

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

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 para optar al Título Profesional
de Ingeniero Agrónomo
Mención: Manejo de Suelos y Aguas

Armando Frederick López Rivera

PROFESORES GUÍAS	CALIFICACIONES
Sr. Manuel Casanova Pinto Ingeniero Agrónomo, M. S.	5,8
Sr. Julio Haberland Arellano Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	5,8
PROFESORES CONSEJEROS	
Sr. Carlos Benavides Zavala Ingeniero Agrónomo	6,0
Sr. Walter Luzio Leighton Ingeniero Agrónomo, M. S.	6,0

Santiago, Chile. 2005

*A Daniel Salas y Manuel Castro
dos grandes exponentes de la raza humana*

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer a quienes colaboraron para que este estudio se llevara a cabo:

A mis profesores guías, Manuel Casanova y Julio Haberland por su tiempo y aportes.

A Carlos Benavides y Walter Luzio por sus excelentes contribuciones.

A José Daniel García, administrador de la Estación Experimental German Greve Silva. Sin su apoyo logístico hubiese sido imposible realizar las mediciones. Por lo mismo, agradezco a Carlos Valenzuela, su Capataz.

A Osvaldo Salazar, Daniel Salas, Ricardo Cáceres, Camilo Sagredo, Verónica Noguer y los que se quedan en el tintero por sus aportes y ayuda.

A Víctor García de Cortazar, sus consejos fueron muy útiles.

A las personas que tienen o tuvieron relación con el Laboratorio de Riego y con quienes siempre pude comentar datos, problemas y soluciones.

Finalmente, al Departamento de Ingeniería y Suelos por la paciencia y financiamiento.

ÍNDICE

UNIVERSIDAD DE CHILE.....	5
UNIVERSIDAD DE CHILE.....	6
SANTIAGO, CHILE. 2005.....	6
AGRADECIMIENTOS.....	8
DEBO AGRADECER A QUIENES COLABORARON PARA QUE ESTE ESTUDIO SE LLEVARA A CABO:.....	8
ÍNDICE.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
CONCLUSIONES.....	23
LITERATURA CITADA.....	24

RESUMEN

Se definió como objetivo evaluar el efecto del gradiente y el aspecto de la pendiente sobre la erosión hídrica a través de las tasas de erosión generadas por lluvias naturales y por un simulador de lluvia. El estudio tuvo lugar en una microcuenca en el secano interior de la zona central de Chile durante los años 2002 y 2003. Para ello, se diseñaron tratamientos consistentes en 9 parcelas en ladera de exposición ecuatorial y 9 parcelas en ladera de exposición polar repartidas en grupos de tres en cada gradiente de pendiente: bajo (11 - 16%), medio (19 - 21%) y alto (26 - 29%). En la primera etapa se midió la lluvia natural y su intensidad de precipitación. Luego, en la segunda etapa de precipitaciones artificiales, se aplicaron cinco intensidades de precipitación con un simulador de lluvia. Los resultados indicaron que las precipitaciones naturales produjeron tasas de erosión mayores en los tratamientos ubicados en ladera de exposición ecuatorial y en gradiente de pendiente medio, sin embargo, las diferencias significativas encontradas no fueron consistentes a través de los tratamientos. Por otro lado, los resultados de precipitación artificial mostraron valores de erosión sólo en gradiente de pendiente alto en todas las intensidades de lluvia de ambas laderas y en gradiente de pendiente medio en intensidades de lluvia iguales o mayores a 37 mm h^{-1} sólo en ladera de exposición ecuatorial, no encontrándose valores comparables en gradiente de pendiente bajo de ambas laderas. Finalmente, Se identifica un concepto de gradiente de pendiente crítico que indica que si bien sobre él la escorrentía es mayor, no lo es el arrastre de partículas gruesas, lo que se manifiesta en un menor registro de partículas en gradientes de pendiente altos comparados con gradientes medios.

Palabras claves: Erosión, pendiente, ladera de exposición, precipitación, simulador de lluvia.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of slope gradient and aspect on water erosion in drylands of the central area of Chile. For this study the runoff generated by natural and artificial rainfall on 2 m² plots, on a sandy loam soil in equatorial and polar exposure and three slope gradients, was quantified. The results indicated that the natural precipitations produced greater erosion rates in the treatments located at equatorial exposure and medium slope gradient. Nevertheless, the significant differences found, were not consistent through out the different treatments. The artificial rainfall generated by means of rain simulator, showed erosion rates in high slope gradient, for both exposures. The medium slope gradient showed erosion rates for intensities of rain equal or greater to 37 mm h⁻¹ only for equatorial exposure slope. On low slope gradient no erosion rate was measurable. Finally, a critical slope gradient that defined the maximum erosion rate, was identified.

