

MISCELÁNEA**UN MODELO ALTERNATIVO DE SISTEMATIZACIÓN DE TIERRAS**Durán¹, J.

Recibido: 30 de diciembre de 1999. Aceptado: 28 de agosto de 2000.

PALABRAS CLAVE: Sistematización, Hidrología, Erosión, Riego.

precipitación) y en los que por razones de manejo de suelos y las características del cultivo (por ejemplo el tabaco) no es posible mantener al suelo cubierto por residuos.

CONSIDERACIONES PREVIAS

El presente trabajo fue realizado entre los años 1982 y 1986, como parte del trabajo de investigación de la Cátedra de Hidrología y la tarea de asistencia técnica del Dpto. de Riego del Instituto Nacional de Colonización, con el apoyo del IICA. Tuvo como objetivo brindar soluciones técnicas a una situación de producción concreta, planteada en el Sistema de Riego de la Colonia Tomás Berreta del I.N.C. Se trata de un área de producción intensiva, integrada por predios chicos, sobre una topografía accidentada, con pendientes fuertes (en promedio 4% con zonas de hasta 7%). De esto se desprende que el enfoque del tema es inevitablemente parcial, en cuanto al ámbito en el cual se han desarrollado los trabajos (predios entre 20 y 70 Hás, con producción semi-intensiva a intensiva). Sin embargo entendemos que la metodología ajustada puede utilizarse en otras situaciones productivas similares, considerando los principios en que se basa. También resulta parcial en cuanto al énfasis adjudicado a la sistematización y a las medidas mecánicas de control de erosión, no por considerar que este conjunto de técnicas es la que brinda las mejores soluciones, sino por el desarrollo relativamente menor que ha tenido esta área de conocimiento, respecto al conocimiento del manejo de suelos, con rotaciones de cultivos, abonos verdes, manejo de los rastrojos, y modalidades de laboreo. Entendemos que la sistematización mediante terrazas no es la «solución de fondo» del problema, sino que es un importante complemento de un correcto manejo de suelos, y en algunos casos un «remedio» necesario (a veces imprescindible). La perspectiva de la incorporación de la técnica de laboreo reducido o siembra directa, entendemos que no invalida los resultados de este trabajo, por cuanto dicha tecnología no es aplicable a la totalidad de las situaciones de producción, como por ejemplo todas las que requieren la realización de surcos y camellones en los que se maneja agua (riego y

ANTECEDENTES

Cayssials R. *et al.*, (1978) indican la existencia de un 30% del territorio, afectado por alguna forma de erosión (21.2% erosión ligera, 6.8% erosión moderada y 2% erosión severa). En el mismo informe se realiza una estimación de erosión en colonias del Instituto Nacional de Colonización (unas 320.000 ha en total), la cual afectaba (al momento del referido trabajo) en alguna de sus formas, alrededor del 55%. Este fenómeno se explica en el hecho de que las colonias se encuentran bajo un uso muy intensivo, no siempre acompañado de un manejo adecuado del suelo. Las fuentes de los trabajos iniciales (en Uruguay) sobre implantación de terrazas como medidas mecánicas (Molinelli, J.C., 1948, y otros), realizan una adaptación de las recomendaciones incluidas al respecto en el Manual de Conservación de Suelos del Soil Conservation Service del U.S.D.A. Nuestro estudio presenta diferencias en cuanto a algunos criterios adoptados en la citada publicación respecto a la conformación en sí de la terraza, pendientes de las mismas, separación entre terrazas y longitud máxima, lo cual implica alcanzar resultados diferentes. No obstante ello, coincidimos en el análisis del tema que considera para el diseño dos elementos básicos:

- El estudio hidrológico para determinar los caudales de diseño.
- El análisis hidráulico del comportamiento de los canales de las terrazas.

Cayssials *et al.* (1978) indican, en sus conclusiones preliminares, que los sistemas en base a terrazas (tal cual se venían implementando hasta la fecha) en general fueron abandonados, volviéndose a los sistemas de laboreo tradicional. Una de las razones indicadas para este hecho es que estos sistemas exigen un adecuado mantenimiento y un nivel técnico muy alto para mantener su eficiencia a largo plazo. Por otra parte, García (1992), respecto a la utilización del terracedo, indica: «Otro elemento a considerar cuando se plantea la realización de sistemas de terrazas permanentes es la ocurrencia a escasa profundidad del horizonte B en la mayoría de los suelos agrícolas del Uru-

¹Cátedra de Hidrología - Facultad de Agronomía. Garzón 780 - Montevideo.

guay; la construcción de terrazas de base ancha en estos casos expondría este horizonte en una proporción importante del terreno. También las terrazas deben tener gradientes cuidadosamente seleccionados en sus canales, lo que garantiza la desuniformidad de las áreas entre terrazas, complicando el movimiento de maquinaria en todo tipo de operaciones. Otro inconveniente es que el sistema requiere mantenimiento y operadores que lo entiendan y respeten. Todo lo anterior lleva a considerar que las terrazas no son solución aplicable a la mayoría de los casos de producción agrícola del país. Al respecto, la experiencia del país es ilustrativa; la Central de Maquinaria del Ministerio de Ganadería y Agricultura, durante la década de los 50 construyó una importante cantidad de sistemas de terrazas en el país que fueron abandonados. Sin embargo las terrazas tienen sentido y se utilizan exitosamente en el cultivo de tabaco sobre suelos arenosos. En este caso el cultivo y el sistema de laboreo protegen muy poco el suelo, se trata de un cultivo en el que se juega una alta inversión por unidad de superficie, los suelos tienen alto riesgo de erosión aunque tienen horizonte A espeso y la capacidad empresarial, conducción técnica, personal y disponibilidad de maquinaria no son las comunes en el país» (los subrayados son nuestros). Las conclusiones expuestas por los autores citados, se refieren al fracaso de un «modelo» de sistematización por medio de terrazas, que era el propuesto por el S.C.S. de USDA, en su momento, el cual fue aplicado sin mediar un análisis suficientemente profundo de su adaptabilidad a nuestras condiciones naturales y características de nuestros sistemas productivos. Con posterioridad al fracaso inicial de la implantación de esta técnica, tampoco se realizó un esfuerzo de investigación para analizar las causas del fracaso y proponer una modificación de las pautas de sistematización. Simplemente se adoptó como válido el precepto que subrayamos en el párrafo citado del trabajo de García.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo modelo de sistematización de tierras que incluye la implantación de terrazas, el cual levanta la mayoría de limitaciones que tenía el aplicado con anterioridad en el país.

