

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DE COBERTURAS EN TALUDES
EN UN SUELO SOMETIDO A EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS**

GABRIEL ELÍAS AGUIRRE ROJAS

Santiago, Chile

2008

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DE COBERTURAS EN TALUDES
EN UN SUELO SOMETIDO A EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS**

**COVERS EVALUATION IN SLOPES IN A SOIL
UNDER SAND EXTRACTION**

GABRIEL ELÍAS AGUIRRE ROJAS

Santiago, Chile

2008

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DE COBERTURAS EN TALUDES
EN UN SUELO SOMETIDO A EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS.**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo
Mención: Manejo de Suelos y Aguas

GABRIEL ELÍAS AGUIRRE ROJAS

PROFESORES GUÍA	Calificaciones
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0
Sr. Wilfredo Vera E. Ingeniero Agrónomo, M.S.	7,0
PROFESORES EVALUADORES	
Sr. Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, M.Sc.	6,8
Sr. Horst Berger S. Ingeniero Agrónomo.	6,6
COLABORADOR	
Sr. Cristian Krémer F. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	

Santiago, Chile
2008

INDICE

	Página
RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
MATERIALES Y MÉTODO.....	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
Propiedades físicas del suelo.....	13
Densidad aparente y textura.....	13
Tensioinfiltrometría.....	14
Contenido de agua.....	16
Cobertura.....	17
Escorrentía y sedimentos.....	20
Precipitaciones naturales.....	27
Evaluación del costo de establecimiento y mantención de las distintas coberturas.....	31
CONCLUSIONES.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	34
Apéndice I.....	37

RESUMEN

En el presente proyecto se evaluó la generación de sedimentos y la escorrentía en taludes protegidos con coberturas inertes o especies vegetales, en dos gradientes de pendiente. El estudio se realizó en Maipú (Santiago) posterior a la extracción de áridos del subsuelo de la Serie Rinconada de Lo Vial (Typic Xerochrepts) de clase textural franco arenosa. Se evaluaron coberturas de doca (*Carpobrotus* sp.) (T1), rastrojo de maíz (T2) y grava gruesa (T3), usando como testigo la vegetación espontánea (T0). Los tratamientos se establecieron en dos gradientes de pendiente (1:2,25 y 1:1) con tres repeticiones. Se simularon precipitaciones, mediante un sistema de riego por aspersión, con intensidades entre 1,43 y 1,87 mm h⁻¹, evaluando la escorrentía (%) y la masa de sedimentos erosionados.

De los sistemas de cobertura estudiados, el testigo (T0) presentó la mayor escorrentía, alcanzando valores de 30 y 50% para los taludes 1:2,25 y 1:1, respectivamente, siendo la escorrentía de los restantes tratamientos significativamente inferior y sin diferencias entre ellos. La producción de sedimentos no es significativa, alcanzando 10 y 26 kg ha⁻¹ (taludes 1:2,25 y 1:1) en el testigo y menos de la mitad para los restantes tratamientos. Si bien el uso de residuos orgánicos asegura una alta cobertura, el rastrojo de maíz (T2) no presentó los mejores resultados en escorrentía y generación de sedimentos, siendo la doca (T1) y la grava (T3) los medios más recomendados para la protección de taludes. En el suelo estudiado, la precipitación mayor a 1,65 mm h⁻¹ generó un aumento de los parámetros evaluados, indistintamente del gradiente de pendiente.

Palabras clave: Erosión hídrica, escorrentía, sedimentos, intensidad de precipitación, pendiente.

ABSTRACT

In two slope gradients with different surface cover the run-off and the amount of sediments were measured. The soil was a Typic Xerochrept (Rinconada de Lo Vial Soil Series) and the experiment was carried out after the sandy subsoil was extracted. The surface covers were sea fig (*Carpobrotus sp.*) (T1), maize stubble (T2), coarse gravel (T3) and the spontaneous vegetation (T0) was used as control. The slope gradients were 1:2.25 and 1:1, and the rainfall was simulated with sprinkle irrigation, going from 1.43 to 1.87 mm h⁻¹ intensities. The run-off (%) and the mass of eroded sediments were measured considering three replications for each treatment.

A run-off increase of 30% in 1:2.25 slope, and 50% in 1:1 slope in the control treatment (T0) were found. No significant differences and with lower figures were found in the remainder treatments. The amount of sediments were 10 and 26 kg ha⁻¹, in T0, for 1:2.25 and 1:1 slopes respectively, which is considered as negligible. In T1, T2 and T3 the amount of sediments were less than this figure. Considering the treatments, T1 and T3 showed the best soil surface protection for that slopes, while in T2 the highest amount of run-off and sediments were measured. It was concluded that in the soil conditions of this study, rainfalls greater than 1.65 mm h⁻¹ will increase run-off and the amount of sediments, independent from slope gradient.

Key words: Water erosion, run-off, sediments, intensity of precipitation, slope.

INTRODUCCIÓN

La intervención de suelos en el ámbito de la extracción de áridos genera cambios topográficos entre áreas explotadas y no explotadas, las cuales quedan interconectadas mediante taludes.

Un talud es el borde inclinado de un corte al terreno natural o de un terraplén, y la posibilidad de que los taludes queden en condiciones de ser utilizados agrícolamente o no dependerá de su extensión e inclinación (McKyes, 2000). Los taludes deben ser construidos de manera estable, y los sistemas de protección utilizados deben considerar aspectos de conservación de flora y fauna benéfica (funcionalidad ecológica) y de estética rural, además cumplir con el objetivo de evitar procesos erosivos.

La erosión es definida como el proceso de degradación, transporte y deposición de materiales del suelo por efecto de agentes erosivos, tales como el agua, el viento o el hielo (Peralta, 1993). Según Ellies (2000), la erosión es quizás el proceso de degradación de suelos que causa un mayor impacto, ya que es irreversible, de gran magnitud, y en casos extremos, pueden provocar en un talud la pérdida total del suelo. La geomorfología y el régimen pluviométrico de Chile sitúan a la erosión hídrica como la primera causa de degradación de los suelos (Carrasco y Riquelme, 2003).

Para estimar la cantidad de suelo erosionado por el agua de lluvia y el escurrimiento superficial, Wischmeier (1976, citado por McKyes, 2000) desarrolló la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). La ecuación y sus componentes son:

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

Donde:

- A: pérdida promedio anual de suelo (Mg ha^{-1})
- R: índice erosividad de la lluvia y el escurrimiento superficial
- K: factor erodabilidad del suelo
- L: factor largo de la pendiente
- S: factor gradiente de la pendiente
- C: factor manejo de cultivos
- P: factor prácticas de conservación

De la ecuación anterior se puede concluir que el proceso erosivo está relacionado con las propiedades intrínsecas del suelo que determinan la erodabilidad (textura, estructura, estabilidad de los agregados y densidad aparente); la erosividad de la lluvia (frecuencia, intensidad y duración); la pendiente (gradiente, longitud y forma); y eventualmente, con las prácticas de control de la erosión, entre las cuales se incluyen el uso de coberturas vivas o inertes.

La erodabilidad del suelo y la erosividad de la lluvia son dos importantes factores físicos que afectan la magnitud de la erosión. La erodabilidad, como característica del suelo, es una medida de la susceptibilidad de éste al desprendimiento y transporte de

partículas por los agentes erosivos, mientras que la erosividad es una expresión de la capacidad de los agentes erosivos para provocar el desprendimiento, transporte de las partículas del suelo (Renard *et al.*, 1997). La magnitud de la erosión hídrica entonces, depende de la facilidad con que las partículas del suelo son desprendidas por la energía de las gotas de lluvia y/o el escurrimiento superficial.

La erodabilidad, como propiedad del suelo, es el efecto integrado de procesos que regulan la recepción de las gotas de lluvia y la resistencia del suelo al desprendimiento de las partículas y al subsiguiente transporte. Según Foster (1988), este proceso está influenciado directamente por propiedades del suelo tales como la distribución del tamaño de partículas, estabilidad estructural, densidad aparente, contenido de materia orgánica, naturaleza de los minerales de arcilla y constituyentes químicos.

La textura del suelo es un factor importante que influye en la erodabilidad. Mientras las partículas gruesas de arena resisten el transporte, los suelos de texturas finas resisten el desprendimiento de las partículas, ya que estos últimos forman estructuras que tienen mayor grado de cohesión. El tamaño de partículas más susceptible al desprendimiento y transporte son la arena fina y el limo (Lal, 1988).

Además, el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo provoca la desagregación de las partículas del suelo, formándose un sello superficial que disminuye la capacidad de infiltración. Cuando la precipitación es mayor que la tasa de infiltración del suelo, se produce escurrimiento superficial del agua que no infiltra, aumentando la concentración de partículas transportadas por erosión (Porta *et al.*, 1999).

La fuerza que poseen los agentes erosivos y que causan el desprendimiento de las partículas del suelo y su posterior transporte es la erosividad. La erosividad de la lluvia se debe en parte al impacto directo de las gotas de lluvia y además al escurrimiento superficial que posteriormente genera. La capacidad que tiene la lluvia para provocar la erosión de suelos es atribuida a la velocidad con que caen las gotas y al tamaño de éstas, en otras palabras a la energía cinética de la lluvia, por lo tanto, la intensidad de ésta tendría una relación directa con la cantidad de suelo perdido (Renard *et al.*, 1997), acción que se vería aumentada con una mayor frecuencia y duración de las precipitaciones.

Con respecto a la cobertura vegetal, ésta protege al suelo de la erosión, ya que intercepta las gotas de lluvia, absorbiendo la energía cinética de estas sin que causen desprendimiento de partículas del suelo (Cuevas *et al.*, 2004). Además, hay muchos otros procesos que interactúan entre las plantas y el suelo que afectan la erosión, haciendo disminuir la pérdida de suelo, y que según Lal (1988), podrían resumirse en:

- El ligamiento físico del suelo con tallos y raíces.
- La unión electroquímica y de nutrientes entre la raíz y el suelo.
- La disminución del escurrimiento por la acción de los tallos, cañas, hojas y el mantillo de material orgánico.
- La infiltración a través de los canales de raíces.

- La mejor estructura y retención de agua, a consecuencia del aumento del contenido de materia orgánica.
- El incremento de la fauna y la actividad biológica que promueve una mejor estructura del suelo.