Key words: erosion, slope, exposure, rainfall, rain simulator.

INTRODUCCIÓN

La geomorfología y el régimen pluviométrico de Chile sitúan a la erosión hídrica como la primera causa de degradación de los suelos. Este tipo de erosión es más marcado cuando el suelo se encuentra en posición de ladera y desprovisto de cubierta, ya sea debido a las prácticas agrícolas o a los eventos de precipitación ocurren concentrados en invierno (Ellies, 2000). Si se valoran las pérdidas de N-P-K para el país, el costo económico mínimo anual de la erosión ascendería a \$ 9.427 millones (Pérez y González, 2001).

Considerando que una de las zonas silvoagropecuarias con mayor degradación de suelos por erosión la constituye la Cordillera de la Costa entre Valparaíso y Concepción (CONAMA-CHILE, 1994), se precisa estimar la dinámica erosiva de los suelos en esta macro-región ante los distintos escenarios de uso del recurso.

Al respecto, Mutchler *et al.* (1988) destacan a las parcelas de escorrentía como una de las metodologías más conocidas para la evaluación directa de la erosión del suelo. Este método de investigación permite controlar muchas de las condiciones en que ocurren los procesos erosivos, como el sellamiento derivado del impacto de las gotas de lluvia (Porta *et al.*, 1999); aunque, no refleja necesariamente todos los fenómenos que se verifican en áreas mayores, ante una lluvia natural. No obstante, se dice que resultan útiles cuando se desea estudiar fases detalladas del proceso erosivo, para así generar modelos matemáticos. En este sentido, Hudson (1995) señala que parcelas de 1-2 m² pueden ser apropiadas si el objetivo es una comparación simple de tratamientos.

Por otra parte, los simuladores de lluvia constituyen otra metodología empleada para evaluar la tasa de erosión del suelo a nivel de campo. Con ellos es posible controlar muchas de las características de algunos eventos de precipitación; asimismo, el tamaño y la energía cinética de las gotas (Meyer, 1994). Por último, sus determinaciones son independientes de la ocurrencia de precipitaciones reales y son fáciles de operar.

Las características de las precipitaciones naturales (intensidad, duración y frecuencia) de una zona y su relación con la tasa de infiltración del suelo, determinan la cantidad de escorrentía superficial. Más aún, en zonas de laderas, cuando la intensidad de precipitación es superior a la tasa de infiltración del suelo, no solo se produce la acumulación del agua en superficie, sino que es movilizadada en forma de escorrentía (superficial y subsuperficial) conjuntamente con suelo. Todo ello, en función de elementos de la pendiente tales como el gradiente (inclinación), el aspecto (exposición), el largo y

configuración de la pendiente (Soil Survey Division Staff, 1993).

Con respecto a las relaciones entre erosión y gradiente de pendiente, Morgan (1997) señala que, las cantidades de suelo perdidas, en las etapas de salpicadura y flujo precanalizado, son directamente proporcionales al gradiente de pendiente hasta alcanzar un máximo a inclinaciones de 14 a 18%. Similares resultados son informados por Evans (1980), con gradientes del orden de 5 a 10%.

En cuanto a las relaciones con el aspecto de la pendiente, la dirección representada en una brújula hacia la cual la superficie del suelo se expone (Schoeneberger *et al.*, 2002), se menciona que toda ladera de aspecto ecuatorial (ladera de exposición norte en el hemisferio sur o ladera de exposición sur en el hemisferio norte) presenta suelos con contenidos de agua menor que una ladera de exposición polar. Por lo tanto, tiene menos cobertura vegetal y más bajo contenido de materia orgánica. Esto hace más erodable al suelo de la ladera ecuatorial, produciendo una marcada diferencia en su evolución. Hanna *et al.* (1982), en Nebraska, encontraron que el contenido de agua disponible fue más alto en suelos de ladera de exposición polar que en aquellos de aspecto opuesto. Por otra parte, Cerdà (1996, 1997) encuentra un patrón claro en laderas opuestas (España), en términos de la distribución de las tasas de infiltración. Así, la ladera de exposición ecuatorial mostró tasas de infiltración más altas que en exposición polar.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación fue evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica en función del gradiente y el aspecto de la pendiente en un suelo del secano interior de la zona central de Chile. Además, correlacionar las tasas de erosión generadas por lluvias naturales con aquellas producidas por un simulador de lluvia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó, durante los años 2002 y 2003, en dos laderas de exposición opuestas de una microcuenca en el secano interior de la zona central de Chile. Específicamente, en la estación experimental Germán Greve Silva ($33^{\circ} 28' S - 70^{\circ} 50' O$), perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, comuna de Maipú. El suelo de las laderas pertenece a la Serie Piedmont Cuesta Barriga (CIREN-CHILE, 1996) y fue clasificado como Typic Haploxeroll.