DESCRIPCION DE LA SISTEMATIZACION «TRADICIONAL»

Los sistemas de terrazas implementados en el país a partir de la década de los 50 tomaron como base una estandarización de los parámetros de diseño, estableciendo los valores usuales (o forma de cálculo) de las distintas variables.

Intervalo vertical: La distancia entre terrazas se calcula como un intervalo vertical, dependiente de la pendiente de la ladera. En primera instancia se utilizó la fórmula de Ramser, ya citada

Pendiente de las terrazas: La pendiente básica definida es de 0.2% (0.2 m cada 100 de desarrollo), pudiéndose aumentar al final hasta valores de 0.4%, cuando la longitud de la terraza hace prever una acumulación de caudales que pudiera incrementar el tirante, sobrepasando el borde libre de la misma. Por lo general se cambia la pendiente a intervalos de 100 a 150 m.

Longitud de las terrazas: Se establece una longitud máxima de unos 550 a 600 m.

Conformación del canal de la terraza: En general se asume una profundidad de agua (tirante) de entre 0.35 a 0.55 m, y un área mínima del perfil transversal del canal de entre 0.7 a 1.0 m². La inclinación de los taludes recomendada es de 4 a 1. El ancho total de las terrazas puede variar entre 4.5 y 12 m.

Estos criterios definen una modalidad de sistematización que resulta en diseños con las siguientes características:

- La distancia entre terrazas, al inicio de las mismas, varía con el porcentaje de pendiente de la ladera, dando anchos de trabajo diferentes a las áreas de cultivo.
- El hecho de mantener una pendiente fija a lo largo del desarrollo del canal de la terraza tiene como consecuencia que, dependiendo de las formas topográficas del predio, inevitablemente las terrazas se acercan o alejan entre sí, en sectores con mayor y menor pendiente del terreno, respectivamente.

El resultado de la aplicación de estas pautas de sistematización es la formación de cuadros de cultivos notoriamente desuniformes, lo cual altera de una manera muy importante el laboreo del suelo y demás prácticas mecanizadas, al perderse la rectangularidad de las melgas. Las operaciones mecanizadas se vuelven difíciles, al trabajar primero una melga de ancho uniforme para luego completar la superficie con pasadas en las áreas de recortes (triángulos, surcos muertos, etc.). Esto significa un incremento importante de los tiempos muertos de las operaciones mecanizadas, todo lo cual aumenta los costos de cultivo en sistemas terracedos de esta manera. Por otra parte, si analizamos algunos casos particulares como la implementación de riego por surcos o la instalación de huertos de frutales, se agregan nuevas dificultades de manejo.

El riego por surcos utiliza, en general y en particular cuando este se implementa en terrenos con pendientes fuertes, una pendiente a lo largo del surco, superior a la del canal de la terraza (entre 0.5% y 1.5%). Por ello, el trazado

de los surcos resultante es oblicuo al trazado de las terrazas, lo cual trae como consecuencia los siguientes inconvenientes:

- Surcos demasiado cortos, considerando el intervalo vertical (distancia) entre terrazas, en suelos con pendientes mayores al 2.5 o 3%
- Inevitablemente quedarán, además, triángulos de surcos aún más cortos y/o áreas desperdiciadas de terreno.
- Al no existir algún elemento fijo que sirva de guía, todos los años deberá replantarse la orientación de los surcos, lo cual implica un incremento de los costos de producción.

La implantación de montes frutales en terrenos con terrazas no paralelas implica que en el espacio entre terrazas, el número de filas de árboles que es posible plantar es variable, generando una conformación de los cuadros, sumamente irregular. Considerando las múltiples operaciones mecanizadas que deben cumplirse en este tipo de plantación (laboreo, tratamientos sanitarios, cosecha, etc.), es posible imaginar el grado de dificultad adicional que implica la adopción del terracedo, en base a estas pautas de sistematización. Estimamos que el aumento de costos de cultivo y sobre todo de dificultad, que implica la necesidad de personal más capacitado, explican lo anotado por Cayssials en cuanto a la caída en desuso de la técnica de terracedo. A esto se suma la necesidad de mantenimiento de la conformación de las terrazas en sí, aunque esto último entendemos que es un aspecto de importancia menor, por su periodicidad, facilidad de realización y relativo bajo costo. No obstante lo expuesto, entendemos que la instalación de terrazas es una técnica eficaz en el control de la erosión de campos cultivados en topografías de pendientes fuertes, que afecta la concentración de agua en una ladera, influyendo principalmente en el factor longitud de pendiente de la ecuación de pérdida de suelo.

DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DEL MODELO PROPUESTO DE SISTEMATIZACIÓN

Se planteó como meta que el sistema a implementar debería cumplir con los siguientes objetivos:

1. Proporcionar un adecuado control de los escurrimientos, como medida de prevención de la erosión.
2. Alterar lo menos posible los métodos de laboreo y demás prácticas culturales utilizadas en los diferentes cultivos.
3. Servir de guía permanente a la realización del laboreo en contorno.

4. Adecuarse tanto a la implantación de cultivos densos (cereales y pasturas) como a cultivos en línea y huertos frutales.

5. Posibilitar el riego superficial, especialmente el riego por surcos.

La metodología de trabajo fue definir criterios de sistematización los cuales se tomaban como hipótesis, y distintas conformaciones de canal de las terrazas, sometiendo al modelo a una doble evaluación:

- un análisis hidrológico (estimación de caudales de escurrimiento).
- un análisis del comportamiento hidráulico de las terrazas.

El estudio pretendió evaluar la posibilidad de instalar sistemas de terrazas, paralelas entre sí, con pendientes variables entre 0.5% y 1.75%, que interceptaran el escurrimiento en la ladera. De esta forma quedarían definidos cuadros de cultivo de ancho uniforme, con la dirección de los surcos paralela a las terrazas.

Distancia entre terrazas y longitud de las mismas

Dado que el criterio general fue la instrumentación de terrazas paralelas, nos parece más adecuado hablar de distancia entre terrazas que de intervalo vertical, aunque para la definición de la separación entre terrazas, hemos considerado las pautas definidas por Schwab *et al.*, (1990), expresadas en la función:

$$IV = 0.3(X * S + Y)$$

donde: IV = intervalo vertical en m.

X = constante de la localización geográfica

S = porcentaje de pendiente promedio, del terreno, arriba de la terraza

Y = constante para la susceptibilidad del suelo a la erosión y condiciones de la cubierta del suelo durante los períodos críticos de erosión

Para el caso del territorio nacional, los valores de X y de Y más adecuados serían 0.7 y 2 respectivamente. Sustituyendo los valores de X e Y en la expresión:

$$IV = 0.3(0.7 * S + 2)$$

Considerando estos criterios y razones de facilidad de realización de las labores culturales, se ha asumido, como pauta general, no superar los 40 m de separación entre terrazas. Por razones de manejo de las labores culturales, en general el largo normal de los surcos de cultivos no supera los 100-120 m. Resulta entonces que cada terraza debería evacuar el escurrimiento producido por, aproximadamente, una media hectárea.

