69,5b	138,5a	74,6b
Infiltración Final		10	31,5b	78a	32b

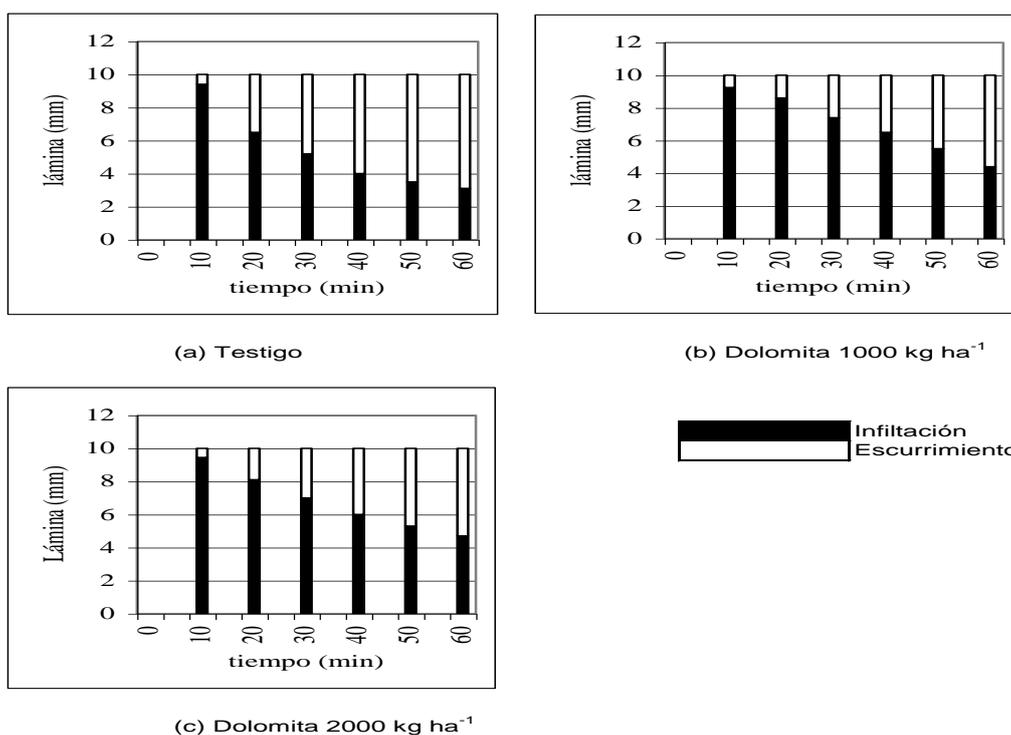


Figura 31. Efecto del encalado con 2 dosis de dolomita sobre la infiltración a lo largo de una hora, con la aplicación de una lámina de 10 mm de agua cada 10 minutos (Vázquez et al., 2009).

Iruetia *et al.*, (2008) en un Argiudol típico evaluaron el efecto conjunto de la aplicación de yeso y descompactación mecánica sobre la perdurabilidad de la estructura porosa del suelo de manera de mantener valores elevados de velocidad de infiltración a lo largo del tiempo. Utilizaron un prototipo para labranza construido sobre la base de un equipo Cultivie para descompactar y aplicar yeso granulado simultáneamente con cada púa del subsolador, a razón de 500 kg/ha, en bandas de 5 cm de ancho separadas a 70 cm, generando una dosis por banda de 7 t/ha, que penetró en el suelo desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad. Observaron que aún después de 6 años de haberse realizado el subsolado se detectaban efectos residuales favorables en el suelo sobre la resistencia a la penetración y en particular sobre la velocidad infiltración (Tabla 11).

e) Descompactación mecánica de costras

El manejo de sellos o costras superficiales es diferente al de las impedancias que se encuentran a mayor profundidad. La prevención de la formación de estas impedancias se basa en los principios fundamentales de protección mecánica de la superficie y en el incremento de la estabilidad de la estructura, ya discutidos en este capítulo. Pero una vez generada la costra el manejo de este tipo de impedancias, puede realizarse con operaciones de labranza secundaria y de postemergencia, dependiendo del momento en que se produzca el sellado superficial en relación a la implantación del cultivo. Las labores con rastras doble acción, de dientes o rotativas tienen el objetivo de romper las costras y generar rugosidad superficial, llevando suelo húmedo a superficie, controlando, al menos en el corto plazo el riesgo de erosión, tanto hídrica como eólica.

Como constituyen labores de emergencia, es necesario analizar la oportunidad de aplicación y considerar, que al generar mezclado del suelo, producir enterramiento del rastrojo y ruptura de terrones y/o provocar una densificación por debajo de la profundidad de pasaje de la herramienta, dejan a la superficie edáfica expuesta a nuevos procesos erosivos. Las herramientas comúnmente utilizadas son los escarificadores, cultivadores de campo, o cinceles.

f) Manejo del pisoteo animal

En sistemas ganaderos, la magnitud de los procesos de compactación y su impacto sobre la erosión hídrica dependen de factores como el contenido hídrico del suelo, la textura, el sistema de manejo del suelo y la pastura (ej. sistema de labranza, fertilización), la carga animal y el tiempo de pastoreo, la cobertura generada por la biomasa vegetal superficial, la estabilización de la estructura a partir del sistema radical de las especies, de la estructura de la comunidad vegetal, entre otros.

En la Tabla 12 se aprecia el área de apoyo y la presión ejercida por las patas de diferentes animales y por maquinaria.

Tabla 12. Masa, área de apoyo y presión ejercida por animales y equipos (extraído de Taboada et al., 2010)

	Masa (kg)	Área Total de apoyo (cm ²)	Presión estática (kpa)
<i>Ovino</i>	40-54	55-84	48-83
<i>Vacuno</i>	306-612	264-460	98-192
<i>Tractor</i>	-	-	18-31
<i>Carro de cereal</i>	-	-	93-104

Como se desprende de la Tabla 12 los animales pueden ejercer presiones muy elevadas. En la Figura 32 se esquematiza el efecto del pisoteo en condiciones de a) moderada humedad y b) suelo saturado, mostrando que la repetición del pastoreo en condiciones de saturación puede consolidar impedancias mecánicas severas en superficie, con su consecuente disminución de la infiltración de agua posterior.

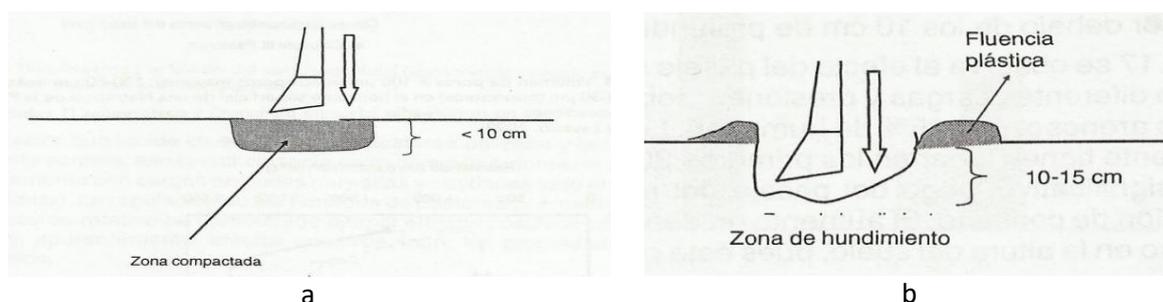


Figura 32. Esquema de la acción del pisoteo en condiciones de a) moderada humedad y b) suelo saturado.

CUESTIONARIO

1. Cuál es el objetivo de las prácticas de manejo de la infiltración.
2. Cuál es el efecto de mantener los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo.
3. Cómo incide el tipo (C/N, contenido de lignina, tamaño) y cantidad de rastrojo en estos efectos. Compare residuos de maíz, soja y trigo.
4. Qué rol juegan las labranzas sobre los residuos (compare convencional vs mínima vs directa).
5. Cómo actúan los cultivos en pie sobre el proceso. Compare un suelo desnudo con uno cultivado con trigo, soja y maíz. Analice cuál es la importancia de la coincidencia o no de las lluvias predominantes en situaciones reales o hipotéticas con la fenología de la especie.
6. Cree que los cultivos de cobertura pueden mejorar el control de este tipo de erosión.
7. Por qué la estabilidad de los agregados de los horizontes superficiales puede incidir en el proceso.
8. De qué manera se puede conservar y mejorar la estabilidad de los agregados. Analice el efecto de abonos verdes, abonos orgánicos, de las rotaciones, de las labranzas, de las enmiendas cálcicas)
9. Cómo actuaría la descompactación mecánica de un encostrado
10. Qué efecto puede tener el pasaje reiterado de maquinaria pesada (establezca valores de peso perjudiciales) en condiciones de suelo mojado.
11. Cuál es el efecto del sobrepastoreo sobre el proceso y cuál el del pisoteo. Compare la presión estática ejercida por ganado (vacuno y ovino) con implementos agrícolas

PRÁCTICAS DEL MANEJO DEL ESCURRIMIENTO

Cálculo del escurrimiento superficial

Se verá más adelante que las prácticas de manejo del escurrimiento necesitan planificarse y dimensionarse en función de los caudales máximos de escurrimiento superficial esperables para una zona determinada. Existen varios métodos de cálculo para obtener esta información. Resulta oportuno destacar que estos métodos de estimación del escurrimiento superficial solo son aplicables en regiones con relieves de pendientes marcadas. Desde suavemente ondulados a abruptos, la componente escurrimiento superficial es del orden del 40 al 50% del total del agua precipitada.

(i) Método de la fórmula Racional o de Ramser

La fórmula es llamada Racional porque las variables que intervienen tienen consistencia numérica. Se puede aplicar en cuencas de hasta 1.300 ha de superficie aproximadamente. La fórmula de predicción del pico de escurrimiento se expresa de la siguiente forma:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{360}$$

Q = pico de escurrimiento (m^3/s)
C = coeficiente de escurrimiento (adimensional)
I = intensidad de la lluvia (mm/h)
A = área de la cuenca (ha)

El valor consignado en el denominador de la fórmula se obtiene por la conversión de las unidades de la intensidad de lluvia (I) y área de la cuenca (A):

$$I = \frac{mm}{h} = \frac{0,001 m}{3600 s} \qquad A = ha = 10000 m^2$$

El producto será:

$$I \times A = \frac{0,001 m}{3600 s} \times 10000 m^2 = \frac{10 m^3}{3600 s} = \frac{1}{360} m^3/s$$

El grado de exactitud que se obtenga con el empleo de la fórmula racional, no puede ser mayor que el grado de precisión con que se halla determinado el elemento menos exacto.

C: Coeficiente de escurrimiento

Se define como el cociente entre el volumen de agua escurrido en relación al volumen de agua llovido (C=escurrimiento/lluvia). Este factor y el tiempo de concentración (**Tc**) son los elementos más difíciles de evaluar. El **C** es un factor adimensional utilizado en el cálculo de I (intensidad de lluvia) que fluctúa entre **1 y 0** (cuando escurre todo o nada de lo llovido, respectivamente). Debido a que C no es un factor constante, sino que varía con la intensidad de la lluvia y las condiciones de la cuenca, su determinación es aproximada. Cuando no existen datos de aforo a la salida de la cuenca, la estimación del factor C se basa en la utilización de coeficientes asignados a características climáticas, de suelos, pendientes, vegetación, prácticas de manejo, uso, etc., en cuencas experimentales en las que se cuenta con datos de aforo.

A continuación se muestran algunas estimaciones del coeficiente C.

Tabla 13. Coeficientes de escurrimiento (Ramser, 1929)

Uso	Relieve	Pendiente (%)	Coeficiente C
Cultivada	Ondulado	5-10	0,60
	Montañoso	10-20	0,72
Pastos	Ondulado	5-10	0,36
	Montañoso	10-20	0,42
Bosques	Ondulado	5-10	0,18
	Montañoso	10-20	0,21

Tabla 14. Coeficientes de escurrimiento (Schwab et al., 1990)

Condiciones de Relieve y Vegetación		Textura		
		Franco-Arenoso	Franco-Limoso y Franco-Arcilloso	Arcilloso
BOSQUE O MONTE	Plano (0-5 %)	0,10	0,30	0,40
	Ondulado (5-10%)	0,25	0,35	0,50
	Colinado (10-30 %)	0,30	0,50	0,60
PASTURA	Plano (0-5 %)	0,10	0,30	0,40
	Ondulado (5-10%)	0,16	0,36	0,55
	Colinado (10-30 %)	0,22	0,42	0,60
CULTIVADO	Plano (0-5 %)	0,30	0,50	0,60
	Ondulado (5-10%)	0,40	0,60	0,70
	Colinado (10-30 %)	0,52	0,72	0,82

Como se observa en la Tabla 16, el método de Temez (1991) considera cinco factores que afectan el escurrimiento:

- Intensidad de lluvia
- Relieve
- Retención superficial
- Infiltración
- Cubierta vegetal

Se establecen cuatro categorías para cada factor y con cada una se va integrando el coeficiente de escurrimiento "C" (se suman los coeficientes parciales de cada factor), para una situación dada.

Tabla 15. Coeficientes de escurrimiento (Chow et al., 1993)

Característica de la superficie	Período de retorno (años)					
	2	5	10	25	50	100
Áreas Urbanas						
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97
Zonas verdes (Jardines, Parques, etc)						
<i>Condiciones pobre (cubierta < 50%)</i>						
Plano (0 - 2%)	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47
Promedio (2 - 7%)	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53
Pendiente superior al 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55
<i>Condiciones promedio (cubierta 50 al 75%)</i>						
Plano (0 - 2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
Promedio (2 - 7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
Pendiente superior al 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
<i>Condiciones buena (cubierta > 75%)</i>						
Plano (0 - 2%)	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36
Promedio (2 - 7%)	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46
Pendiente superior al 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51
Áreas rurales						
<i>Áreas de cultivos</i>						
Plano (0 - 2%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
Promedio (2 - 7%)	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51
Pendiente superior al 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54
<i>Pastizales</i>						
Plano (0 - 2%)	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41
Promedio (2 - 7%)	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49
Pendiente superior al 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53
<i>Bosques</i>						
Plano (0 - 2%)	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39
Promedio (2 - 7%)	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47
Pendiente superior al 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52

Tabla 16. Factores que determinan el escurrimiento y sus coeficientes parciales (Temez, 1991)

FACTORES	CATEGORIAS			
	70-100 (0,30)	70-50 (0,25)	50-30 (0,18)	30-25 (0,12)
Intensidad de la lluvia (mm/h)				
Relieve	Empinado (S> 20%) (0,10)	muy ondulado (S=20-10%) (0,05)	ondulado (S=10-5%) (0,02)	relativam. plano (S=5-0%) (0,01)
Retención por la superficie	insignif. (0,10)	pocas depresiones (0,07)	algunas depresiones y zanjas (0,05)	retención por estructuras que cubren el 90% del área (0,02)
infiltración	roca sólida (0,25)	textura arcillosa (0,18)	textura franca-arenosa a franco-limosa (0,10)	textura arenosa, suelo profundo (0,05)
Cubierta	suelo desnudo (0,25)	cultivos limpios, menos de 10% de buenas pasturas (0,20)	50% de suelo cubierto (0,10)	90% de suelo cubierto (0,05)
Sumatoria	1,00 (extremo)	0,75 (alto)	0,45 (normal)	0,25 (bajo)

Ejemplo de estimación de C a través de la integración de coeficientes parciales (Tabla 16).

Datos:

- Pampa Ondulada
- Lluvias de una intensidad de 60 mm/h
- Pendientes entre 1 y 4%
- Pocas depresiones superficiales
- Suelos de textura franco-limosas
- Cultivos anuales en casi toda la superficie.

De la Tabla 16 se obtienen los siguientes valores:

- Lluvia 0,25
- Relieve 0,02
- Retención 0,07
- Infiltración 0,10
- Cubierta 0,20
- **C Total** (sumatoria de los anteriores) 0,73

Por lo tanto, el factor C de escurrimiento para las condiciones planteadas es de 0,73 lo que prácticamente significa que un 73% de lo que llueve, escurre. Además, existe un método gráfico para determinar el factor C (Schwab et al., 1990), a partir de la intensidad de lluvia corregida según el tiempo de concentración en la cuenca. Se consideran diferentes situaciones de uso y manejo para diferentes grupos hidrológicos (Figura 33):

- Maíz con prácticas comunes de manejo
- Maíz con prácticas mejoradas
- Pastura permanente
- Pradera de dos años
- Trigo con prácticas mejoradas

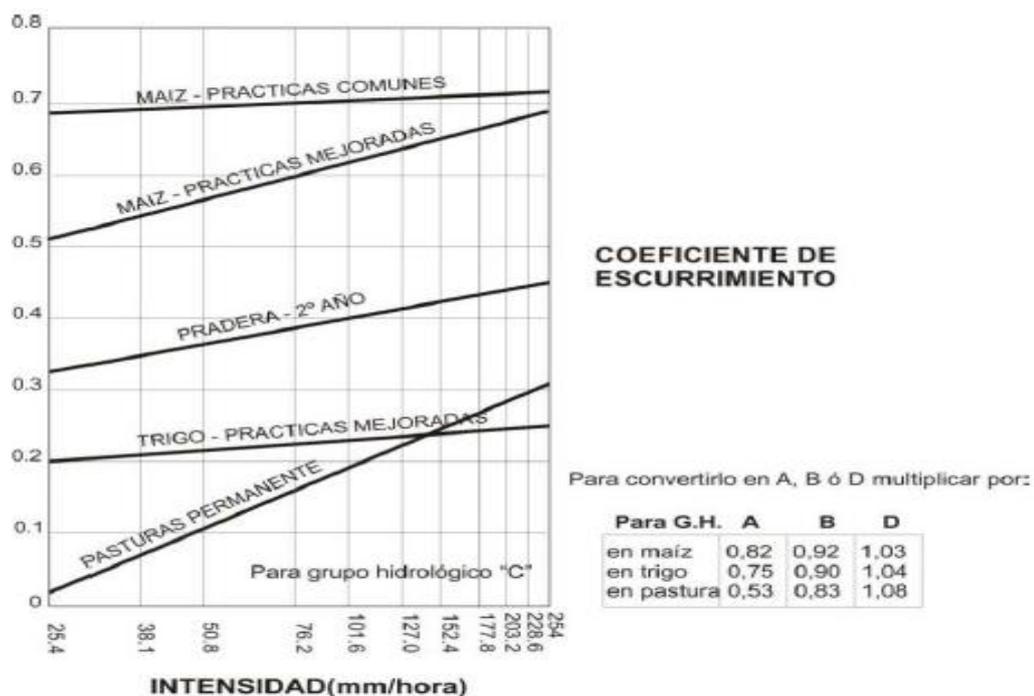


Figura 33. Método gráfico para estimar el coeficiente "C" de escurrimiento.

I: Intensidad de la lluvia

La intensidad "I", corresponde a la intensidad máxima de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración en la cuenca y una recurrencia o período de retorno en años.

Tc: Tiempo de concentración

Se define como el tiempo máximo requerido por el escurrimiento para llegar a la salida de la cuenca desde cualquier punto de la misma. En otras palabras es el tiempo que tarda el agua proveniente de toda la cuenca, en concentrarse en el punto de salida de la misma.

En función de lo expresado resulta necesario considerar el Tc para estimar la intensidad máxima de precipitación en la cuenca estudiada, de modo de convertir una característica climática de una región (intensidad de lluvia obtenida a través de una serie estadística), en una característica hidrológica propia de la cuenca considerada.

Si se considera un frente de lluvias disperso que cubre la totalidad del área de la cuenca, llegará un momento en que toda la superficie estará aportando escurrimiento. En términos generales y haciendo un división del área en diferentes fracciones (Figura 34), una vez comenzada la lluvia, en un tiempo t_1 , comenzará a llegar a la salida de la cuenca el escurrimiento proveniente de la porción más próxima a la misma (f_1), luego en el tiempo t_2 , llegará el escurrimiento proveniente de las fracciones f_1+f_2 y así sucesivamente hasta que en el tiempo t_n (fin de la lluvia), que es igual al T_c , llega el agua escurrida desde las fracciones f_1 hasta la f_n , es decir de la totalidad de la cuenca. Es por esta causa que para una situación determinada, para obtener el caudal máximo de escurrimiento, se toma aquella intensidad de lluvia que se haya producido en un tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca.

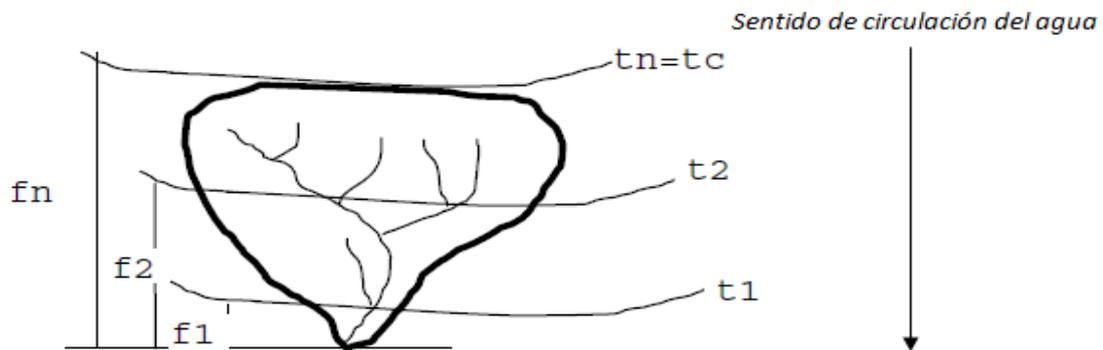


Figura 34. Esquema de circulación del agua de lluvia desde la cabecera al punto más distante de la cuenca.

Por otro lado, dado que las relaciones intensidad/duración de las lluvias demuestran que la intensidad decrece cuando la duración es mayor, la máxima intensidad y por lo tanto el máximo caudal de escurrimiento, se dará en una tormenta cuya duración mínima se corresponda con el tiempo de contribución de toda la cuenca al escurrimiento (Tiempo de concentración). Tomar una duración de lluvia inferior o superior al tiempo de concentración (T_c), llevará a incurrir en errores en la estimación del caudal pico (Q_p), ya sea por una subestimación o sobrestimación del mismo, respectivamente. Entre las características de la cuenca que determinan su tiempo de concentración se pueden mencionar:

- **Tamaño:** a mayor tamaño, mayor será el tiempo de concentración
- **Topografía:** la complejidad, longitud y gradiente de las pendientes definen la topografía de un área e influyen en el tiempo de concentración. Relieves ondulados, con pendientes complejas, determinan tiempos de concentración menores que los de cuencas uniformes y planas
- **Forma:** a igualdad de factores, superficie, patrón de drenaje, etc., el tiempo de concentración depende de la distancia entre el punto más lejano y la salida de la cuenca. En otras palabras de la forma de la cuenca, así cuencas largas y delgadas presentan un T_c mayor que las cuencas redondas o cuadradas. (Figura 35).

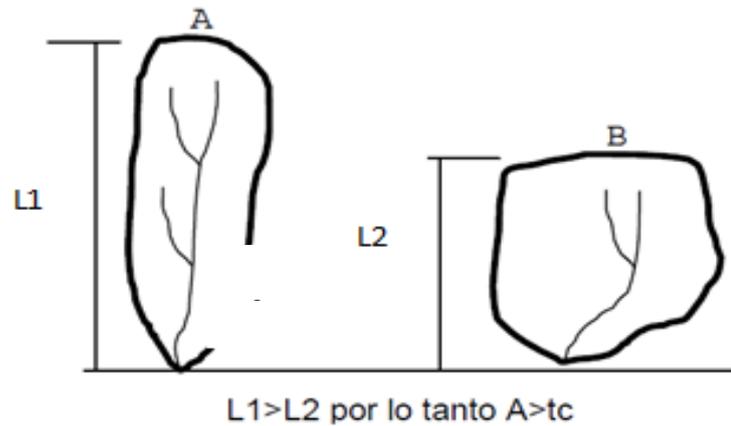


Figura 35. Efecto de las características físicas de la cuenca sobre el tiempo de concentración (T_c).

