

# EVALUACIÓN DEL MODELO USLE PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN UN ALFISOL UBICADO EN LA COMUNA SAN PEDRO, CHILE

Barlin Olivares<sup>1</sup>, Deyanira Lobo<sup>2</sup>, Koen Verbist<sup>3</sup>, R. Vargas<sup>4</sup> y Oscar Silva<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), carretera vía Soledad, El Tigre estado Anzoátegui, Venezuela. [bolivares@inia.gob.ve](mailto:bolivares@inia.gob.ve).

<sup>2</sup>Departamento de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay estado Aragua. [lobod@agr.ucv.ve](mailto:lobod@agr.ucv.ve)

<sup>3</sup> Department of Soil Management, Ghent University, Centro del Agua para las Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe ( CAZALAC), Chile. [Koen.Verbist@ugent.be](mailto:Koen.Verbist@ugent.be)

<sup>4</sup> Corporación Nacional Forestal, Región Metropolitana, Santiago, Chile.

<sup>5</sup> Departamento de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay estado Aragua. [silvao@agr.ucv.ve](mailto:silvao@agr.ucv.ve)

## RESUMEN

En el presente estudio se evaluó el modelo USLE en la estimación de la erosión hídrica en un Alfisol ubicado en la comuna San Pedro, Región Metropolitana de Chile, con el empleo de valores de erosividad (R) obtenidos mediante la aproximación de Arnoldus (IFM) y ecuaciones propuestas por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) en España, adaptadas a las condiciones de Chile. Para la evaluación de las pérdidas de suelo se utilizaron los datos de sedimentos por cada evento de precipitación durante el período 1996-2000, medidas en parcelas experimentales con los tratamientos de subsolado, zanjas de infiltración y pradera natural. Se compararon los valores de erosión estimados con los medidos en parcelas de erosión en términos de estadística básica y en índices basados en diferencia y regresión a través del sistema computarizado IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates). En el análisis descriptivo y comparativo de las ecuaciones seleccionadas se determinó que las pérdidas de suelo estimadas con la USLE, utilizando la ecuación de erosividad de la lluvia de ICONA, obtenida con datos de otras localidades, proporcionó valores que se ajustan bien a los valores registrados en el área de estudio, con ligeras variaciones; sin embargo, las pérdidas estimadas usando el factor de erosividad calculado a través de la aproximación de Arnoldus (IFM) influyó en la sobrestimación de los valores de pérdida de suelo. De acuerdo con los resultados el modelo USLE fue capaz de establecer aproximaciones con relación a la tendencia de los datos, es decir, los datos estimados fueron consistentes y siguieron el mismo patrón de los datos tomados en campo.

**Palabras Clave:** Suelo, degradación, erosividad, lluvia, USLE

## INTRODUCCIÓN

En Chile, el problema relacionado con la erosión es considerado uno de los procesos de mayor relevancia en la pérdida de la capacidad productiva de las tierras (Mancilla, 2006). Es precisamente por esta razón que surge la necesidad de evaluar la erosión hídrica en términos de la pérdida de suelo a la que está sujeta un área determinada, según las

condiciones actuales de uso y manejo, para de esta manera aplicar medidas que eviten las pérdidas de este recurso. El presente estudio constituye una base teórica, práctica y experimental a la hora de diseñar y decidir la mejor estrategia productiva.

Los estudios de erosión hídrica en Chile no son muy abundantes, de aquí surge el interés de llevar a cabo este tipo de estudios en la Región Metropolitana de este país. Asimismo, esta metodología empleada podría ser implementada en estudios similares en diversas regiones afectadas por la erosión hídrica o susceptible a ella.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la bondad en la estimación de la erosión hídrica del modelo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) en un Alfisol, bajo diferentes situaciones de manejo de suelo, en la Región Metropolitana de Chile, específicamente en una cuenca ubicada en la Comuna San Pedro, comparando las estimaciones de erosión proporcionadas por el modelo, utilizando dos adaptaciones para la valoración de la erosividad de la lluvia, con las respectivas mediciones de erosión obtenidas en parcelas experimentales en años recientes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo estuvo ubicado en la localidad de Alto Loica, Comuna San Pedro, Provincia de Melipilla en la Región Metropolitana de Chile. Dicha localidad se encuentra en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, a 120 km al Suroeste de Santiago de Chile; a  $-34^{\circ} 01' 58,8''$  de latitud y  $-71^{\circ} 25' 1,2''$  de longitud. Posee un clima templado con tendencia a mediterráneo, caracterizado por presentar una estación seca en verano (Diciembre a Marzo). La precipitación media anual es de 399 mm. La temperatura media anual es de  $15^{\circ}\text{C}$ . La vegetación típica de la zona está constituida por Espino (*Acacia caven*), Quillay (*Quillaja saponaria*), Boldo (*Peumus boldus*) y Maitén (*Maytenus boaria*) (Tokugawa y Vargas, 1996).