Cuadro 1. Intervalo vertical y distancia en metros entre terrazas según pendiente.

% de pendiente	intervalo vertical en m	distancia en m
3	1.23	41
4	1.44	36
5	1.65	33
6	1.86	31

ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Un sistema de terrazas es en definitiva un sistema de pequeñas cuencas. Cada terraza es el canal de salida del escurrimiento de la cuenca delimitada por las líneas de divorcio de aguas (en el caso de la primer terraza del sistema), o por la terraza superior (para las subsiguientes terrazas en la ladera). Dadas las reducidas dimensiones de las cuencas de las terrazas, podríamos considerar que los parámetros que afectan el escurrimiento mantienen el mismo valor en cualquier punto de estas micro-cuencas. Se asume que el tipo de suelo, la pendiente, ubicación en la ladera, la condición de la superficie, etc., son idénticos en todos los puntos de la superficie entre terrazas. En definitiva el caudal pico que sería necesario evacuar, podría ser calculado utilizando la fórmula racional:

$$Q = C * I * A$$

donde: Q = caudal de escurrimiento en m³/hora
 C = coeficiente de escurrimiento
 I = intensidad máxima en m/hora para el tiempo de concentración
 A = área de la cuenca en m² (4000-5000)

El método racional es una gran simplificación de un proceso complicado. Sin embargo, se le considera suficientemente exacto cuando se estima el escurrimiento para diseñar estructuras relativamente de bajo costo, donde las consecuencias de fallas no tendrían consecuencias graves. La utilización del método racional, está limitado a pequeñas cuencas (en nuestro caso analizamos sub-cuencas de alrededor de media hectárea). Este método se desarrolla bajo los siguientes supuestos:

- 1) La lluvia se registra a una intensidad uniforme con una duración por lo menos igual al tiempo de concentración de la cuenca.
- 2) La lluvia se registra con una intensidad uniforme sobre todo el área de la cuenca.

Dado los tiempos de concentración relativamente cortos que se manejan en este trabajo y la reducida superficie

de las cuencas que desaguan en las terrazas, se entiende que ambos supuestos se cumplen.

Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento «C», se define como la relación entre el grado máximo de escurrimiento y la intensidad de lluvia, y es adimensional. Vale decir la proporción de la intensidad de la precipitación que supera la capacidad de infiltración instantánea del suelo, en el momento de ocurrir la tormenta de diseño. Según Schwab (1990), las estimaciones hechas para el coeficiente de escurrimiento en cuencas pequeñas, con un solo cultivo, en Coshocton, Ohio, han mostrado que los efectos fundamentales se atribuyen al grado de infiltración, a la cubierta superficial y a la intensidad de la lluvia. En este análisis se ha considerado la peor situación posible en cuanto al escurrimiento, a fin de aumentar los márgenes de seguridad del sistema de terrazas, en el entendido que la ruptura de las estructuras de conducción de las aguas concentradas, podría ocasionar mayores daños que los que provocaría el escurrimiento sobre terreno sin sistematizar. Así, aun cuando la mayor parte del tiempo el suelo se encuentre cultivado con pasturas o bien con surcos en contorno, hemos considerado la posibilidad de la ocurrencia de una lluvia de máxima intensidad en el momento en que el suelo está cultivado con una práctica deficiente. Para suelos del grupo hidrológico B, con cultivos en surcos, práctica deficiente, con intensidades de lluvias de 200 mm/h, el coeficiente C adquiere un valor de 0.66 (Schwab 1990). Los suelos de la asociación Fray Bentos, pertenecen a la clase hidrológica C (Duran, A 1997), por lo que los valores de coeficiente de escurrimiento deben corregirse por el factor 1.09 (Schwab, 1990), con lo que el valor del coeficiente «C» sería de 0.72. Chow, V.T. (1994) reúne en la siguiente tabla los coeficientes C para distintas condiciones de superficie e incorporando la variable período de retorno:

De acuerdo a las condiciones planteadas en este trabajo (Área de cultivo con pendiente entre 2 y 7%) para un período de retorno de 100 años, el coeficiente adecuado para la aplicación de la fórmula racional sería 0.51. No obstante la fuerte base experimental sobre la que se elaboraron los datos presentados por Chow, hemos considerado ubicarnos del lado de la seguridad adoptando en este trabajo para el cálculo del caudal pico el valor de coeficiente de escurrimiento «C» recomendado por Schwab, es decir 0.72. Este criterio trae como consecuencia una posible sobrevaloración de más del 40% del caudal pico calculado. Por consiguiente el análisis hidráulico que realizamos en este trabajo resulta sumamente conservador, en cuanto a las longitudes máximas que podrían adoptar las terrazas.

Cuadro 2. Coeficiente de escurrimiento. Fuente: Chow, V.T., 1994. Hidrología Aplicada. Los valores son los utilizados en Austin, Texas.

Características de la superficie	Período de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Area de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	1.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Tiempo de concentración

Para calcular el caudal de escurrimiento que se acumulará en los tramos finales de una terraza, será preciso considerar el tiempo que demorará en llegar a este punto el agua que ha caído en el sitio más remoto de la cuenca. Cuando el agua que llega desde el punto más alejado se reúne con la que viene de los lugares más cercanos, se obtendrá el máximo caudal concentrado. Para la estimación de ese tiempo de concentración, una de las alternativas es considerar el espacio que debe recorrer el agua y su velocidad media.

$$\text{Tiempo} = \text{Distancia} / \text{Velocidad}$$

Existen dos tipos de condición de movimiento del agua en el espacio entre terrazas, netamente diferenciados. Por un lado el escurrimiento no concentrado que ocurre, pendiente abajo, por toda la superficie cultivada. Por otro lado, la velocidad que adquiere el agua en el canal de la terraza. Hemos entendido que para trabajar con márgenes de seguridad debíamos considerar la situación más crítica, es decir el momento en el cual el terreno se encuentra cultivado, desnudo, previo a la realización de alguna siembra. Según Molinelli (1948), la velocidad de escurrimiento de aguas no concentradas sobre tierras cultivadas con pendientes entre 0 y 3% es de 0.61 m/seg. y para pendientes entre 4% y 7% es de 1.22 m/seg. Según Chow, V.T. *et al.* (1993) las velocidades promedio aproximadas del flujo de escurrimiento, en metros por segundo,

para calcular el tiempo de concentración serían las siguientes:

Cuadro 3. Velocidad de escurrimiento según pendiente y tipo de cobertura.