La exactitud en la estimación del tiempo de concentración depende de la exactitud con que se pueda estimar la trayectoria recorrida y la velocidad de la corriente. Algunos de los métodos usados para el cálculo de este parámetro son:

a) Fórmula de **Bransby-Williams**: el T_c se expresa como:

$$T_c = \frac{L \times M^2}{1,5 \times D \times F}$$

T_c = tiempo de concentración (minutos)

L = distancia máxima a la salida (km)

D = diámetro de un círculo equivalente a la superficie de la cuenca (km)

M = área de la cuenca (km^2)

F = porcentaje promedio de pendiente de las principales vías de desagüe de la cuenca

b) **Fórmula de Kirpich**: expresada como:

$$T_c = 0,02 \times L^{0,77} \times S^{-0,386}$$

T_c = Tiempo de concentración (minutos)

L = longitud máxima de la cuenca (m)

S = gradiente promedio (m/m)

R: Período de Recurrencia

Una vez estimado el T_c , se define una duración de lluvia esperada, para un período de recurrencia determinado, que se mantenga por un período igual al tiempo de concentración y que por lo tanto produzca la máxima intensidad de precipitación en la cuenca estudiada.

Por período de recurrencia se entiende a la probabilidad de que en un determinado lapso de tiempo (5, 10, 15, 50 años), pueda repetirse una lluvia máxima esperada. Dicho período se considera como límite, para que una vez pasado, se haga precisa una eventual reparación de los daños sufridos. Mientras mayor es el período de años elegido menor es la probabilidad que se produzcan eventos iguales o superiores al calculado.

La elección del período de recurrencia adecuado está relacionada con el costo de las prácticas y/o estructuras de protección y con el tiempo que permita que dicho costo quede amortizado. La elección de la recurrencia depende del tipo de obra (su costo y amortización) y la vida útil de la misma en relación al riesgo asumido. En general, en áreas donde existen tormentas frontales (poco intensas y durante todo el año), el período óptimo es entre 5 y 10 años; mientras que donde prevalecen tormentas chubascosas estivales de alta intensidad acompañadas de granizo y viento, el período de recurrencia óptimo es entre 10 a 20 años de acuerdo a las características de la situación en estudio.

En forma general y a modo de síntesis, al definir los períodos más adecuados para una situación particular, se debe tener presente lo siguiente:

- Variación climática (alternancias de períodos húmedos y secos medidos en décadas)
- Avances tecnológicos (que determinen la adecuación de nuevas técnicas para la solución de los problemas erosivos)
- Cambios en los procesos de producción, originados por factores económicos (nuevos mercados, precios), tecnológicos (aparición de nuevas especies)
- Costos de ejecución y mantenimiento de las obras de infraestructura
- Envergadura o importancia social de la obra a construir: este aspecto hace referencia a un factor seguridad en el éxito de la obra para un período de tiempo determinado (un puente será planteado para un período de recurrencia en el orden de los cientos de años; un alero de chapas para el control de cabecera de cárcava, en el orden de una década).

El cálculo de la intensidad de precipitación para aplicar en la fórmula de Ramser, puede realizarse de las siguientes formas:

- contar con información pluviográfica local
- estimar I a partir de valores medios de intensidades para el lugar (Ej. San Pedro (Bs As) 60-65 mm/h; Balcarce 50 mm/h)
- estimar I a partir de datos de precipitación máxima de 24 horas, previo tratamiento estadístico adecuado

a) A continuación se presentan algunas figuras que ilustran datos para diferentes localidades argentinas (Figuras 36 a 42).

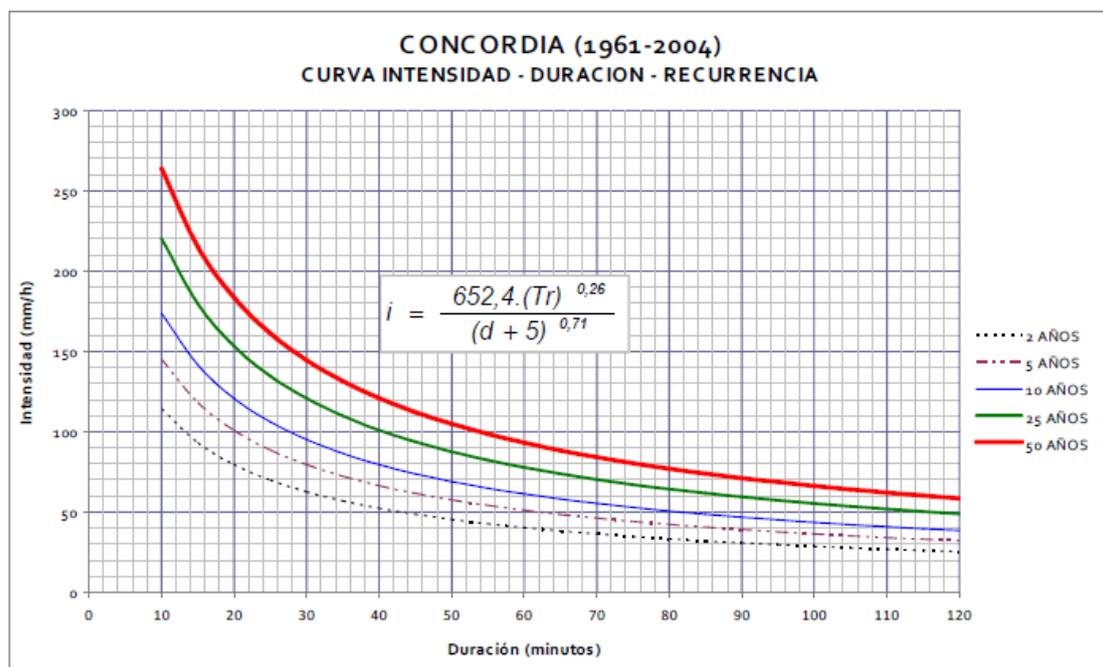


Figura 36. Intensidad máxima de lluvia horaria de Concordia para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados. (Dción. Hidráulica Pcia. Entre Ríos, 2008)

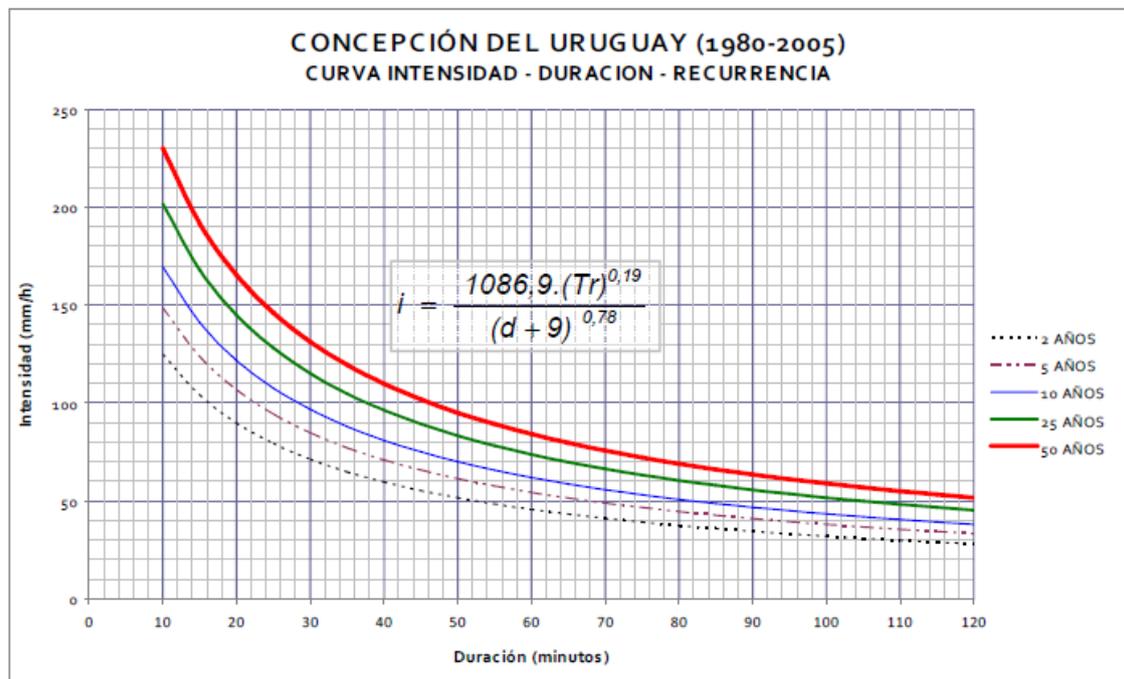
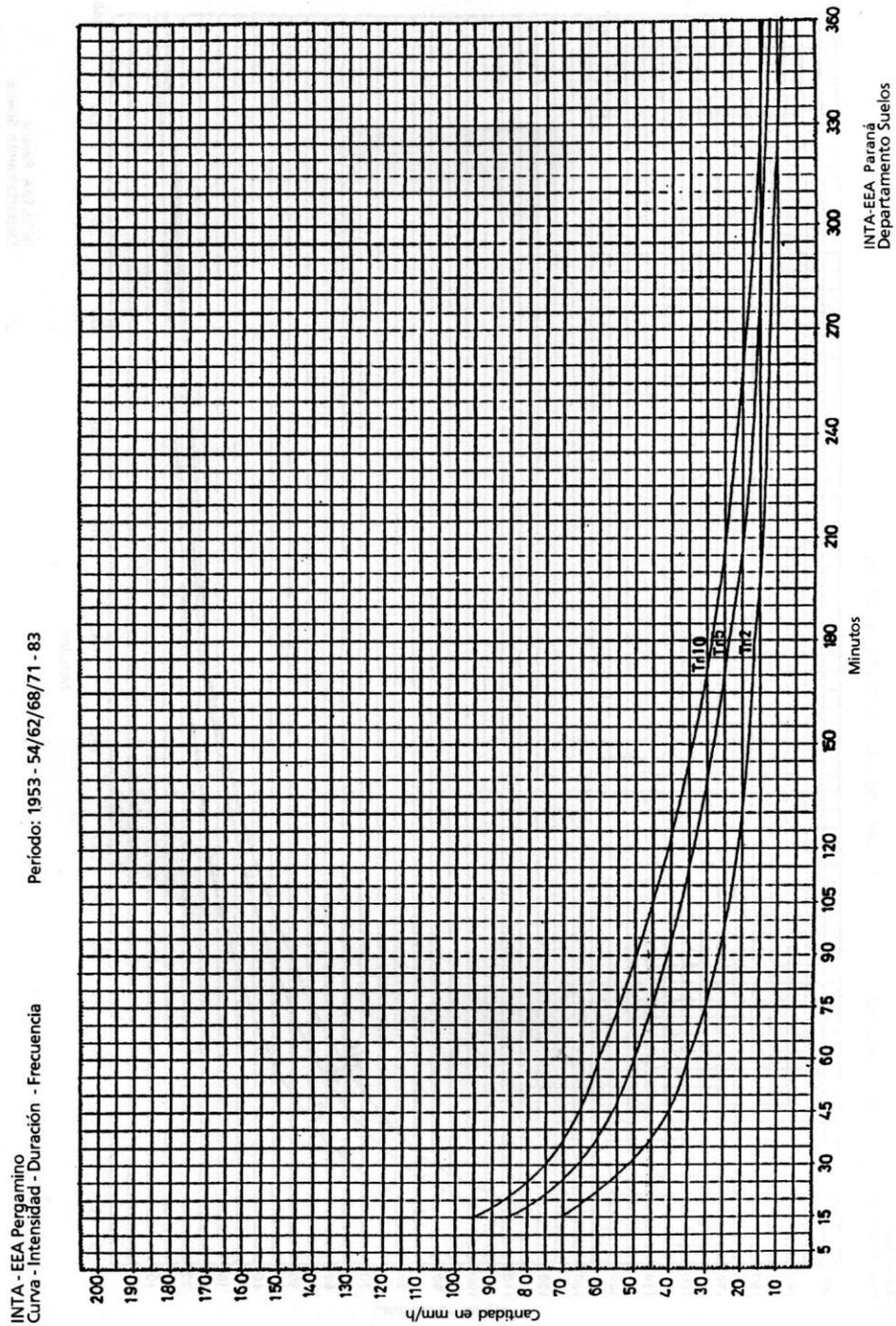


Figura 37. Intensidad máxima de lluvia horaria de Concepción del Uruguay para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados. (Dción. Hidráulica Pcia. Entre Ríos, 2008)



34

Manual de sistematización de tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Serie Didáctica n° 17

Figura 38. Intensidad máxima de lluvia horaria de Pergamino para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados.

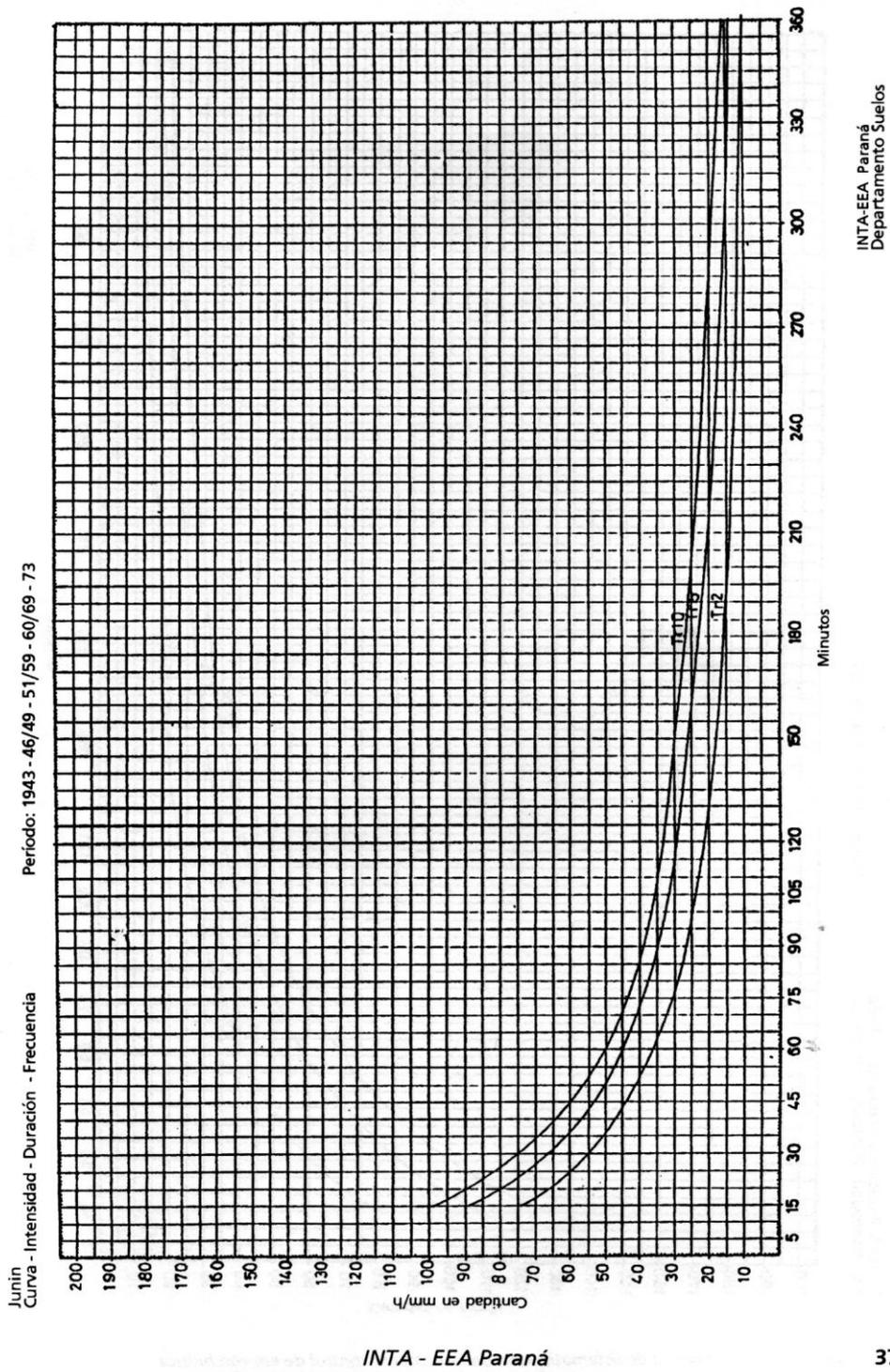
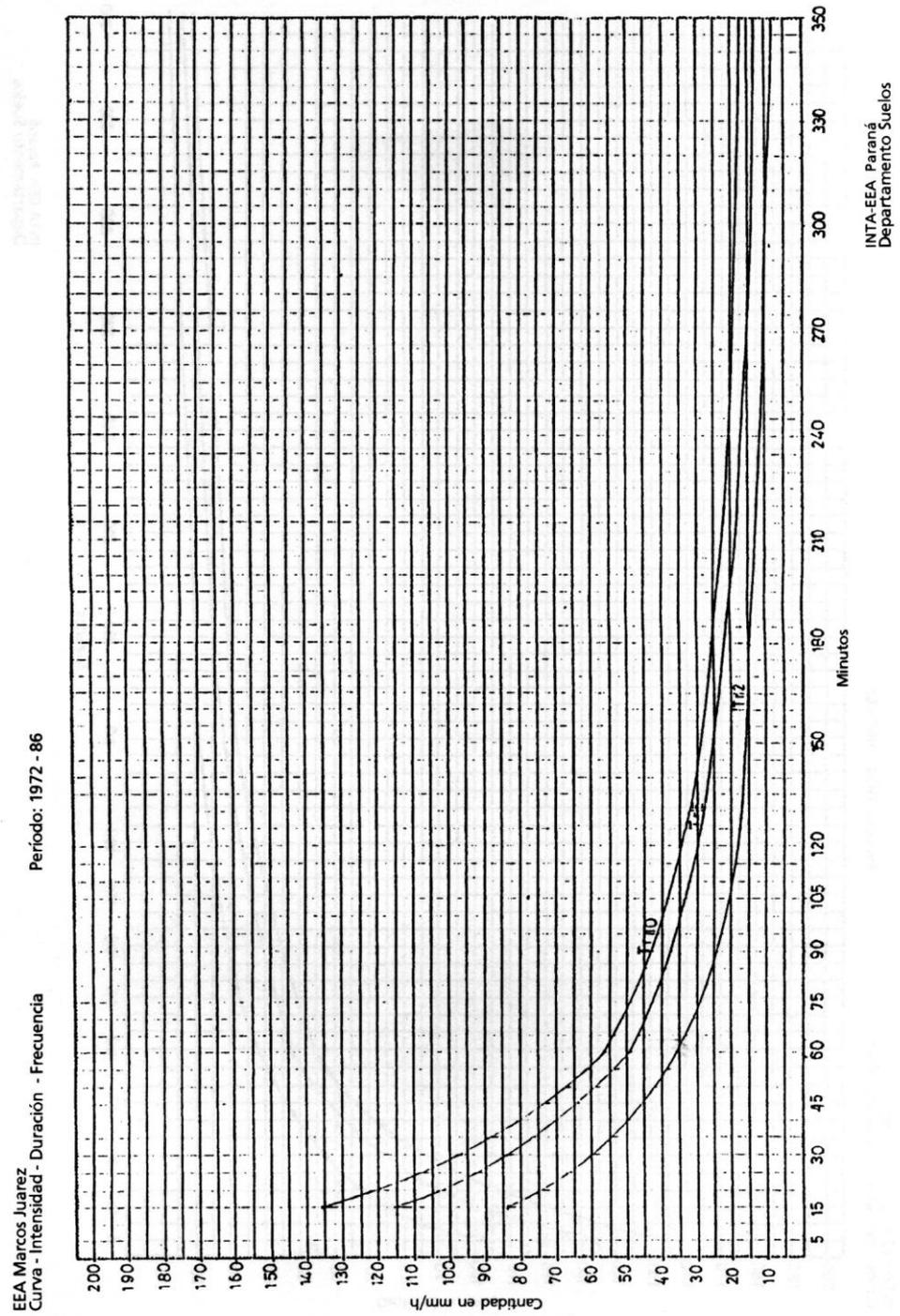


Figura 39. Intensidad máxima de lluvia horaria de Junín para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados.



32

Manual de sistematización de tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Serie Didáctica n° 17

Figura 40. Intensidad máxima de lluvia horaria de Marcos Juárez para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados.

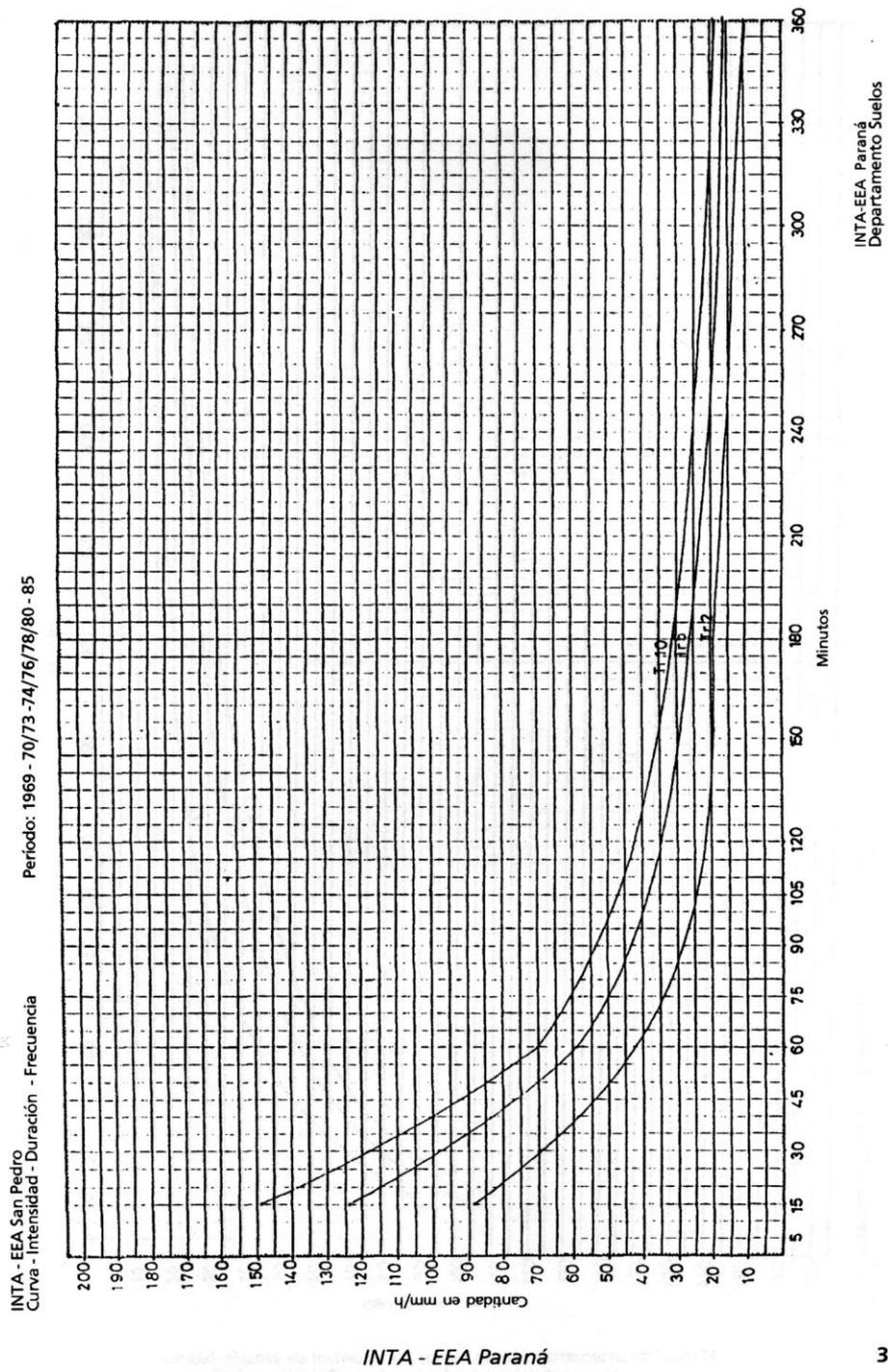


Figura 41. Intensidad máxima de lluvia horaria de San Pedro para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados.