Se instalaron 18 unidades experimentales (Figura 1); nueve de estas parcelas se localizaron en ladera de exposición Ecuatorial (E) y otras nueve en ladera de exposición Polar (P), a no más de 1 ó 2 m de separación entre repeticiones (3). Se dispusieron en tres rangos de gradiente de pendiente (11 - 16%, 19 - 21% y 26 - 29%) en cada ladera y se denominaron gradiente de pendiente b (bajo), m (medio) y a (alto).

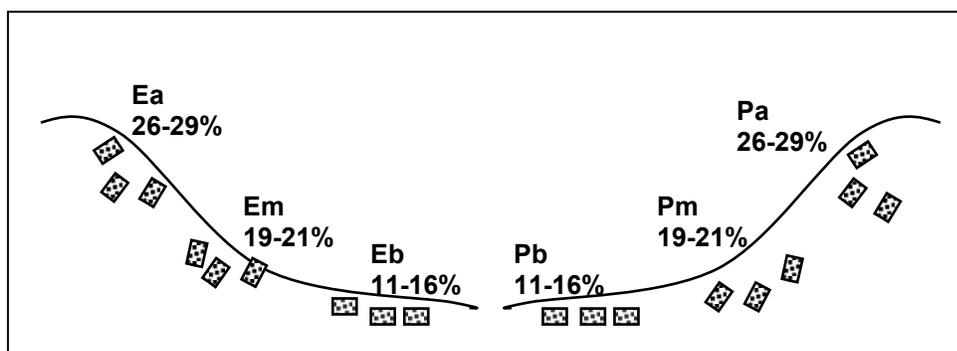


Figura 1. Distribución espacial de las parcelas de acuerdo a exposición (E y P) y gradiente de pendiente (a, m y b). Esquema no a escala.

Previo al inicio del ensayo, los horizontes superficiales de cada parcela fueron muestreados para análisis físicos básicos. Se determinaron los separados texturales (hidrómetro de Bouyoucos), la densidad aparente (método del terrón), la retención de agua a 33 y 1.500 kPa (olla y plato a presión) de acuerdo a Klute (1986) como a Dewis y Freitas (1970). El contenido de agua inicial del suelo fue determinado por gravimetría antes de iniciar las pruebas con el simulador (Mayo 2003).

Las características morfológicas superficiales de los suelos de ambas laderas se incluyen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción morfológica del horizonte A de los suelos en cada ladera.

Ladera de exposición ecuatorial	Ladera de exposición polar
<p>0-15 cm: pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3)s, pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2)h; franco arcillo limoso; moderados; partiéndose a estructura granular fina y media fuerte; muy plástico, muy adhesivo y duro; raíces finas y muy finas comunes; poros finos y muy finos escasos; gravas finas subabundantes; dondeadas abundantes; gravas angulares gruesas comunes; límite lineal claro.</p>	<p>0-24 cm: pardo a pardo oscuro (10 YR 4/4)s, pardo oscuro (10 YR 3/3)h; arcillo limoso; bloques subangulares medios y finos moderados, rompiéndose a estructura granular fina fuerte; muy plástico, muy adhesivo y duro; raíces finas y muy finas comunes; poros intersticiales gruesos escasos, finos y muy finos abundantes, medios comunes; gravas gruesas abundantes; límite ondulado abrupto.</p>

La delimitación de las parcelas se hizo con latón de zinc y su interior se mantuvo libre de vegetación. Con dimensiones de 2 m de largo y 1 m de ancho, se incluyen en la Figura 2.