Descripción del curso de agua	Pendiente en %		
	0 - 3	4 - 7	8 - 11
No concentrada:			
Bosques	0-0.46	0.46-0.76	0.76-0.98
Pastizales	0-0.76	0.78-1.07	1.07-1.30
Cultivos	0-0.91	0.91-1.37	1.37-1.68

La pendiente promedio de la zona donde se han realizado los trabajos es de 4.3 %, por lo que, podríamos considerar como probable una velocidad media de alrededor de 1 m/seg., a los efectos de los cálculos. Considerando un recorrido del agua no concentrada de 40 mts, el tiempo que demora en llegar el agua hasta el canal de una terraza sería de unos 40 segundos. La velocidad del agua en el canal de la terraza se sitúa alrededor de unos 1.1 m/seg., en la situación de máxima pendiente (el cálculo de este parámetro se verá más adelante). Para una longitud máxima de 120 m, el tiempo que le lleva al agua en llegar al final de la terraza sería de unos 110 segundos, lo cual totalizaría un tiempo de concentración menor a 3 minutos. Otra metodología para la estimación del tiempo de concentración, es la cita-

da por Schwab *et al.*, (1990), de acuerdo a la ecuación de Kirpich de 1940. Esta ecuación fue desarrollada a partir de datos del SCS, en siete cuencas rurales de Tennessee, con canales bien definidos y pendientes entre 3% y 10%. Según Chow (1993), esta ecuación se considera adecuada para estimar el tiempo de concentración de cuencas entre 0.4 ha y 81 ha.

Su expresión es:

$$T_c = 0.0195 L_m^{0.77} S^{-0.385}$$

donde: T_c = tiempo de concentración en minutos

L = longitud máxima de la corriente en m.

S = gradiente de la cuenca en m/m

El gradiente « S » se calcula como el intervalo vertical desde el punto más alto de la cuenca a la salida de la terraza, dividido el valor de « L ». En nuestro caso, con terrazas separadas 40 m y con una longitud máxima de 120 m, considerando una pendiente promedio del 4.3% en las laderas y una pendiente máxima de las terrazas de 1.75%, el intervalo vertical promedio sería:

$$IV_m = 4.3 * 40 / 100 + 1.75 * 120 / 100 = 3.83$$

El recorrido máximo sería 40m ladera abajo y 120 m a lo largo de la terraza ($L = 160$ m)

Entonces $S = 3.83 / 160 = 0.02395$ m/m

Utilizando estos valores en la ecuación de Kirpich el tiempo de concentración adquiere un valor de 4 minutos.

Otro método reseñado por Hotchkiss *et al.*, (1995) es el llamado California Culvert Practice, desarrollado para pequeñas cuencas montañosas de California.

Su expresión es:

$$t_c = 0.95 (L^3 / H)^{0.385}$$

donde: t_c = tiempo de concentración en horas

L = longitud del recorrido en km.

H = desnivel en m

Considerando para nuestro caso valores de $L = 0.16$ km. y $H = 3.83$, el tiempo de concentración resultante es de 4 minutos.

En consecuencia, a los efectos del cálculo del escurrimiento, hemos tomado entonces un valor de tiempo de concentración de 4 minutos

Intensidad máxima

En relación a la intensidad máxima, no existen, en el país, datos estimados o medidos de intensidad de lluvia para un lapso tan corto. Molinelli (1948) estima una intensidad de 150 mm/hora para un tiempo de 5 minutos. Rovira *et al.*, (1981), para la localidad de «La Estanzuela», estiman una intensidad de 140 mm/hora para un tiempo míni-

mo de 10 minutos y un período de retorno de 10 años. Rodríguez Fontal (1985), para la sub-región VII, para un período de recurrencia de 10 años, para 5 minutos de duración, estima, con un nivel de confianza del 90% un volumen de precipitación de 19.9 mm, lo cual significa una intensidad de 239 mm/hora. La ecuación utilizada por Rodríguez Fontal, para la sub-región VII, para eventos menores a 2 horas es la siguiente:

$$h = 27.2 (1 + 0.707 \log (1 / (1 - (1 - r)^{(1/T)}))) t^{0.478}$$

donde: h = máximo valor de lluvia ocurrida en t horas consecutivas, con un período de recurrencia de T años, a menos de un riesgo r

r = nivel de riesgo

t = duración de la lluvia en horas

T = período de recurrencia en años

Mediante la utilización de esta ecuación sería posible estimar la intensidad máxima para nuestra situación, considerando el tiempo de concentración, y definiendo los valores de las variables «riesgo» y «período de recurrencia». Genta, J.L. *et al.*, (1994) indica que la selección de la vida útil y el riesgo se deben definir en base a las características de las obras a construir y el costo de los daños que se ocasionarían si la tormenta supera a la de diseño. Al respecto, Dal-Ré Tenreiro, R *et al.*, (1990) indican que para drenajes superficiales mediante zanjas o colectores que evacúan las aguas de escorrentía directa, las secciones se calculan, normalmente, para crecidas con un período de retorno de 5 años en zonas de cultivo de secano y 10 años en zonas de regadío. La vida útil de un sistema de terrazas no es fácil de estimar por cuanto se consideran estructuras permanentes, las cuales, una vez implantadas deberían mantenerse por un período indefinido de tiempo. Si consideramos la implementación de terrazas en el marco de un sistema de conservación de suelos basado en el manejo de una rotación y a otras prácticas conservacionistas (laboreo reducido, etc.) tendientes a incrementar la estabilidad estructural del suelo, podríamos tomar la vida útil de las terrazas como el período requerido para el establecimiento del sistema integrado de conservación. En este caso, el período durante el cual debemos asegurar el funcionamiento de las terrazas podría ser de 10 a 15 años. Vale decir que deberíamos estimar la intensidad máxima esperable (para nuestro tiempo de concentración), cuyo valor no sea superado durante el período de la vida útil, con un cierto nivel de seguridad (o de riesgo). El período de retorno indica la probabilidad de ocurrencia de un evento, en un año dado. Si el período de retorno es de, p. ej. 10 años, la probabilidad de que ocurra el evento es de 1/10 y por consiguiente la probabilidad de que no ocurra es 9/10 (90%). Esto es para un año. Si queremos calcular la

probabilidad de que no ocurra en dos años consecutivos, esta sería $9/10 \times 9/10$ (81% de seguridad), y en tres años consecutivos $9/10 \times 9/10 \times 9/10$ (72.9% de seguridad). Siguiendo este razonamiento, resulta claro que a medida que ampliamos el período durante el cual no deseamos que ocurra el evento (vida útil de la obra), va aumentando el riesgo. Así, si tomamos un período de retorno de 10 años para una vida útil también de 10 años, el riesgo de que el evento se presente alguna vez durante la vida útil es de más del 65% (más de la mitad de las probabilidades). En el siguiente gráfico es posible analizar la evolución del nivel de riesgo a medida que varía la vida útil y para distintos tiempos de retorno. Resulta claro que para aumentar los márgenes de seguridad, para una vida útil dada, debemos tomar un período de retorno mayor. En base al razonamiento expuesto es posible establecer una relación entre la vida útil de la obra, el nivel de riesgo asumible y el período de retorno que se hace necesario considerar.