Un mejor crecimiento vegetativo, y en consecuencia una mejor protección del suelo, podrían tener directos beneficios económicos en términos de rendimientos y producción de cultivos. Sin embargo, la presencia de vegetación tiende a retener el agua de lluvia, lo que permite que se alcance un grado elevado de saturación en el suelo de los taludes, predisponiéndolo hacia una falla por deslizamiento en cualquier momento en que se presente una lluvia de suficiente duración que termine por saturarlo (Schwab *et al*, 1993).

Además, algunos investigadores han estudiado y demostrado efectos ambivalentes en el uso de cubiertas vegetales, en donde, bajo ciertas condiciones, desencadenan o aceleran procesos erosivos, debido a la compleja interacción entre la vegetación, la pendiente, el tipo de suelo y la erosión (Stocking, 1988). Al respecto, De Ploey *et al* (1974) determinaron que praderas con más de 8 grados de pendiente aumentan la tasa de erosión respecto al suelo desnudo, por un aumento en la turbulencia del flujo superficial del agua. También la intercepción del follaje produce un incremento del tamaño de las gotas, aumentando la energía cinética de éstas (Lam, 1978).

Elementos de la pendiente tales como la gradiente (inclinación), el aspecto (exposición), el largo y la configuración de la pendiente, también van a influir en la erosión de un área (Soil Survey Staff, 1993). La longitud de la pendiente tiene un efecto importante sobre el comportamiento del agua en el potencial de erosión (Casanova y Urra, 2000). El escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo son proporcionales a la longitud de la pendiente, ya que las pendientes largas llevan a una intensificación de la escorrentía, aumentando su volumen y causando así una erosión más seria. Un aumento del ángulo de la pendiente causa un aumento de la velocidad de escorrentía y con ello la energía cinética del agua causa una mayor erosión (FAO, 2000).

Una de las ideas más difundidas entre los ingenieros, es que un talud es más estable mientras menor sea su inclinación. Sin embargo, esta apreciación es sólo válida para taludes con inclinación menor de 50° (111 %) en donde se observa un beneficio importante al disminuir la gradiente del talud (Crespo Villalaz, 2005).

Por otra parte, la recomendación entregada por el SAG establece que los taludes perimetrales en sectores de extracción de áridos deben ser de 45%, por lo tanto, el gradiente de la pendiente será un aspecto importante en el diseño y posterior uso de técnicas de estabilización.

De lo anteriormente expuesto, se infiere la gran cantidad de factores a considerar durante el diseño y construcción de los taludes, así como también en el posterior uso de técnicas de estabilización (que pueden ser sistemas de protección basados en elementos vivos o inertes) que aseguren la protección del suelo ante agentes erosivos.

En la presente investigación se plantea que un sistema de protección basado en elementos vivos es más eficiente que un sistema basado en elementos inertes, además de ser autoregenerante, perdurar más en el tiempo y otorgar una continuidad más armónica con el paisaje original.

El objetivo general de este proyecto, financiado por la Universidad de Chile, fue evaluar la eficacia de la estabilización de taludes mediante técnicas que aseguren su protección ante agentes erosivos, para el caso de taludes que conectan una zona donde se explotaron áridos del subsuelo con un sector no alterado por la extracción.

MATERIALES Y MÉTODO

El estudio fue realizado en la Estación Experimental Agronómica Germán Greve Silva, ($33^{\circ} 28' \text{ LS} - 70^{\circ} 50' \text{ LO}$), perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la Comuna de Maipú, Región Metropolitana, ocupando el talud del sector límite entre el sitio de extracción de áridos y las áreas no aptas de explotación. Los análisis de las muestras obtenidas en terreno se realizaron en los Laboratorios de Riego y Física de Suelos de la misma Facultad. Las mediciones en terreno y los análisis de laboratorio se llevaron a cabo entre Agosto de 2006 y Junio de 2007.

La extracción de áridos se efectuó sobre suelos de la Serie Rinconada de Lo Vial, perteneciente a la Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Typic Xerochrepts (CIREN-CHILE, 1996), entre los años 2001 y 2004. La explotación, una vez repuesto el material suelo (escarpe), generó un desnivel de entre 2 y 2,5 m con el sitio no explotado.

Al inicio del estudio se procedió a realizar un levantamiento topográfico del sitio, para elegir el lugar que reuniera las condiciones óptimas para llevar a cabo el ensayo. Luego, sobre el área del talud, se procedió a dar los dos gradientes de pendiente a estudiar, por medio de marcos de madera, los cuales se situaban sobre el talud original, obteniendo la inclinación requerida por medio de un nivel de carpintero, que indicaba los lugares en donde era necesario cortar o rellenar con suelo (Figura 1).



Figura 1. Diseño de los taludes, sector con gradiente 1:2,25.

Luego se construyeron 24 parcelas (4 tratamientos, 2 gradientes de pendiente y 3 repeticiones) de 4 metros de ancho, a las que se agregó un borde de 0,5 m a cada lado, con la cobertura del tratamiento respectivo. Los largos de las parcelas variaron ligeramente en función del gradiente, para incluir su efecto sobre la velocidad del escurrimiento superficial, bajo los distintos sistemas de protección. En la parte baja del talud se instaló un sistema de recolección de escorrentía y sedimentos (canaleta con bidones de 50L), y en la cabecera del talud se construyó una zanja de desviación para evitar aportes de sedimentos desde fuera de la zona de evaluación (Figura 2).

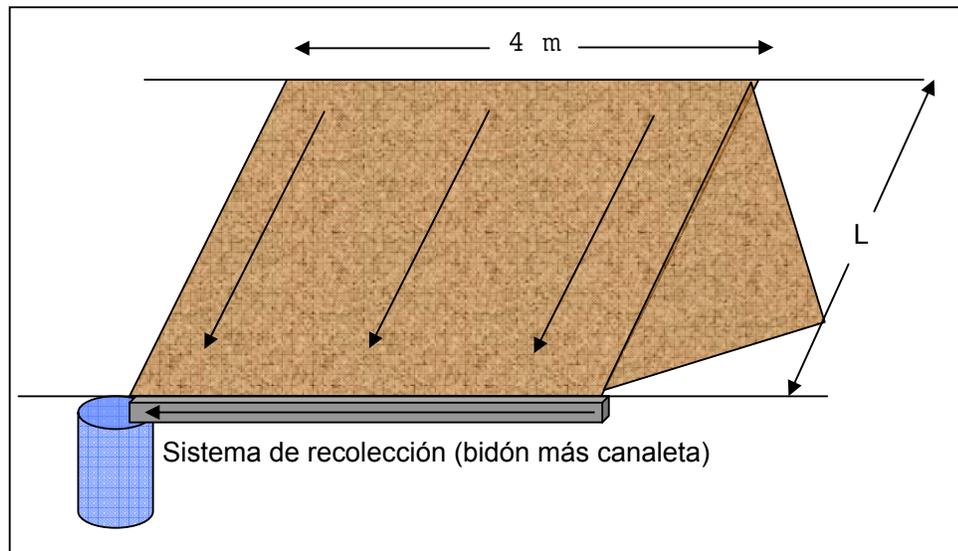


Figura 2. Diseño de las parcelas. El largo L varía para las dos gradientes de pendiente.

Una vez establecidas las dos gradientes, se implementaron las coberturas, resultando en los tratamientos presentados en el Cuadro 1:

Cuadro 1: Tratamientos de cobertura. En la gradiente, v:h es la relación vertical: horizontal.

	Cobertura	Gradiente (v:h)
T0	Testigo, suelo con vegetación espontánea	1:1; 1:2,25
T1	Doca (<i>Carpobrotus sp.</i>)	1:1; 1:2,25
T2	Residuo de maíz (<i>Zea mays L.</i>) entero	1:1; 1:2,25
T3	Grava, con aplicación de herbicida	1:1; 1:2,25

Los tratamientos descritos en el Cuadro 1 contemplan dos taludes para los sistemas de protección propuestos. Éstos son talud 1:1 y talud 1:2,25, correspondiendo este último al recomendado por el SAG para taludes perimetrales, construidos después de la reposición del suelo, en áreas de extracción de áridos, que indica que deben tener una pendiente de 45% ó 24° de inclinación (Ruiz, 2005). En el caso del talud 1:1, equivalente a una inclinación de 100%, se plantea la cobertura, ya sea de tipo inerte o viva, esta última espontánea o cultivada, como complemento a las recomendaciones actuales.

La disposición final de las parcelas, presentada en la Figura 3, consideró un diseño de dos ensayos (dos taludes) con los tratamientos dispuestos completamente al azar en bloques continuos (estructura factorial 2 x 4).

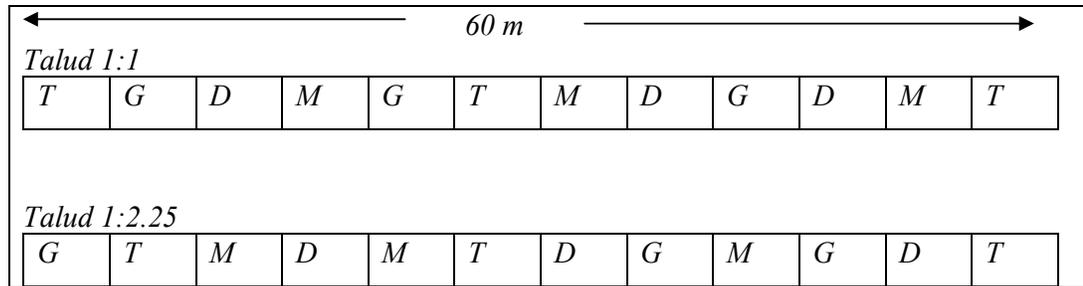


Figura 3: Disposición final de las parcelas con coberturas Testigo (T), Grava (G), Doca (D) y Residuo de maíz (M). Los taludes 1:1 y 1: 2,25 son contiguos.

Para el establecimiento de las coberturas vivas y para simular las lluvias artificialmente, se instaló un sistema de riego por aspersión, que constaba de dos sectores, ambos con dos laterales de 60 metros cada una, ubicadas paralelamente en la parte superior e inferior de las parcelas; cada lateral tenía 11 aspersores, separados a 6 m (Figura 4).



Figura 4. Instalación del sistema de riego, frente al talud 1:1.

Para el Tratamiento 1, las plantas de doca se establecieron a una densidad de cuatro plantas por metro lineal, con hileras perpendiculares a la gradiente, distanciadas a 30 cm entre sí. En el tratamiento 2, la cobertura de caña de maíz se aplicó en dosis equivalente a 6 Mg ha^{-1} , buscando un mínimo de 90% de cobertura, mientras que para el tratamiento 3, con la grava se buscó un mínimo de cobertura del 70%.

