



## METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN ZONAS ÁRIDAS Y SU APLICACIÓN EN EL MANEJO Y PROTECCIÓN DE PROYECTOS HIDRÁULICOS

**Ing. Fernando Oñate-Valdivieso**

Docente Investigador del Área de Hidrología-UCG-SIG  
Universidad Técnica Particular de Loja  
Campus San Cayetano, Loja – Ecuador.  
[fronate@utpl.edu.ec](mailto:fronate@utpl.edu.ec)

### Resumen

El proyecto de riego Zapotillo irrigará 10000 ha en una zona sub desértica tropical ubicada en la Provincia de Loja, zona fronteriza entre Ecuador y Perú, la conducción principal atraviesa zonas con fuertes pendientes y escasa cobertura vegetal, condiciones que producen una pérdida considerable de suelo que se traduce en transporte de sedimentos en el canal y obstrucciones por deslizamientos, por lo que se desea identificar áreas críticas para la erosión hídrica como base para implementar planes de manejo y protección que aseguren el total funcionamiento de la obra. Para esta tarea se aplica la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) en combinación con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Al tratarse de un canal de riego en una zona con escasa información meteorológica, se introdujo modificaciones en la metodología general de la RUSLE en lo referente a la determinación de la erosividad de la lluvia, y al factor topográfico LS.

### Abstract

The Project of irrigation in Zapotillo will irrigate 10,000 hectares in a sub-deserted and tropical zone located in the province of Loja, a border zone between Ecuador and Peru, the canal passes through sloping zones that have scarce vegetation as a covering, which produces a big loss of soil generating transportation of sediments in the canal and landslides due to floods, that is why it is necessary to identify critical areas for the hydro erosion as the basis to implement plans for the management and protection that assure the total functioning of the work. In this activity we apply the reviewed universal soil loss equation (RUSLE) in combination with systems of geographic information (GIS). Being this an irrigation canal in a zone with a lack of meteorological information, it was introduced modifications in the general methodology of the RUSLE regarding determining the erosion level in the rain and the topographic factor LS.

**Palabras claves:** RUSLE; pérdida de suelo; erodabilidad; erosividad de la lluvia.

### Introducción

El éxito de un proyecto para el aprovechamiento de recursos hídricos, depende en gran medida de los planes de manejo a implementarse con miras a asegurar, hasta cierto punto, la disponibilidad de agua y la reducción del volumen de sedimentos hasta rangos aceptables. En el caso del manejo de sedimentos es necesario contar con metodologías que permitan la evaluación de zonas vulnerables a la erosión hídrica, la que predominantemente origina la pérdida de suelo y la consecuente producción de sedimentos. La propuesta metodológica para la evaluación del riesgo de erosión en zonas áridas se ha desarrollado en base a la ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), formulada por Wischmeier y Smith (1968–1978) y revisada por Lane y Nearing (1989), a la que se le han introducido ciertas modificaciones en lo referente a la determinación del factor de erosividad de la lluvia R y al factor topográfico

LS, y su aplicación se ha realizado empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el tratamiento de la información.

La presente metodología se aplica al área de influencia de la conducción principal del Proyecto de Riego Zapotillo ubicado en el extremo sur occidental de la provincia de Loja, en la zona limítrofe Ecuador – Perú. La conducción principal se encuentra en una zona subdesértica tropical con temperaturas que oscilan entre los 23 y 26 °C, escasa precipitación y la poca presencia de cobertura vegetal. Tiene una longitud de 30 Km y atraviesa zonas caracterizadas por la presencia de fuertes pendientes y escasa cobertura factores que se traducen en pérdida constante de suelo que con el tiempo se traduce en arrastre de material en la conducción y en obstrucciones ocasionadas por deslizamientos, de ahí que es necesario realizar un estudio del potencial erosivo a fin de identificar zonas críticas e implementar planes