$$Tr = 1/(1-(1-r)^{(1/vu)})$$

donde: Tr = período de recurrencia en años
 r = nivel de riesgo
 vu = vida útil de la obra

Considerando lo anterior, hemos entendido adecuado utilizar un período de retorno de 90 años, para contar con

un nivel de riesgo de ocurrencia del evento máximo de solo el 20%, para una vida útil de 20 años. Con estos parámetros y utilizando la ecuación de Rodríguez Fontal para la sub-región correspondiente (VII), con un tiempo de concentración de 4 minutos, nuestra tormenta de diseño tendría una intensidad de 318 mm/hora.

Caudal pico de escurrimiento

Utilizando la fórmula racional, y los valores de coeficiente de escurrimiento, e intensidad máxima de precipitación ya definidos y considerando un área de cuenca de 4800 m², constituida por la melga que queda encerrada entre dos terrazas (120 m x 40 m), el caudal pico resultante fue de 308 l/s.

ANÁLISIS HIDRÁULICO

Se ha tomado este valor de caudal pico de escurrimiento de 308 l/seg., como base para el análisis del comportamiento hidráulico de los canales.

Conformación del canal de la terraza

Las estructuras de interceptación y conducción del escurrimiento implementadas fueron canales en tierra de tipo «de ladera», vale decir con terraplén de un solo lado.

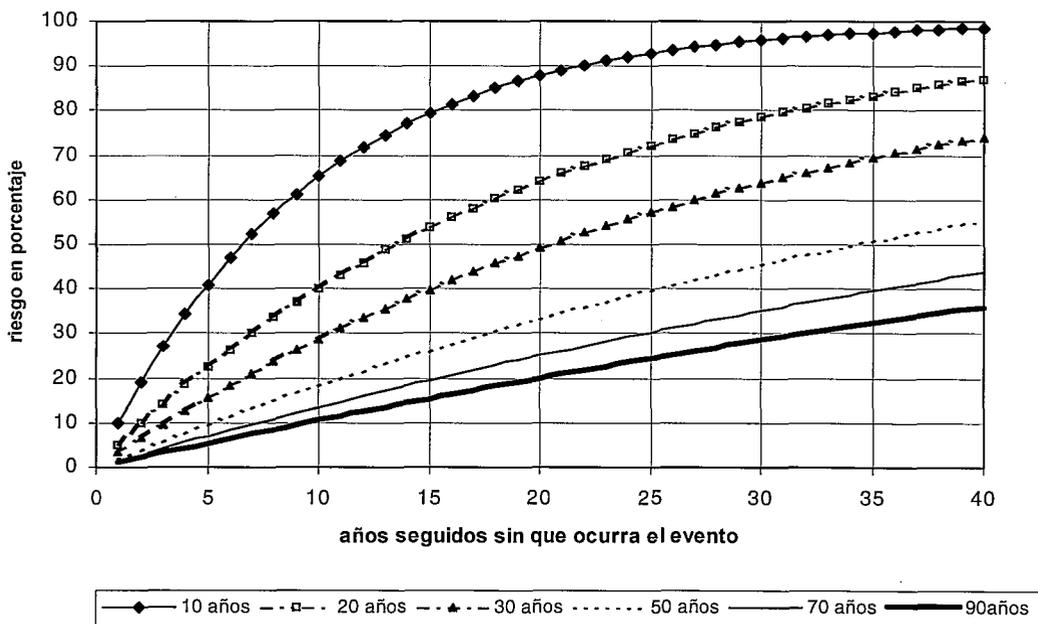


Figura 1. Niveles de riesgo según el período de recurrencia y la vida útil de la obra.

La tierra para la construcción del terraplén se extrae del área del canal. Al plantearnos la utilización de este tipo de terrazas hemos tomado en cuenta, por un lado, las posibilidades que brinda la maquinaria agrícola convencional y por otro, la utilización de la menor proporción posible de terreno. Respecto al primer aspecto, consideramos el uso, para la construcción del canal de la terraza, de una hoja de nivelación de enganche de tres puntos, acoplada a un tractor de tamaño medio (50-60 Hp). Hemos evaluado, en la práctica, que este equipo puede construir, con relativa facilidad, terraplenes con relaciones de inclinación «Z» de hasta 1.5 a 1 (33° de inclinación respecto a la Horizontal). Con mayor inclinación (por ejemplo 1 a 1; 45°) la construcción es más dificultosa. Cabe indicar que por la ubicación que tendrían las terrazas, no se pensaba en la posibilidad del pasaje de maquinaria agrícola sobre ellas, en ninguna de las operaciones de laboreo, siembra, etc. Tampoco se realizaría ningún tipo de cultivo en la terraza. Tanto el canal como el terraplén de las terrazas, se mantendrían empastados, como forma de preservarlos de la erosión que podría causar el tránsito del agua, a altas velocidades. Por otra parte, con el mismo equipamiento, es posible construir terraplenes de hasta 0.6-0.7 m de altura (medidos desde el fondo del canal hasta el coronamiento del terraplén). Para minimizar el terreno ocupado, hemos optado por el uso de terrazas de base angosta. Una forma de reducir el ancho de la terraza es aumentar la inclinación de los taludes y reducir el ancho de la base del canal. En la figura adjunta, se muestra un perfil transversal de la terraza tipo.

El talud del canal de la terraza, ladera arriba (Z3), es decir el talud de ingreso del escurrimiento al canal, se ha prefijado con una inclinación de 3 a 1, como forma de asegurar su estabilidad, evitando una gran aceleración del

agua que pudieran dar lugar a procesos de erosión en dicha zona. Para los taludes del terraplén de la terraza (Z1 y Z2) se adoptó una inclinación de 1.5 a 1. Se analizaron los distintos tipos de perfil y ancho de fondo del canal, para los cuales se calcularon las profundidades de corte necesarias a fin de igualar los volúmenes excavados y terraplenados, así como también el ancho total de la terraza, considerando una pendiente del terreno del 5%.