En estos dos tratamientos (T2 y T3) fue necesaria la aplicación de un herbicida (glifosato) para mantener las cubiertas sin el crecimiento de malezas que pudieran afectar las evaluaciones; mientras que el T1 se mantuvo limpio por medio de un desmalezamiento manual, para no afectar el crecimiento de la doca. En el tratamiento T0 (testigo), se mantuvo solo la vegetación espontánea, a la que se le realizó un corte con desbrozadora para evitar la producción de semillas.

La evaluación del efecto protector de las cubiertas se realizó en función de lluvias simuladas mediante el sistema de riego por aspersion, aunque también se evaluó algunos eventos de precipitaciones naturales. Se instalaron dos pluviómetros que registraron los montos de estas precipitaciones.

Se realizaron cinco lluvias simuladas, obteniendo cinco diferentes intensidades de precipitación, en un rango de 1,43 a 1,87 mm durante 1 hora, estando todas estas en el rango de intensidades medias y máximas de precipitaciones naturales de un año normal (López, 2005), luego de las cuales se procedió a tomar tres alícuotas desde el sistema de recolección de escorrentía y sedimentos. El contenido de sedimentos en la escorrentía, tanto para mediciones de precipitaciones naturales como artificiales, se determinó mediante una variante del método indicado por Da Veiga y Do Prado (1993) sometiendo las alícuotas del escurrimiento a un secado a 70° C por 2 a 3 días, determinando por gravimetría la masa de partículas desprendidas por erosión.

Para apoyar los resultados, se tomaron muestras de suelo en todas las parcelas, con el objeto de obtener el contenido de agua antes de cada lluvia artificial, y así detectar posibles diferencias atribuibles a la humedad del suelo al momento de iniciar las precipitaciones.

También se realizó una caracterización física del suelo del talud, que incluyó densidad aparente por el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002) y textura con el hidrómetro de Bouyoucos (Gee y Or, 2002), además de mediciones de tensioinfiltrometría (White *et al.*, 1992) en cada una de las parcelas, para evaluar posibles diferencias de propiedades que determinan la erodabilidad y conductividad hidráulica (K) entre los suelos de cada tratamiento. Para la determinación de la densidad aparente se tomaron dos muestras de 0 a 10 cm de profundidad por parcela, en ambos gradientes de pendiente; para la determinación de textura se tomaron seis muestras por talud, a la misma profundidad.

En la determinación de la infiltración y estimación de la conductividad hidráulica, se utilizó un tensioinfiltrómetro de 20 cm de diámetro. Las mediciones se realizaron en las dos gradientes de pendientes (1:1 y 1:2,25), en todas las parcelas de estudio. Se midió la tasa de infiltración con el equipo cada 30 segundos, hasta alcanzar el estado de equilibrio dinámico. Las presiones de suministro o tensiones (-10, -6, -4, -2 y -1 hPa) se aplicaron en forma ascendente para evitar el efecto de histéresis (Reynolds y Elrick, 1991).

Se obtuvieron las velocidades de infiltración para cada tratamiento, las que asociadas a las respectivas tensiones, permitieron estimar la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), extrapolando la velocidad de infiltración a la tensión cero.

La evaluación del porcentaje de cobertura de los distintos tratamientos, se realizó mediante un método de análisis fotográfico, donde las imágenes fueron procesadas con el programa computacional Image J.

Las comparaciones (escorrentía, sedimentos, porcentaje de cobertura) se hicieron entre tratamientos, en base a áreas de igual tamaño, para ambas condiciones de pendiente. Se determinaron los parámetros estadísticos básicos (media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación). Los resultados de tensioinfiltrometría, escorrentía, producción de sedimentos y cobertura fueron sometidos a un análisis de varianza, para detectar posibles diferencias significativas entre tratamientos y entre taludes, aplicando la prueba de comparación múltiple de Tukey ($P \leq 0,05$) cuando fue necesario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas del suelo

Densidad aparente y textura

Los resultados de densidad aparente obtenidos por el método del cilindro indicaron que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de esta propiedad para los suelos de cada una de las parcelas de estudio (Cuadro 2), por lo tanto la densidad aparente no sería un factor diferenciante en la generación de sedimentos y escorrentía para los diferentes tratamientos.

Para la textura (Cuadro 3), los valores obtenidos mostraron que los suelos de las parcelas de ambos taludes presentan similares cantidades de arena, limo y arcilla, presentando todas ellas clase textural franco arenosa.

Cuadro 2. Densidad aparente (Da) promedio, desviación estándar (DS) y coeficiente de variación (CV) de los tratamientos para ambos gradientes de pendiente

Tratamiento	Da (Mg m ⁻³)	DS	CV (%)
Talud 1: 2,25			
T0	1,31 a	0,04	2,86
T1	1,30 a	0,03	2,34
T2	1,29 a	0,05	3,62
T3	1,32 a	0,07	5,09
Talud 1:1			
T0	1,33 a	0,05	3,71
T1	1,34 a	0,07	4,92
T2	1,31 a	0,06	4,47
T3	1,35 a	0,05	3,54

Cuadro 3. Contenido promedio (%) de arena (a), arcilla (A) y limo (L) de los tratamientos para ambos gradientes de pendiente; entre paréntesis el coeficiente de variación (%).

Gradiente Talud	a	A (%)	L	Clase textural
1:1	71,5 (4,2)	10,3 (19,9)	18,1 (6,1)	Fa
1:2,25	70,3 (3,1)	10,1 (15,6)	19,6 (3,6)	Fa

Las propiedades estructurales y texturales, al encontrarse el ensayo en un sitio homogéneo en cuanto al suelo, no serían contrastantes y no estarían afectando la escorrentía y el arrastre de sedimentos, según la ecuación de Wischmeier (McKyes, 2000).

Tensioinfiltrometría

Con los datos de tiempos parciales medidos a las distintas tensiones, se realizó un

gráfico de Infiltración acumulada vs. Tiempo, tal como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 5.

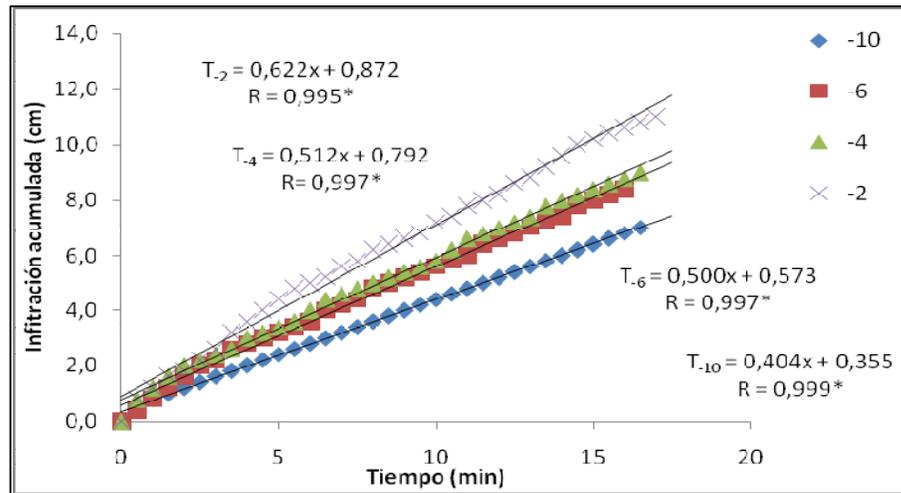


Figura 5. Infiltración acumulada del tratamiento 3 (grava), repetición 1, sector 1:2,25, para distintas presiones de suministro (-10, -6, -4 y -2 hPa). Los ajustes son significativos al 95%.

Luego, con los datos de las repeticiones asociadas a las tensiones -4, -6 y -10 hPa, (no se consideraron las tensiones más bajas, -2 y -1 hPa, ya que se observó gran escurrimiento superficial al momento de las mediciones), se obtuvo un gráfico de las velocidades de infiltración. Con un ajuste exponencial (Figura 6), se determinó la conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs}), extrapolando la velocidad de infiltración a la presión de suministro cero.

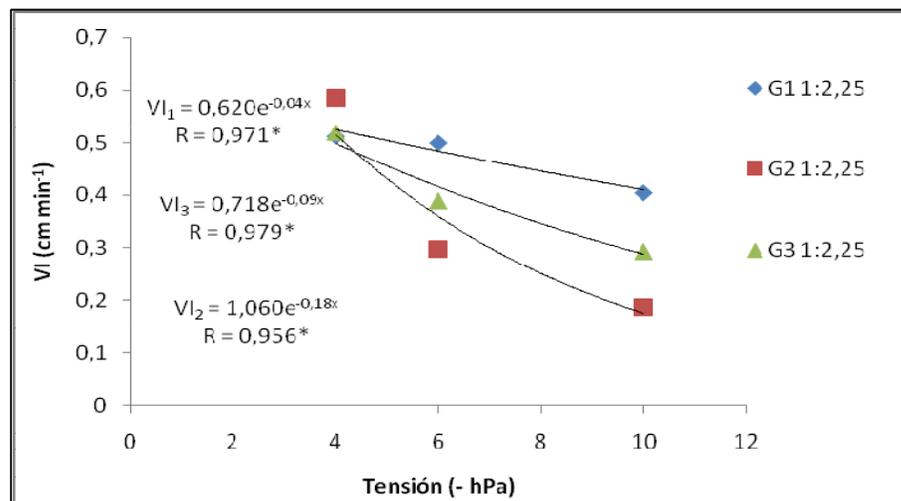


Figura 6. Velocidad de Infiltración, para las tres repeticiones del tratamiento 3 (grava, G1, G2 y G3), sector 1:2,25. Los ajustes son significativos al 95%.

Se ha de distinguir la conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs}) de la conductividad hidráulica determinada en laboratorio, K_s ; ya que en la primera, el aire atrapado en el espacio poroso podría obstruir el flujo del agua, subestimándose así la

conductividad hidráulica del suelo (Reynolds *et al.*, 1983). El Cuadro 4 presenta los resultados de las mediciones de campo.