El tipo de suelo donde se encuentra ubicado el ensayo corresponde a un Alfisol, perteneciente a la Serie Cauquenes. El pedón representativo de uno de los componentes de la Asociación Cauquenes es un miembro de la familia Ultic Paleoxeralfs, fina, caolinítica, isomésica, de acuerdo al sistema de clasificación de suelos del USDA (1993). Descansa sobre un substrato constituido por roca granítica muy meteorizada. Ocupa una posición topográfica de cerros y lomajes con erosión severa y bien drenada. Por capacidad de uso del suelo fue clasificado como clase VII que significa baja calidad dentro de las ocho clases restantes y se adjunta la letra (e) que significa limitación por erosión y/o topografía (Martínez, 2004).

Para la evaluación de las pérdidas de suelo se utilizaron los datos de sedimentos para cada evento de precipitación durante el período 1996-2000, obtenidas mediante mediciones en las parcelas experimentales con los tratamientos de subsolado, zanjas de infiltración y un tratamiento testigo llamado pradera natural, con dimensiones: 4 m de ancho y 22,14 m de largo; para una superficie total de  $88,56\text{ m}^2$ , delimitadas en su perímetro por una lámina de metal. En la base inferior de las parcelas está el área de captación.

El modelo USLE, contempla la acción de los factores precipitación, suelos, topografía, cobertura y prácticas de conservación. Su expresión básica es la indicada en la ecuación 1 (Wischmeier y Smith, 1978).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde:

A: pérdida de suelo, expresada, en el sistema métrico internacional, en  $Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ .

R: energía erosiva de la lluvia ( $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ ).

K: erosionabilidad del suelo [ $(Mg \cdot ha^{-1}) \cdot (MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1})^{-1}$ ]

L: relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por la longitud de la pendiente.

S: relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por el gradiente de la pendiente.

C: relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por el manejo y uso de la tierra (cobertura del cultivo, generalmente).

P: relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por el uso de prácticas de conservación.

Para la estimación del factor erosividad de la lluvia se utilizaron dos adaptaciones del factor R, la primera fue desarrollada por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza ICONA (1988). Es conveniente indicar que la misma tiene su origen en las zonas áridas y semiáridas con clima mediterráneo de España, por lo tanto responde a un patrón específico de lluvia del clima local.

En este sentido, investigadores en Chile como Valenzuela y Morales (2004), tomando en cuenta el tipo de clima y los montos de precipitación recibidos en la zona, seleccionaron la fórmula por analogía climática que mejor se adapta a la Región, siendo esta la primera forma de estimar el factor erosividad en ( $hJ \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ), a partir de los datos mensuales de precipitación del período 1996 -2000:

$$R = 0,291 \cdot [PMEX]^{1,297} [MR]^{-0,511} [MV]^{0,366} [F 24]^{0,414}$$

Donde PMEX es la lluvia media de la máxima mensual de cada uno de los años de la serie (mm), MR es la lluvia media del período Octubre-Mayo (mm), MV la lluvia del período Junio-Septiembre (mm), y F24 es el factor de concentración de la máxima lluvia diaria, que se define como:

$$F24 = \frac{(\text{máxima lluvia en 24 horas del año})^2}{\text{Suma de las máximas en 24 horas de todos los meses del año}}$$

Arnoldus (1980) propuso una corrección del IF, en la que se consideran no sólo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses. Este índice fue denominado Índice de Fournier Modificado (IFM).