PRECIPITACIONES DEL PERIODO 1972-1980

ESTACION TANDIL

RELACION INTENSIDAD-RECURRENCIA

FUENTE PROVINCIA DE BUENOS AIRES M.O.P.
 DIRECCION PROVINCIAL DE HIDRAULICA
 DEPARTAMENTO RECURSOS HIDRICOS

I = Intensidad de lluvias en mm./h
 R = Período de recurrencia en años
 D = Duración de la precipitación en minutos
 (tiempo de concentración, Tc)

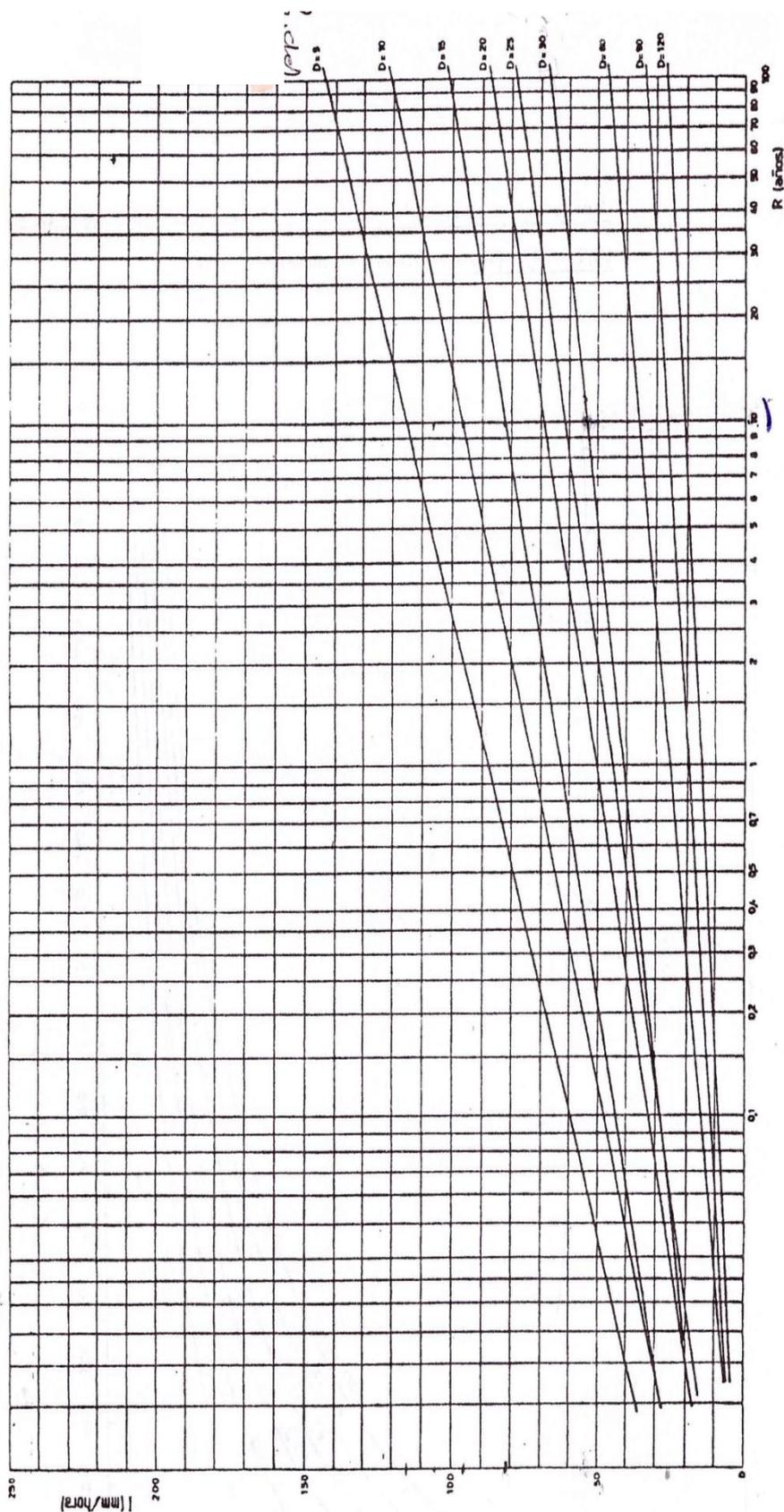


Figura 42. Intensidad máxima de lluvia horaria de Tandil para diferentes duraciones de los eventos y períodos de retorno considerados.

c) Si bien lo ideal es contar con información de pluviógrafos para la zona estudiada, lo cual permitiría un cálculo más preciso de la intensidad correspondiente al tiempo de concentración, por lo general resulta difícil contar con esa información, por lo que se puede estimar a partir de una lluvia máxima de 24 horas, que es un dato más fácil de obtener y mediante el empleo de coeficientes de conversión, se determina una lluvia máxima en 30 min., 1 hora, 2 horas, etc., para un período de recurrencia de 10 años, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Procedimiento para el cálculo de la probabilidad de lluvias máximas para diferentes tiempos de recurrencia. La Plata 1965-2011

Nº de orden	año	mes	día	Lluvia máxima	T	P (%)
1	1980	5	14	155,1	52,00	1,92
2	1964	2	5	148,1	26,00	3,85
3	1990	11	19	133	17,33	5,77
4	1962	4	31	131	13,00	7,69
5	2006	2	23	117	10,40	9,62
6	1984	10	27	114,5	8,67	11,54
7	1998	1	4	113	7,43	13,46
8	1982	2	20	110,7	6,50	15,38
9	1993	2	8	110	5,78	17,31
10	1963	12	10	108,2	5,20	19,23
11	1985	5	31	108	4,73	21,15
12	1995	2	23	108	4,33	23,08
13	1989	12	16	105	4,00	25,00
14	1992	1	31	98	3,71	26,92
15	1987	3	23	97	3,47	28,85
16	2002	1	26	97	3,25	30,77
17	1981	5	11	92	3,06	32,69
18	1968	11	1	89,2	2,89	34,62
19	2003	11	10	85	2,74	36,54
20	1994	7	31	84,5	2,60	38,46
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
50	1986	8	9	48,5	1,04	96,15
51	1965	12	9	38	1,02	98,08

Con los datos pluviométricos de lluvia máxima diaria para una secuencia de años, se calcula el período de retorno o recurrencia (T)

$$T = \frac{N + 1}{m}$$

N: número de años de la serie en estudio

M: número de orden en la serie

En este caso si se quiere averiguar el período de recurrencia para lluvias mayores a 117 mm: N = 51 y m = 5

$$T = 51 + 1/5 = 10,4$$

Esto significa que en La Plata cada 10,4 años ocurren lluvias superiores a 117 mm.

La probabilidad de ocurrencia (P) es:

$$P(\%) = \frac{m}{N + 1}$$

En el ejemplo, una lluvia mayor a 117 mm en La Plata tiene una probabilidad de ocurrencia de:

$$P(\%) = 5/51 + 1 = 9,6 \%$$

Esto indica que 9,6 años de cada 100, ocurrirán lluvias iguales o mayores a 117 mm.

Para estructuras de conservación se utilizan períodos de retorno de 10 años y P=10%.

En el ejemplo para obtener exactamente el 10%, se interpola entre los N° de orden 5 y 6, lo que arroja un valor 116,5 mm. Herahfiel (1961) un factor de corrección para este cálculo de 1,13 por comprobar que este cálculo subestima la lluvia máxima de 24 h. Así: 116,5 mm x 1,13 = 131,7 mm. Obtenida la lluvia máxima para 24 h, debe estimarse cuál es la lluvia máxima horaria, lo que puede hacerse usando los datos de la Tabla 18.

$$I \text{ máx horaria} = 131,7 \times 0,36 = 47,4 \text{ mm}$$

Tabla 18. Factor de conversión para estimar intensidades de lluvia a partir de una lluvia máxima de 24 horas.

Duración de lluvia	30 min.	1 hora	2 horas	6 horas	12 horas	24 horas
Factor de conversión	0,31	0,36	0,44	0,69	0,88	1,00

Una vez determinado el Tc de la cuenca y el valor de intensidad horaria de lluvia, se deberá corregir este valor para el Tc determinado. La corrección puede realizarse empleando métodos gráficos tales como el de la Figura 43. En dicho gráfico se lee en ordenadas la intensidad horaria calculada y se intercepta en el diagrama la curva correspondiente al Tc calculado. En abscisas se lee la intensidad de lluvia corregida para dicho Tc. Supongamos en este ejemplo que Tc = 30 min, a partir de la Figura 43 se obtiene un valor de I = 79 mm/h.

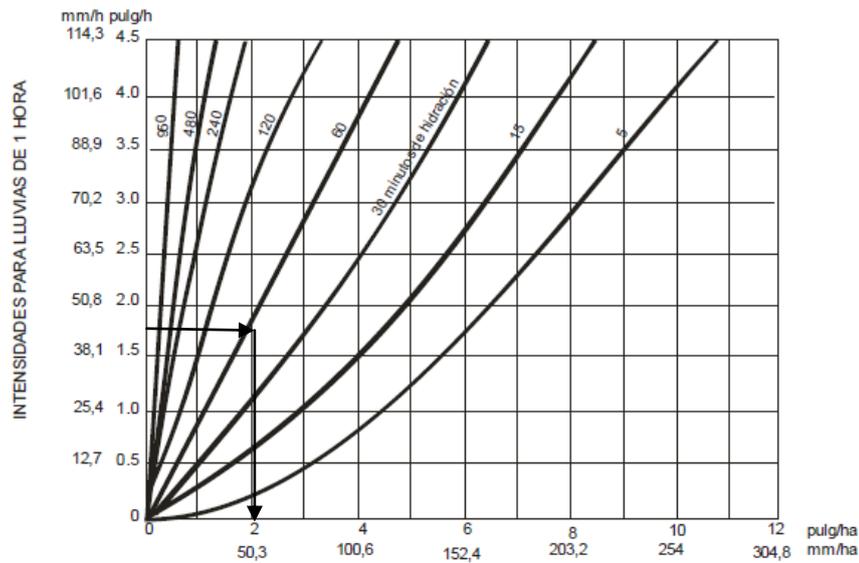


Figura 43. Método gráfico para calcular la *I* horaria corregida según *T_c* (Gráfico de Hathaway).

Otro método gráfico (Schwab et al., 1990), permite obtener el factor de corrección en la ordenada, a partir del dato de tiempo de concentración (*T_c*), que se localiza en la abscisa (Figura 44). Conocido el factor de corrección, se lo multiplica por la intensidad horaria sin corregir.

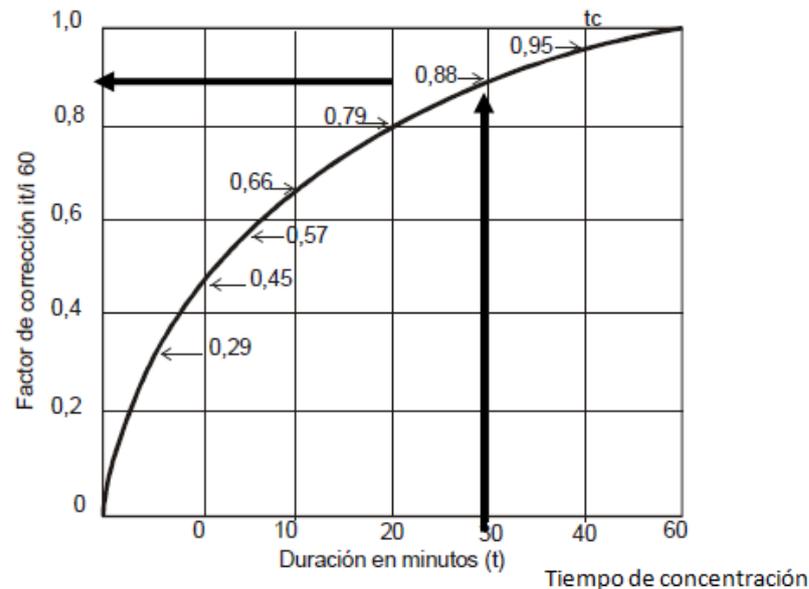


Figura 44. Factor de corrección para calcular la intensidad de lluvia (Schwab et al., 1990).

En nuestro ejemplo el cálculo sería:

$$47,4 \text{ mm} \times 0,88 \times 60/30 = 83,4 \text{ mm}$$

Área de la cuenca (*A*)

El factor que resta para el cálculo del caudal pico es la superficie de la cuenca expresada en hectáreas. La estimación de este dato se realiza a través del uso de un planímetro o por el método de la cuadrícula, el cual consiste en el recuento de cuadros de un área conocida, que entran en el perímetro de la cuenca.

(ii) Método del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (Curva Número)

Es un método adecuado para la estimación del escurrimiento en cuencas reducidas (hasta 800 ha aproximadamente). Una de las ventajas en relación a otros métodos consiste en que, además de tomar en cuenta la influencia de las características de la cuenca (relieve, infiltración, cobertura vegetal, etc.), en la estimación del caudal pico, considera los efectos de las prácticas conservacionistas.

Además, es importante consignar que este método, a diferencia de la Fórmula Racional, emplea para la estimación de los escurrimientos, la lluvia total máxima de 24 horas y no la intensidad horaria.

Se lo utiliza para estimar el volumen medio de escurrimiento de una cuenca y además el caudal pico. La diferencia entre ambos parámetros hidrológicos es:

- el volumen escurrido indica la cantidad total de escurrimiento que produce una cuenca expresada en forma de lámina unitaria (mm) o en volumen total (m^3 , hm^3). En una cuenca el volumen total escurrido (m^3) surge del producto de la lámina (m) por el área de la cuenca (m^2). Representa el área total bajo un hidrograma (Figura 45)

- el caudal pico expresa la cantidad de escurrimiento instantáneo para una creciente máxima, que ocurre en una unidad de tiempo, expresada en l/s o m^3/s . Representada

por el máximo caudal (Figura 45)

El método se basa en determinar los grupos hidrológicos de suelos que componen la cuenca, el uso de los mismos y la posible aplicación de prácticas conservacionistas. Con estos elementos se integra el complejo hidrológico suelo-cobertura o Curva Número (CN).

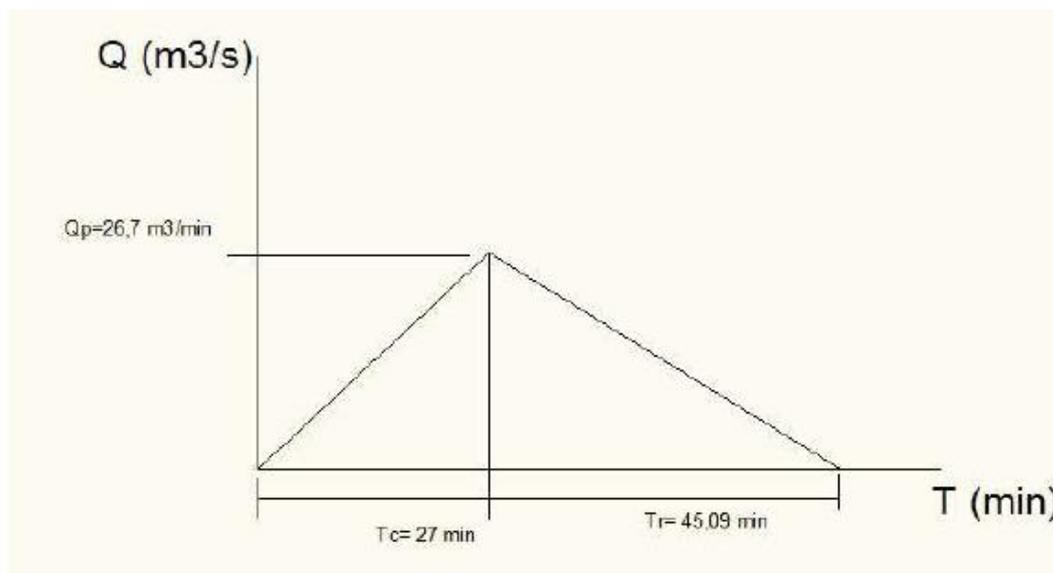


Figura 45. Hidrograma triangular para el cálculo del caudal pico (Q_p) por el método racional.

Mayores detalles para el empleo de esta metodología puede verse en Cisneros et al. (2012).

(iii) Modelos de simulación en Hidrología Superficial. Programa HEC-HMS 3.5

El Sistema de Modelación Hidrológica HEC-HMS (Hydrologic Modeling System –

Hydrologic Engineering Center) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU, es un software libre, y está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía de los sistemas de cuencas dendríticas. Puede ser aplicado en un amplio rango de áreas geográficas para la solución de una amplia gama de problemas. Los hidrogramas producidos por el programa se utilizan directamente o junto con otro software para los estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, la previsión de flujo, el impacto de la futura urbanización, el diseño de reservorios, la reducción de daños de las inundaciones y la operación de los sistemas, entre otros.

El programa es un sistema de modelización generalizada capaz de representar gran número de cuencas diferentes. Un modelo de la cuenca se construye mediante la separación del ciclo hidrológico en partes manejables y la definición de límites en torno a la cuenca de interés. Cualquier flujo de masa o energía en el ciclo se puede representar con un modelo matemático. En la mayoría de los casos, varias opciones de modelo están disponibles para la representación de cada flujo. Cada modelo matemático incluido en el programa es adecuado para diferentes ambientes y bajo diferentes condiciones.

El uso del programa requiere que el usuario haya caracterizado previamente la/las cuencas en estudio desde el punto de vista físico (definición de cuencas y subcuencas, pendientes, red de drenaje, precipitación máxima, CN, etc.). Una vez realizada dicha caracterización se puede aplicar el modelo HEC-HMS para la modelación hidrológica en función de los objetivos de estudio planteados.

Los usos principales de este modelo son:

- Estimación de caudales pico de cuencas y subcuencas para diseño de estructuras de conducción y control de escurrimientos (canales, defensas de cabecera de cárcavas, alcantarillas, etc.)
- Análisis de sensibilidad de diferentes parámetros del modelo (CN, lag, impermeabilidad de cuencas, etc.) sobre el caudal de las cuencas. Se pueden evaluar cambios de uso del suelo, efectos de la urbanización, efecto de prácticas de conservación, etc.
- Evaluación y diseño de estructuras de regulación (embalses), derivaciones, etc.

Mayores detalles para el empleo de esta metodología puede verse en Cisneros et al. (2012).

(iv) CUESTINARIO

1.- Cuáles son los procesos hídricos en la interfase suelo-planta que considera de importancia para decidir estrategias de prevención y control, de la erosión hídrica.

2.- Describa de qué variables depende c/u de los procesos considerados en la pregunta 1 y analice si conoce prácticas agronómicas que pudieran modificar estos procesos.

3.- Para qué sirve la fórmula racional de Ramser.

4.- Cuáles son los términos de esa fórmula.

5.- De qué depende el coeficiente de escurrimiento. Qué unidad tiene. Dé algunos valores posibles para distintas situaciones.

6.- Qué entiende por tiempo de concentración de una cuenca y qué por período de recurrencia o retorno.

7.- Cómo puede calcular el tiempo de concentración. Qué variables de la cuenca lo modifican.

8.- Una vez conocido el tiempo de concentración cómo se procede para hallar la intensidad máxima horaria de la lluvia.

9.- Cómo se puede calcular el área de una cuenca.

10.- Qué diferencias tienen el método de la Curva Número y el modelo desarrollado por el Programa HEC-HMS 3.5 con el de la Fórmula Racional.

Técnicas de manejo del relieve

En el apartado IV.1 se analizaron las técnicas agronómicas que permiten incrementar las tasas de infiltración y disminuyen el impacto de la gota de lluvia a través de la cobertura, las cuales deben integrarse adecuadamente con las técnicas de manejo del relieve discutidas en este apartado. Las técnicas de manejo del relieve (también llamadas prácticas de conservación, prácticas estructurales o de sistematización), son un conjunto de técnicas que abarcan desde la simple ordenación de las líneas de cultivo, hasta prácticas muy complejas como la nivelación completa de terrenos muy inclinados, con fines de implementar el uso agrícola. Son técnicas milenarias en algunos casos utilizadas por casi todas las antiguas civilizaciones para realizar sus cultivos, tanto en secano como bajo riego.

Las técnicas de manejo del relieve se basan en diferentes principios del ordenamiento hidrológico:

- Acortar la longitud y el grado de la pendiente, de modo de reducir el volumen y la velocidad del escurrimiento, o directamente de detenerlo
- Generar microrelieves superficiales que permiten incrementar la retención y el detenimiento superficial del agua en superficie y de ese modo mejorar la captación del agua en el lugar donde cae
- Atrapar los sedimentos que se mueven con el escurrimiento, por el efecto de “filtro” que pueden tener los cultivos siguiendo líneas en contorno
- Conducir controladamente los escurrimientos que no pudieron ser manejados por otras técnicas, a lugares predeterminados, sin que causen erosión

Si bien a escala de lote son técnicas de probada eficacia, en la escala de cuenca, la misma depende del grado de adopción por el resto de los productores de la cuenca. Un trabajo reciente de Prada et al.(2011) indica que se requiere en el orden de un 50 % de la superficie de una cuenca sistematizada para obtener una eficacia aceptable en términos sociales y de reducción de escurrimientos o pérdida de suelo.

Las prácticas de manejo del relieve que se analizarán a continuación son las siguientes, en orden de complejidad:

1. Cultivos cortando la pendiente;
2. Cultivos en curvas de nivel o cultivos en contorno;
3. Cultivos en fajas a nivel, cultivos intercalados a nivel;
4. Cultivos en terrazas:
 - de banco o bancales
 - de banco de conservación
 - de absorción o a nivel,
 - de desagüe, de escurrimiento o a desnivel

Las tres primeras técnicas implican solamente un direccionamiento de las líneas de siembra, en forma perpendicular a la pendiente del lote. En los cultivos en fajas, además, se intercalan cultivos con pastos, o distintos tipos de cultivos. Los cultivos en terrazas implican movimientos de suelo en el lote, de ahí que suelen nombrarse como prácticas estructurales de conservación. Las terrazas de absorción o desagüe se basan en la construcción de pequeños bordos, mientras que las terrazas de banco implican el movimiento de grandes volúmenes de suelo, hasta generar superficies casi planas.

Los principales criterios para la selección de una técnica de manejo del relieve son los siguientes:

1. Potencial de escurrimiento y riesgo de erosión: este sería un criterio general que indica el grado de complejidad del lote a tratar. Incluye pendiente (gradiente, longitud y especialmente complejidad), agresividad del clima, erodabilidad del suelo, etc. Los suelos más permeables requerirán técnicas más sencillas que aquellos con dificultades para la infiltración. Cuanto mayor sea el potencial de escurrimiento/erosión, mayor complejidad tendrá la técnica de sistematización.
2. Tipo de sistema de producción: los sistemas mixtos permiten la elección de técnicas que implican un uso diversificado del lote, como los cultivos en fajas con pasturas. Contrariamente, los sistemas de producción agrícola puros tenderán a adoptar técnicas que permitan un uso con un solo cultivo.

3. Forma de tenencia de la tierra: una limitación a la adopción de estas técnicas son los sistemas de tenencia bajo arrendamiento de corto plazo, los que se inclinarán, a lo sumo, por las técnicas más sencillas
4. Costos: cuanto mayor es el movimiento de suelo, mayores son los costos de la sistematización.

(i) Cultivos cortando la pendiente

Esta práctica consiste en trazar una línea perpendicular a la pendiente principal de un lote, a fin de que sirva como línea base para la siembra de cultivos (línea guía). Para su marcación en el lote (replanteo) se utiliza un nivel de anteojo con el que se procede de la siguiente manera: el observador se ubica en el medio del lote, a una distancia más o menos equidistante de los límites del mismo, según la topografía y el criterio del técnico. Previo nivelado del aparato, se ubica un punto o lectura determinado en un jalón o mira estacionado en un límite del lote donde se coloca una marca (estaca o bandera). Posteriormente el mirero (persona que lleva la mira) se traslada hacia el otro límite del lote y se desplaza pendiente arriba o abajo hasta hacer coincidir la visual horizontal del nivel de anteojo con la lectura o marca en la mira o jalón, donde se ubica una nueva estaca o bandera. Uniéndolas con la sembradora, el productor obtendrá la línea de base o línea guía de siembra para todo el lote (Figura 46).