Cuadro 4. Conductividad hidráulica saturada K_{fs} (cm min^{-1}), para ambos gradientes de pendiente. Letras distintas acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	K_{fs} (cm min^{-1}) sector 1:2,25			K_{fs} (cm min^{-1}) sector 1:1		
	Media	DS	CV (%)	Media	DS	CV (%)
T0 (Test.)	1,05 a	0,29	27,72	0,81 a	0,51	63,39
T1 (Doca)	0,67 a	0,28	42,14	0,83 a	0,16	19,32
T2(Res.Maíz)	0,97 a	0,18	18,81	0,43 a	0,04	8,51
T3 (Grava)	0,80 a	0,11	19,18	0,87 a	0,52	44,87

Los valores de conductividad hidráulica entregados en el Cuadro 4, muestran que no hay diferencias significativas entre los distintos tratamientos. Debido a que este parámetro no varió con ninguno de los factores (pendientes y coberturas) es posible concluir que no afecta las comparaciones de escorrentía y sedimentos entre los tratamientos, y que por lo tanto, se está trabajando con un suelo con propiedades hidráulicas homogéneas.

Noguer (2005), evaluando también K_{fs} en suelos de la Serie Rinconada de Lo Vial con distintas gradientes de pendiente (0, 15, 20 y 25 %), obtuvo como resultado valores mucho más bajos a los de este estudio, con conductividades entre $0,02 \text{ cm min}^{-1}$ para gradiente 0% y $0,007 \text{ cm min}^{-1}$ para gradiente 25%, mostrando claramente una relación inversa entre conductividad hidráulica y gradiente de pendiente. En ese sentido, los valores obtenidos en este estudio no siguieron esa tendencia, lo que se explicaría por la disturbación que sufrió el suelo, por la acción de la extracción de áridos y por las labores realizadas al momento de dar la pendiente necesaria a los taludes para la investigación.

Contenido de agua

Además de las propiedades mencionadas anteriormente, se midió el contenido de agua

en el suelo antes de cada simulación de precipitaciones (Cuadro 5). En este sentido, Hudson (1997) destaca que el contenido inicial del agua del suelo es relevante en la tasa de erosión, pues, afecta la velocidad de saturación del suelo.

Cuadro 5. Contenido de agua (W%) al momento del inicio de las precipitaciones artificiales, para ambos gradientes de pendiente.

Tratamiento	W (%) sector 1:2,25			W (%) sector 1:1		
	Media	DS	CV (%)	Media	DS	CV (%)
1,43 mm h ⁻¹						
T0 (Test.)	3,13	0,76	24,44	2,34	1,03	43,80
T1 (Doca)	3,10	0,36	11,75	3,02	0,65	21,59
T2(Res.Maíz)	2,66	0,53	20,12	1,90	0,23	12,05
T3 (Grava)	5,05	1,02	20,21	2,04	0,53	25,83
1,54 mm h ⁻¹						
T0 (Test.)	2,45	0,22	9,12	2,25	0,39	17,44
T1 (Doca)	2,39	0,37	15,28	2,59	0,93	35,86
T2(Res.Maíz)	2,39	0,30	12,64	1,74	0,20	11,79
T3 (Grava)	3,14	0,64	20,37	3,46	0,57	16,56
1,65 mm h ⁻¹						
T0 (Test.)	2,87	0,85	29,6	1,97	0,76	38,69
T1 (Doca)	3,24	0,19	5,96	2,34	0,80	34,35
T2(Res.Maíz)	2,69	0,49	18,10	1,70	0,46	27,13
T3 (Grava)	3,86	0,81	21,05	3,46	0,34	12,98
1,8 mm h ⁻¹						
T0 (Test.)	2,44	0,48	19,51	2,54	0,17	6,57
T1 (Doca)	2,41	0,33	13,76	2,17	0,49	22,52
T2(Res.Maíz)	2,62	0,31	11,8	2,21	0,38	17,14
T3 (Grava)	3,58	0,28	7,77	3,22	1,16	36,06
1,87 mm h ⁻¹						
T0 (Test.)	2,48	0,35	14,16	2,02	0,39	19,16
T1 (Doca)	2,24	0,25	11,34	1,84	0,22	12,14
T2(Res.Maíz)	2,47	0,21	8,50	2,08	0,47	12,66
T3 (Grava)	2,83	0,31	10,79	2,24	0,14	6,42

Se observa una gran homogeneidad en el contenido de agua inicial, en la mayoría de los tratamientos, además, todos ellos presentaron valores bajos en el contenido de agua inicial, por lo tanto este factor tampoco sería importante en el establecimiento de diferencias en la generación de sedimentos y escorrentía entre los tratamientos, para las diferentes intensidades de precipitación.

Cobertura

La evaluación del porcentaje de cobertura se realizó en tres tiempos desde el establecimiento hasta el término del ensayo. El talud con pendiente 1:2,25, presentó una evolución de las coberturas variable en el tiempo (Figura 7 y 8). La doca aumentó su cobertura desde un 45% aproximado al momento del establecimiento de las plantas, a un 70% aproximado en diciembre, momento en que se realizaron las últimas mediciones. En el mismo transcurso de tiempo, la cobertura de gravas se mantuvo prácticamente estable, mientras que las coberturas testigo y residuos de maíz disminuyeron su porcentaje. En el testigo, debido a que muchas especies que surgieron gracias a las lluvias invernales, y que se incluían en la cobertura inicialmente evaluada, fueron desapareciendo por la proximidad de la estación seca y no prosperaron con las lluvias generadas artificialmente. El residuo de maíz bajó su porcentaje de cobertura, puesto que éste comenzó a descomponerse, debido a las condiciones de alta temperatura y humedad que se dieron al momento de las evaluaciones.



Figura 7. Imágenes de los 4 tratamientos, en el talud 1:2,25 tomadas el 15 de diciembre de 2006

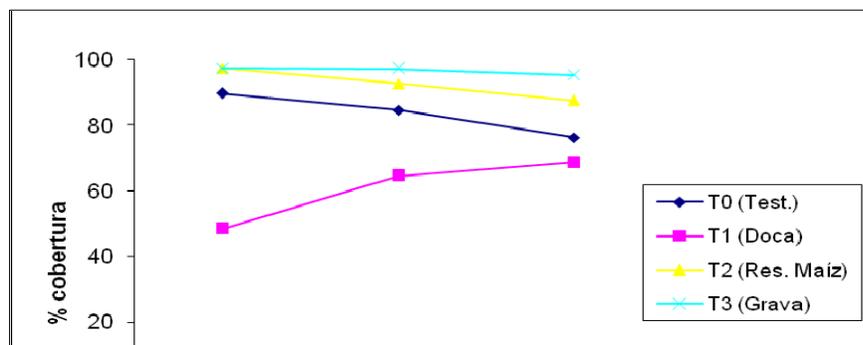


Figura 8. Evolución de porcentajes de cobertura para los distintos tratamientos, sector 1: 2,25.

La construcción del talud 1:1 dejó al descubierto el fragipán característico de la Serie Rinconada de Lo Vial, lo que dificultó el establecimiento vegetal, tanto de la doca como de la vegetación espontánea del tratamiento testigo, donde solo se establecieron las plantas en la parte superior e inferior del talud, por encima y por debajo del fragipán (Figura 9 y 10). El tratamiento con grava no superó una cobertura de 60%, debido a que por la alta pendiente del talud el ordenamiento fue inestable y constantemente ocurrió deslizamiento de las gravas.



Figura 9. Imágenes de los 4 tratamientos, en el talud 1:1, al 15 de diciembre de 2006.

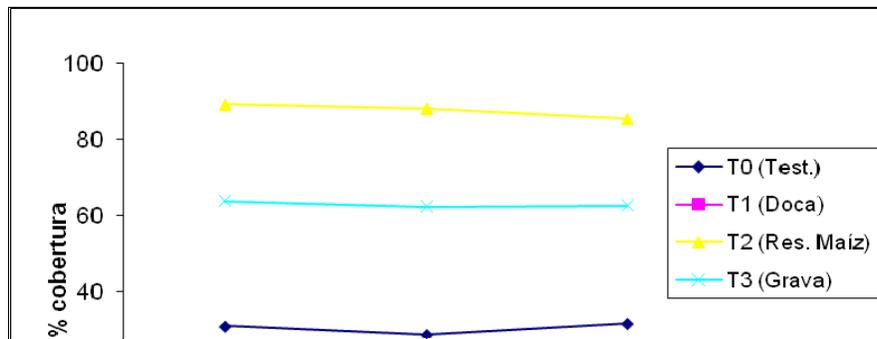


Figura 10. Evolución de porcentajes de cobertura para los distintos tratamientos, sector 1: 1.

La cobertura de residuo de maíz también resultó inestable, ocurriendo deslizamientos en reiteradas ocasiones, por lo que constantemente se tuvo que reubicar el residuo para lograr mayor cobertura al igual que con la cobertura de gravas. Además de esto, también ocurrió descomposición del residuo, tal como en el sector 1:2,25.

Escorrentía y sedimentos.

Se evaluaron cinco precipitaciones artificiales, generadas con el sistema de riego. Las diferentes intensidades de precipitación fueron equivalentes a 1,43, 1,54, 1,65, 1,80 y 1,87 mm durante 1 hora. Las figuras 11 y 12 presentan el porcentaje de escurrimiento, para los taludes 1:2,25, y 1:1 respectivamente, asociados a las diferentes precipitaciones.

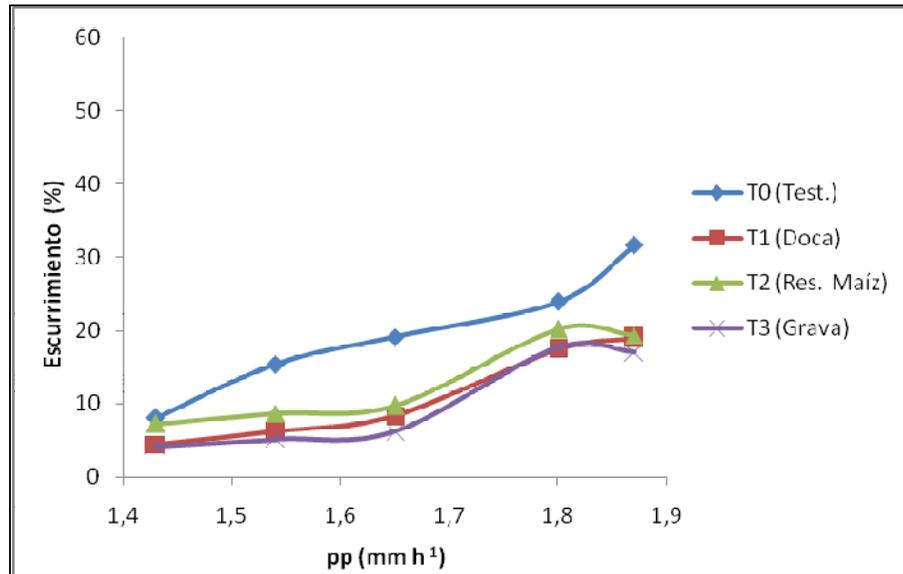


Figura 11. Escurrimiento superficial generado por diferentes intensidades de precipitación, por tratamiento, para el talud 1:2,25.