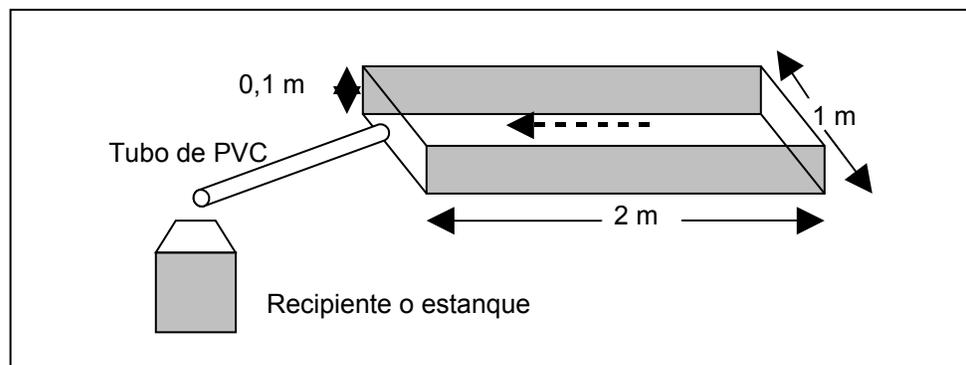


Figura 2. Representación gráfica de una parcela del ensayo. No a escala.

En una primera etapa, durante cada evento de precipitación natural se registró su intensidad con un pluviógrafo mecánico (Wilh. Lambrecht KG Göttingen). Así mismo, se midió el volumen total de escorrentía en cada una de las 18 parcelas, que fue recibido en estanques para, en laboratorio, determinar el contenido de sedimentos mediante una variante del método indicado por Veiga y Prado (1993). En este sentido, se sometió varias alícuotas del fluido a un secado a 70°C por 2 a 3 días, determinando por gravimetría la masa de partículas desprendidas por erosión.

En una segunda fase de mediciones se utilizó un simulador de lluvias para generar las precipitaciones artificiales. La escorrentía generada por estas precipitaciones se recogió en estanques plásticos y se midió en recipientes graduados. El simulador, de geometría cuadrada, contó con 256 salidas tubulares plásticas (goteros) y una placa recipiente con una capacidad de 5,75 L, construida en acrílico rígido transparente. Esta placa reposa sobre una estructura metálica de forma cúbica que mediante tornillos en su base permite nivelarla; a su vez, es alimentada externamente con agua a caudal constante mediante una bomba peristáltica desde un estanque. La bomba consiste en un generador portátil alimentado por baterías y se regula mediante un microprocesador que permite simular la intensidad de precipitación deseada, cuyos valores se encuentran entre 7 y 90 mm h⁻¹ (Figura 3).

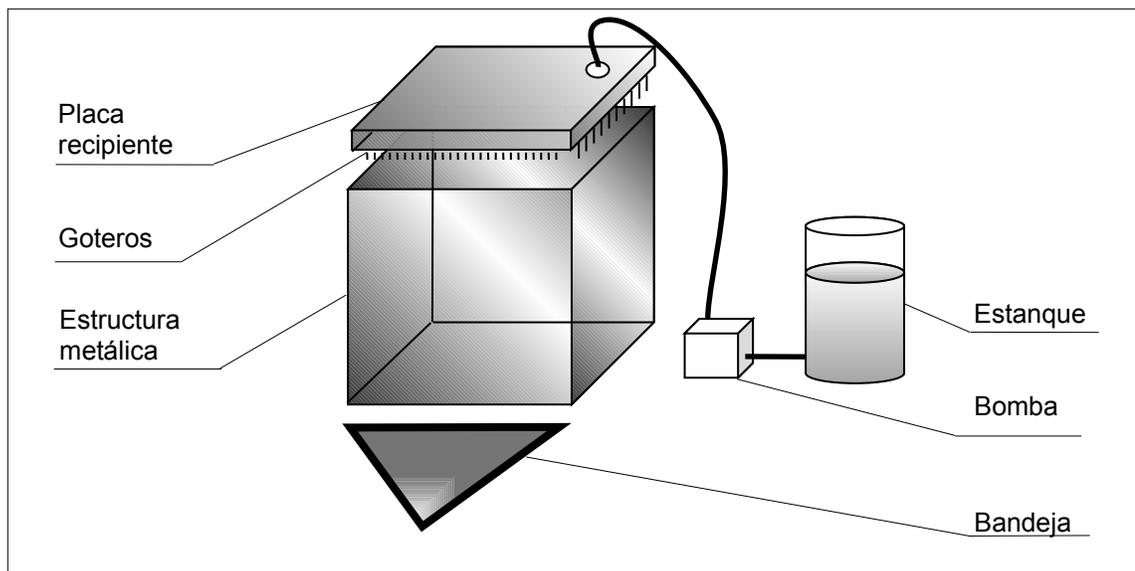


Figura 3. Representación gráfica del simulador de lluvia. No a escala.