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde (Pi) representa la precipitación del mes y (Pt) es la precipitación total anual del área. Por otra parte, la segunda adaptación para estimar la erosividad de la lluvia es a través de la siguiente ecuación, donde R es la erosividad de la lluvia ( $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$ ); a= 0 y b=  $1,6881 \text{ mm}^{-1}$  son coeficientes que se obtienen de una regresión lineal con la ecuación propuesta por ICONA (1988):

$$R = a + b \cdot \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} = a + b \cdot IFM$$

Esta última ecuación se obtiene a partir de la fórmula propuesta por ICONA (1988), con esto no se emplea el IFM como sustituto del análisis de bandas, por lo tanto los coeficientes

(a y b) no provienen de la regresión de IFM con el índice de erosión pluvial ( $EI_{30}$ ) de bandas, lo cual representa una limitación en la estimación de la erosividad.

Los valores medidos en las parcelas de erosión se compararon con los valores de erosión estimados mediante la USLE, aplicando las dos adaptaciones en cuanto al factor R: a) estimado mediante la aproximación de Arnoldus (IFM) (1980) y b) estimado con la fórmula de ICONA (1988). La comparación se realizó con el sistema computarizado IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates) en términos de estadísticas básicas como el promedio, desviación típica, sesgo y curtosis; estadísticas basadas en diferencia como los índices eficiencia de simulación (EF), el coeficiente de concordancia (d) y el error medio absoluto (MAE), y por último las estadísticas basadas en regresión utilizadas fueron el coeficiente de regresión de Pearson y la pendiente, el intercepto y la probabilidad de que la pendiente y el intercepto sean uno y cero respectivamente.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comparar conjuntamente los valores de erosión medidos en todos los tratamientos con sus respectivos valores estimados, se puede observar en el cuadro 1, que ambas opciones de USLE sobrestimaron la erosión. La adaptación de erosividad que presentó valores totales y promedios más cercanos a los medidos fue el estimado con (ICONA). Por su parte esta adaptación presentó los valores de sesgo y curtosis menores a los medidos, lo que significa que al utilizar la opción de USLE con R (ICONA), además de presentar valores mayores, esta presenta un menor predominio de valores bajos y con menor concentración con respecto a la media.

**Cuadro 1.** Estadísticas básicas de la erosión medida y estimada para todos los tratamientos.

Estadística Básica	Medida	USLE	
		R (IFM)	R (ICONA)
Número de valores	15	15	15
Suma ( $Mg\ ha^{-1}$ )	1,50	2,81	1,85
Promedio ( $Mg\ ha^{-1}$ )	0,10	0,18	0,12
Desviación Típica ( $Mg\ ha^{-1}$ )	0,08	0,16	0,09
Sesgo	1,31	1,49	0,37
Curtosis	0,90	2,38	-1,19

En cuanto a la eficiencia de simulación se observa en el cuadro 2, que ambas adaptaciones de erosividad con USLE presentaron valores negativos, lo que quiere decir que el error en magnitudes generado hace suponer que la media de los valores medidos sería mejor estimadora que los resultados estimados. Por su parte, de acuerdo a los valores del índice de concordancia, la opción de USLE que generó un valor mayor fue R con (ICONA), lo que se interpreta como mayor concordancia entre los valores de erosión medidos y estimados. El error medio absoluto fue mayor para la opción de USLE con R (IFM), es decir, presentó mayor diferencia promedio entre valores medidos y estimados.

**Cuadro 2.** Estadísticas basadas en diferencia de la erosión medida y estimada para todos los tratamientos.

Índice	USLE	
	R (IFM)	R (ICONA)
Eficiencia de simulación (EF)	-3,60	-0,25
Índice de Concordancia (d)	0,45	0,67
Error Medio Absoluto (MAE)	0,12	0,06

Como se observa en el cuadro 3, el coeficiente de regresión fue mayor para la opción de USLE con R (ICONA); sin embargo, ambos valores se clasifican como de baja o débil correlación entre los valores de erosión medidos y estimados, de acuerdo a la probabilidad conjunta de que el intercepto sea cero y la pendiente uno, se indica que para ambas adaptaciones esta probabilidad es muy similar.