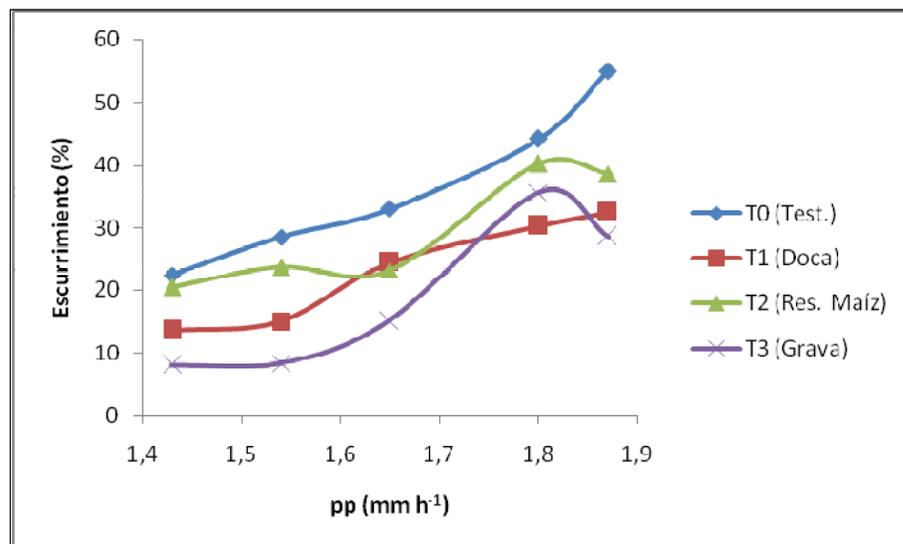


Figura 12. Escurrimiento superficial generado por diferentes intensidades de precipitación, por tratamiento, para el talud 1:1.

Los porcentajes de escurrimiento son menores en el talud 1:2,25 en un amplio rango de intensidad de precipitación. Cuando el talud es mayor (Figura 12) el testigo mantiene el mayor nivel de escorrentía, pero las otras coberturas presentan un comportamiento

irregular, debido a la alta variabilidad inducida por una pendiente del 100%. Para el talud 1:2,25 (Figura 11) las coberturas alternativas presentan menos de 20% de escurrimiento y aseguran hasta un 50% de mayor protección respecto al testigo con vegetación espontánea, resultados similares a los obtenidos por Meyer y Mannering (1971), en estudios de coberturas vegetales en control de erosión.

Las Figuras 13 y 14 presentan la cantidad de sedimentos arrastrados en función de las intensidades de precipitación.

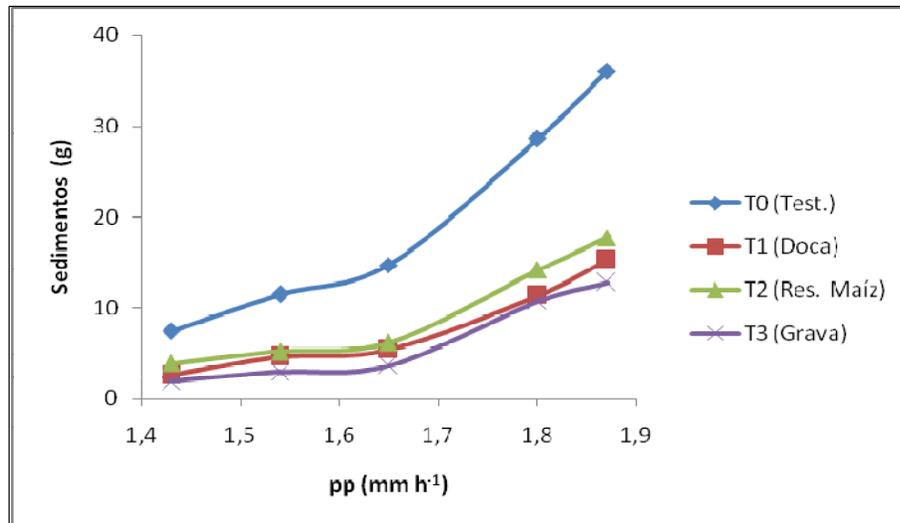


Figura 13. Sedimentos generados por diferentes intensidades de precipitación, por tratamiento, para el talud 1:2,25.

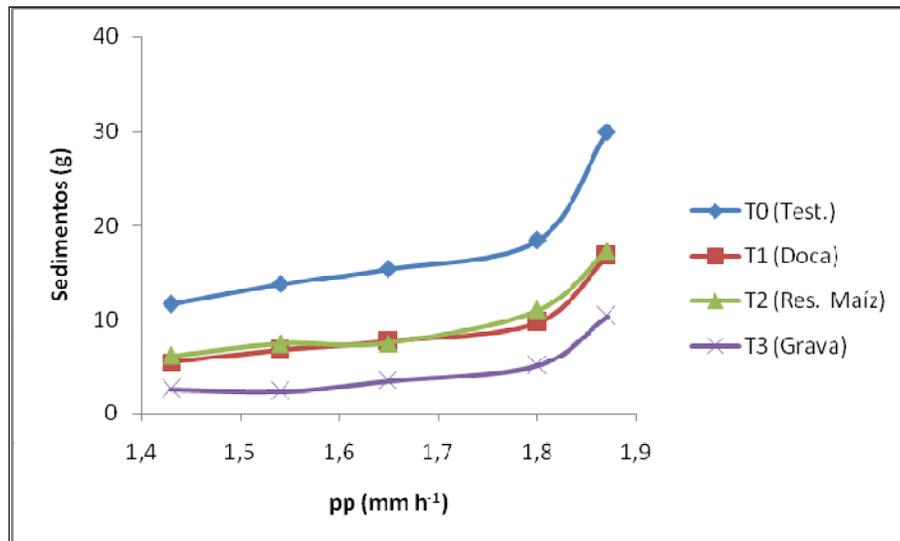


Figura 14. Sedimentos generados por diferentes intensidades de precipitación, por tratamiento, para el talud 1:1.

Al analizar los sedimentos generados por los tratamientos, en concordancia con los valores del escurrimiento, el testigo presenta la mayor cantidad de erosión, independiente del gradiente, mientras que la cobertura de gravas asegura la mayor

protección del suelo.

Existe una intensidad de precipitación crítica en el gradiente 1:2,25 (Figura 13), mayor a $1,65 \text{ mm h}^{-1}$, a partir de la cual aumenta la tasa de generación de sedimentos, tanto así que para las intensidades más altas la cantidad de material arrastrado es mayor en este talud que en el talud con gradiente 1:1. Para este último, el aumento en la tasa de generación de sedimentos ocurre con precipitaciones mayores a $1,8 \text{ mm h}^{-1}$. Esto no es de extrañar, si se piensa que antes de evaluar ocurrieron precipitaciones naturales que arrastraron sedimentos finos, lo que generó un proceso de “estabilización”. Así, en el talud con gradiente mayor (1:1) se arrastraron más partículas, dejando aquellas que resistieron la intensidad de las precipitaciones naturales, siendo las precipitaciones artificiales mayores a $1,8 \text{ mm h}^{-1}$ las que pusieron en movimiento partículas de mayor tamaño. Por otra parte, en el talud 1:1 se encuentra expuesto el fragipán, que posee agentes cementantes de baja solubilidad que estabilizan el material del talud.

Las comparaciones entre tratamientos para las distintas intensidades de precipitación se presentan en los Cuadros 6 y 7, en cuyo caso los sedimentos están dados en base a kg ha^{-1} .

Cuadro 6. Porcentaje de escurrimiento y masa de sedimentos originados en el talud 1:2.25 con distintas intensidades de precipitación. Letras distintas acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	Escurrimiento (%)			Sedimentos (kg ha^{-1})		
	Media	DS	CV (%)	Media	DS	CV (%)
$1,43 \text{ mm h}^{-1}$						
T0 (Test.)	8,08 b	0,44	5,49	3,75 b	1,08	28,76
T1 (Doca)	4,38 a	0,74	16,88	1,31 a	0,17	12,67
T2(Res.Maíz)	7,22 b	0,74	10,24	1,97 a	0,29	14,79
T3 (Grava)	4,14 a	1,25	30,10	0,96 a	0,23	23,63
$1,54 \text{ mm h}^{-1}$						
T0 (Test.)	15,33 b	3,79	24,73	5,84 b	1,77	30,28
T1 (Doca)	6,15 a	1,01	16,37	2,34 a	0,52	22,04
T2(Res.Maíz)	8,68 a	0,69	7,91	2,62 a	0,51	19,51
T3 (Grava)	5,16 a	1,33	25,80	1,47 a	0,42	28,33
$1,65 \text{ mm h}^{-1}$						
T0 (Test.)	19,15 b	5,46	28,51	7,48 b	2,25	30,08
T1 (Doca)	8,31 a	0,62	7,41	2,74 a	0,27	9,69
T2(Res.Maíz)	9,74 a	3,31	33,95	3,13 a	0,52	16,61
T3 (Grava)	6,20 a	0,39	6,24	1,84 a	0,35	18,77
$1,8 \text{ mm h}^{-1}$						
T0 (Test.)	23,97 b	1,41	5,88	14,52 b	2,29	15,76
T1 (Doca)	17,39 a	2,15	12,39	5,77 a	1,31	22,67
T2(Res.Maíz)	20,21ab	3,55	17,56	7,17 a	0,58	8,14
T3 (Grava)	17,67 a	1,81	10,26	5,45 a	0,31	5,68
$1,87 \text{ mm h}^{-1}$						
T0 (Test.)	31,62 b	2,31	7,30	18,29 b	1,33	7,26
T1 (Doca)	19,00 a	1,09	5,71	7,76 a	1,21	15,62
T2(Res.Maíz)	19,27 a	2,22	11,53	9,03 a	2,44	27,07
T3 (Grava)	17,01 a	2,52	14,83	6,49 a	1,91	29,36