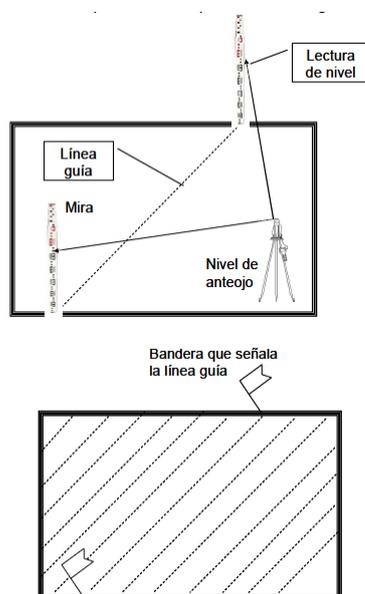


Figura 46. Esquema de trazado de línea de base para cultivos cortando la pendiente. Nótese que la lectura de nivel en ambos puntos es idéntica. Abajo, lote con líneas de cultivo (Figuras vistas en planta, fuera de escala).

Estas marcas pueden quedar en forma permanente para ser utilizadas en años venideros. Cabe aclarar que suelen presentarse casos complejos en los que se puede dividir el lote en dos o más líneas de siembra. Se aconseja utilizar la misma dirección marcada en tareas de arada, disqueadas, rastreadas y siembra, pudiendo hacerse estas con pequeños cambios de dirección para evitar provocar irregularidades en el terreno.

Esta técnica es la más sencilla de implementar, se aplica en condiciones de bajo potencial erosivo del sitio, con pendientes uniformes, de bajo gradiente. Puede aplicarse a cualquier sistema de producción ya que sólo implica la orientación de las líneas de siembra, tanto de cultivos como de pasturas. Su efectividad para el control de la erosión dependerá de la rugosidad superficial generada por las labores o por el rastreo, y del manejo de las condiciones de infiltración del suelo. La línea guía trazada puede usarse además para la implementación de cultivos en fajas cortando la pendiente.

(ii) Cultivos en curvas de nivel o contorno

Se llama curva de nivel o en contorno a una línea trazada en el terreno, que une puntos de igual altura sobre el nivel del mar. La técnica de cultivos en curvas de nivel, por lo tanto, es aquella en la cual las operaciones de labranza y siembra se realizan siguiendo esa línea. El efecto de la práctica sobre la escorrentía es similar a la práctica anterior: cortar la pendiente de forma que cada surco o cada planta represente un obstáculo al avance del agua, aumentando la retención y el detenimiento superficial. Se utiliza en casos de pendiente del 1-3% y de corta longitud, por ejemplo < de 150 m. La ejecución de esta práctica se hace posible a través del trazado de curvas guías o de nivel a un intervalo vertical determinado de la misma manera que se explicará más adelante para las terrazas. Todas las prácticas de manejo posteriores (laboreos, siembras, formas de pastoreos, etc.) seguirán dichas líneas (Figura 47).

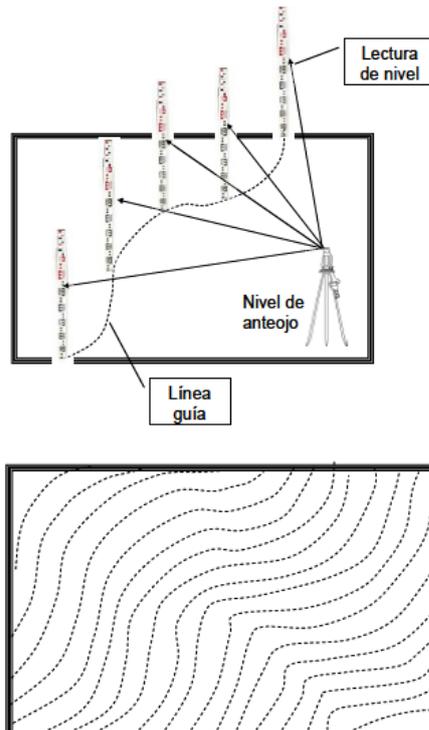
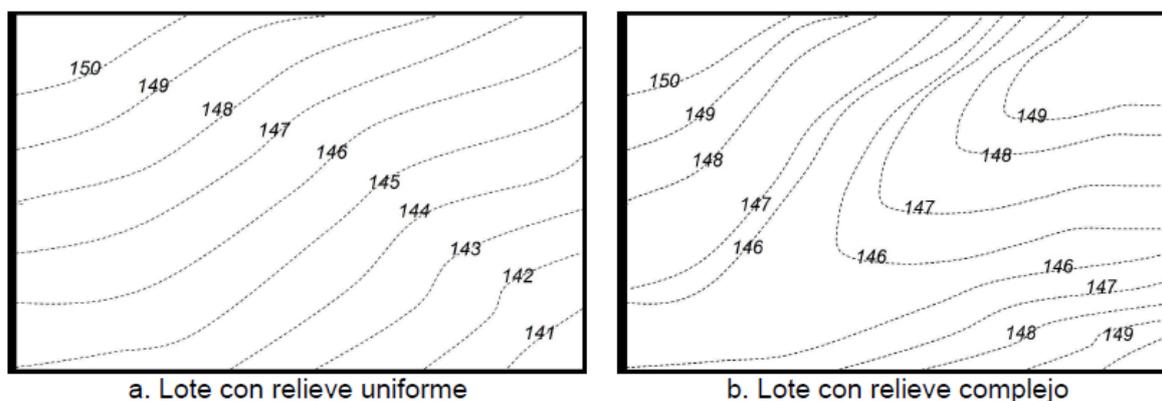


Figura 47. Esquema de trazado de la línea guía de cultivo en contorno o curvas de nivel.

Nótese que la lectura de nivel en todos los puntos es idéntica. Abajo, lote con líneas de cultivo (Figuras vistas en planta, fuera de escala).

La primera etapa en la implementación de esta práctica consiste en el análisis de la complejidad del terreno a tratar, ya que cuanto más complejo sea, mayor número de líneas guía deberán trazarse. Esto significa que, cuanto más uniforme es un terreno, mayor paralelismo habrá entre líneas guía, y por lo tanto el sistema de cultivo en curvas de nivel será más simple de implementar (Figura 48).



a. Lote con relieve uniforme

b. Lote con relieve complejo

Figura 48. Relevamientos planialtimétricos de dos lotes con diferente complejidad.

En la Figura 48 se muestran dos ejemplos de topografía con diferente complejidad en las que puede apreciarse el paralelismo entre curvas de nivel.

Se comienza con el trazado de la curva de nivel en la parte más alta del lote, dejando una superficie posible de laborear aguas arriba. La 2ª curva de nivel se inicia aguas debajo de la 1ª, sumando el intervalo vertical determinado a la 1ª lectura, y así sucesivamente con el resto de las curvas.

La marcación de cada punto de medición, cada 20-30 m se deja señalado con estacas. Una vez trazadas las líneas, se lleva a cabo el suavizado para que no queden ángulos cerrados difíciles de trabajar, esto se logra dejando el mismo número de estacas a un lado y otro de la curva de nivel. Por último se procede a la marcación a través de una pasada de arado ida y vuelta alomando, o una franja de vegetación espontánea ó de pasturas; de este modo en las sucesivas siembras no será necesario volver a replantar las curvas de nivel guía.

Este tipo de trazado se corresponde con el denominado **cultivo en contorno clásico** en el cual se trazan tantas curvas de nivel como indique el intervalo vertical calculado.

En la medida que el terreno se hace más complejo o desuniforme, el paralelismo entre curvas de nivel es menor, por lo tanto para realizar esta sistematización puede ser necesario un relevamiento planialtimétrico (o planialtimetría) y de ese modo seleccionar un menor número de líneas guía o curvas de nivel para realizar las labores, que el que hubiera establecido el cálculo de intervalo vertical, a los fines de simplificar las labores. Este tipo de **cultivo en contorno** se denomina **simplificado**. Debe destacarse, sin embargo, que el cultivo en contorno clásico es más eficiente que el simplificado, de manera que si las condiciones de relieve lo permiten, debe seleccionarse. Además, el contorno clásico se recomienda para suelos erodables y o poco profundos, cultivos densos y lotes extensos. Contrariamente, el simplificado, además de en relieves complejos, se recomienda en suelos profundos, poco erodables, cultivos en línea y lotes poco extensos.

En la Figura 49 se muestra la implementación de cultivos en curvas de nivel.

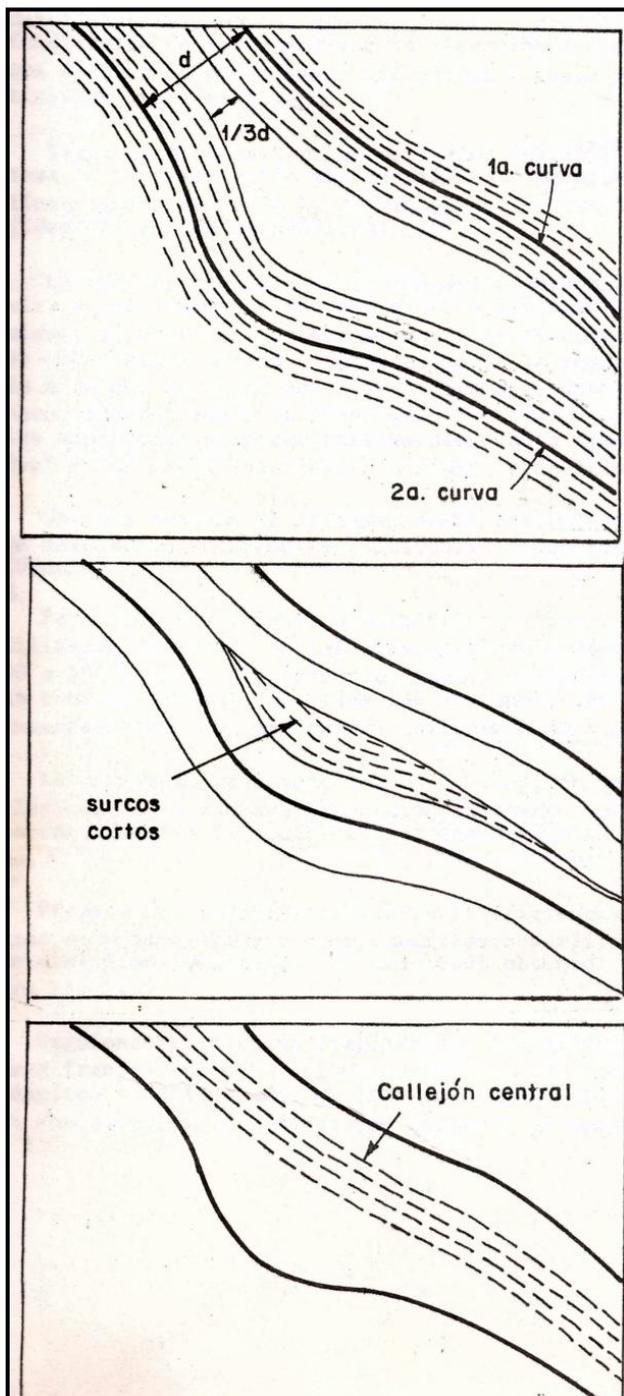


Figura 49. Cultivos en curvas de nivel o en contorno

Este sistema se aplica en condiciones de relieve más complejo y pronunciado que la técnica de cultivos cortando la pendiente, cuando los riesgos de erosión son mayores y no pueden ser adecuadamente resueltos con una simple línea, siendo necesario cortar todas las direcciones de la pendiente. Las curvas guía para este tipo de cultivo pueden servir de base para la realización de cultivos en fajas a nivel, discutidos a continuación.

En relieves complejos se suelen trazar más de una línea guía, las cuales sirven de base para realizar las siembras hacia abajo y arriba, hasta una distancia en la cual las marcas de siembra se encuentran con la otra línea guía. En este caso quedarán zonas desperejas o "chanchos", los que deben ser sembrados en forma separada. En el apartado siguiente se amplían estos conceptos.

El laboreo entre curvas de nivel debe respetar la secuencia indicada en la Figura 50 para el caso de preparación de cama de siembra y siembra. La secuencia se invierte para la cosecha.



A) Una vez marcadas las curvas en el terreno, las labranzas se efectúan en redondo alrededor de cada curva hasta alcanzar $1/3$ de la distancia mínima que la separa de otra curva

B) En una 2ª etapa conviene arar los surcos cortos, es decir los que tienen longitud $<$ a la curva de nivel

C) En una 3ª etapa se hará el callejón que queda en la parte central entre las curvas de nivel

Figura 50. Secuencia para el laboreo siguiendo curvas de nivel.

(iii) Cultivos en fajas o franjas a nivel

El cultivo en fajas (también llamadas fajas buffer) consiste en la siembra de fajas o paños alternados de pasturas de crecimiento denso (denominada franja de protección o contención) y cultivos anuales en hileras (faja protegida), perpendicularmente a la dirección de la pendiente o siguiendo curvas de nivel (cultivos en fajas a nivel o en contorno). Se utiliza con pendientes del 1-5% y longitudes < a los 300 m.

Una variante de esta técnica consiste en la siembra en fajas de cultivos anuales, de distinto porte y ciclo de crecimiento, en lo que constituye una forma de cultivos intercalados en franjas (Figura 51).

Los principios de funcionamiento de los cultivos en fajas son los siguientes:

- Disminución de la velocidad y desorganización del agua de escurrimiento al fluir por la faja de césped denso (aumento del detenimiento y la retención superficial)
- Aumento de la velocidad de infiltración del agua, tanto en la faja de pastura densa como en la cultivada (esto es dependiente del manejo en cada una de ellas)
- Captura del sedimento procedente de la faja de cultivo, el cual se deposita en la faja empastada al disminuir la velocidad del agua de escurrimiento. Este fenómeno se ve promovido por el mayor desarrollo de la faja de pasto en contacto con la franja cultivada (efecto de bordura)
- Protección mutua de los cultivos intercalados. El cultivo más temprano y denso (ej. maíz o sorgo) protege al cultivo más tardío y ralo (ej. soja), tanto de la erosión hídrica como eólica. Al año siguiente, el cultivo ralo se siembra en el sector cubierto con rastrojos abundantes (dejados por maíz o sorgo), y el cultivo denso se siembra más temprano en el sector con menor proporción de residuos (sector que viene de soja).



Figura 51. Cultivos en fajas siguiendo curvas de nivel

Las operaciones agrícolas en lotes cultivados en fajas, se ejecutan en forma similar a las tierras trabajadas en curvas de nivel, sin embargo se debe tener en cuenta algunas particularidades:

La siembra en fajas requiere el establecimiento de una rotación anual si se trata de cultivos anuales u plurianual en caso de incluir pasturas, respetando su vida útil

Al arar se debe evitar la formación de camellones y surcos muertos.

Siempre deben dejarse vías de desagües perfectamente protegidas con vegetación. Estas, facilitan también el tránsito de maquinaria para ejecutar labores en las fajas que lo exigen, sin dañar las plantas en aquellas ocupadas por otros cultivos.

Para el dimensionamiento de las fajas se procede de la siguiente manera:

El factor LS de la USLE permite obtener una aproximación del espaciamiento entre franjas protectoras, quedando definido el ancho de la franja de cultivo, estableciendo la condición de longitud de pendiente crítica con la cual la tasa de erosión anual del suelo se mantiene dentro de las pérdidas de suelo tolerables. De este modo, aplicando la fórmula de la USLE y despejando LS, resulta:

$$L \times S = \frac{A}{R \times K \times C \times P}$$

donde A = es la tasa de pérdida de suelo tolerable, definida por el usuario

Una vez que el valor de LS ha sido obtenido, se utiliza el nomograma de la Figura 21 para determinar la longitud de la pendiente crítica en función del gradiente de pendiente local (se ingresa al nomograma por LS, se corta en pendiente del lote y se obtiene la longitud). Esta longitud crítica puede ser tomada como el máximo espaciamiento entre franjas de pradera a través de la pendiente, con el cual la tasa de pérdida de suelo anual se mantendrá por debajo del nivel de tolerancia elegido.

Otra aproximación teórica para determinar la longitud de pendiente crítica o espaciamiento entre franjas de pradera, está basada en la velocidad del flujo superficial, en el coeficiente de rugosidad de Manning (se verá más adelante), en las características de la lluvia y de la infiltración de agua en el perfil, y en el gradiente de la pendiente. Si se emplea este método se despeja Lc (longitud de pendiente crítica, a partir de la cual la velocidad del flujo comienza a ser erosiva). El SCS-USDA propone anchos posibles para la faja empastada y de cultivo para diferentes rangos de pendiente (Tabla 19).

Tabla 19. Ancho de franjas empastada y cultivada en función del gradiente de pendiente y relaciones de ocupación cultivo/pasto.

Pendiente (%)	Ancho de franja empastada (m)	Ancho de faja cultivable (m)	Relación de anchos cultivo/pradera	% de suelos con pradera
Hasta 1	8	48	6	14
Hasta 3	12	36	3	25
Hasta 6	12	24	2	33
Más de 6	20	20	1	50

Es importante tener en cuenta que el ancho de la faja cultivable sea múltiplo del ancho de las herramientas a utilizar, con el fin de facilitar las operaciones de labranza.

Una vez estimados los anchos de fajas protectora y protegida, el método más sencillo de trazado consiste en marcar "líneas guías" siguiendo curvas de nivel, al igual que el procedimiento mencionado para cultivos en contorno simplificado, con un distanciamiento igual al ancho que se le quiere dar a las fajas. Cada línea guía constituye el centro de la franja laboreada, es decir que, estimado un ancho de franja laboreada, se trabaja la mitad de ese ancho hacia arriba y la mitad hacia abajo de la línea. El procedimiento para el trazado de las otras franjas es el siguiente: a partir de la línea guía original (G1) se pueden paralelizar una o dos líneas hacia arriba y hacia abajo de ella, dependiendo de la complejidad de la pendiente del terreno. En caso de ser compleja, es probable que se pueda trazar solo una paralela a cada lado y si es uniforme podrán hacerse dos o más. La distancia o intervalo horizontal (IH) entre línea guía y su paralela será igual a:

$$IH = \text{Ancho franja cultivada} + \text{ancho franja empastada}$$

Esto se debe a que esa distancia incluye la mitad de la franja cultivada, toda la franja empastada y la mitad de la próxima franja cultivada (Figura 52).

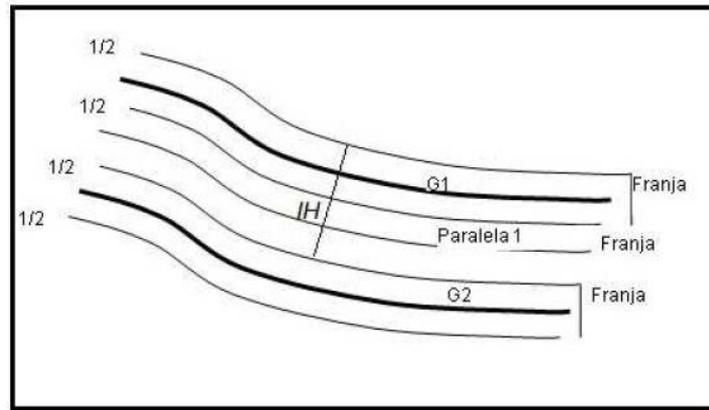


Figura 52. Esquema de trazado de los cultivos en franjas a nivel.

Luego de la paralelización se procede al trazado de una nueva línea guía (G2 en Figura 52) y se repite el paso anterior.

Este tipo de trazado se denomina cultivo en **franjas en contorno simplificado**, pues el ancho de la faja protegida y protectora es uniforme en todo el lote. Existen otros tipos de trazados denominados cultivo en **franjas en contorno clásico**, en el cual el borde de cada faja sea está protegida o protectora, se corresponde con una curva de nivel, razón por la cual el ancho de las fajas en todo el lote es desuniforme.

Resulta conveniente decidir los criterios de distanciamiento entre líneas guías teniendo en cuenta la parte del lote que tenga mayor pendiente, ya que de esta forma se asegura que en esos lugares las fajas tendrán el ancho deseado. Esto puede ocasionar que queden franjas empastadas demasiado anchas en los lugares con menor pendiente.

La técnica del cultivo en franjas, especialmente la que incluye pasturas permanentes, es una de las más seguras y efectivas para el control de erosión y escurrimientos. Por esta razón es aplicable a situaciones con alto potencial de escurrimiento y erosión, en pendientes de algo gradiente, en las cuales la longitud es controlada por la presencia de la pastura densa.

(iv) Terrazas de banco o bancales

El sistema de terrazas de banco o bancales consiste en una serie de áreas planas, semejantes a bancos o escaleras, que convierten una pendiente escarpada en planos casi horizontales (terraplén), separados por paredones (talud), generalmente estabilizados con piedra (Figuras 53).



Figura 53. Terrazas de banco o bancales.

En las terrazas de banco se modifica tanto la longitud, como el gradiente de las pendientes, ya que se genera una superficie plana. Su uso está concentrado en áreas de montaña, con pendientes superiores al 20 % y con condiciones del subsuelo que permitan generar terrenos aptos para la agricultura, como los que

se observan en la Figura 34. Requieren grandes movimientos de suelo para su construcción y una muy alta precisión en el trazado de los bancales y sus vías de desagüe o drenaje, especialmente aquellas construidas en regiones de altas precipitaciones.

(v) Terrazas de desagüe y terrazas de absorción

Las terrazas son el conjunto de un paño con su respectivo canal y bordo construidos transversalmente a la pendiente de manera de interceptar el escurrimiento superficial.

Su objetivo es reducir la erosión por acortamiento de la longitud de la pendiente al propiciar una mayor infiltración en los paños. Se aplica en general con pendientes del 2-10%, ó con pendientes menores al 2% si éstas son muy largas. Se suelen aplicar en suelos profundos ó moderadamente profundos (0,70-1 m) y a diferencia del cultivo en franjas pueden ser cultivadas con la misma especie en toda la superficie.

Antes de entrar en el análisis de cada tipo de terraza, se hará una descripción general de las características comunes de ambos sistemas de manejo del relieve. El objetivo común a ambos tipos de terrazas es cortar la longitud de la pendiente del lote con estructuras conformadas por un bordo de tierra de baja altura. El bordo interrumpe el flujo de la escorrentía, el que puede tomar dos caminos posibles, en función del tipo de terraza:

En las terrazas de desagüe el escurrimiento circula lentamente por la porción cóncava de la terraza (canal de la terraza) y descarga en un canal de desagüe planificado a tal fin (Figura 54, Scotta et al., 1989). Se utiliza en regiones con más de 500-700 mm de precipitación anual.

En las terrazas de absorción el escurrimiento se acumula en la porción cóncava de la terraza, provocando allí su infiltración en el suelo (Figura 55). Se utilizan con precipitaciones menores a los 500-700 mm. El canal y el bordo están a nivel.



Figura 54. Esquema de terraza de desagüe e imagen a campo

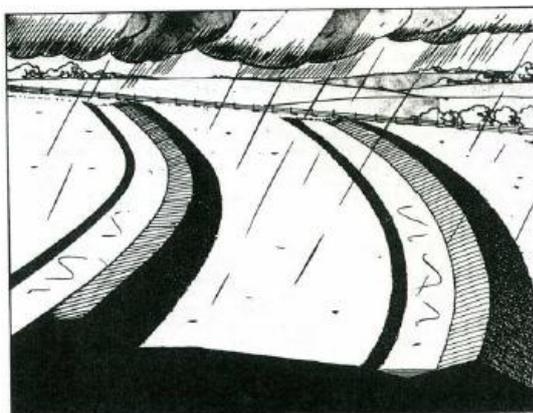
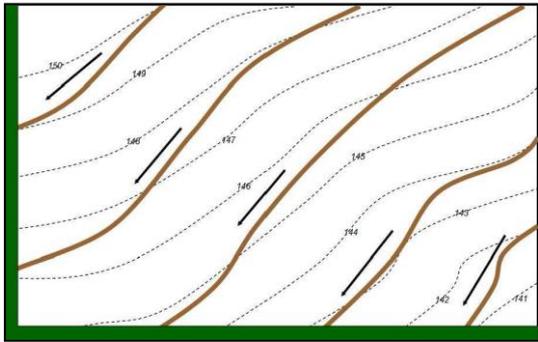


Figura 55. Esquema de terraza de absorción e imagen a campo.