Las intensidades de precipitación controladas por el simulador de lluvia y aplicadas a los sitios de estudio fueron de 7, 17, 26, 37 y 45 mm h⁻¹, denotadas respectivamente como I_2 , I_3 , I_4 , I_5 e I_6 . Nuevamente se recolectó la escorrentía generada artificialmente y se determinó el contenido de sedimentos, siguiendo el mismo procedimiento que para las lluvias naturales.

El ensayo se realizó bajo un diseño de parcelas divididas, en el cual las subparcelas correspondieron a cada evento de precipitación natural, ocho en total, y a las cinco intensidades de precipitación artificial. Como se ha señalado, la unidad experimental corresponde a una parcela y los tratamientos corresponden a las combinaciones de los factores exposición (2), tipo de pendiente (3) y número de subparcelas (8); es decir, un total de 48 tratamientos

en precipitaciones naturales y 30 tratamientos en precipitaciones artificiales, considerando estas unidades experimentales con tres repeticiones. Los resultados se sometieron a ANDEVA y se realizó la prueba de comparación de medias por medio del método SNK (Student-Newman-Keuls), a un nivel de confianza de 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se presentan los gradientes de pendiente y las características físicas del suelo de los distintos tratamientos; advirtiéndose cierta homogeneidad, entre las repeticiones, del contenido de agua inicial ($W_{inicial}$), la densidad aparente (Db), textura y retención de agua (R.A) del suelo.

Cuadro 2. Características físicas del suelo en cada tratamiento.

Tratamiento	Gradiente de pendiente	$W_{inicial}$ %	R.A		Textura			Db (Mg m ⁻³)
			33 kPa	1500 kPa	Arcilla	Limo	arena	
Eb1	14,4	10,7	20,1	9,1	20,0	25,0	55,0	1,6
Eb2	13,9	10,0	20,5	9,1	17,4	26,0	56,6	1,5
Eb3	13,4	10,5	20,0	9,1	17,5	26,4	56,1	1,6
Em1	19,2	17,2	20,3	8,9	19,0	25,5	55,5	1,7
Em2	19,9	15,2	19,9	8,9	19,1	28,0	52,9	1,6
Em3	21,0	14,4	19,7	8,7	19,2	28,4	52,4	1,7
Ea1	28,8	16,2	22,9	8,9	19,0	30,5	50,5	1,7
Ea2	28,3	14,2	22,8	8,9	24,8	33,7	41,5	1,7
Ea3	26,7	13,4	23,3	8,9	21,1	37,9	41,0	1,7
Pb1	13,7	15,9	20,0	9,3	19,0	25,5	55,5	1,4
Pb2	10,2	13,9	20,2	9,5	21,1	32,9	46,0	1,5
Pb3	15,7	13,1	20,2	9,5	21,2	33,3	45,5	1,4
Pm1	20,9	10,9	20,4	11,1	19,0	25,5	55,5	1,4
Pm2	20,0	10,4	20,4	11,2	19,3	26,1	54,6	1,4
Pm3	20,7	11,4	20,6	11,1	19,4	26,5	54,1	1,4
Pa1	27,9	9,50	22,3	9,8	19,0	25,5	55,5	1,7
Pa2	28,7	9,80	22,3	9,9	19,0	31,8	49,2	1,7
Pa3	26,4	10,0	22,2	9,7	19,1	32,2	48,7	1,7

Exposición ecuatorial (E) y polar (P); gradiente de pendiente alto (a), medio (m) y bajo (b); repeticiones: 1, 2 y 3.

Las precipitaciones naturales registradas durante el período de estudio, fueron denominadas con el término descriptivo **F** y cada evento se ordena cronológicamente en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características de la lluvia natural en cada evento.

Término descriptivo	Fecha	Cantidad	Duración	Intensidad media	Intensidad máxima	Tiempo desde lluvia precedente
	(dd-mm-aa)	(mm)	(h)	---(mm h ⁻¹)---		(días)
F2	05-08-02	18,7	35,5	0,5	3,2	>25
F3	18-08-02	24,8	18,0	1,4	2,0	13
F4	23-08-02	49,9	12,0	4,2	3,9	5
F5	06-06-03	9,8	8,0	1,2	1,2	>25
F6	02-07-03	5,2	5,0	1,0	3,1	25
F7	10-07-03	24,1	20,0	1,2	2,3	8
F8	31-07-03	1,2	1,5	0,8	1,0	21
F9	04-08-03	3,1	3,5	0,9	1,9	4

En el Cuadro 4 se comparan todos los eventos de precipitación que produjeron erosión mayor (análisis vertical) para cada tratamiento.