Cuadro 7. Porcentaje de escurrimiento y masa de sedimentos originados en el talud 1:1 con distintas intensidades de precipitación. Letras diferentes acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	Escorrimento (%)			Sedimentos (kg ha ⁻¹)				
	Media	DS	CV (%)	Media	DS	CV (%)		
1,43 mm h ⁻¹								
T0 (Test.)	22,48	c	2,50	11,12	10,25	c	1,96	19,17
T1 (Doca)	13,61	b	1,64	12,03	4,82	b	4,82	13,46
T2 (Res.Maíz)	20,42	c	1,86	9,09	5,41	b	0,81	15,06
T3 (Grava)	8,05	a	0,62	7,69	2,27	a	0,56	37,63
1,54 mm h ⁻¹								
T0 (Test.)	28,56	d	0,66	4,00	12,18	c	2,86	20,75
T1 (Doca)	15,04	b	1,16	13,34	6,00	b	1,87	27,53
T2 (Res.Maíz)	23,80	c	0,69	5,00	6,56	b	0,16	2,10
T3 (Grava)	8,38	a	1,16	23,94	2,06	a	0,34	14,82
1,65 mm h ⁻¹								
T0 (Test.)	33,07	b	6,22	32,77	13,62	b	4,20	30,84
T1 (Doca)	24,49	ab	4,63	32,94	6,81	a	2,84	41,65
T2 (Res.Maíz)	23,24	ab	4,94	37,09	6,60	a	2,45	37,07
T3 (Grava)	15,20	a	2,35	26,96	3,08	a	1,85	43,93
1,8 mm h ⁻¹								
T0 (Test.)	44,25	c	4,92	11,11	16,32	c	2,02	12,37
T1 (Doca)	30,32	a	4,46	14,71	8,56	b	0,88	10,32
T2 (Res.Maíz)	40,31	bc	2,60	6,45	9,69	b	0,05	0,47
T3 (Grava)	35,64	ab	5,16	14,48	4,53	a	2,13	47,11
1,87 mm h ⁻¹								
T0 (Test.)	55,05	b	9,61	17,46	26,50	b	6,90	26,05
T1 (Doca)	32,50	a	7,40	22,76	14,87	a	3,98	26,77
T2 (Res.Maíz)	38,65	a	1,45	3,74	15,39	a	0,84	5,46
T3 (Grava)	28,63	a	0,71	2,48	9,13	a	1,32	14,49

Para el talud 1:2,25, los tratamientos con cobertura de residuo de maíz y doca presentaron valores muy similares en cuanto a la generación de sedimentos, mientras que el tratamiento con cobertura de gravas siempre obtuvo los valores más bajos en este aspecto, sin ser estadísticamente significativas las diferencias para con los dos tratamientos anteriormente mencionados. En el talud 1:1, estas mismas coberturas presentan diferencias significativas para algunas intensidades de precipitación. Además se observa que el tratamiento testigo es el que genera mayor cantidad de sedimentos, presentando siempre diferencias estadísticamente significativas comparadas con el resto de los tratamientos evaluados, independiente del gradiente de pendiente.

De los resultados obtenidos en el talud 1:1, el T2 (Res. Maíz) presentó la mayor cobertura entre todos los tratamientos (Fig. 8), y como ya se comentó, se presentaron dificultades para establecer el resto de las coberturas producto de la presencia del

fragipán. Sin embargo, el tratamiento T2, aún cuando presentó la mayor cobertura, presentó valores altos en escurrimiento y generación de sedimentos, lo que se puede explicar porque la cobertura de residuo de maíz no tiene un contacto continuo con el suelo del talud, a diferencia de la cobertura de gravas, ya que si bien el T2 cubre y protege al suelo del impacto de las gotas de agua, éstas llegan a la superficie del talud y las que no infiltran ganan nuevamente energía cinética al escurrir a lo largo del talud, generando arrastre de sedimentos (Lal, 1988).

En ambos taludes (1:1 y 1:2,25) el tratamiento T1 (Doca) presentó valores de sedimentos muy similares al tratamiento T2 (Res.Maíz) y mucho menores al tratamiento testigo (T0), aún cuando presentó un porcentaje de cobertura menor al de ambos tratamientos, por lo que se puede decir que cumple de mejor manera con el objetivo de asegurar la protección del suelo en taludes ante agentes erosivos. Sin embargo, el lento crecimiento que presentó, evidenciado por el lento aumento en el porcentaje de cobertura, hace que sea recomendable una mayor densidad de plantación o establecerla de manera combinada con otro método de cobertura (por ejemplo combinado con residuo de maíz), para lograr mejores resultados.

Otra explicación a los mejores resultados obtenidos por el T1 en comparación al T2 sería que, si bien estas dos coberturas estarían entregando materia orgánica (M.O) al suelo del talud, la alta relación C/N del residuo de maíz hace que el aporte de M.O y su efecto estabilizador sea lento (Forján, 2002), en contraste con la interacción de las raíces de las plantas de doca, que además del ligamiento físico de éstas con el suelo, estaría aportando M.O. de manera más rápida y directa al suelo del talud, debido a su menor relación C/N y su distribución dentro del perfil de suelo.

Por otra parte, el tratamiento T3 (Grava) fue el más efectivo en controlar tanto el escurrimiento como la cantidad de sedimentos generados, en ambos gradientes de pendiente. Además presentó un porcentaje de cobertura cercano al 100% muy estable durante todo el ensayo en el talud 1:2.25, evidenciando ser el tratamiento más eficiente en el control de erosión en taludes.

Dados estos resultados, sería recomendable realizar evaluaciones posteriores a las hechas en este estudio, para comparar el efecto protector de la cobertura de gravas con la cobertura de doca, cuando ambas presenten porcentajes de cobertura similares. Esto debido a que en otros estudios de coberturas protectoras de suelos, hay muchos autores que aseguran obtener los mejores resultados con coberturas vegetales (Stocking, 1988), aún cuando otros, con visión más ingenieril, aseguran que este tipo de coberturas no son eficientes en el control de la erosión, mostrando mejores resultados en coberturas inertes como gravas, cemento, geotextiles, etc. (Berry and Reid, 1993).

Existe una alta dependencia del sedimento generado por los distintos tratamientos en relación al porcentaje de escorrentía para las diferentes intensidades de precipitación, lo que se demuestra a modo de ejemplo, en las figuras 15 y 16, las que presentan las dos

intensidades de precipitación extremas usadas en esta investigación.

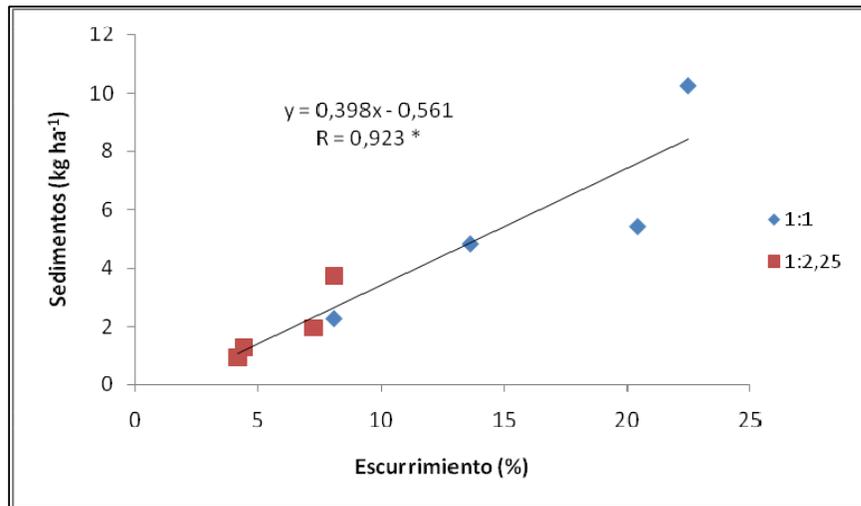


Figura 15. Dependencia del sedimento generado por los ensayos en relación al porcentaje de escurrimiento para una precipitación de $1,43 \text{ mm h}^{-1}$. El ajuste es significativo al 95%

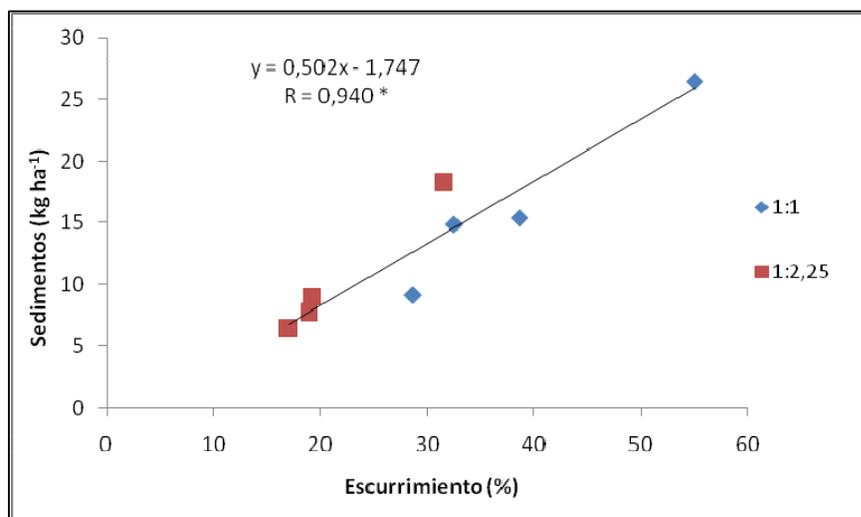


Figura 16. Dependencia del sedimento generado por los ensayos en relación al porcentaje de escurrimiento para una precipitación de $1,87 \text{ mm h}^{-1}$. El ajuste es significativo al 95%

Ambos gradientes de pendiente se ordenan en la misma tendencia lineal, generando un continuo al aumentar el talud. Sin embargo, las intensidades intermedias no sufren cambios importantes en la tasa de generación de sedimentos en función del porcentaje de escurrimiento.

Precipitaciones naturales

Durante el período de estudio ocurrieron cuatro eventos de precipitación importantes (63, 46, 21 y 9,86 mm), ocurriendo las dos primeras cuando el ensayo no estaba plenamente establecido. La precipitación de 21 mm corresponde a dos lluvias de 8,27 y 12,7 mm, separadas por un receso de 5 horas, pero por ocurrir dentro del mismo día (15 de Agosto) se considera como un evento único. El día 28 de Agosto ocurrió una precipitación de 9,86 mm y tuvo una duración de 24 horas. Los Cuadros 8 y 9 presentan el porcentaje de escurrimiento y la cantidad de sedimentos arrastrados, para los taludes 1:2,25 y 1:1, respectivamente, asociados a la precipitación de 21 mm, mientras que los cuadros 10 y 11 presentan los datos asociados a la lluvia de 9,86 mm.