Con respecto a los valores bajos de erosión, estos tienden a ser sobrestimados por la adaptación de R (IFM), a excepción de dos eventos de erosión de magnitudes bajas. Por su parte, la adaptación de USLE con R (ICONA) presentó valores muy cercanos a los medidos. De acuerdo a los valores de erosión de magnitudes altas se pudo evidenciar que ambas adaptaciones del modelo tienden a subestimarlos.

**Cuadro 3.** Estadísticas de regresión de la erosión medida y estimada para todos los tratamientos.

Parámetros	USLE	
	R (IFM)	R (ICONA)
Coefficiente de regresión (r)	0,40	0,48
Intercepto (b0)	0,10	0,06
Probabilidad del Intercepto (b0)	0,13	0,06
Pendiente (b1)	0,82	0,53
Probabilidad de la pendiente (b1)	0,74	0,11
Probabilidad b1=1; b0=0	0,25	0,21

En términos generales, de acuerdo a las estadísticas empleadas para la comparación de los valores medidos en campo con los valores de erosión estimados por el modelo USLE en sus dos adaptaciones del factor R, se puede inferir que a pesar de las diferencias observadas en magnitud, el modelo USLE fue capaz de establecer tendencias, observando que los valores estimados siguen una distribución similar a los obtenidos en campo. En los tres tratamientos evaluados los índices de eficiencia de simulación (EF) fueron negativos, lo que indica que el error en magnitudes generado es lo suficientemente importante como para suponer que la media de los valores medidos sería mejor estimadora que los resultados

simulados. Por su parte el índice de concordancia (d) fue similar en todos los tratamientos evaluados con pocas diferencias, con relación al error medio absoluto (MAE) estos fueron altos en la mayoría de los tratamientos lo cual evidencia las diferencias promedios entre los valores medidos y simulados.

### CONCLUSIONES

Debido al origen empírico de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), así como a los procedimientos para calcular cada uno de los factores, se destaca que estos no son universales, es decir, la certeza de sus predicciones es mayor a medida en que las condiciones en que se aplique se asemejen a las condiciones donde inicialmente se obtuvieron. Por esta razón, los resultados o estimaciones en este estudio deben interpretarse únicamente como aproximaciones de la tendencia que pudiesen ocurrir en la realidad.

El modelo USLE fue capaz de establecer aproximaciones con relación a la tendencia de los datos, es decir, los datos estimados fueron consistentes y siguieron el mismo patrón de los datos tomados en campo, a pesar de las ligeras sobreestimaciones y subestimaciones.

Las posibles causas del comportamiento del modelo USLE en las estimaciones de la erosión hídrica para la zona de estudio son, en primer lugar, la baja erosión observada en esas situaciones de manejo como subsolado, zanjas de infiltración y pradera natural, donde el error puede ser más grande que los datos obtenidos en campo. Así mismo, el empleo de la precipitación mensual en ambas ecuaciones, utilizadas para el cálculo del factor de erosividad de la lluvia que puede ocultar el efecto erosivo de lluvias diarias de gran magnitud.

### BIBLIOGRAFÍA

- ARNOLDUS, H. M. J. 1980.** An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In M. De Boodt and D. Gabriels. (eds.). Assessment of soil erosion. John Wiley and Sons, Chichester, Gran Bretaña. p. 127-132.
- ICONA (1988).** Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Ariel, S.A. Barcelona, Madrid. 292 p.
- MANCILLA, G. 2006.** El uso de modelos de erosión para la planificación de actividades forestales (parte I). *Ambiente For.* (Chile) 1(2): 42-45.
- MARTÍNEZ, R. 2004.** Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Bio-Bio (sector sur). Tesis de grado. Santiago, Chile; Universidad de Chile. 147 p.
- TOKUGAWA K. y R. VARGAS. 1996.** Control de erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile. Informe intermedio de control de erosión. Proyecto CONAF – JICA. Chile. 72 p.
- VALENZUELA, B y L. S. MORALES. 2004.** Estimación del factor de erosividad de las precipitaciones en la Región de Coquimbo. XIV Simposio Chileno de Física, Antofagasta. Chile. 3p.
- WISCHMEIER, W. H. y D. D. SMITH . 1978.** Predicting soil erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook 537. 58 p.