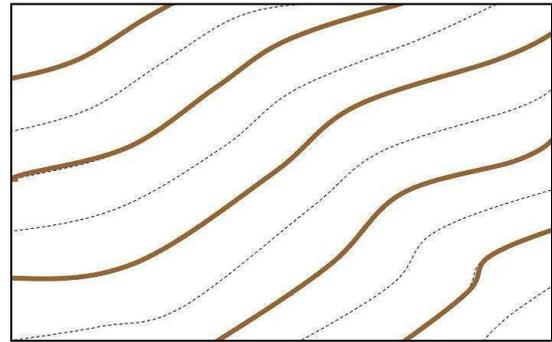
Ambos tipos de terrazas se construyen empujando tierra declive abajo, para formar un cauce con un bordo o camellón bajo, entre $30 \text{ cm}^{-1} \text{ m}$ de altura aproximadamente. La dirección de la terraza, en relación a la topografía del lote, dependerá del tipo de terraza elegida:

- Terrazas de desagüe: deben ser trazadas sobre una línea con mínima pendiente para que se produzca la descarga hacia un canal colector. La pendiente debe permitir una velocidad lo suficientemente baja como para que no se produzca erosión del canal, y lo suficientemente alta como para que no produzca sedimentación de partículas sobre el canal. Esto se logra con pendientes que no superen el 0,5 % de gradiente.
- Terrazas de absorción: deben trazarse sobre una línea a nivel para que pueda acumular el escurrimiento generado en el paño de terreno entre dos terrazas consecutivas.

En la Figura 56 se indica esquemáticamente la ubicación de los dos tipos de terrazas, sobre un mismo lote. En ella se indican las curvas de nivel obtenidas mediante un relevamiento planialtimétrico, y la dirección que toman las terrazas, según sean de desagüe o de absorción.



a. Terrazas de desagüe. En el trazo más grueso verde se indica el canal de desagüe, en el trazo mediano la terraza y las flechas indican la dirección del escurrimiento]



b. Terrazas de absorción, nótese que la línea de la terraza coincide con la curva de nivel.

Figura 56. Esquemas de emplazamiento de terrazas en base a un relevamiento planialtimétrico (UNRC-SECYOT). La línea gruesa representa una terraza, la línea punteada representa una curva de nivel. Escala aproximada 1:10.000.

Para ambos tipos de terraza, el diseño transversal, es decir la configuración del conjunto canal-bordo, puede ser de dos tipos:

1) de base ancha: también llamadas terrazas cultivables, ya que el diseño de la terraza es lo suficientemente ancha como para que puedan ser cultivadas en su totalidad. Para que esto sea posible el conjunto de canal y bordo deben tener un ancho de entre 10 y 15 m, distribuido en partes aproximadamente iguales entre canal y bordo, con una relación de taludes de aproximadamente 5 a 8:1 (quiere decir que si la terraza tiene 30 cm de altura (IV), el talud del bordo tendrá entre 1,5 y 2,4 m, con lo cual sólo el bordo ocupa entre 3 (ya que $3 = 1,5 \times 2$) y 5 (ya que $5 = 2,4 \times 2$) m (Figura 57 y 58a). En esta forma aprovecha también la circunstancia de que un canal con tales especificaciones es un conductor de escorrentías a bajas velocidades. La sección transversal de una terraza de base ancha (son aquellas que permiten ser sembradas en su totalidad sin provocar inconveniente a la maquinaria agrícola), para los propósitos de diseño, puede considerarse como un canal triangular.

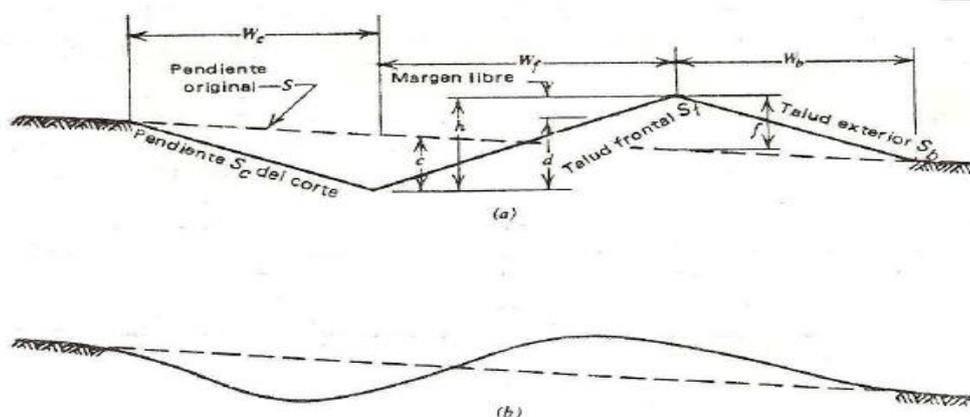


Figura 57. a) Diseño de la sección transversal de una terraza de base ancha. b)

Sección transversal de una terraza de base ancha después de 10 años de cultivo.

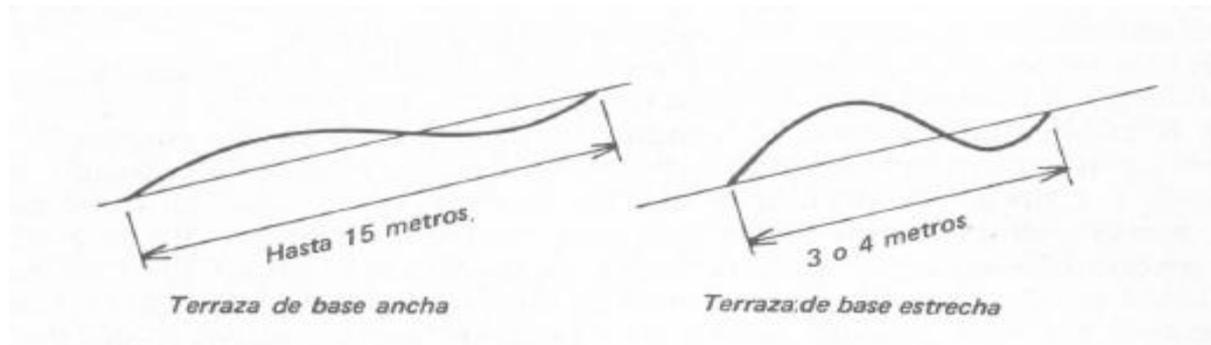


Figura 58. Dimensiones de canal y bordo en a) terrazas de base ancha o cultivable y b) de base angosta

La profundidad de la corriente (d en Figura 58) es la altura a la parte superior del camellón menos un margen o bordo libre aproximadamente de 8 cm. Después de suavizarlos, los anchos del fondo y del camellón deberán tener casi 1 metro, lo cual dará un corte transversal que se aproxima a la forma de una terraza después de 10 años de cultivo. Al diseñar las secciones transversales, el ancho de la pendiente del frente (w_f) debe ser igual al ancho de la maquinaria que se utiliza para las operaciones de labranza y cultivo. Cuando los anchos de los taludes laterales son iguales ($w_c = w_f = w_b = W$), los

cortes y los rellenos según la geometría son:

$$c + f = h + s \times W$$

donde:

c = corte

f = relleno

h = profundidad del canal incluyendo el margen libre

s = pendiente original del terreno

W = ancho del talud lateral

2) de base angosta: también llamadas terrazas empastadas, debido a que, al ser de sección más angosta, no pueden ser cultivadas, y terminan empastándose en la porción del camellón. Se utilizan en situaciones de mayor pendiente que las desagüe (6-9%). Su ancho normalmente está entre 3-4 hasta 8 m, para una misma altura de terraza (Figura 58 b). Los taludes son empinados, generalmente menores a 4:1 a 5:1. Este tipo de terraza es más segura, ya que hay menores riesgos de rotura del bordo al estar empastado. Se utiliza en condiciones de mayor potencial de escurrimiento que la terraza de base ancha (mayor pendiente, suelos menos permeables, uso más intensivo del lote, mayor intensidad de lluvia, etc.).

En la Tabla 19 se indican las principales características de ambos tipos de terrazas.

Tabla 19. Algunas características de los sistemas de terrazas.

Característica	Terraza de desagüe	Terrazas de absorción
<i>Pendiente</i>	Hasta 0,5%	0
<i>Escurrimiento/captación lluvia</i>	Descarga a un canal. Parte de la lluvia se pierde	Se acumula en la terraza. No hay pérdidas
<i>Terreno</i>	Alto potencial de escurrimiento	Bajo potencial de escurrimiento
<i>Diseño</i>	Base ancha o angosta	Normalmente base angosta
<i>Paralelización</i>	Posible, variando la pendiente	Debe respetar la línea a nivel
<i>Planialtimetría</i>	Necesaria. Sólo en pendientes uniformes puede replantearse directamente a campo	Necesaria. Pueden replantearse directamente a campo
<i>Riesgo de desborde</i>	Bajo, el agua circula	Alto, el agua se acumula
<i>Mantenimiento</i>	Permanente	Permanente
<i>Obras complementarias</i>	Canales de desagüe, drenajes subterráneos	Canales de desagüe opcionales
<i>Sedimentos</i>	Parte se descargan a las vías de drenaje	Quedan retenidos en la terraza

Diseño y dimensionamiento de terrazas

El diseño de un sistema de terrazas debe calcularse para períodos de recurrencia de 10 años. En las de desagüe el diseño implica la definición del espaciamiento y la localización apropiada de las terrazas, el diseño de un canal de capacidad suficiente y el desarrollo de secciones transversales fáciles de cultivar. Las características del suelo, las prácticas de manejo del suelo y del cultivo, y las condiciones climáticas son los puntos más importantes en el diseño de esta técnica.

Una de las principales definiciones de diseño de un sistema de terrazas de desagüe es la posibilidad de paralelización y rectificación del trazado en el lote. Se denomina paralelización al diseño siguiendo líneas paralelas (curvas o rectas), según el análisis de la planialtimetría. Por otra parte un sistema rectificado es aquel en el que las terrazas, además de paralelas, siguen líneas rectas, en forma similar a la definida para los cultivos cortando la pendiente. De acuerdo a esta clasificación las terrazas de desagüe pueden ser:

- Curvas no paralelas: responden a un diseño complejo del relieve, en dirección y gradiente
- Curvas paralelas: el relieve es complejo en dirección, pero uniforme en gradiente
- Rectas no paralelas: el relieve es de dirección uniforme pero gradiente complejo
- Rectas paralelas: el relieve es uniforme en dirección y gradiente

Cuanto más rectas y paralelas sean las terrazas, menores dificultades de manejo acarrearán, en relación a líneas de siembra, pulverización y cosecha. En la Figura 59 pueden observarse estos diferentes diseños.

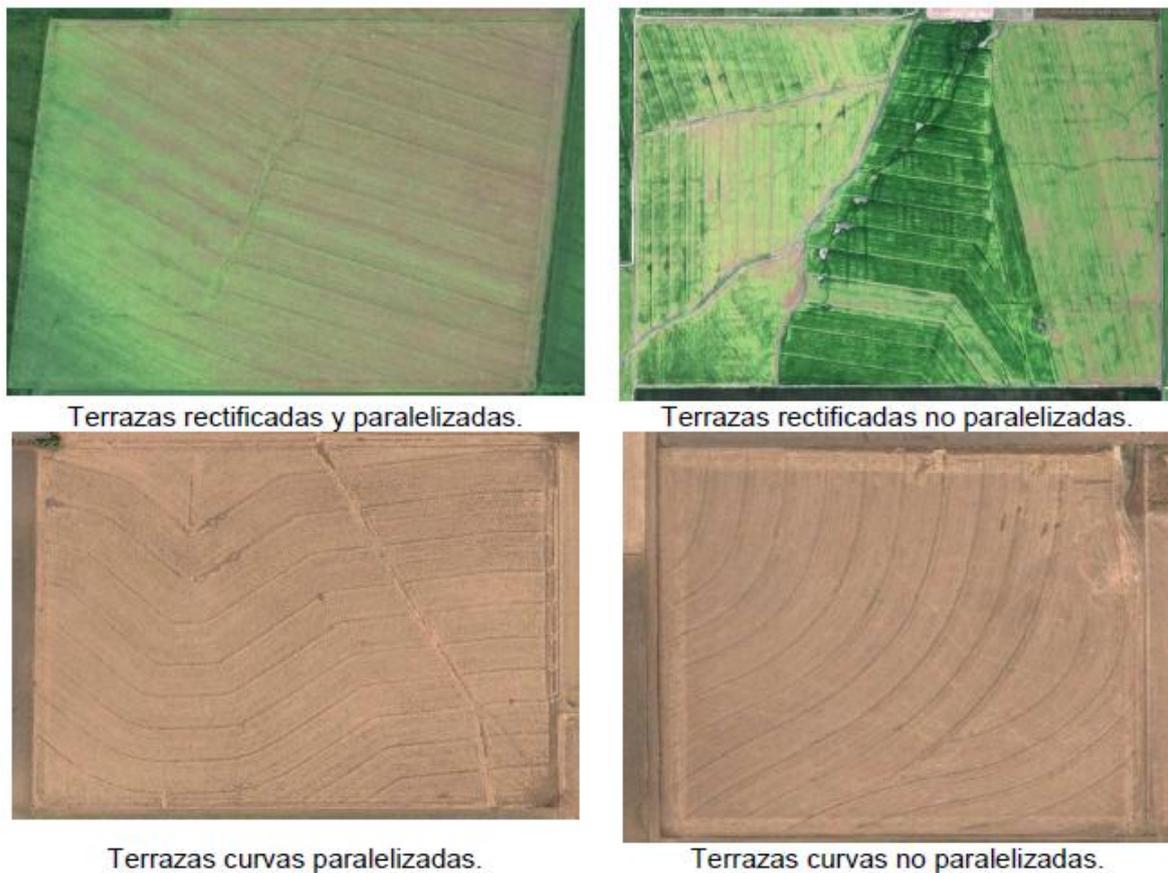


Figura 59. Diferentes diseños en planta de terrazas de desagüe (UNRCSECYOT).

Espaciamiento entre terrazas

i) Terrazas De Desagüe

La distancia horizontal o intervalo horizontal (IH) entre terrazas es el otro parámetro de diseño esencial del sistema. El IH se estima bajo el principio que la escorrentía que fluye sobre el terreno entre dos terrazas no alcance velocidad erosiva. Depende por lo tanto de la pendiente del terreno, de las condiciones del suelo y del cultivo que en él se establezca y de las características climáticas del lugar (tipo e intensidad de precipitación). Se denomina intervalo vertical (IV), a la diferencia de altura entre dos terrazas consecutivas (Figura 60).

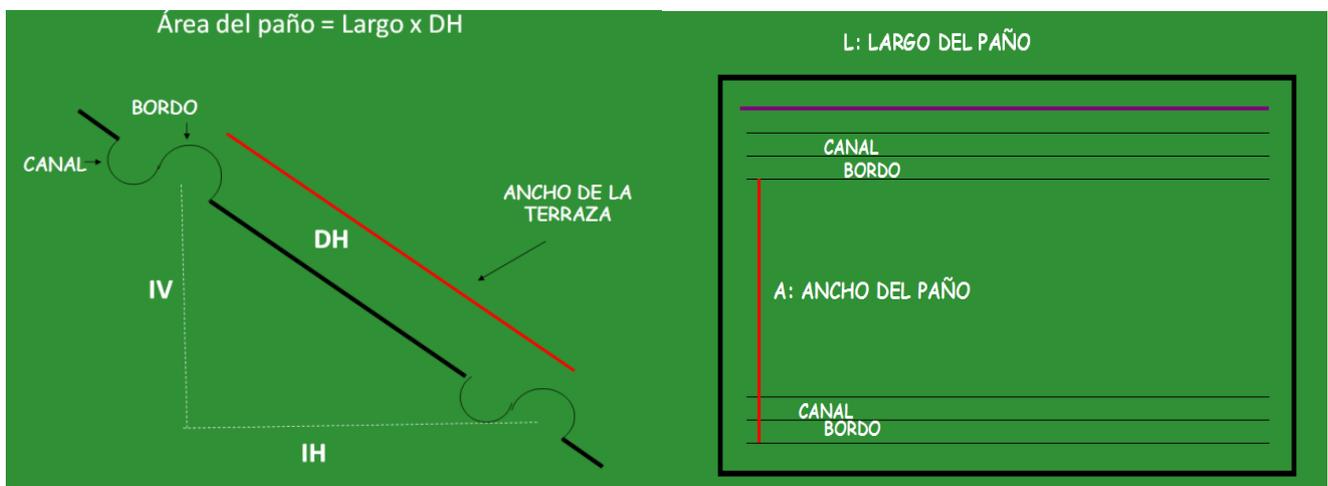


Figura 60. Vista lateral y en plano del conjunto de canal, bordo y paño de una terraza.

La pendiente del terreno (S) relaciona IH e IV según:

$$IH = IV \times \frac{100}{S}$$

donde:

IH= intervalo horizontal: Distancia horizontal, en metros, de separación entre dos terrazas consecutivas

IV= intervalo vertical: Diferencia en altitud, en metros, entre dos terrazas adyacentes

S= pendiente del terreno, en %.

Puede obtenerse a través de **DIFERENTES MÉTODOS**:

- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS): como se ha visto en la Parte III de este capítulo dicha formulación es

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

en donde (Sistema métrico decimal):

A= pérdida anual de suelo (t/ha año)

R= factor de erosividad por la precipitación pluvial (J mm/m² h año)

K= factor de erodabilidad del suelo (kg m² h año/ m² J mm)

L= factor de longitud de la pendiente (m)

S= factor de gradiente de pendiente (%)

(LS: factor combinado (adimensional))

Establecida una tolerancia (T) que reemplaza a A en la fórmula, y conocida la pendiente (S) se despeja la longitud (L), que en este caso describimos como IH.

- Fórmulas empíricas

- Por ejemplo en Pampa Ondulada se emplea la siguiente fórmula:

$$IH = \left(\frac{100 X + 100 Y}{S} \right) \times 0,305$$

Donde

x: factor lluvia (0,4-0,8).

terrazas con gradiente: N Bs As (0,6); SE Bs As (0,7)

terrazas de absorción (0,8)

y = factor infiltración y cobertura,

suelo de baja infiltración y poca cobertura y=1

suelo de alta infiltración y alta cobertura y=2

suelos con uno de los 2 factores desfavorables y=1,5

S: grado de la pendiente (%)

- INTA Balcarce (SE bonaerense) propone:

$$IH = IV \times \frac{100}{S}$$

$$IV = S + \frac{8}{5}$$

- Otras fórmulas empíricas utilizadas para el cálculo del intervalo vertical (IV) son las siguientes:

* Servicio de Conservación de suelos del USDA (Engineering Field Manual, SCS 1984):

$$IV = (a \times S + b) \times 0,3$$

donde:

IV = intervalo vertical en m

a = 0,4 -0,8 para áreas de altas y bajas precipitaciones respectivamente. Para la región central de Argentina, pueden tomarse valores intermedios.

b= 1 -4 según características del suelo, cultivo y prácticas de manejo. 1 para condiciones de alto potencial de escorrentía, 4 para condiciones contrarias.

S = gradiente de la pendiente, en porcentaje.

Por ejemplo, para la región de Río Cuarto (Córdoba), en un lote con 2 % de pendiente, puede tomarse un valor $a = 0,6$ y $b = 3$, luego el $IV = (0,6 * 2 + 3) * 0,3 = 1,26$ m. El IH correspondiente será $IH = (1,26 * 100) / 2 = 63$ m. Si la pendiente del lote hubiera sido del 3 %, el IH sería igual a 42 m.

* Fórmula de Rhodesia (Hudson, 1982):

$$IV = \left(\frac{S + f}{2} \right) \times 0,3$$

donde:

IV = intervalo vertical (m)

f = 3,0-6,0 según la erodabilidad del suelo.

0,3= factor de conversión de pies a metros

* Fórmula de Sud Africa (Hudson, 1982).

$$IV = \left(\frac{S}{a} + b \right) \times 0,3$$

Términos similares a los del SCS.

Un criterio adicional para ajustar el IH entre terrazas es el de considerar que debe ser múltiplo del ancho de las maquinarias a utilizar, para facilitar las operaciones sobre las mismas. En términos generales, los espaciamientos mayores deben usarse en suelos permeables, ricos en materia orgánica, en terrenos en los cuales va a practicarse una rotación con una alta proporción de plantas protectoras y en zonas con lluvias de baja intensidad. Los espaciamientos menores se aplican en suelos muy compactos, de baja permeabilidad, en suelos ocupados por cultivos que ejercen poca protección al suelo (cultivos de escarda) y precipitaciones de alta intensidad. En la Tabla 20 se presentan valores de IH e IV que, si bien fueron recomendados para EEUU, puede servir como guía o marco de referencia al estimar los distanciamientos en una situación local. Se tomó a la pendiente como criterio de espaciamiento.

Tabla 20. Intervalos vertical y horizontal en función del gradiente de pendiente en terrazas de desagüe.

Pendiente del terreno (%)	Intervalo Vertical (IV) (m)		Intervalo Horizontal (IH) (m)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1	0,50	0,70	50,0	70,0
2	0,64	0,86	32,0	43,0
3	0,70	0,95	23,0	31,0
4	0,76	1,00	10,0	25,0
5	0,83	1,12	16,6	22,4
6	0,89	1,20	14,8	20,0
7	0,96	1,29	13,7	18,4
8	1,02	1,38	12,8	17,3
9	1,08	1,47	12,0	16,3
10	1,15	1,55	11,5	15,5
11	1,21	1,64	11,0	14,9
12	1,28	1,73	10,6	14,4

Se han considerado velocidades máximas no erosivas en Argentina de 0,6 m/s para suelos ricos en materia orgánica y 0,4 m/s para suelos limosos.

Otro cálculo que debe realizarse es el del **canal de la terraza**.

Para ello es necesario calcular primero el área del paño (AP):

$$(I) \quad AP = \frac{IH \times LT}{10000}$$

Donde:

AP= área del paño (ha)

IH= intervalo horizontal (m)

LT= longitud de la terraza (m)

Una vez que se tiene este dato se calcula el pico de escurrimiento para esa área de paño (AP) con la fórmula de Ramser ya vista, teniendo en cuenta los datos zonales de intensidad de lluvia (I) y locales de coeficiente de escurrimiento (C) (Ver Métodos de estimación del escurrimiento superficial):

$$(II) \quad Q = \frac{C \times I \times AP}{360}$$

donde:

Q= pico de escurrimiento (m³/s)

C= coeficiente de escurrimiento (adimensional)

I= intensidad de la lluvia (mm/h)

AP= área del paño (ha)

Luego se calcula el área del canal (AC):

$$(III) \quad AC = \frac{Q}{VMNE}$$

Siendo:

AC: área del canal (m²)

Q: pico de escurrimiento (m³/s) (Por fórmula de Ramser)

VMNE: velocidad máxima no erosiva establecida para la zona y tipo de suelo (m/s) (por fórmula de Manning)

Por otro lado el AC (considerando una sección triangular) también es:

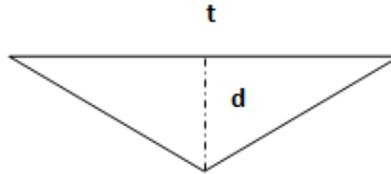
$$(IV) \quad AC = \frac{t \times d}{2}$$

Siendo:

AC: área del canal (m^2)

t: ancho (m)

d: profundidad máxima en un canal triangular (m)



Se coloca por tanteo un valor de d (en general menor a la profundidad del horizonte A, para facilitar el empaste cuando es de base angosta, o del cultivo si es de base ancha) y se utiliza el AC calculado con la fórmula III.