Cuadro 8. Porcentaje de escurrimiento y masa de sedimentos originados en el talud 1:2,25 con una precipitación natural de 21 mm ocurrida el 15 de Agosto. Letras distintas acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	Escurrecimiento			Sedimentos		
	Media (%)	DS	CV (%)	Media (g)	DS	CV (%)
T0 (Test.)	3,14 a	0,48	15,4	8,17 a	1,01	16,4
T1 (Doca)	4,27 a	1,33	31,2	12,27 a	4,44	36,2
T2 (Res. Maíz)	4,43 a	0,50	11,4	26,22 b	5,71	21,8
T3 (Grava)	3,46 a	1,24	35,8	7,18 a	2,58	35,9

Cuadro 9. Porcentaje de escurrimiento y masa de sedimentos originados en el talud 1:1 con una precipitación natural de 21 mm ocurrida el 15 de Agosto. Letras distintas acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	Escurrecimiento			Sedimentos		
	Media (%)	DS	CV (%)	Media (g)	DS	CV (%)
T0 (Test.)	7,73 a	1,22	15,7	7,77 ab	2,67	34,4
T1 (Doca)	3,93 b	1,29	32,7	14,73 a	11,03	74,9
T2 (Res. Maíz)	4,35 b	1,06	24,4	4,54 ab	2,83	62,4
T3 (Grava)	2,32 b	1,05	45,5	2,41 b	1,66	69,0

A pesar de existir gradientes de pendiente elevadas, el porcentaje de escurrimiento es bajo en todos los tratamientos, y se traduce en menos de 1,65 mm para una precipitación de 21 mm. Aún así, en el talud 1:1 el testigo presentó un escurrimiento significativamente superior a los otros tratamientos, siendo que sólo el T2 (Res. Maíz) presentaba una cobertura cercana al 100%. El resto de los tratamientos, como ya se comentó, presentó dificultades para establecer la cobertura en el sector del talud que presenta fragipán.

El tratamiento T3 (Grava) fue el más efectivo en controlar tanto el escurrimiento como la cantidad de sedimentos generados, al igual que bajo las precipitaciones artificiales, dado que presentaba una cobertura alta al momento de instalar el ensayo y al momento de las precipitaciones naturales.

El tratamiento T1 (Doca) tuvo una limpieza manual de malezas, por lo que el suelo se encontraba suelto al momento de caer la lluvia, de ahí los altos niveles de sedimentos generados en ambos gradientes de pendiente. En el talud 1:2,25, el T2 (Res. Maíz)

generó una alta cantidad de sedimentos, posiblemente asociada a una condición experimental, ya que se evidenció tránsito animal y humano en superficie con remoción de parte del material de cobertura. Al considerar la cantidad de sedimentos en kg ha^{-1} , se evidencia nuevamente la eficiencia del T3 (grava) como controlador de la erosión en taludes (Figura 17).

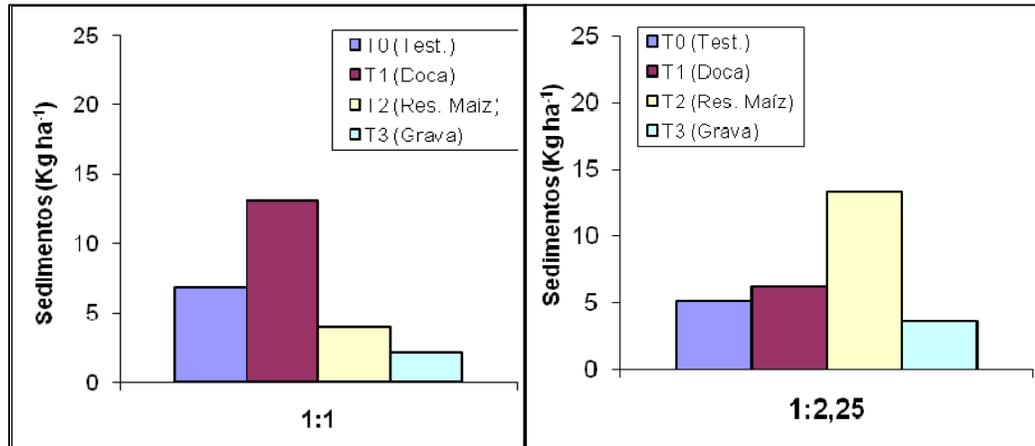


Figura 17. Sedimentos (Kg ha^{-1}) generados por una precipitación de 21 mm en 24 h. para las distintas coberturas instaladas en taludes 1:1 y 1:2,25.

Como ya se comentó, los altos valores de sedimentos generados por el T1 (Doca), especialmente en el talud 1:1, se asocian a la baja cobertura y a la condición suelta del suelo, como consecuencia del control de malezas. El tratamiento T2 (Res. Maíz) en el talud 1:2,25 sufrió tránsito animal, lo que contribuyó a los altos niveles de sedimentos. Si no se consideran estos dos tratamientos, existe una buena correlación entre el porcentaje de escurrimiento y el nivel de sedimentos generados por los tratamientos (Figura 18)

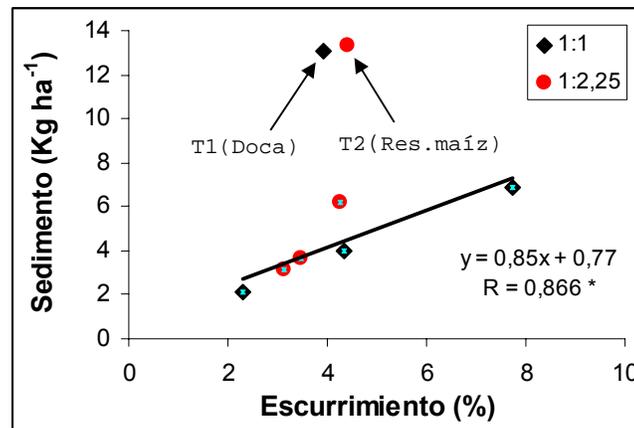


Figura 18. Dependencia del sedimento generado por las parcelas en relación al porcentaje de escurrimiento para una precipitación de 21 mm. El ajuste es significativo al 95%, excluidos los dos datos fuera de tendencia.

Cuadro 10. Porcentaje de escurrimiento y masa de sedimentos originados en el talud 1:2,25 con una precipitación natural de 9,86 mm ocurrida el 28 de Agosto. Letras distintas acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	Esguerrimiento			Sedimentos		
	Media (%)	DS	CV (%)	Media (g)	DS	CV(%)
T0 (Test.)	5,41 c	0,77	14,3	4,63 b	1,34	28,9
T1 (Doca)	2,23 a	1,19	53,3	3,02 ab	1,23	40,8
T2 (Res. Maíz)	3,78 b	0,30	7,9	2,50 a	0,14	5,8
T3 (Grava)	3,26 ab	0,30	9,1	2,36 a	0,89	37,8

Cuadro 11. Porcentaje de esguerrimiento y masa de sedimentos originados en el talud 1:1 con una precipitación natural de 9,86 mm ocurrida el 28 de Agosto. Letras distintas acusan diferencias entre tratamientos (Tuckey, $P \leq 0,05$).

Tratamiento	Esguerrimiento			Sedimentos		
	Media (%)	DS	CV (%)	Media (g)	DS	CV(%)
T0 (Test.)	5,53 b	1,81	32,8	4,79 b	0,08	15,7
T1 (Doca)	4,55 ab	1,69	37,3	3,39 ab	1,22	35,9
T2 (Res. Maíz)	4,04 ab	1,80	44,4	1,87 a	2,00	107,9
T3 (Grava)	2,24 a	0,45	20,0	1,31 a	0,73	55,5

Para hacer comparables los valores de sedimentos entre las diferentes gradientes de pendiente, los resultados de la Figura 19 se presentan en base a igual área (kg ha^{-1}).

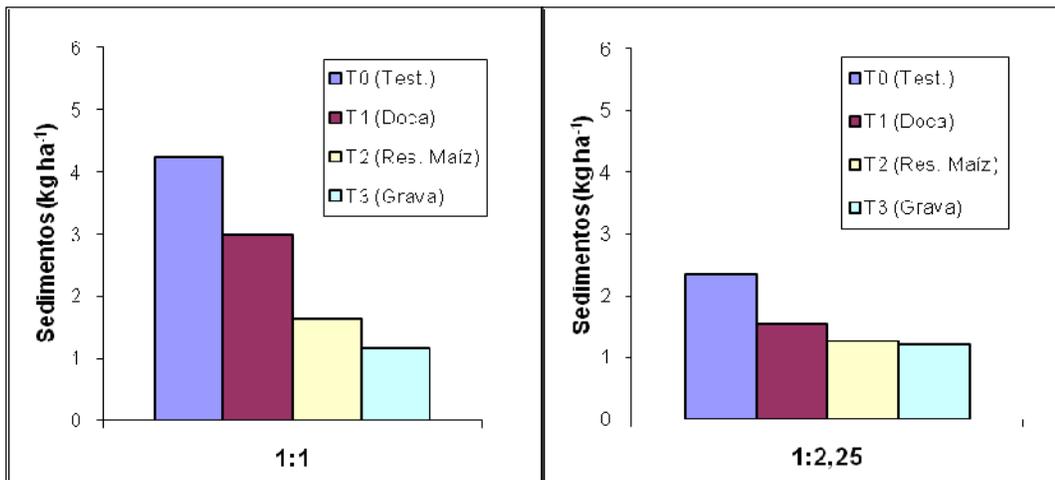


Figura 19. Sedimentos (Kg ha^{-1}) generados por una precipitación de 9,86 en 24 h. para las distintas coberturas instaladas taludes con pendientes 1:1 y 1:2,25

Para la lluvia de 9,86 mm, se obtuvieron resultados similares a los producidos por las precipitaciones artificiales. Para ambos gradientes de pendiente, el tratamiento T0 presentó los mayores valores, tanto de esguerrimiento, como de sedimentos generados.

La cobertura de grava (T3) fue la más efectiva en el control de erosión en taludes, y no se observaron diferencias significativas entre T1 y T2 (Doca y Residuo de maíz), aún cuando el porcentaje de cobertura de la doca era sustancialmente menor al del residuo de maíz.