Cuadro 4. Erosión media del suelo producida por precipitaciones naturales, de acuerdo a aspecto y gradiente de pendiente.

Tratamiento→	Ea	Em	Eb	Pa	Pm	Pb
Evento	-----ton ha ⁻¹ -----					
F2	0,048a	0,289a	0,039a	0,069a	0,068a	0,060a
F3	0,070a	0,167a	0,030a	0,065a	0,025a	0,058a
F4	1,121b	1,405c	0,722c	0,741c	0,297c	0,903a
F5	0,027a	0,024a	0,040a	0,022a	0,013a	0,010a
F6	0,055a	0,102a	0,032a	0,088a	0,021a	0,025a
F7	0,467a	0,663b	0,288b	0,446b	0,181b	0,082a
F8	0,003a	0,004a	0,001a	0,006a	0,009a	0,007a
F9	0,009a	0,021a	0,006a	0,008a	0,008a	0,008a

Exposición ecuatorial (E) y polar (P); Gradiente de pendiente alto (a), medio (m) y bajo (b). Letras distintas en una columna indican que hay diferencias significativas ANDEVA ($\alpha = 0,05$).

Los valores mayores de erosión se observan en los eventos F4 y F7, que muestran diferencias significativas. Esto es debido a que ambos eventos, en general, son los que presentan las características más propicias para que ocurra erosión; esto es, un tiempo menor desde la lluvia precedente, cantidad y duración mayores, más una elevada intensidad máxima de precipitación.

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. Por otra parte, la erosividad de la lluvia está determinada por su duración y cantidad de agua caída, esperándose tasas de erosión altas con precipitaciones de larga duración o mayor frecuencia (Suárez de Castro, 1979).

En el Cuadro 5 se analizan y comparan por separado los gradientes de pendiente en cada ladera (ecuatorial: letras mayúsculas; polar: letras minúsculas), a fin de determinar qué tratamientos de gradiente de pendiente se asocia a una erosión mayor.

Cuadro 5. Erosión media del suelo producida por precipitaciones naturales comparando, individualmente por aspecto, los distintos gradientes de pendiente.

Tratamiento →	Ea	Em	Eb	Pa	Pm	Pb
Evento	-----ton ha ⁻¹ -----					
F2	0,048A	0,289B	0,039A	0,069a	0,068a	0,060a
F3	0,070A	0,167B	0,030A	0,065a	0,024a	0,058a
F4	1,121A	1,405A	0,722A	0,741a	0,296a	0,903a
F5	0,027A	0,024A	0,040A	0,022a	0,013a	0,010a
F6	0,055A	0,102A	0,032A	0,088b	0,020a	0,025a
F7	0,467A	0,663A	0,288A	0,446a	0,181a	0,082a
F8	0,003A	0,004A	0,001A	0,006a	0,009a	0,007a
F9	0,009A	0,021A	0,006A	0,008a	0,008a	0,008a

Exposición ecuatorial (E) y polar (P); Gradiente de pendiente alto (a), medio (m) y bajo (b). Letras mayúsculas o minúsculas en una fila indican diferencias significativas ANDEVA ($\alpha = 0,05$).

Así, solo los eventos F2 y F3 en gradiente medio exposición ecuatorial se halló erosión mayor, reduciéndose las pérdidas a gradientes mayores. Estos resultados son similares a los encontrados por otros autores (Evans, 1980; Morgan, 1997; Jen-Chen Fan and Min-Fon Wu, 2001) para gradientes medios de pendiente identificando un concepto de gradiente de pendiente crítico que indica que, si bien sobre él la escorrentía es mayor, no es así el arrastre de partículas gruesas.

Por otra parte, Casanova *et al.* (2001) en una investigación previa, para las mismas dos laderas de este estudio, encontraron conductividades hidráulicas no saturadas (K_{ψ}) diferentes para cada gradiente de pendiente que podrían explicar también los valores de erosión diferentes observados entre gradiente de pendiente. Obviamente, la erosión en gradiente de pendiente bajo es minimizada debido a su mayor capacidad de infiltración del suelo dado un mayor tiempo de infiltración (Huang *et al.*, 2001; González del Tánago, 1991).