Hemos utilizado la fórmula de Manning de velocidad del agua en canales en tierra para analizar el comportamiento hidráulico de las distintas conformaciones de canal.

Cuadro 4. Dimensiones del canal de las terrazas según diferente ancho de fondo.

Dimensiones	Ancho de fondo		
	a = 0 m	a = 0.3 m	a = 0.5 m
Profundidad de corte sobre la ladera (hcl)	0.37	0.34	0.33
Profundidad de corte sobre el terraplén (hct)	0.29	0.26	0.23
Ancho total de la terraza	2.87	3.15	3.34

$$V = 1/n R^{2/3} S^{1/2} \text{ (Manning)}$$

donde: V = velocidad del agua en m/s

n = coeficiente de rugosidad

R = radio hidráulico en m

S = pendiente hidráulica m/m

El valor del radio hidráulico «R» se determina por la relación entre el área de la vena líquida y el perímetro mojado:

a : fondo del canal
 Ac : ancho de coronamiento
 Ht : profundidad total
 hct : prof. corte/terraplen
 hcl : prof. corte/ladera
 Z1, Z2 y Z3 : inclinación de taludes

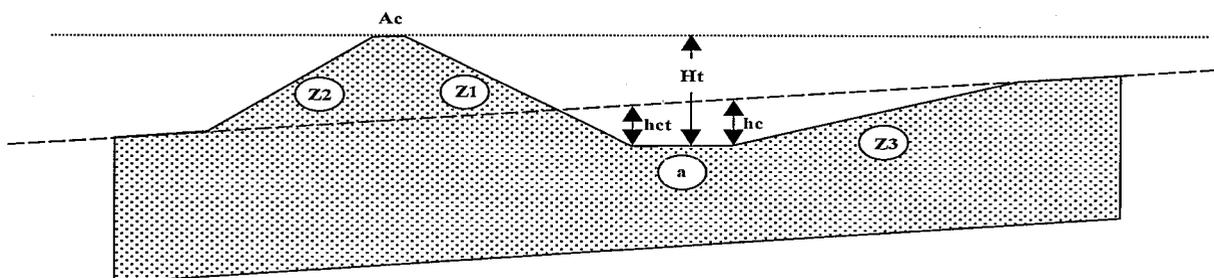


Figura 2. Perfil transversal de una terraza.

$$R = A/P$$

donde: R = radio hidráulico en m

A = área de la vena líquida en m²

P = perímetro mojado en m

Mediante la ecuación de continuidad, es posible obtener el caudal conducido por el canal:

$$Q = A * V$$

donde: Q = caudal en m³/s

A = área de la vena líquida en m²

V = velocidad media del agua en m/s

Para el análisis hidráulico se ha considerado un valor del coeficiente de rugosidad «n» de 0.035, correspondiente a la condición de las paredes del cauce cubiertas de malezas, al considerar que esta puede ser la condición habitual del canal de las terrazas.

Velocidad y tirante máximos permisibles

Según Schwab (1990), la velocidad máxima permisible para canales con vegetación (pasto Bermuda) y pendientes del canal entre 0% y 5%, es de 2.4 m/s. En el manual de conservación de suelos del SCS del USDA (1947), se indica que el pasto bermuda ha resistido velocidades de 2.5 a 3 m/s, mientras que otras gramíneas (p.ej. *Poa pratensis*) solo resisten velocidades de 1.5 a 2.1 m/s. El *Penisetum clandestinum* tiene los mismos valores de resistencia a la velocidad del agua que el pasto Bermuda. Al tratarse de canales empastados, de uso intermitente, se ha adoptado como criterio de velocidad, no sobrepasar 1.2 m/s como velocidad instantánea máxima, a fin de evitar procesos erosivos en el propio canal de la terraza. Por otra parte, considerando la profundidad máxima del canal que es posible lograr con la maquinaria utilizada, a fin de prevenir

desbordamientos que ocasionarían la rotura de la terraza, se ha entendido como criterio deseable, que el tirante «h» (profundidad de agua en el canal) máximo no sobrepase la profundidad de corte. Tal como se observa en el cuadro con los datos de los perfiles, la profundidad de corte se sitúa alrededor de los 0.30 m. Así, prácticamente toda la vena líquida circularía bajo el nivel del terreno, sobre material inalterado, dejando un borde libre de otros 0.30 m, lo cual otorga un importante margen de seguridad. El límite máximo admisible del tirante, a los efectos de calcular la máxima capacidad de conducción de cada una de las secciones tipo, lo hemos fijado en 0.5 m (0.1 a 0.2 m de borde libre).

Pendiente de las terrazas

El trazado de terrazas paralelas sobre topografías desuniformes lleva a variaciones en la pendiente de la terraza. No es posible mantener el paralelismo con la utilización de pendientes fijas en las terrazas. Por otra parte, queríamos ubicar los surcos de riego en forma paralela a las terrazas (o viceversa). Considerando las pendientes que es posible adoptar en los surcos, hemos evaluado el comportamiento hidráulico de las terrazas, dentro de un rango de pendientes entre 0.5% y 1.75%

Comportamiento de distintas secciones de canal

En los cuadros siguientes se presentan, para distintas formas de canal y distintas pendientes de terraza, las velocidades y tirantes alcanzados para una longitud de 120 m y una separación entre terrazas de 40 m, los caudales máximos que serían capaces de conducir, sin sobrepasar los límites máximos establecidos ($h \leq 0.5$ m y $V \leq 1.2$ m/s) y las longitudes máximas posibles de las terrazas.

Cuadro 5. Comportamiento hidráulico de canal triangular.

Sección triangular	Máximos admisibles			
	Longitud de terraza: 120 m		Caudal	Longitud
% Pendiente	vel. m/s	tirante (h) m	l/s	metros
0.50	0.55	0.46	408	159
0.75	0.67	0.43	500	195
1.00	0.78	0.41	577	225
1.25	0.91	0.39	645	252
1.50	1.05	0.36	707	276
1.75	1.11	0.35	764	298

Cuadro 6. Comportamiento hidráulico de canal con ancho de fondo = 0.3 m.

% Pendiente	Sección trapezoidal con "a" = 0.30 m		Máximos admisibles	
	Longitud de terraza: 120 m		Caudal	Longitud
	vel. m/s	tirante (h) m	l/s	metros
0.50	0.69	0.38	520	203
0.75	0.81	0.35	638	249
1.00	0.90	0.33	737	287
1.25	0.98	0.31	823	321
1.50	1.05	0.30	902	352
1.75	1.11	0.29	974	380

Cuadro 7. Comportamiento hidráulico de canal con ancho de fondo = 0.5 m.