Despejando de la fórmula (IV) se sabe que:

$$t = \frac{AC \times 2}{d}$$

Siendo:

t: ancho (m)

AC: área del canal (m^2)

d: profundidad máxima en un canal triangular (m)

Establecido por tanteo d, se realiza el cálculo del radio hidráulico (RH) que es:

$$(V) \quad RH = \frac{AC}{PM}$$

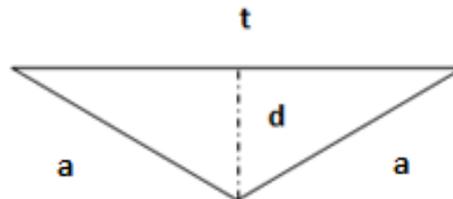
Donde:

RH: radio hidráulico (m)

AC: área del canal (m^2)

PM: perímetro mojado (m)

El perímetro mojado (PM) es la longitud del perímetro en donde se establece el contacto suelo-agua (sumatoria de a + a). El mismo se calcula por Pitágoras:



$$(VI) \quad PM = a + a = \left[\sqrt{\left(\frac{t}{2}\right)^2 + d^2} \right] \times 2$$

Conocidos AC y PM, se calcula el RH.

A posteriori, usando la fórmula de Manning (VII), se despeja S (pendiente), considerando un coeficiente de rugosidad dado.

$$(VII) \quad V = \frac{RH^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

donde:

V = velocidad de flujo (m/s)

n = coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)

RH = radio hidráulico (m)

S = pendiente del canal (m/m)

Despejando de (VII) se tiene:

$$S = \left(\frac{V \times n}{RH^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

Verifico que el valor de " S " se encuentre entre 1-5‰, que es lo estipulado en este tipo de canales para evitar procesos erosivos en ellos. Si fuera superior se debe reiterar el cálculo, disminuyendo " d ".

ii) Terrazas De Absorción

El cálculo del IH de terrazas de absorción sigue un criterio hidrológico que se basa en que el volumen unitario escurrido en el paño entre dos terrazas (es decir por m de ancho unitario), debe ser igual al volumen unitario que es capaz de retener la terraza de absorción. El volumen escurrido (expresado en m) se puede estimar con las metodologías vistas en el capítulo de **Hidrología Superficial y Cálculo de Escurrimiento** (Fórmula de Ramser para un tiempo de recurrencia de 10 años). Se requiere además conocer la pendiente del terreno, y la altura de la terraza. La ecuación que despeja L , o longitud entre dos terrazas, equivalente al IH discutido, se expresa como (Luque, 1997):

$$IH = \frac{2 \times H^2}{9 \times Q \times S}$$

Donde:

IH = intervalo horizontal entre terrazas (m)

H = altura de la terraza (m)

Q = lamina de escurrimiento para una tormenta extrema (m)(por Ramser)

S = pendiente del lote en tanto por 1.

Por ejemplo, una terraza de absorción de 30 cm de altura, para retener 40 mm de escurrimiento en una pendiente del 2 ‰, da como resultado una terraza cada 25 m. Si la altura de la terraza se incrementa en 10 cm, el IV resultante es de 44 m.

Desnivel de los canales de las terrazas

La pendiente o desnivel de los canales de las terrazas hacia el desagüe varía desde cero (terrazas de absorción o a nivel) hasta 0,5‰. Se procura utilizar siempre el menor desnivel que sea posible, de manera que el agua circule por el canal con velocidades apenas suficiente para prevenir la sedimentación de las partículas que acarrea el agua. De esta forma, además, se evita que el propio lecho del canal llegue a sufrir erosión.

En terrazas de desagüe, suele darse un desnivel variable a la línea de trazado, comenzando con el mínimo en la parte superior, y terminando con el máximo desnivel posible en proximidades del desagüe. Este sistema es aconsejable en estructuras de gran longitud y permite aumentar la capacidad del canal sin aumentar la sección del mismo, lo cual significa economía en construcción. Es decir, el canal de desagüe de la terraza puede tener un gradiente constante (alrededor del 2‰) o variable, incrementándose hacia el desagüe vegetado (Figura 61).

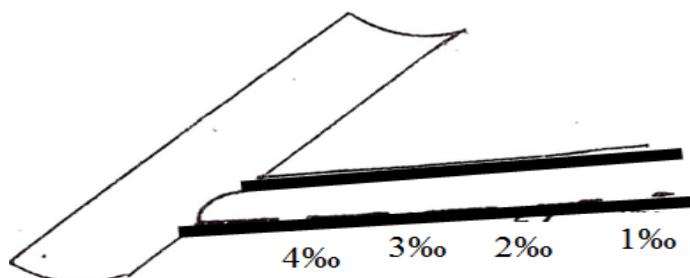


Figura 61. Canal de terraza de desagüe con gradiente variable hacia el canal vegetado

La Tabla 21 da una orientación sobre los desniveles permisibles por cada 100 m de longitud de terrazas de desagüe

Tabla 21. Desnivel de terrazas en función de la longitud de la misma.

Longitud (m)	Desnivel o pendiente hacia el desagüe (%)	
	Mínimo por 100 m	Máximo por 100 m
0-100	A nivel	0,10
100-200	0,10	0,15
200-300	0,15	0,20
300-400	0,20	0,30
400-500	0,30	0,40

Longitudes recomendadas de las terrazas (IH en Figura 41)

La forma y el tamaño del lote a sistematizar, las posibilidades de ubicación y tamaño de canales de desagüe drenaje, la tasa de escurrimiento, son los factores que definen la longitud de la terraza.

Las terrazas demasiado largas presentan serias dificultades de construcción y manejo. Exigen secciones transversales demasiado amplias y mayores coeficientes de seguridad, especialmente en los tramos cercanos al desagüe para poder recibir la escorrentía acumulada del área que protegen sin recurrir a desniveles exagerados.

En la Tabla 22 se ilustran longitudes de terrazas según las texturas de los suelos.

Tabla 22. Longitud de terrazas de desagüe en función de la textura del suelo.

	Tipo de suelo	
	Arenosos	Arcillosos
Máxima Longitud Normal (m)	240	400
Máxima Longitud Absoluta (m)	400	450

Los valores en suelos arcillosos son mayores debido a su mayor estabilidad estructural.

Para las terrazas de absorción o a nivel no hay longitud máxima, particularmente cuando se colocan pequeños diques u obstrucciones en el canal cada aproximadamente 150 metros. Estos diques evitan la pérdida total de agua de la terraza y reducen los daños que ocasionan los riachuelos si se llegan a romper.

dEmplazamiento de los desagües

En un sistema de terrazas de desagüe, lo primero a construir, son los desagües. En lo posible, es conveniente utilizar como tales, los cauces naturales existentes en la cuenca. A nivel de lote en función de la topografía, la conformación de los desagües puede no respetar los cauces naturales y ser alguna de las siguientes formas:

- Desagüe en una o dos cabeceras del lote
- Desagüe en todas las cabeceras del lote
- Desagüe en el centro del lote
- Desagüe en el centro y cabeceras del lote

En la Figura 62 se indican esquemáticamente este tipo de localización de los desagües y la dirección del escurrimiento que descargan las terrazas.

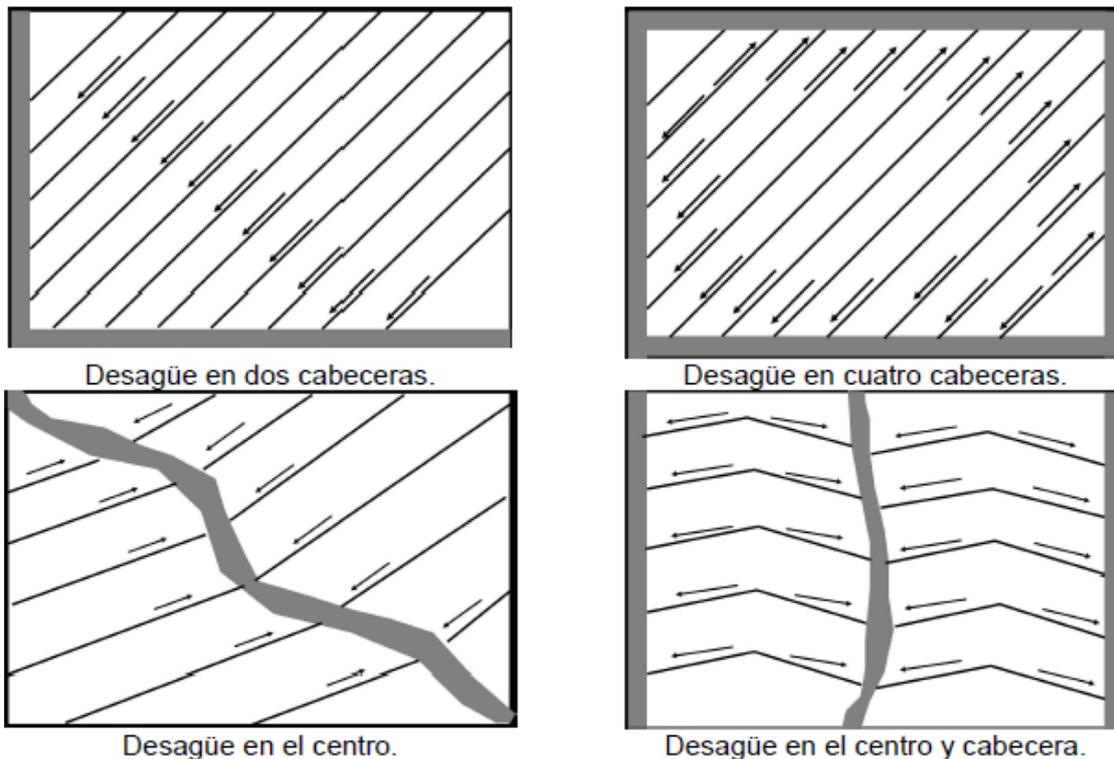


Figura 62. Diferentes tipos de localización de desagües de terrazas. Las líneas llenas indican las terrazas, las flechas indican el escurrimiento y las zonas grises indican canales de desagüe.

Establecido el lugar de ubicación de los desagües y conocido el gradiente del mismo, el cálculo de su capacidad de conducción o caudal y dimensionamiento se puede realizar a través de lo expuesto en el apartado sobre control de escurrimientos.

En terrazas de desagüe el canal puede tener un gradiente constante (alrededor del 2‰) o variable (1-5‰), incrementándose hacia el desagüe vegetado.

Trazado de las terrazas

Para el trazado de las terrazas es necesario conocer las diferentes alturas del terreno, identificar las vaguadas naturales que podrán utilizarse como desagües, para lo cual es necesario realizar una planialtimetría del lote a sistematizar (tanto más necesaria cuanto más compleja sea la pendiente) o definir a través de un simple reconocimiento a campo, la dirección de la pendiente principal en casos en que la misma sea uniforme. El objetivo es poder contar con curvas de nivel para terrazas de absorción o curvas con un cierto desnivel para las terrazas de desagüe.

Esta tarea se realiza en tres etapas:

1. Etapa de campo: con la ayuda de instrumental óptico, se realiza un relevamiento planialtimétrico. Existen en la actualidad receptores GPS con corrección diferencial que permitan realizar planialtimetrías expeditivas y muy precisas.
2. Etapa de gabinete para el procesamiento de los datos obtenidos a campo, y para la definición de todos los parámetros del diseño: IV, IH, localización y dimensionamiento de desagües, paralelización, rectificación, tipo de terraza, etc.
3. Replanteo o ejecución en el terreno del proyecto desarrollado en gabinete.

Construcción de las terrazas

La construcción de las terrazas puede realizarse con la maquinaria disponible en el campo, como arados de discos o arado rastra o rastrón, o con maquinaria vial, como topadora o motoniveladora. Actualmente se cuenta con maquinaria especializada para realizar esta tarea: las terracedoras. Algunas son modificaciones de rastras de doble acción, mientras que otras trabajan expulsando la tierra hacia el costado.

Deben tenerse presente algunos detalles para lograr economía y eficiencia en la construcción de un sistema de terrazas. Los principales son los siguientes:

Comenzar siempre la construcción de las terrazas por la más alta en el terreno, continuando en orden hasta la más baja. En esta forma se evita el peligro de que después de construir algunas terrazas en la parte baja del lote, una precipitación fuerte las destruya por no tener capacidad para recibir la escorrentía de toda el área que aún no se ha protegido

Remover en cada vuelta, tanta tierra como la potencia de la máquina lo permita, de este modo se asegura el uso eficiente del equipo

En pendientes suaves, tratar de mover toda la tierra de arriba hacia abajo, es más económico

Procurar no mover la tierra de sitios que luego habrá necesidad de rellenar

Procurar que la máquina trabaje siempre en tierra que no haya sido removida, esto quiere decir que en cada serie de vueltas de la máquina terracedora (arado, cuchilla niveladora, etc.) debe aumentarse algunos centímetros la profundidad de corte para que apoye en tierra firme

Antes de iniciarse la construcción de una nueva terraza, debe haberse terminado por completo la anterior. Todo el sistema será tan débil como el punto más débil en él

Conviene trabajar el suelo en estado húmedo o friable, como el recomendado para cualquier tipo de movimiento de suelo. Esto permitirá un mejor aprovechamiento de la energía y una mejor compactación del suelo una vez pisado

En cuanto a la oportunidad de construcción: normalmente se prefiere construir y empastar las vías de desagüe en otoño, luego del período de lluvias, ya que es el mejor momento de implantación de las pasturas (en las terrazas de base angosta), y si los desagües se empastan bien, permite la construcción de las terrazas en la primavera siguiente, antes de la siembra de los cultivos de cosecha gruesa.

Mantenimiento de las terrazas

El mantenimiento de un sistema de terrazas no implica costo adicional alguno, si se tiene la precaución anualmente de arar el lote teniendo en cuenta una serie de pautas:

- En el caso de que el sistema de terrazas se haya construido con arado, luego de cosechar el cultivo sembrado, se deberá realizar un repaso de los lomos para darles la altura correspondiente pues se produce un asentamiento. Este punto no resulta necesario cuando las terrazas han sido construidas con equipos viales, ya que quedan perfectamente compactadas;
- Al cambiar la rotación del lote y si se incluyen pasturas, conviene hacer un repaso de todo el sistema debido a que el pisoteo de la hacienda produce compactación que hace disminuir la altura efectiva de las terrazas

- El cuidado fundamental que requiere cada vía de desagüe es cuando se las cruza o transita con herramientas de distintos tipos. Es importante que al trabajar un lote, se levanten las herramientas y se disminuya la velocidad al cruzar el desagüe, porque se producen daños en la cubierta vegetal y a los pocos años el canal queda reducido
- Debe controlarse adecuadamente el pastoreo, en especial evitando el sobrepastoreo, y la localización de callejones de tránsito de la hacienda hacia las aguadas, los que suelen ser sitios preferenciales de rotura de terrazas.

(vi) CUESTIONARIO

- 1.- Explique qué objetivo se persigue con las prácticas de manejo del relieve.
- 2.- Qué tipo de prácticas conoce en este sentido y en qué condiciones usaría c/u.
- 3.- Cómo se traza una línea guía para cultivos cortando la pendiente y cómo las curvas de nivel.
- 4.- En cultivos en contorno puede usarse un criterio estricto o hacer un diseño simplificado. Indique en qué consisten y cuándo aconsejaría cada caso.
- 5.-Cuál es el objetivo de los cultivos en fajas o franjas a nivel.
- 6.- De ejemplos de cultivos que pueden combinarse.
- 7.- Cómo puede estimarse el espaciamiento entre franjas.
- 8.- De ejemplos de anchos de franjas cuando se alternan pasturas con cultivos de cosecha.
- 9.- Cómo se procede a campo para trazar las franjas.
- 10.- Qué se entiende por terrazas, cuáles son sus partes constitutivas y qué tipos conoce.
- 11.-Cuál es la pendiente en una terraza de bancal, en una de desagüe y en una de absorción.
- 12.- Cuáles son los largos de los paños en cada caso.
- 13.- Cuándo una terraza es de base ancha y por qué se llama “cultivable”, cuándo es de base angosta o “empastada”.

14.- Complete la siguiente tabla:

Tipo de terraza	Ancho del canal (m)	Ancho del bordo (m)	Talud
Base ancha			
Base angosta			

- 15.- Cómo puede calcularse el intervalo horizontal (IH) y vertical (IV) en las terrazas de absorción y de desagüe.
- 16.- De rangos de valores (m) de IH y IV para diferentes pendientes.
- 17.- Dónde se pueden emplazar los desagües en una terraza de desagüe.
- 18.- Cómo se traza una terraza:
 - - qué terraza se construye 1º, la de arriba o la de abajo?
 - - cómo se cava el canal
 - - en qué época se hace
 - - en qué momento se construyen los desagües vegetados
- 19.- Una vez trazada la terraza, qué prácticas de mantenimiento conviene llevar a cabo.

Canales

En apartados anteriores se discutieron las técnicas que permiten captar el agua en el lugar donde cae a través del manejo de la infiltración, la retención y el detenimiento superficial. No obstante, en la mayor parte de las zonas sujetas a erosión hídrica, no es posible la captación de la totalidad del agua de lluvia, por lo que deberán implementarse un conjunto de técnicas de manejo de los excedentes hídricos. Paralelamente cuando se describieron las terrazas, como sistema de manejo del relieve, se hizo alusión a las de tipo de desagüe que implican, de la misma manera, el manejo del agua conducida por canales que acompañan a los bordos de cada paño.

Aquí se discutirán un conjunto de técnicas con dos objetivos principales:

- **Definir, consolidar y estabilizar la red de drenaje** de la cuenca, a través de obras de conducción controlada de los escurrimientos, y de control de erosión en las vías de drenaje
- **Reducir los caudales máximos** en las cuencas a los fines de disminuir el potencial erosivo del escurrimiento en toda la red de drenaje y mitigar los niveles de inundación en los sectores bajos a través de las técnicas de reguladores de escurrimiento.

La implementación de estas técnicas puede requerir la intervención del sector privado o público, según la magnitud y los costos, y la posibilidad de beneficios sociales de llevarlas a cabo. Cuando las características de la obra así lo exijan, debiera haber una intervención de los organismos del estado provincial y nacional, planificando el manejo de los excedentes de agua, por tratarse de obras necesarias, no solo para la protección de la producción agropecuaria, sino también de la estructura física de una región o cuenca (efectos del escurrimiento sobre caminos, puentes, poblaciones, etc.).

a) Canales de guarda e interceptores: es una estructura hidráulica diseñada para conducir agua de zonas altas de manera controlada en forma no erosiva, derivándola a zonas donde se elimina. Su localización resulta transversal a la dirección del escurrimiento. Se trata de estructuras de tierra que pueden estabilizarse mediante vegetación herbácea. Estos canales pueden construirse circunscribiendo áreas serranas que generan un escurrimiento no controlado hacia las tierras de cultivo; para el aislamiento de cárcavas, caminos y construcciones diversas o para la delimitación de lotes no sistematizados, protegiendo de esta manera los sectores aguas abajo del canal. Para la ubicación de la práctica deben tenerse en cuenta las condiciones del relieve y las características de la red de drenaje. La topografía deberá permitir trazar el canal de guarda con una pendiente adecuada hacia la red de desagüe previamente planificada.

En las Figuras 63 y 64 pueden verse ilustraciones.

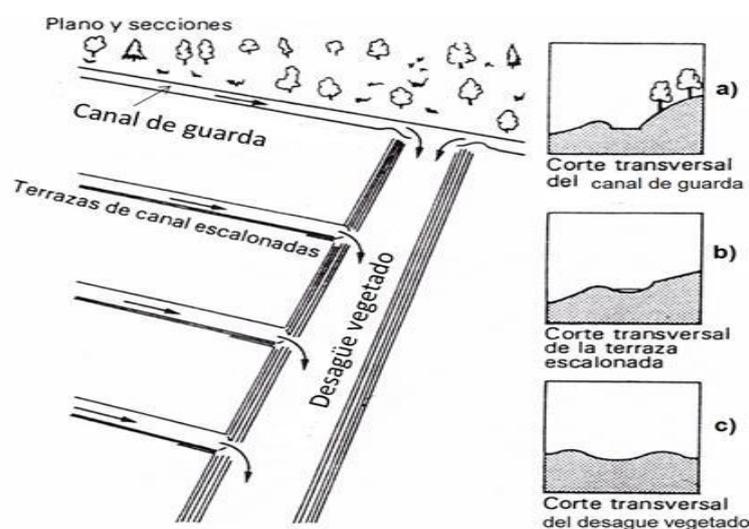


Figura 63. Izquierda: esquema de terrazas con sus respectivos canales hacia el desagüe vegetado, mostrando en la parte superior el canal de guarda que deriva las aguas provenientes de cuenca arriba hacia el desagüe vegetado protegiendo las terrazas. Derecha: cortes transversales de los respectivos canales: a) de guarda, b) de la terraza y c) del desagüe vegetado.

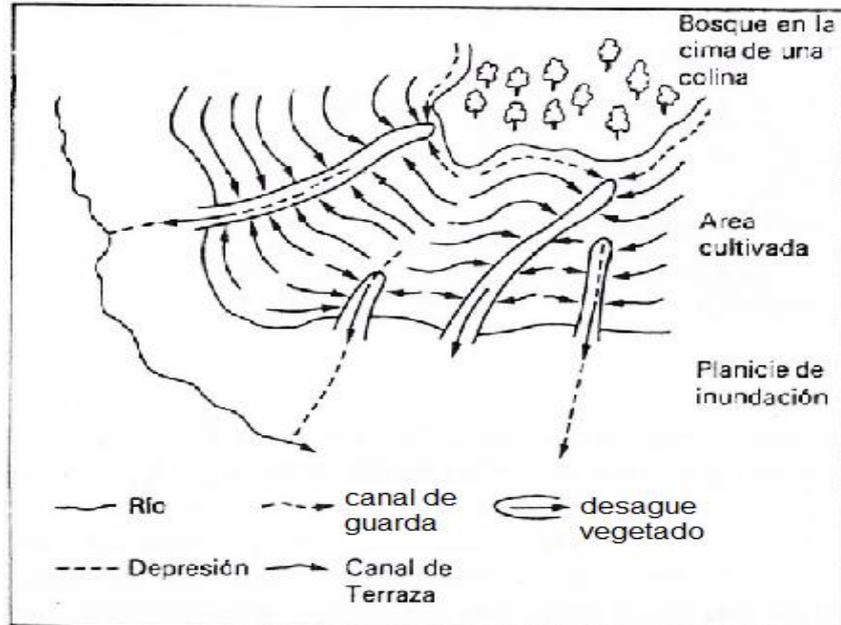


Figura 64. Vista en planta de un esquema de terrazas con sus canales que desaguan a los desagües vegetados. En la parte superior de la imagen se aprecia el canal de guarda conduciendo el agua hacia los mismos desagües vegetados.

b) Canales de desagüe vegetado: son estructuras hidráulicas encargadas de conducir los excesos de escurrimiento en forma no erosiva. Su función es la de consolidar las vías naturales o artificiales de escurrimiento e impedir la erosión lineal (surcos o cárcavas). Se localizan sobre las vaguadas naturales (desagües primarios y secundarios), respetando la red de drenaje natural de la cuenca, o excepcionalmente, su localización puede no coincidir con vías naturales, como es el caso de lotes sistematizados con terrazas (desagües terciarios) (Ver Figuras 63 y 64). Los canales utilizados en conservación tienen ubicación en cualquier tipo de cuenca que presente excesos de escurrimiento que deben ser conducidos y evacuados y que permitan una cobertura vegetal (Figura 65).