El Cuadro 6 se analizan los tratamientos de gradiente de pendiente (a, m y

b) por separado para cada ladera de exposición (E y P).

Cuadro 6. Erosión media del suelo (ton ha⁻¹) producida por precipitaciones naturales, comparando individualmente en cada ladera sus gradientes de pendiente.

Tratamiento	Ea	Pa	Em	Pm	Eb	Pb
Evento	-----ton ha ⁻¹ -----					
F2	0,048a	0,069a	0,289a	0,068a	0,039a	0,060a
F3	0,070a	0,065a	0,167b	0,024a	0,030a	0,058a
F4	1,121a	0,741a	1,405b	0,296a	0,722a	0,903a
F5	0,027a	0,022a	0,024a	0,013a	0,040a	0,010a
F6	0,055a	0,088a	0,102a	0,020a	0,032a	0,025a
F7	0,467a	0,446a	0,663b	0,181a	0,288a	0,082a
F8	0,003a	0,006a	0,004a	0,009a	0,001a	0,007a
F9	0,009a	0,008a	0,021a	0,008a	0,006a	0,008a

Exposición ecuatorial (E) y polar (P); Gradiente de pendiente alto (a), medio (m) y bajo (b). Letras distintas en una fila indican que hay diferencias significativas ANDEVA ($\alpha=0,05$).

Se aprecia que, casi en la totalidad de los eventos, para el gradiente alto y medio una tendencia a haber más erosión en la ladera de exposición ecuatorial con diferencias significativas solo en tres eventos (F3, F4 y F7) y gradiente medio. Esto coincide con lo expuesto por otros autores (Hanna *et al.*, 1982; Cerdà, 1996, 1997) en el sentido que los suelos de ladera de exposición ecuatorial son más erodables que los suelos de exposición polar para el mismo gradiente de pendiente. Sin embargo, al comparar gradientes de pendiente bajo (Eb y Pb) la tendencia no es tan clara y no se advierten diferencias estadísticamente significativas.

Con respecto a las lluvias generadas artificialmente con simulador, se observó escorrentía en ambas laderas a gradientes de pendiente alto, para todas las intensidades de lluvia evaluadas (Cuadro 7).

Cuadro 7. Erosión media del suelo producida con simulador de lluvias.

Tratam.	Ea	Em	Eb	Pa	Pm	Pb
Evento	-----ton ha ⁻¹ -----					
I ₂	0,144			0,106		
I ₃	0,224			0,147		
I ₄	0,174			0,169		
I ₅	0,138	0,170		0,176		
I ₆	0,223	0,166		0,195		

En los gradientes restantes, los resultados fueron extremadamente erráticos (salvo para las dos intensidades más altas e exposición ecuatorial y gradiente de pendiente medio), de manera que fueron excluidos del análisis. A pesar que la tendencia general es que a mayor intensidad de precipitación, mayor es la erosión producida, estos resultados no indican que exista diferencia alguna, estadísticamente significativa.

CONCLUSIONES

- Las lluvias artificiales realizadas con simulador, generaron escorrentía en ambas laderas solo a gradientes de pendiente alto. Si bien se observó la una tendencia general — a mayor intensidad de precipitación, mayor es la erosión producida— estos resultados no indican que exista diferencia alguna entre ellos, estadísticamente significativa.
- Las características de los eventos de lluvia natural (intensidad y duración) y las condiciones de suelo precedentes a ellos, particularmente de contenido de agua del suelo, determinaron significativamente la magnitud de la erosión hídrica generada.
- Los suelos de exposición ecuatorial tienden a presentar valores de erosión superiores a aquellos generados en laderas de exposición polar, ante eventos de lluvia natural, como un reflejo de su erodabilidad.
- Se identifica un concepto de gradiente de pendiente crítico, observado por muchos autores, que indica que si bien sobre él la escorrentía es mayor, no lo es el arrastre de partículas gruesas, lo que se manifiesta en un menor registro de partículas, particularmente a gradientes altos de pendiente comparados a gradientes medios.

LITERATURA CITADA

CASANOVA, M.; MESSING, I. and JOEL, A. 2000. Influence of aspect and slope gradient on hydraulic conductivity measured by tension infiltrometer. *Hydrological Processes*, 14: 155-164.

CERDÀ, A. 1996. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, 69: 217 - 232.

—————1997. Seasonal changes of infiltration rates in a mediterranean scrubland on limestones. *Journal of Hydrology*, 198: 209 - 225.