% Pendiente	Sección trapezoidal con "a" = 0.5m		Máximos admisibles	
	Longitud de terraza: 120 m		Caudal	Longitud
	vel. m/s	tirante (h) m	l/s	metros
0.50	0.69	0.35	605	236
0.75	0.80	0.32	742	289
1.00	0.89	0.30	856	334
1.25	0.97	0.28	957	374
1.50	1.04	0.27	1049	409
1.75	1.10	0.26	1073	419

Conclusiones del análisis hidráulico

Surge de los resultados del análisis de comportamiento hidráulico de las distintas secciones de canal que:

- La principal limitante viene dada por el riesgo de que una sobreelevación del tirante pueda provocar un desbordamiento de la terraza, con los consiguientes daños, y no por la velocidad que adquiere el agua en el canal ya que esta nunca sobrepasa la máxima velocidad no erosiva.
- La sección triangular, si bien permite evacuar la tormenta de diseño, es la sección que resulta con mayor tirante. Permite un largo máximo de terraza de unos 160 metros (con una pendiente de la terraza de 0.5%), con un tirante de 0.5 m.
- La sección trapezoidal con ancho de fondo del canal "a" de 0.5 m permitiría largos de terraza de hasta 235 metros (con una pendiente de la terraza de 0.5%), aunque resulta en el mayor ancho total de la terraza (3.35 m), lo que aumenta la proporción de suelo no aprovechado.

- Las observaciones indican que el perfil de los canales tiende a estabilizarse en una sección parabólica que podría asimilarse bastante bien a un canal trapezoidal con un ancho de fondo reducido, tal como sería el perfil con "a" = 0.30 m.
- La sección trapezoidal con a = 0.30 m admite largos de terrazas de hasta 200 m (con una pendiente de la terraza de 0.5%) sin sobrepasar los 0.5 m de tirante máximo admisible que habíamos definido como el límite. Esta sección tendría un ancho de terreno ocupado por la terraza de 3.15 m.

CONCLUSIONES GENERALES DEL ANÁLISIS DEL MODELO

En los análisis hidrológicos y de comportamiento hidráulico de las terrazas, se calcularon los tirantes y las velocidades de la vena líquida en los canales de las terrazas, en todas las posibles condiciones que pudieran surgir a partir de las pautas de sistematización adoptadas. Con-

siderando que el tipo de canal más adecuado es el de sección trapezoidal con un ancho de base de 0.30 m, una inclinación de taludes 1 1/2 a 1, un tirante máximo de 0.30 m y un ancho de solera de 0,35m, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

a) El área máxima absoluta que puede servir una terraza de este tipo, varía con el % de pendiente del canal, desde 5500 m² con 0.5% de pendiente hasta 10.000 m² con 1.5%

b) Las velocidades dentro de este rango de áreas y pendiente se sitúa entre 0.75 y 1.25 m/s, las cuales son admisibles como no erosivas, si se considera que el canal se encuentra empastado y funciona en forma intermitente.

c) Si consideramos los anteriores criterios para la sistematización de cuadros, con un ancho máximo de 40 m y una longitud máxima de 120 m, en todos los casos nos situamos dentro del rango de seguridad más que aceptable en cuanto a la capacidad de las terrazas.

CRITERIOS DE SISTEMATIZACIÓN

Las pautas de sistematización utilizando el tipo de terrazas descrito quedan definidas por los siguientes lineamientos:

- 1) Ubicación de los drenajes naturales y líneas divisorias de aguas, los cuales actuarían como ejes principales de la sistematización.
- 2) Longitudes de las terrazas (y los surcos de riego) no inferiores a los 50 m (por la practicidad en el laboreo) ni superiores a los 120 m.
- 3) Terrazas paralelas a la dirección de los surcos (o viceversa).
- 4) Coincidencia del final de una terraza y arranque de la siguiente contigua, en caso que la distancia entre una divisoria de aguas y un bajo sea tal que requiera más de una terraza (independiente), de las longitudes prefijadas en el punto 2).
- 5) Distancia entre dos terrazas sucesivas (superior e inferior), nunca mayor a 40 m.
- 6) Pendiente de los surcos (y las terrazas) entre 0.5% y 1,75%
- 7) Los drenajes naturales se mantienen empastados (nunca se aran), dado que son sitios de concentración de agua durante las lluvias y por lo tanto el riesgo de erosión es muy alto.

De esta forma es posible en la mayoría de los casos, melgas de ancho homogéneo (igual cantidad de surcos en toda su longitud), lo cual facilita todas las labores

culturales, incluyendo el riego por surcos. Se limitó la longitud de los surcos por dos motivos: El primero, a fin de lograr un riego por surcos con alta eficiencia de aplicación, ya que surcos demasiado largos prolongan la etapa de mojado del surco. En segundo lugar se entendió que, con pendientes transversales tan fuertes, existía un alto riesgo de rotura de los surcos al acumularse en su parte baja las aguas de escurrimiento. Por otra parte, una de las formas de limitar los caudales acumulados en los canales de las terrazas) consiste en adoptar una longitud promedio de 100 m, con un máximo de 120 m. Las terrazas se ubican de forma que, además de cumplir su función principal de intercepción y conducción de la escorrentía, sirven como una guía para el laboreo y la orientación de los surcos. De esta forma, en lugar de entorpecer las prácticas culturales, las facilitan.

SISTEMATIZACIÓN PARA RIEGO POR SUPERFICIE

Se ha incluido un plano con un diseño de sistematización para riego por surcos. En el mismo se han trazado regueras en tierra a partir de un canal existente. Distinguimos regueras en tierra a una pendiente baja (0.3%) y líneas de derivación de agua a los surcos ubicadas en la máxima pendiente, donde se instalarían tuberías de conducción y de derivación, de acuerdo a la metodología planteada por P. Durán (1988). En este proyecto de sistematización se considera área de cultivo únicamente aquella que queda bajo cota de riego. El área sobre cota no se ha sistematizado aunque si se ha incluido una terraza de tipo "tradicional" para interceptar y conducir los escurrimientos de las zonas altas, a fin de que los mismos no afecten el área cultivada. En aquellos cuadros en los que no ha sido posible mantener el paralelismo entre terrazas, se indica la dirección de los surcos y las zonas de desperdicio no cultivadas. Cabe destacar que en dicho esquema de sistematización, el riego por surcos solo puede llevarse adelante mediante el uso de algún tipo de equipamiento que permita la conducción y derivación de agua de riego desde cabeceras que se encuentran en pendientes de más de 4%. No obstante ello, los resultados obtenidos en el desarrollo de estos equipamientos y los trabajos de investigación actualmente en curso con dicho fin, indican que es posible implementar sistemas aptos para esta condición, los cuales presentan además una alta eficiencia en el uso del agua y de la mano de obra.