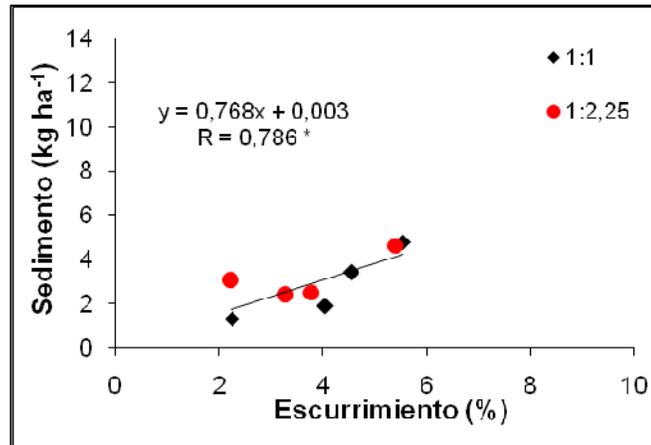


Figura 20. Dependencia del sedimento generado por las parcelas en relación al porcentaje de escurrimiento para una precipitación de 9,86 mm. El ajuste es significativo al 95%

Al igual que para las precipitaciones artificiales, en ambas precipitaciones naturales la relación entre el porcentaje de escurrimiento y los sedimentos generados por las diferentes intensidades se ordenan en una tendencia lineal y directamente proporcional, para ambos gradientes de pendiente. Además, la tasa de generación de sedimentos es mayor a medida que aumenta la intensidad de precipitación.

Evaluación del costo de establecimiento y mantención de las distintas coberturas.

Para realizar la evaluación del costo y mantención de las diferentes coberturas estudiadas, se realizaron los cálculos para un talud de 5 m (largo aproximado de un talud con gradiente 1: 2,25; con una diferencia de altura entre la zona explotada y la no alterada de 2 m) por 100 m de ancho durante un período de un año. Los costos, evaluados en pesos chilenos, consideraron los aspectos detallados a continuación.

Doca

Ítem	Costo total
- Costo de las plantas: 6666 plantas terminadas, a \$118 cada una.	\$785.588.
- Instalación de la cobertura (plantación): cuatro hombres durante dos días ¹ .	\$80.000.
- Desmalezado manual: dos hombres durante un día, cuatro veces al año.	\$80.000.
Subtotal:	\$ 945.588.

Además, para la cobertura de doca se consideró un sistema de riego por microaspersión, con un costo aproximado de \$290000. (Detalle en Apéndice 1)

TOTAL COBERTURA DE DOCA = \$ 1.235.588.-

Grava

Ítem	Costo total
- Costo de la grava: 40 m ³ , a \$8000 cada uno.	\$ 320.000.
- Instalación de la cobertura: cuatro hombres durante tres días.	\$ 120.000.
- Desmalezado químico: un hombre durante un día, cuatro veces al año.	\$ 40.000.
- Mantención de la cobertura: un hombre durante un día, una vez al mes.	\$ 120.000.
- Herbicida (Glifosato, a una dosis de 4 L ha ⁻¹): una botella de 1 L.	\$ 12.490.
TOTAL COBERTURA DE GRAVA =	\$612.490.-

Residuo de maíz

Ítem	Costo total
-------------	--------------------

¹ Todos los salarios de mano de obra fueron calculados con un jornal de \$10000.

- Instalación de la cobertura: cuatro hombres durante un día.	\$ 40.000.
- Desmalezado químico: un hombre durante un día, cuatro veces al año.	\$ 40.000.
- Mantenición de la cobertura: un hombre durante un día, una vez al mes.	\$ 120.000.
- Herbicida (Glifosato, a una dosis de 4 L ha ⁻¹): una botella de 1 L.	\$ 12.490.
TOTAL COBERTURA DE RESIDUO DE MAÍZ =	\$212.490.-

Testigo

Ítem	Costo total
- Cortes con desbrozadora: un hombre durante un día, tres veces al año.	\$ 30.000.
TOTAL COBERTURA TESTIGO =	\$30.000.-

Si bien la cobertura de doca es la de mayor costo durante el primer año, cuenta con la ventaja de que no requiere una mantención más allá del desmalezado manual, no así las coberturas de grava y residuo de maíz, que además del desmalezado químico, necesita mantención y cuidado ante posibles derrumbes o cierta inestabilidad generada por tráfico de personas o animales, hechos ocurridos durante el transcurso del estudio.

CONCLUSIONES

El elemento protector de taludes mejor evaluado, en cuanto al menor escurrimiento y menor generación de sedimentos, es la cobertura de gravas.

En taludes de bajo gradiente de pendiente, la grava presenta una buena estabilidad y persistencia en el tiempo. Sin embargo, en taludes con alta inclinación se torna inestable, siendo necesaria su re-instalación periódica.

La cobertura de doca cumple de buena manera la protección de suelos contra agentes erosivos, teniendo como principal defecto, su lento período de establecimiento.

El residuo de maíz presenta un bajo efecto protector del suelo, aún cuando se encuentra con un alto porcentaje de cobertura inicial. Además éste último decrece debido a la descomposición del residuo.

La cobertura de doca es la de mayor costo al momento del establecimiento, sin embargo, requiere menos mantención en el tiempo, haciéndola conveniente en términos económicos.

BIBLIOGRAFÍA

Berry, P.L. y Reid, D. 1993. Mecánica de suelos. Mc Graw- Hill Interamericana. Bogotá, Colombia. 415 p.

Carrasco, J. y Riquelme, J. 2003. Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas. Instituto de investigaciones agropecuarias, INIA. Boletín N° 103. Rancagua, Chile. 132 p.

Casanova, M. y Urra, M. 2000. Fundamentos de topografía aplicada a la agricultura. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Depto. Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile. 109 p.

CIREN-CHILE. 1996. Estudio Agrológico, Región Metropolitana. Tomos 1 y 2. Centro de Información de Recursos Naturales, Publicación 115. Chile. 464 p.

Crespo Villalaz, C. 2005. Mecánica de suelos y cimentaciones. 5ª ed, Limusa. Madrid, España. 680 p.

Cuevas, J., Dörner, J. y Ellies, A. 2004. Elementos de física y mecánica para evaluar la sustentabilidad de suelos agrícolas. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, 4 (2): 1-13

Da Veiga, M. y Do Prado L. 1993. Manual para la instalación y conducción de experimentos de pérdida de suelos. FAO, Documento de campo N° 1. Italia. 34 p.

De Ploey, J., Savat, J. y Moeyersons, J. 1974. The differential impact of some soil loss factors on flow, runoff creep and rainwash. Earth Surface processes 1: 151-161.

Ellies S, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile – An overview. Acta Geológica Hispánica, 35: 279-284.

Food and Agriculture Organization, (FAO). 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. Land and water Bulletin 8. Food and Agriculture Organization Roma, Italia. 228 p.

Forján, H. 2002. La siembra directa y los rastrojos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 3 p.

Foster, G. R. 1988. Modeling soil erosion and sediment yield. pp: 97-117. *In*: Lal, R. (Ed.) Soil erosion research methods. CRC Press. New York, EEUU. 244 p.

Gee, G.W. y Or, D. 2002. Particle – size analysis. Pp: 255-293. *In* Dane, J.H. y Topp, G.C. (Eds.) Methods of soil analysis Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, EEUU. 1692 p.

Grossman, R.B. y Reinsch, T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. pp: 201-228. *In*: Dane, J.H. y Topp, G.C. (Eds.) Methods of soil analysis Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin,

EEUU.1692 p.

Hudson, N. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Boletín de suelos N° 68. Food and Agriculture Organization, Roma, Italia. 147 p.

Lal, R.1988. Erodibility and erosivity. pp: 141-160. *In*: Lal, R. (Ed.) Soil erosion research methods. CRC Press. New York, EEUU. 244 p.

Lam, K.C. 1978. Soil erosion, suspended sediment and solute production in three Hong Kong catchments. *Journal of Tropical Geography*. 47: 51-62.

López, A. 2005. Efecto del gradiente y el aspecto de la pendiente en la erosión hídrica de un suelo del secano interior de la zona central de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 21 p.

Meyer, L. D. y Mannering, J.V. 1971. The influence of vegetation and vegetative mulches on soil erosion. Pp: 355-366. *In*: Biological effects in the hydrological cycle. Proceedings, Third International Seminar for Hydrology Professors. Purdue University, West Lafayette, Indiana.

McKyes, E. 2000. Agricultural engineering soil mechanics. 4ª ed, New York, Elsevier. 292 p.

Noguer, V. 2005. Efecto de la pendiente del suelo en el comportamiento de un tensiointilómetro en laboratorio. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 24 p.

Peralta, J.M. 1993. Agentes erosivos y tipos de erosión. pp. 14 – 81. Tecnologías de Conservación de suelos y agua. Programa de capacitación a agentes de extensión. INIA – Serie Platina N° 46. Santiago. Chile. 132 p.

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero De Laburu, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 849 p.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoser, D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agricultural Research Service, Agricultural Handbook Number 703. USDA. EEUU. 335 p.

Reynolds, W. D., Elrick D. E. and Topp, G. C. 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science* 136: 250-268.

Reynolds, W. D., and Elrick D. E. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of American Journal* 55: 633-

639.

Ruiz, C. G. 2005. Manual de especificaciones técnicas de buenas prácticas de manejo de suelos en laderas. Serie técnica N° 20. Servicio Agrícola y Ganadero, SAG. Santiago, Chile. 56 pp.

Schwab, G., Fangmeier, D., Elliot, W. and Frevert, R. 1993. Soil and water conservation engineering. 4ª ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, EEUU. 507 p.

Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, EEUU. 437 p.

Stocking, M.A. 1988. Assessing vegetative cover and management effects. pp 163-185. *In* Lal, R. (Ed.) Soil erosion research methods. CRC Press. New York, EEUU. 244 p.

White, I., Sully, M. J. and Perroux, K. M. 1992. Measurement of surface-soil hydraulic properties: Disc Permeameters, tension infiltrometers and other techniques. pp: 69-103. *In*: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. SSSA. Special Publ. N°30. Madison WI. USA. 288 p.

APÉNDICE 1

Costo de sistema de riego por microaspersión, para establecimiento de cobertura de Doca.

Materiales	Unidades	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Bomba CST 75 2" x 2", Pentax.	1	136.274	136.274
Tubos de PVC, 25mm x 6m, Vinilit.	18	2677	48.186
Emisores de riego VAN 18, Rainbird.	18	1200	21.600
Adaptadores de boquilla, 1/2 ", Rainbird.	18	150	2.700
Tees 20x20x20 mm, Vinilit.	18	374	6.732
Otros (Cabezal, Válvulas, Adhesivo).			10.000
Subtotal			89.218
Instalación			
Hombres (\$/día de trabajo)	6	10000	60.000
TOTAL			\$285.492.-

Precios al 27 de Agosto de 2007.