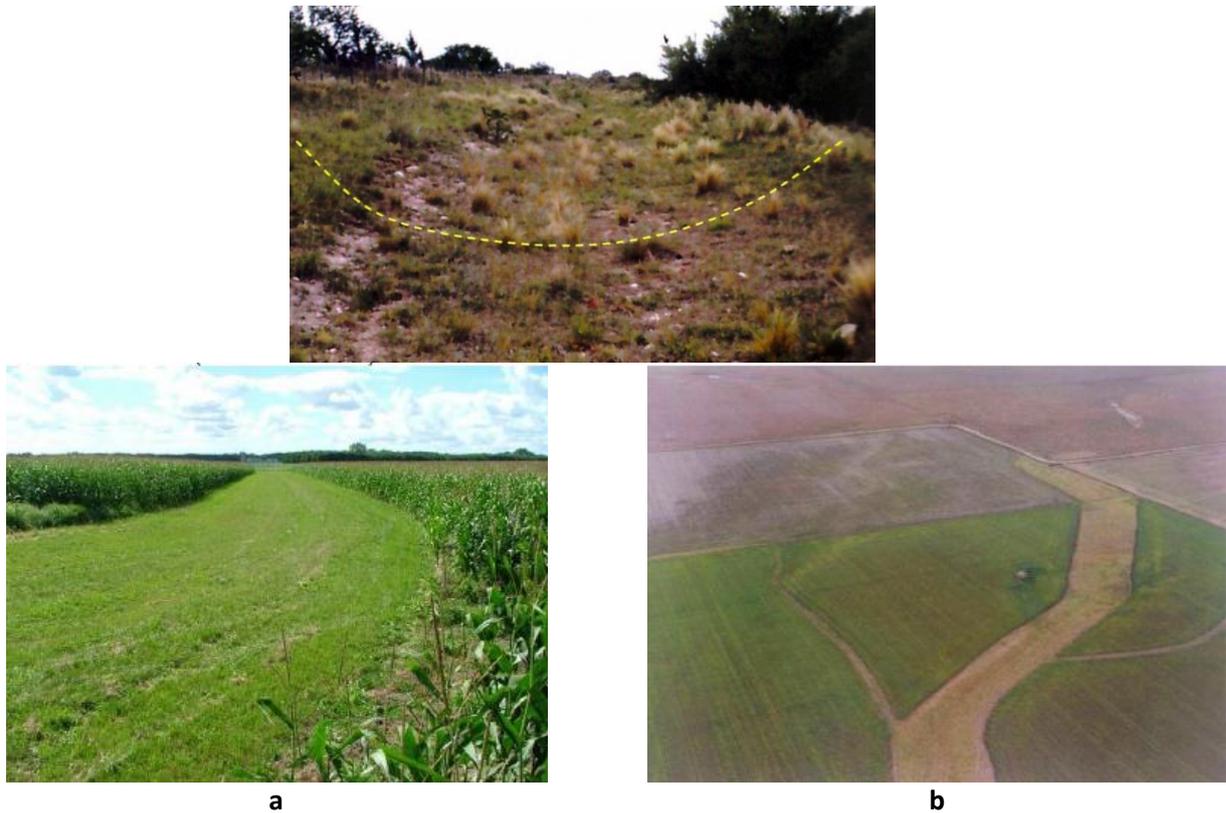


Figura 65. Canales vegetados de desagüe. Arriba: perfil parabólico. Abajo a) en sistematización de una cuenca y b) canal principal y secundario. (Cisneros et al., 2012).

Es una práctica básica para la consolidación de la red de desagüe, por lo que debe estar integrada con todas las demás obras que tengan ese objetivo (canales interceptores, defensas de cabeceras, microembalses) dentro de la visión de cuenca. El procedimiento de cálculo para el dimensionamiento es similar al visto para canales de guarda. La diferencia está en que en canales de desagüe, la pendiente S estará dada por la pendiente natural del cauce, y no es una variable controlada por el diseñador, como en los canales de guarda.

La construcción se puede realizar con maquinaria convencional (arado rastra, arado de discos) o especial (motoniveladora).

La vida útil de un canal depende de las condiciones de praderización que se logren en el mismo. Si bien es un sector de suelo que está destinado a la función de evacuación de excedentes, es tierra productiva que debe ser aprovechada convenientemente, ya sea a través de cosecha directa con hacienda o cosecha mecánica del pasto. La condición de funcionamiento ideal es de una pastura de no más de 15 cm de altura, para lo cual es necesario un permanente mantenimiento con desmalezadora para lograr dicha condición.

(i) Diseño y dimensionamiento de los canales empastados

Los principios de diseño de forma y tamaño son comunes para todos los tipos de canales empastados, tanto de guarda como de desagüe y terrazas de desagüe empastadas.

a) *Forma del canal*: los canales pueden ser trapezoidales, triangulares o parabólicos. Para canales de tierra, la tendencia natural es hacia la forma parabólica (Figura 66b) por efecto de la vegetación, la erosión o la sedimentación en el canal. Además es la forma que más se adapta para la construcción con maquinaria convencional (arado de discos, múltiple, etc.).

	Área	$bd + Zd^2$
	Perímetro mojado	$b + 2d\sqrt{1+Z^2}$
	Radio hidráulico	$\frac{bd + Zd^2}{b + 2d\sqrt{1+Z^2}}$
	Anchura superior	$t = b + 2dZ$ $T = b + 2DZ$
	Área	$\frac{2}{3}td$
	Perímetro mojado	$t + \frac{8d^2}{3t}$
	Radio hidráulico	$\frac{t^2d}{1.5t^2 + 4d^2}$ (aprox.) $\frac{2d}{3}$
	Anchura superior	$t = \frac{3a}{2d}$ $T = t\left(\frac{D}{d}\right)^{\frac{1}{2}}$

Figura 66. Secciones transversales de 2 canales a) trapezoidal, b) parabólico. Cálculo del área, perímetro mojado, radio hidráulico y anchura superior.

T = ancho máximo del canal considerando un margen de seguridad; t = ancho máximo del canal considerando estrictamente el caudal de diseño; D = profundidad máxima del canal considerando un margen de seguridad; d = profundidad máxima del canal considerando estrictamente el caudal de diseño. A = sección transversal de flujo de agua.

b) *Tamaño del canal*: la función de los canales es la de evacuar un determinado caudal de escurrimiento (Q) a una velocidad tal que no provoque erosión en él y que evite la sedimentación de partículas. El caudal para el diseño será el máximo que ocurre con una determinada probabilidad (período de retorno o recurrencia) para la cuenca que aporta al colector (se ha visto en apartados anteriores mediante el empleo de la fórmula Racional de Ramser). Este período de recurrencia elegido dependerá de la seguridad que se quiera dar a las obras o tierras protegidas y expresa la probabilidad de que el canal rebalse por lo menos una vez en el período de años considerado (5, 10, 20, etc.). La capacidad de desagüe del canal Q , es decir el máximo caudal que puede evacuar, está definido por la ecuación de continuidad (Chow et al., 1993):

$$(I) \quad Q = AC \times V$$

siendo:

Q = caudal máximo para un determinado tiempo de retorno (m^3/s)

AC = sección transversal de flujo que escurre por el canal (m^2)

V = velocidad de flujo (m/s)

La velocidad del agua en canales abiertos es una función de la pendiente, la condiciones de rugosidad del piso (coeficiente de rugosidad) y del radio hidráulico (relación entre la sección A y el perímetro de mojadura p). La expresión matemática que los vincula es la fórmula de Manning, vista anteriormente:

$$(II) \quad V = \frac{RH^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

donde:

V = velocidad de flujo (m/s)

n = coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)

RH = radio hidráulico (m)

S = pendiente del canal (m/m)

$$(III) \quad RH = \frac{AC}{PM}$$

AC = sección transversal de flujo (m²)

PM = perímetro mojado (m)

La rugosidad superficial es un parámetro muy importante que controla la velocidad del agua que fluye. El coeficiente de rugosidad es a menudo considerado como la suma de los efectos impartidos por las partículas del suelo, microtopografía superficial (forma de los microrelieves) y de la vegetación, teniendo este último factor un papel más relevante que el resto de los factores mencionados. El grado de rugosidad estará dado por la morfología de la planta y por la densidad de crecimiento de la misma.

En la Tabla 23 se ilustran algunos datos brindados por el propio autor.

Tabla 23. Coeficiente de rugosidad para canales con diferente tipo de vegetación.

Cubierta vegetal	Coef. Rugosidad (n)
Hierba corta (5-15 cm)	0,030-0,060
Hierba media (15-25 cm)	0,030-0,085
Hierba larga (25-60 cm)	0,040-0,150

A los fines prácticos puede adoptarse:

$n = 0,035$ Pobremente vegetado

$n = 0,045$ Medianamente vegetado

En la Tabla 24 se indican coeficientes de rugosidad n , para diferentes condiciones de suelo y vegetación.

Tabla 24. Valores de coeficiente de rugosidad de Manning (n) para diferentes condiciones de cobertura y tratamiento del suelo. (Morgan y Rickson, 1995).

Cobertura o tratamiento	Cantidad de residuo en superficie (tn/ha)	Valor de n recomendado	Rango
Asfalto		0,011	0,01-0,013
Suelo arenoso desnudo		0,01	0,010-0,016
Suelo franco-arcilloso desnudo		0,02	0,012-0,033
Barbecho desnudo		0,05	0,006-0,160
Arado cincel	<0,6	0,07	0,006-0,160
	0,6-2,5	0,18	0,07-0,34
	2,5-7,5	0,30	0,19-0,47
	>7,5	0,40	0,34-0,46
Rastras de discos	<0,6	0,08	0,008-0,410
	0,6-2,5	0,16	0,10-0,25
	2,5-7,5	0,25	0,14-0,53
	>7,5	0,30	0,24-0,48
Labranza Cero	<0,6	0,04	0,03-0,07
	0,6-2,5	0,07	0,01-0,13
	2,5-7,5	0,30	0,16-0,47
Arado de vertedera		0,06	0,02-0-10
Vegetación densa y alta (>60 cm)			0,06-0,20
Vegetación alta (25-60 cm)			0,04-0,15
Vegetación mediana (15-25 cm)			0,03-0,08
Vegetación corta (5-15 cm)			0,03-0,06
Vegetación muy corta (<5 cm)			0,02-0,04

Las velocidades se seleccionan en base al tipo de suelo (erodabilidad) y a las condiciones de la vegetación del canal (tipo, cobertura, altura), teniendo en cuenta que no debe provocar erosión en el fondo del cauce ni producir sedimentación. Esto último disminuye la sección de flujo y por lo tanto aumentan los riesgos de desborde del canal. En la Tabla 25 se transcriben algunos valores extraídos del Handbook 135 (USDA).

En la Tabla 26 se dan valores orientativos sobre las velocidades máximas permitidas en canales de tierra.

Tabla 25. Velocidades máximas permisibles para canales (Handbook 135, USDA)

Cobertura	Velocidad máxima (m/s)
Césped malo	0,9
Césped normal	1,2
Césped vigoroso de rápido establecimiento	1,5
Césped vigoroso ya establecido	1,8
Césped de excelente calidad o cuando sea inevitable darle menor velocidad	2,1

Tabla 26. Velocidades máximas permitidas en canales de tierra.

Material/Suelo	Velocidad máxima en cobertura herbácea esperada después de dos estaciones de crecimiento (m/s)		
	Suelo desnudo	Cobertura normal	Cobertura muy buena
Arena limosa muy fina	0,30	0,75	1,50
Arena suelta fina	0,50	0,90	1,50
Suelo arenoso	0,75	1,50	2,00
Suelo franco-arcilloso firme	1,00	1,70	2,30

Existen dos procedimientos básicos para dimensionar canales empastados, uno está basado en la aproximación $d=1,5*RH$ (Fangmeier et al, 2006), que se discute a continuación, y otro es un método de prueba y error.

Para el primer procedimiento, una vez obtenido el caudal máximo que debe transportar el canal, la velocidad máxima permitida y el coeficiente de rugosidad, podemos encontrar el RH que satisfaga la ecuación de Manning, despejando RH de la ecuación:

$$(IV) \quad RH = \left(\frac{V \times n}{S^{1/2}} \right)^{2/3}$$

Para canales de guarda la pendiente de diseño S se seleccionará en base a las posibilidades que brinde el relieve, pero no deberá superar el 0,6%. La altura máxima en el centro del canal, d, para ese caudal máximo, resulta de la siguiente aproximación para canales parabólicos:

$$(V) \quad d = 1,5 R$$

El ancho máximo para ese caudal (t) surge del despeje de la ecuación de sección de una parábola, siendo:

$$(VI) \quad t = \frac{3 AC}{2 d}$$

Para lo cual, se debe obtener el valor de AC de la ecuación I, ya que conocido el caudal Q, y está establecida la velocidad máxima permitida V:

$$AC = \frac{Q}{V}$$

A los fines del diseño y dimensionamiento de canales no vegetados, como terrazas de desagüe, debe considerarse en el cálculo de "n" la condición de suelo desnudo. Así mismo, el cálculo de la velocidad máxima no erosiva debe establecerse para dicha condición.

Ejemplo de cálculo: se debe dimensionar un canal para desaguar una cuenca que eroga un caudal pico de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, para una recurrencia de 10 años; la vía de desagüe tiene una pendiente media del 1 %, y se mantendrá bajo una condición de pastura permanente corta, en un suelo franco-arenoso. De la Tabla 18 se selecciona un valor de $n = 0,04$, y de la Tabla 20 un valor de velocidad máxima permitida del escurrimiento de 1,5 m/s.

Con los datos del problema despejamos RH de la ecuación de Manning:

$$RH = \left(\frac{1,5 \times 0,04}{0,1^{0,5}} \right)^{1,5} = 0,46 \text{ m}$$

Con la aproximación de la ecuación 3 resulta:

$$d = 1,5 \times 0,46 = 0,69 \text{ m (aproximadamente 0,7 m)}$$

Aplicando la ecuación de continuidad para obtener AC:

$$AC = \frac{10}{1,5} = 6,66 \text{ m}^2$$

Aplicando la fórmula de la sección de una parábola, obtenemos t:

$$t = \frac{3 \times 6,66}{2 \times 0,7} = 14,3 \text{ m}$$

Con lo cual, el canal proyectado debería tener una profundidad de 0,7 m y un ancho de 14,3 m. Agregando a cada dimensión un 10 % de margen de seguridad (T y D de Figura 47), las dimensiones finales del canal son de 0,8 m de profundidad y 16 m de ancho aproximadamente.

(ii) Trazado y construcción

el canal de guarda desvía la dirección natural del escurrimiento, a diferencia del canal de desagüe que se realiza sobre una vía ya establecida, es decir, lo conduce por una sección totalmente diseñada por un profesional. Por lo tanto, el lugar de emplazamiento dependerá del sector que se quiere proteger y de las posibilidades que brinda el relieve para su construcción. Se comenzará a marcar la traza del canal de guarda partiendo desde la desembocadura del mismo en el canal de desagüe que evacuará las aguas de aquel, dándole con el instrumento óptico correspondiente (nivel o teodolito) la pendiente de diseño. La traza se dejará estaqueada para después proceder a la construcción de la obra. Conviene realizar los movimientos de tierra una vez finalizada la estación de lluvias, luego de la cual se sembrará la pastura definitiva, la cual deberá tener el desarrollo y la cobertura adecuada antes del inicio de las lluvias más intensas. El aporte de tierra para la construcción del canal se efectúa preferentemente desde aguas arriba a los fines de hacer más eficiente el movimiento de tierra y lograr la conformación del bordo del canal aguas abajo del mismo (Ver Figura 44).

el desagüe vegetado se traza demarcando en el terreno el eje principal de la vaguada natural y a ambos lados se demarca la mitad del ancho total calculado (T). Esto se realiza a lo largo de toda la vaguada natural respetando las diferentes dimensiones calculadas (T y D) en su recorrido. Posteriormente se procede a su construcción con arados de reja o disco o motoniveladora, realizando el movimiento de tierra en sucesivas pasadas de la maquinaria desde el eje central hacia ambos lados. A medida que avanza su construcción se realizan controles de la profundidad hasta lograr la calculada (D).

(iii) CUESTIONARIO

- 1.- Qué es un canal de guarda y qué uno de desagüe.
- 2.- Qué formas puede adoptar el canal.
- 3.- Cómo se dimensiona un canal, qué variables deben tenerse en cuenta.
- 4.- Cómo se calcula el caudal máximo y para qué tiempo de recurrencia se debe hacer.
- 5.- Cómo se calcula la velocidad máxima no erosiva. Qué coeficientes de rugosidad podría utilizar. Qué valores puede tomar la velocidad máxima no erosiva.
- 6.- Detalle el procedimiento de cálculo usando:
 - $d=1,5 \cdot R$ (Fangmeier et al, 2006)
 - método de prueba y error.
- 7.- Dónde se ubica y cómo se traza un canal de guarda.

Técnicas de prevención y control de cárcavas

Para prevenir la formación de cárcavas debe atenderse a las causales antrópicas responsables de su formación descritas en la Parte I de esta unidad. Entre ellas cabe destacar el cambio de uso del suelo de las áreas de aporte a los sectores de concentración del escurrimiento. Por ejemplo, deforestación, uso agrícola intensivo, manejo inadecuado de la cobertura y de la infiltración en el área de aporte (Ver Punto III.1). Otra causal bastante frecuente es la construcción de infraestructura vial y/o hidráulica que genera el trasvase de caudales de una vía de escurrimiento a otra. Por otra parte, la modificación de la cobertura vegetal en la propia vaguada natural (sobrepastoreo, agricultura convencional) también genera un aumento de la velocidad del escurrimiento que puede derivar en una cárcava.

Una vez formada la cárcava, se pueden aplicar técnicas de control de la misma.

Se llama cabecera al sector activo de una cárcava, por donde se produce su avance (retrocedente), el piso de la cárcava es el sector que ya ha sido erosionado, y es por donde circula el escurrimiento que ingresa a la cárcava, las paredes laterales también pueden sufrir erosión, en la medida que no se estabilice el piso. En la Figura 67 pueden verse 2 esquemas de cárcavas.

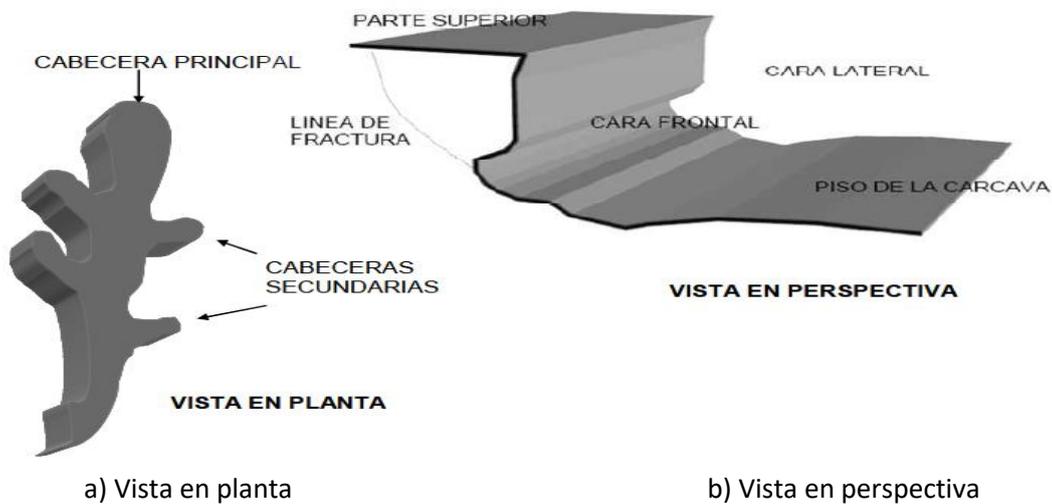


Figura 67. Esquema de componentes de una cárcava a) vista en planta de una cárcava ramificada con cabecera principal y secundaria, b) vista en perspectiva de las partes de una cárcava.

(i) Principios de control de cabeceras de cárcavas

Son estructuras hidráulicas construidas sobre las cabeceras de cárcavas con el objetivo de detener el avance retrocedente y la profundización de los niveles de base de los cauces de desagüe afectados por este tipo de erosión. Como se ha visto, el avance de la cárcava se produce por la acción combinada de la erosión en el piso al caer el agua desde la cara superior, el humedecimiento y debilitamiento del bloque por una línea de fractura, y su posterior desprendimiento. En base a ello los principios de control de cabeceras son:

Aislamiento de la parte superior de la cabecera, minimizando la infiltración de agua en el suelo en un área inmediatamente antes del corte de la cárcava. De este modo se evita que el bloque aumente de peso y caiga

Protección del piso y cara frontal de la cárcava. Se evita de este modo el socavamiento del fondo y de la pared inferior y el desprendimiento del bloque

Protección de las paredes laterales. Los taludes laterales deben estabilizarse para evitar su crecimiento en ancho

Entrada única del agua. El agua debe entrar a la cárcava solo por una entrada protegida, normalmente por la cabecera principal. De no aislarse el ingreso al resto de las cabeceras secundarias (Figura 48a) se producirán otras cabeceras, en cada una de ellas. Dicha entrada deberá tener suficiente capacidad como para evacuar el escurrimiento máximo calculado para la cuenca en ese punto

Aislamiento. Se evitará la entrada de animales, al menos en los primeros años de la estabilización, tanto a las estructuras y obras complementarias, como dentro de la cárcava para impedir el pisoteo y pastoreo de la vegetación.

Vertedero y estructura fija

Son estructuras de mampostería que protegen las paredes laterales, frontal, piso y parte superior de la cabecera, mediante muros de ladrillo, piedra, gavión u hormigón armado (Figura 68). Su planteo y construcción debe ser supervisada por ingenieros civiles o hidráulicos. Se utiliza en cualquier tipo de cárcava, siendo la práctica más costosa, por lo tanto requiere la aplicación de factores de seguridad altos (tiempo de recurrencia largos para la lluvia de diseño). Por su alto costo, es conveniente ubicarla en los lugares más estratégicos de la cuenca, que permita costearla entre todos los beneficiarios de la obra, por ejemplo en lugares de interés comunitario como sitios con peligro de rotura de caminos, puentes, o alcantarillas. Su utilidad principal está en cárcavas de tamaño medio a alto.



Figura 68. Estructuras para el control de cabeceras de cárcava.

La caída del agua se produce en el colchón hidráulico, (también llamado batea difusora o dissipador de energía), pudiendo variar en cuanto al diseño de caída, el cual puede ser recto (a 90 °), inclinado, curvo o tipo escalera.

Saetín de cabecera o tobogán

Esta práctica consiste en el rebajado de la cabecera de la cárcava, de manera tal que quede con una pendiente uniforme y en la construcción sobre la misma de un canal revestido de mampostería u hormigón. En la base del canal se emplaza la batea difusora o dissipador de energía. Se puede utilizar en cualquier tipo de cárcava; se aconseja para cárcavas no mayores a 4 metros de profundidad, límite a partir del cual, la energía a disipar es excesiva. También se pueden usar materiales alternativos al hormigón, como colchonetas de gavión piedras y alambre tejido), chapas de zinc, hormigón ciclópeo (piedra y hormigón), bloques, geotextiles con vegetación, etc. En la Figura 69 se presenta una estructura de este tipo en base a bloques.



Figura 69. Tobogán de bloques para proteger la cabecera de una cárcava. (www.prairiestateoutdoors.com)

Toda obra de defensa que requiera la entrada única del agua por la zona protegida, requiere de obras complementarias que cumplan esta función. Estas obras son los albardones de embocadura y los canales interceptores. Permiten que el agua sólo ingrese a la cabecera o a zonas sin peligro de erosión, de modo de evitar el crecimiento de cabeceras secundarias. Se describen a continuación:

- Albardones de embocadura: consisten en estructuras de tierra que impiden la entrada de agua por los laterales de la barranca. Se construyen a manera de embudo colector, perpendiculares o con un cierto ángulo respecto a la dirección de flujo
- Canales derivadores: son estructuras ubicadas en forma paralela a la cárcava que tienen por objeto impedir el ingreso a la misma del agua proveniente de áreas aledañas, evitando de ese modo la formación de nuevas cabeceras secundarias, perpendiculares al cauce principal

Esquemáticamente se muestran en la Figura 70.

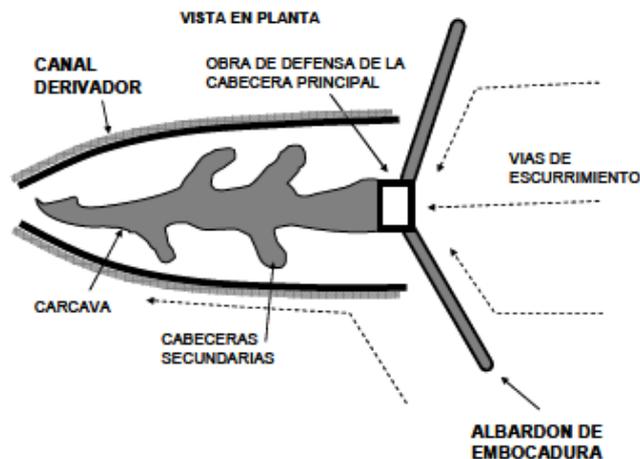


Figura 70. Esquema de obras complementarias de defensa de cabeceras de cárcavas. Albardones de embocadura y canales derivadores.