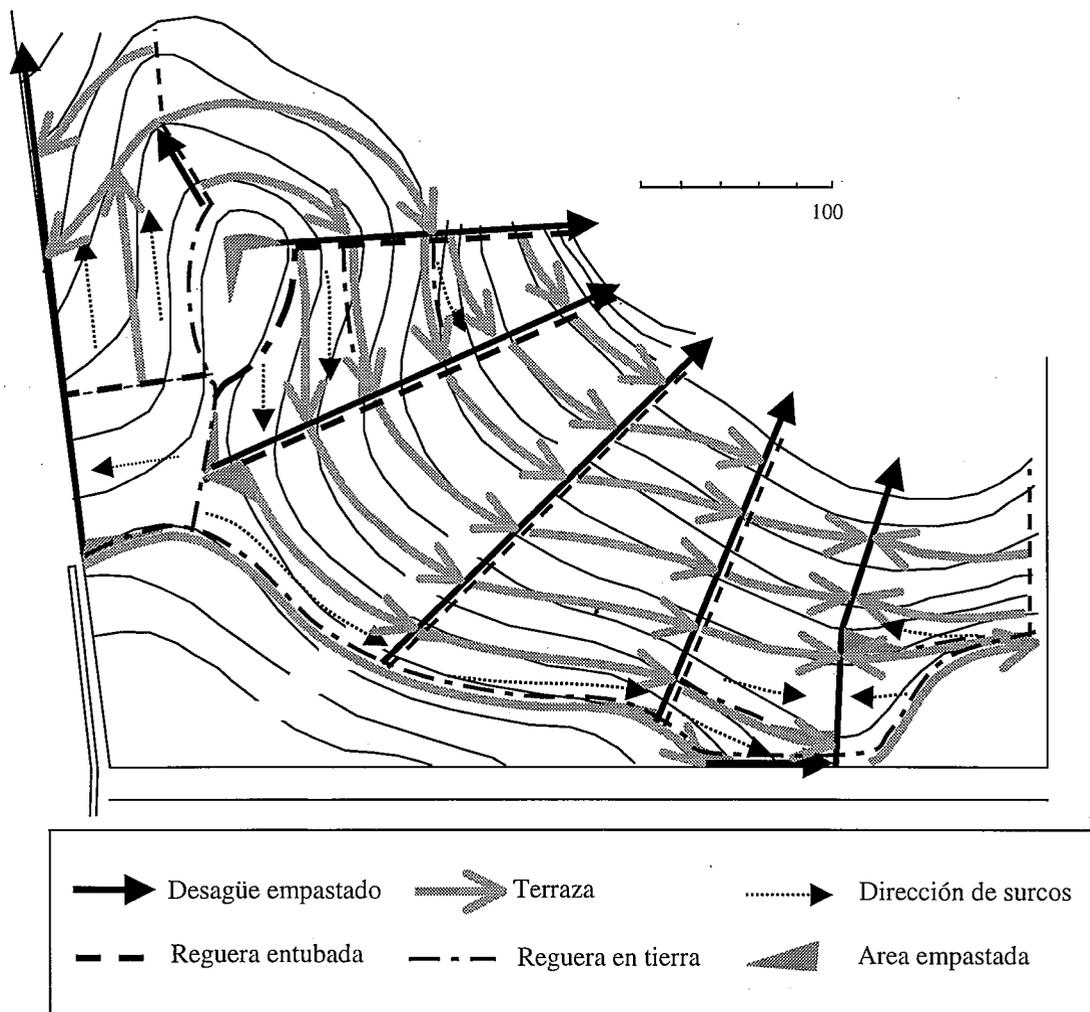


Figura 3. Sistematización para riego por superficie.

BIBLIOGRAFÍA

- CASÁS BERNADÁ & H.E. COHAN. 1980. Aspectos económicos a programas de Conservación de suelo. Revista A.I.A., Montevideo, Uruguay. 2ª época, Diciembre, 1980.
- CAYSSIALS, R., J.E. LIESEGANG & J. PIÑEYRUA. 1978. Panorama de la erosión y conservación de suelos en el Uruguay. M.A.P. Uruguay. Boletín Técnico N° 4.
- CHOW, V.T., D.R. MAIDMENT & L.W. MAYS. 1993. Hidrología Aplicada. Mc.Graw Hill. Colombia.
- DAL-RE TENREIRO, R. & G. GONZALEZ. 1990. Curso Internacional sobre Riego y Drenaje. Madrid
- DURAN, A. 1997. Clasificación Hidrológica de los Suelos del Uruguay. Agrociencias, Vol I, N° 1:15-29.
- DURAN, P. 1988. Riego por surcos. Nota Técnica N° 4, Facultad de Agronomía, Montevideo.
- GARCIA, F. 1992. Guía para la toma de decisiones en conservación de Suelos. 3ª aproximación. INIA, Uruguay, Serie Técnica N° 26.
- GENTA, J.L. & F. CHARBONIER. 1994. Hidrograma unitario triangular. Fac. de Ingeniería, U.R.
- HOTCHKISS, R.H. *et al.*, 1995. Peak Discharge for Small Agricultural Watersheds. Journal of Hydraulic Engineering, Vol 121 N° 1.

- MOLINELLI, J.C. 1948. Sistematización por medio de terrazas, de predios destinados a la agricultura. Ministerio de Ganadería y Agricultura, Dirección de Agronomía. Uruguay. Publicación N° 93.
- RODRIGUEZ FONTAL, A. 1984. Fórmulas lluvia-duración-riesgo en las ocho subregiones del Uruguay (Aplicación a la agricultura). Agua en la Agricultura, N° 2. DUMA-MGAP. Montevideo.
- ROVIRA, L. *et al.*, 1982. Intensidades máximas de lluvia en las zonas de influencia de las estaciones agroclimáticas La Estanzuela, Paysandú, Bella Unión y Treinta y tres. MGAP. Montevideo.
- SCHWAB, G.O., R.K. FREVERT, T.W. EDMINSTER & K.K. BARNES. 1990. Ingeniería de Conservación de Suelos y Aguas. Noriega Editores, Editorial LIMUSA. México.
- U.S.D.A. Manual de Conservación de Suelos. 1947. Publicación TC-243. Oficina Central de Traducciones. Secretaría de Estado de los Estados Unidos. Washington D.C.