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

CONAMA-CHILE. 1994. Propuesta; Plan Nacional de Conservación de Suelo (Comisión Nacional del Medio Ambiente). Santiago, Chile. 137 p.

DEWIS, J. Y FREITAS, F. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. *Boletín de Suelos* N° 10. Food and Agriculture Organization, Roma, Italia. 252 p.

ELLIES, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile – An overview. *Acta geológica hispánica*, 35 : 279-284.

EVANS, R. 1980. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal control: an empirical viewpoint. pp: 109-128. *In*: M. J. Kirkby and R. P. C. Morgan (eds). *Soil erosion*. Chichester, John Wiley. 312 p.

JEN-CHEN FAN and MIN-FON WU. 2001. Effects of soil strength, texture, slope steepness and rainfall intensity on interrill erosion of some soils in taiwan. <<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/isco99/pdf/ISCOdisc/SustainingTheGlobalFarm/P093-Fan.pdf>> [consulta: noviembre 2004].

FERRERA, A. G. and SINGER, M. J. 1985. Energy dissipation for water drop impact into shallow pools. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 1.537 – 1.542.

GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M. 1991. La ecuación universal de pérdidas de Suelo. Pasado, Presente y Futuro. *Rev. Ecología*. N° 5. ICONA. 37 p.

HANNA, Y. A.; HARLAN, P. W. and LEWIS, D. T. 1982. Soil available water as influenced by landscape position and aspect. *Agronomy Journal*, 74: 999 – 1.004.

HUANG, C.; GASCUEL-ODOUX, C.; CROS-CRAYOT, S. 2001. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena*, 46: 177-188.

HUDSON, N. 1995. Soil conservation. Third edition. Batsford Limited. London. 391 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.

IRIARTE, A.; SIMON, M.; GARCÍA, I.; BARAHONA, E.; ORTIZ, I. 2000. Propiedades hídricas de los suelos de olivar mediante simulación de lluvia. *Edafología (Revista de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo)*, 7-2: 67-74.

JOEL, A. 2000. Surface Runoff: A water resource for poor farming communities in drylands. Doctoral thesis. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences. 53 p.

KLUTE, A. 1986. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd. edition. (Klute, A. Ed.). Agronomy Monograph N° 9. Madison, WI. EUA. 1.188 p.

LUK, S. H., CAI, Q. G., and WANG, G. P. 1993. Effects of surface crusting and slope gradient on soil and water losses in the hilly loess region, North China, *Catena Supplement*, 24: 29-45.

MEYER, L. D. 1994. Rainfall simulators for soil erosion research. pp: 83-103. *In*: Lal, R. (ed.) Soil erosion research methods. Iowa, USA: Soil and Water Conservation Society. 340 p.

MORGAN, R.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa, Madrid. 343 p.

MUTCHLER, C. K.; MURPHREE, C. E. AND MCGREGOR, K. C. 1994. Laboratory and Fields Plots For Erosion Research. pp: 11-38. *In*: Lal, R. (ed.) Soil erosion research methods. IOWA, USA: Soil and Water Conservation Society. 340 p.

NOLAN, S.C., VAN VLIET, L.J.P., GODDARD, T.W., FLESCHE, T.K. 1997. Estimating storm erosion with rainfall simulator. *Canadian Journal of Soil Science*, 77: 669 – 676.

PÉREZ C. y GONZÁLEZ, J. 2001. Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA) CRI-Quilamapu, Chillán- Chile. 196 p.

PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO DE LABURU, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. (Porta *et al.* Eds.). 2ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 849 p.

SCHOENEBERGER, P.J., WYSOCKI, D.A., BENHAM, E.C., and BRODERSON, W.D. 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. (Schoeneberger *et al.* Eds.), Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 228 p.

SHARMA, K., SINGH, H. and PAREEK, O. 1983. Rain water infiltration into a bar loamy sand. Hydrological Sciences Journal, 28, 417 – 424.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18. 437 p.

STONE, J.J. and G.B. PAIGE. 2003. Variable rainfall intensity rainfall simulator experiments on semi-arid rangelands. (<http://www.tucson.ars.ag.gov/icrw/Proceedings/Stone.pdf>) [consulta: noviembre 2004].

SUÁREZ DE CASTRO, F. 1979. Conservación de suelos. IICA, San José de Costa Rica. 315 p.

VEIGA, M. DA Y PRADO L. DO. 1993. Manual para la instalación y conducción de experimentos de pérdida de suelos. Food and Agriculture Organization, Italia. Documento de campo N° 1. 34 p.