Suavizado y albardonado de cabecera

Consiste en realizar un suavizado (también llamado ataludado) de la cabecera de la cárcava, como forma de evitar el salto hidráulico. Luego el suavizado se protege mediante albardones y empastado, de manera de evitar la erosión de la pendiente, hasta que el flujo alcanza su velocidad mínima a nivel del piso de la cárcava. Se puede utilizar en cualquier tipo de cárcava que permita modificar la sección de entrada para evacuar el caudal previsto. La profundidad de la cárcava debe permitir el uso de maquinaria pesada (topadora, motoniveladora o pala cargadora) para efectuar el desmoronamiento del filo de la pared frontal de la cárcava y luego suavizar la cabecera con arado, motoniveladora o con la misma topadora (Figura 71).

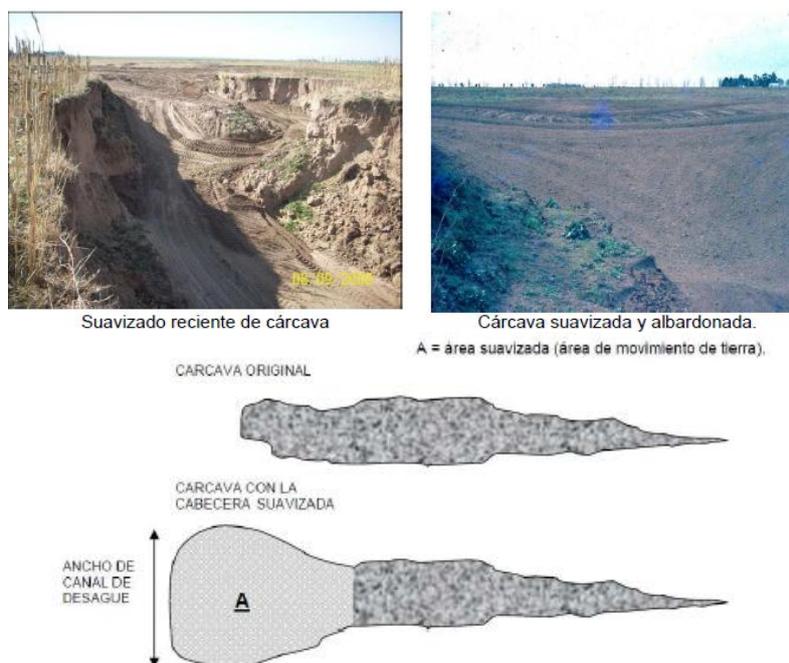


Figura 71. Suavizado o ataludado de cabecera de cárcava (UNRC-SECYOT).

Las dimensiones de la entrada a la zona de la cabecera suavizada deberán ser iguales a las del canal de desagüe que finaliza en la cárcava. A medida que se ingresa en la cárcava, el ancho suavizado irá siendo menor hasta terminar siendo igual al ancho del piso de la cárcava. Respecto a la pendiente del talud suavizado, no deberá ser mayor al 10 %. De la misma manera que con las estructuras anteriores, estas obras deben albardonarse. Toda la obra depende de la etapa de consolidación, la cual se puede realizar mediante una adecuada compactación y praderización, tratando de hacerlo con el piso húmedo o mojado. Luego podrán sembrarse o plantarse especies con rápido cubrimiento (gramilla, gramón, raygrass, trébol blanco, etc.). Este tipo de estructuras de tierra, si bien son relativamente económicas, requieren un mantenimiento constante por la rotura de albardones, rebalse por los laterales y permanentes resiembras.

Aleros o voladizos

Son técnicas consistentes en la construcción de una estructura voladiza sobre la cabecera de la cárcava, que conduzca el agua y la descargue alejada de la pared frontal, de manera que la energía de la cascada no produzca la socavación del fondo de la cárcava. Se puede realizar en cualquier tipo de cárcava, no siendo una limitante la altura de la misma. Es de construcción relativamente accesible, ya que sólo requiere chapas de zinc, postes, alambre y brea, aunque también puede construirse en hormigón armado (Figura 72).



Dto. Tercero Arriba, Córdoba



Dpto. Río Cuarto, Córdoba

Figura 72. Aleros de chapa protegiendo la cabecera de cárcavas.

Paralelamente el piso se protege con un zampeado de piedras o cajón de piedras, o simplemente con un colchón de agua que se genera en la zona de choque de la cascada. La cara frontal se protege con una pared rústica de chapas, al igual que los laterales. En la Figura 73 se esquematizan las partes constitutivas de un alero de chapa.

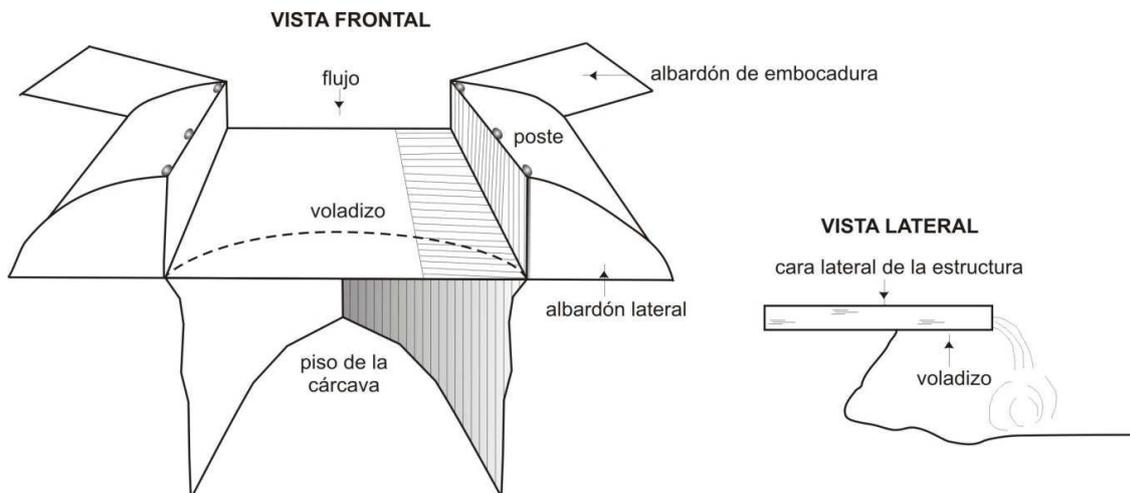


Figura 73. Esquema de las partes constitutivas de un alero de chapa para control de cabeceras de cárcava.

Albardón con desagüe lateral protegido

Es una práctica que consiste en el aislamiento hidrológico de la barranca mediante un albardón derivador que desvía las aguas antes de la cabecera y las conduce por un canal de desagüe protegido paralelo a la cárcava (Figura 74). Se pueden utilizar en cualquier tipo de cárcava, con la restricción de que la topografía a ambos lados de la misma (o al menos un lado) permita la construcción de un canal, que finalmente derive las aguas hacia una zona no afectada por la cárcava. En casos en que la cárcava finalice en cauces permanentes profundos, la salida del desagüe lateral protegido al arroyo o río deberá llevar la defensa correspondiente, de lo contrario se producirá una nueva cárcava sobre el canal lateral.

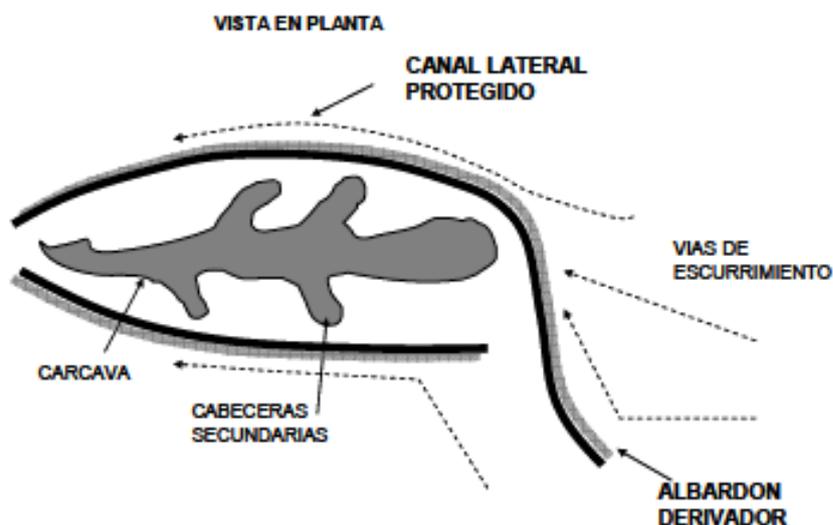


Figura 74. Esquema de defensa de cárcava mediante albardón con canal de desagüe lateral protegido

Las dimensiones del canal deberán calcularse para caudales máximos, con períodos de recurrencia intermedios entre los del canal y los de estructuras fijas (5 -10 años).

(ii) Técnicas de recuperación del piso de cárcavas

Los fundamentos de las técnicas de recuperación de piso se basan en la disminución de la velocidad de circulación del agua dentro de la cárcava y como resultado se espera obtener la depositación del material que lleva el escurrimiento en suspensión. Dicho efecto se logra interponiendo algún tipo de obstáculo a la circulación del flujo, a los fines de aumentar los coeficientes de rugosidad, y por consiguiente reducir la velocidad de la corriente. La elección de las prácticas de recuperación de piso se basan en los siguientes criterios:

- Profundidad de la cárcava, por la posibilidad de parabolizado de la sección
- Características del piso, por el tipo de material, presencia de toscas, presencia de napa, etc.
- Pendiente del piso para definir el espaciamiento de los obstáculos

El elemento de la estabilización del piso es la vegetación herbácea, de ahí que todos los aspectos que la afectan, inciden sobre el éxito de la recuperación de las cárcavas. Todas las técnicas requieren de un mantenimiento constante, ya que están sentadas sobre un ambiente altamente inestable, sujeto a condiciones extremas (sustrato calcáreo, tosca) y cambios bruscos (grandes caudales concentrados).

A continuación se discuten algunas de las técnicas de recuperación de los suelos de cárcavas.

Albardonado del interior de la cárcava

Consiste en la disposición de albardones transversales a la dirección de flujo en el interior de la cárcava, según los criterios discutidos en el suavizado de cabeceras. La tierra necesaria para construir los albardones se puede extraer volteando los taludes de la cárcava, en este caso se realiza un parabolizado de la sección de la cárcava solamente donde va ubicado el albardón (Figura 75). La tierra extraída de A se utiliza para construir el albardón B.

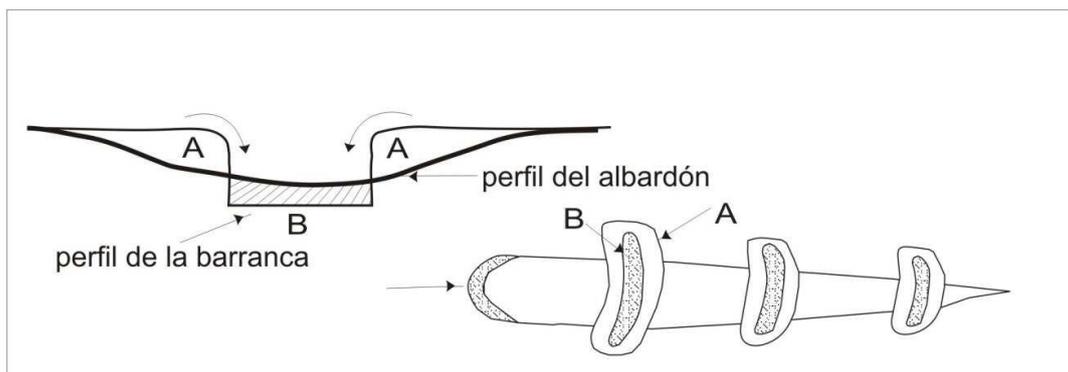


Figura 75. Recuperación de pisos de cárcavas mediante albardonado interior.

El agua debe circular por la parte central del albardón para evitar la erosión de las márgenes. En la medida que los albardones se van colmatando de sedimentos, se continúan levantando periódicamente hasta la recuperación del nivel original. En cuanto a la estabilización de las estructuras se deben seguir los lineamientos expuestos en el suavizado y albardonado de la cabecera, práctica de la cual ésta es complementaria y posterior en el tiempo.

Rastrillos de retención

Son estructuras transversales construidas con postes, ramas, estacas, alambre o cualquier otro elemento disponible que permita formar un cerco en el interior de la cárcava. En este caso la acumulación de residuos que lleva el agua, produce el taponamiento de la estructura y la sedimentación. Se pueden utilizar en cárcavas que no permitan el parabolizado de sus márgenes, como es el caso de las cárcavas muy profundas. El distanciamiento entre los rastrillos sigue los mismos criterios que el albardonado, aunque en este caso podrá ser menor. La disposición de los postes deberá ser aproximadamente parabólica para permitir el paso del agua por el centro de la estructura (Figura 76).

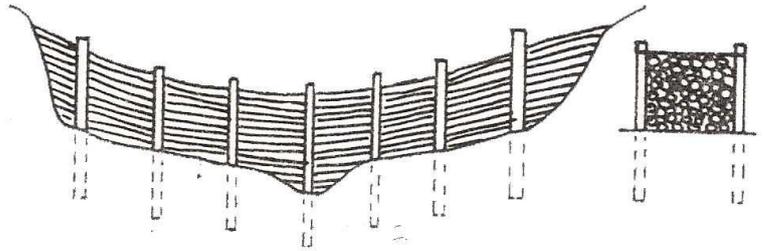


Figura 76. Rastrillos de retención para recuperación del piso de cárcava.

Parabolizado o ataludado de toda la cárcava

Consiste en la modificación del perfil de la cárcava mediante el borrado de sus aristas vivas y la posterior parabolización total. Luego se procede al albardonado de la nueva sección parabólica, siguiendo los mismos criterios anteriores. Es aconsejable para cárcavas relativamente pequeñas que permitan el parabolizado de sus márgenes, permitiendo el ingreso a ellas de las maquinarias. La diferencia con la práctica del albardonado es que aquí se trabaja sobre toda la extensión de la cárcava, mientras que en la anterior sólo se lo hace en el lugar donde van los albardones. La disposición de los albardones permite obtener una sección de flujo adecuada a los caudales a desaguar. En la Figura 77 se muestran ejemplos de cárcavas parabolizadas y albardonadas.



Figura 77. Parabolizado y albardonado de cárcava

Praderización y forestación de las cárcavas

Estas prácticas son aplicables a cualquier movimiento de suelo que se realiza sobre las cárcavas, y son prácticas imprescindibles para la estabilización del piso y de las estructuras ya vistas. La praderización debe considerar las condiciones de piso para la elección de especies adaptadas ya que los pisos pueden estar constituidos por horizontes o condiciones poco aptos para el crecimiento de las plantas (B texturales muy potentes, toscas, napa muy cercana a la superficie, etc.). Según el tipo de reproducción del vegetal se podrá plantar o sembrar; en caso de sembrarse se deberá utilizar una densidad 3 a 4 veces mayor que la normal para la especie. Se justificará en estos casos la fertilización si fuera necesario para mejorar el comportamiento del pasto. Según la época en la que finalicen los movimientos de tierra, en relación a la estación de lluvias se elegirán especies anuales de rápido crecimiento (moha, mijo, gramilla, etc. para la primavera) o bien las especies perennes definitivas (alfalfa, agropiro, festuca, tréboles, etc. para el otoño). La forestación conviene realizarla con estacas o bien mediante plantación con pan de tierra. La disposición de las plantas debe tender a proteger básicamente las paredes laterales de la cárcava, para lo cual se deben disponer en 2 ó 3 hileras paralelas.

Técnica de control de caudales máximos

Reguladores de escurrimiento: también conocidos como microembalses, son pequeñas obras hidráulicas de tierra ubicadas transversalmente a las vías naturales de escurrimiento, consistentes en un murallón de tierra, una salida o descarga principal, un área de embalse y una salida o vertedero de emergencia (Figura 78). Su función en la cuenca es la de disminuir los caudales máximos de escurrimiento aguas abajo de la estructura de regulación. Los embalses discutidos en este apartado son adecuados para cuencas agrícolas, en llanuras, y para cauces no permanentes, y su altura máxima no supera los 5 m.

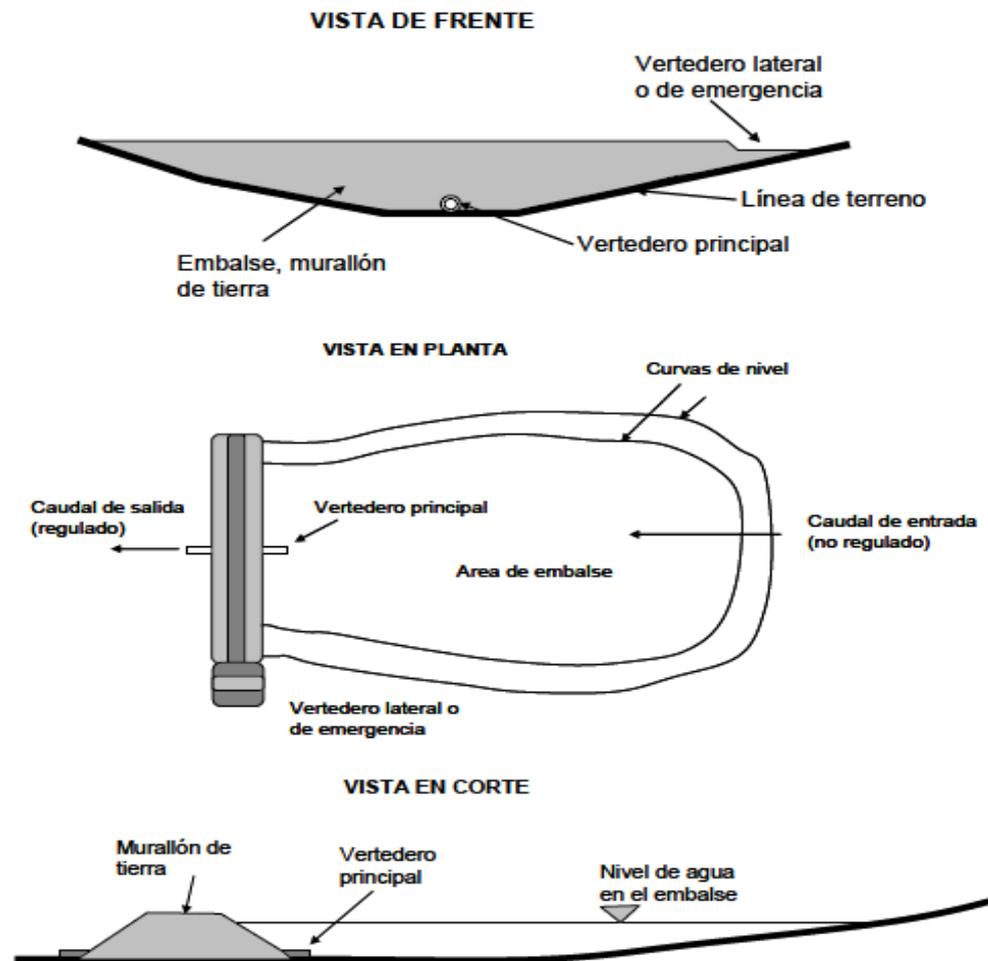


Figura 78: Regulador de escurrimiento: Esquema de componentes principales.

Esta práctica es una variante de los denominados embalses agrícolas (ponds), los cuales pueden cumplir variadas funciones en el ordenamiento de las cuencas. Entre ellas se destacan:

- Función de regulación de crecientes: son embalses diseñados con el vertedero principal ubicado en la base del embalse, a nivel de piso, y su función es solamente de regulación. No retienen escurrimiento ya que todo lo que ingresa, descarga por el vertedero, por lo que el tiempo de embalse dura unas pocas horas, al cabo de las cuales la obra se vacía
- Función de retención hídrica: son embalses con fines exclusivamente de acumulación o retención de agua, ya sea para fines de riego o para bebida del ganado. Sólo poseen un vertedero lateral de emergencia, por esa razón el embalse permanece siempre con una cierta cantidad de agua. Por no poseer vertedero principal no tiene funciones de regulación, o éstas son mínimas y operan sólo cuando el embalse está vacío, por ejemplo durante un período extenso de sequía que evapora el agua almacenada
- Función de retención y regulación: son los denominados embalses multipropósito en los cuales el vertedero principal está ubicado a una cierta altura del nivel mínimo de piso, definiendo una altura de embalse, por debajo de la cual cumple funciones de retención. Por encima de la cota de ubicación del vertedero principal, el embalse cumple funciones de regulación.

CUESTIONARIO

1.- Cómo puede controlarse el avance de la cabecera de una cárcava?

2.- Describa en qué consisten las siguientes obras para controlar las cabeceras:

- Vertedero y estructura fijas
- Saetín o tobogán
- Suavizado y albardonado de cabecera
- Alero o voladizo
- Albardón con desagüe lateral protegido
- 3.- Describa las obras para mejorar el piso
- Albardonado del interior de la cárcava
- Rastrillos de retención
- Parabolizado o ataludado de toda la cárcava
- Praderización y forestación de la cárcava

4.- Qué es un microembalse y cuál puede ser su función.

BIBLIOGRAFÍA

- Blanco H., R. Lal.** 2010. Principles of Soil Conservation and Management. Ed. Springer, New York. 557 p. Disponible en: http://www.academia.edu/5910529/Principles_of_Soil_Conservation_and_Management
- Bocco G., J. Palacio y C. Valenzuela, C.** 1990. Gully erosion modelling using GIS and geomorphology knowledge ITC Journal 253-257.
- Carrasco J., Riquelme J. Eds.** 2003. Métodos y Prácticas de Conservación de Suelos y Aguas. Boletín INIA Nº 103. SA. Gobierno de Chile. 131 p.
- Castiglioni M., M. Massobrio, C. Chagas y O. Santanatoglia.** 1998. Predicción de hidrogramas modificando el tiempo de concentración de una microcuenca de pampa ondulada con pendientes menores al 2%. Revista Ciencia del Suelo. 17: (3).
- Castiglioni M., M. Massobrio, C. Chagas y O. Santanatoglia.** 1999. Análisis de un modelo hidrológico en una microcuenca de pampa ondulada, República Argentina. Revista Investigación Agraria 14 (3): 325-331. España.
- Cisneros J., C. Cholasky, A. Cantero Gutierrez, J. González, M. Reynero, A. Diez y L. Bergesio.** 2012. Erosión hídrica. Principios y técnicas de Manejo. UNIRIO Ed. Río Cuarto, Córdoba. 287 p. Dirección de Hidráulica de Entre Ríos- Facuñad Regional Concordia/Universidad Tecnológica Nacional. 2008. Tormentas de diseño para la Pcia. De Entre Ríos. 104 p.
- Hudson N.** 1982. Conservación del suelo. Ed. Reverté SA. 335 p.
- Kirkby M.J., R.P.C. Morgan.** 1984. Erosión de Suelos. Ed. Limusa. 370 p.
- Massobrio M., A. Maggi y O. Santanatoglia.** EX AEQUO, 1997. Estimación de la erosión hídrica en la provincia de la pampa argentina, Revista Facultad de Agronomía, 17 (3): 323-331.
- Morgan R. y U. López de Meneses.** 1997. Erosión y conservación de suelos. Ed. Mundi-Prensa. ISBN 8471146797, 9788471146793. 343 p.
- Nearing M., L. Lane, E. Alberts y J. Laflen.** 1990. Prediction technology for soil erosion by water; status and research needs. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 1702-1711.
- Santanatoglia O., C. Chagas, E. Rienzi, M. Castiglioni y E. Sbatella.** 1996. Características de los sedimentos producidos por erosión hídrica en una microcuenca del Arroyo del Tala (Buenos Aires). Revista Ciencia del Suelo 14(1):42-46.
- Scotta E., L. Nani, Conde A., A. Rojas, Castañeira H. y O. Paparotti.** 1989. Manual de sistematización de tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Serie Didáctica N 17. Ed. INTA, EEA Paraná, Entre Ríos. 56 p.