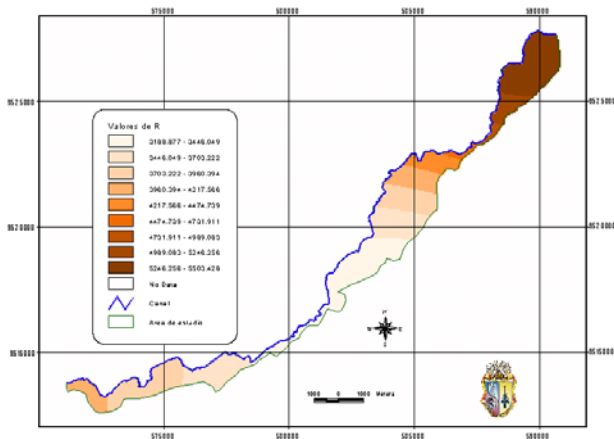


Partiendo de estas ecuaciones, con una duración de la tormenta calculada en base al tiempo de concentración que se presenta en el área de influencia del canal y con un periodo de retorno de cinco años se definió la tormenta típica empleando el método de los bloques alternos. Se calculó la energía total de la tormenta típica aplicando la ecuación (2), para obtener finalmente un valor de R típico para la zona de estudio en base a la ecuación (3).

Conocido el R típico se calculó el valor mensual de R para las estaciones Zapotillo, Alamor en Saucillo, Sozoranga y Sabiango pertenecientes a la red del INAMHI, en base a multiplicar el R típico por el número de días con precipitación registrados en cada mes, este valor es corregido en base a un factor obtenido de relacionar la precipitación total de cada mes con el total anual, para finalmente obtener el R anual con la sumatoria de los valores mensuales de R. Las estaciones consideradas son vecinas a la zona de estudio, cuentan con registros de precipitación mensual y pertenecen a la Zona de Intensidades No. 19.

Con la ayuda de ArcView 3.2ª y su extensión Saptial Analyst, se realizó la interpolación de los valores de R anual correspondientes a cada estación a fin de conformar un mapa de la variación espacial de R.

**GRAFICO No. 2: Erosividad de la lluvia**



**Factor de erodabilidad del suelo**

Este factor representa la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica, su valor depende de la textura superficial, la estructura, de la permeabilidad y del contenido de materia orgánica. Su determinación de realiza aplicando la expresión:

$$K = \frac{2.1M^{1.14}(12-a)(10)^{-4} + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)}{100} * 1.2928 \quad (6)$$

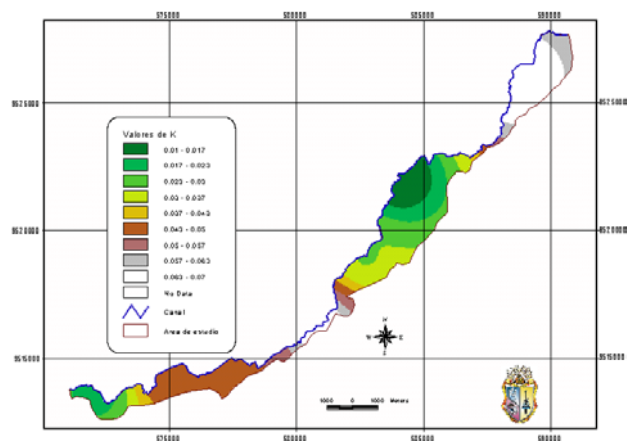
Donde:

- K* es el índice de erodabilidad
- M* = (%Limo + % arena muy fina) (100- % arcilla)
- a* es el porcentaje de materia orgánica
- b* es la clasificación de acuerdo al tipo y clase de la estructura
- c* es la clasificación de la permeabilidad

En el presente caso de estudio, al no contar con información a detalle de los tipos de suelo, se optó por tomar muestras de suelo uniformemente repartidas en el área de estudio, para posteriormente realizar el análisis granulométrico, de clase estructural, de permeabilidad y de contenido de materia orgánica a fin de calcular los valores de K para cada una de las muestras tomadas aplicando la ecuación (6).

Se procedió a colocar sobre una mapa de la zona de estudio los lugares de toma de muestras y los correspondientes valores de K para proceder a realizar la interpolación Krigging de los datos para conformar un mapa de la distribución de K en el área de estudio.

**GRAFICO No.3: Factor de erodabilidad del suelo**



**Factor de longitud y grado de la pendiente**

El factor LS integra la pendiente media de la ladera su longitud, considera el efecto de la topografía sobre la erosión. La pendiente (S) refleja la influencia de la gradiente de la pendiente en la erosión ya que el potencial de erosión incrementa con la pendiente, la longitud (L) se define como la distancia horizontal entre el punto donde inicia el escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente al grado de producir la



sedimentación o hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un curso bien definido.

La expresión que permite calcular el factor LS es la siguiente:

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2) \quad (7)$$

Donde:

$\lambda$  es la longitud de la pendiente en m  
 $m$  es un exponente que depende del grado de la pendiente  
 $s$  es la pendiente del terreno en %

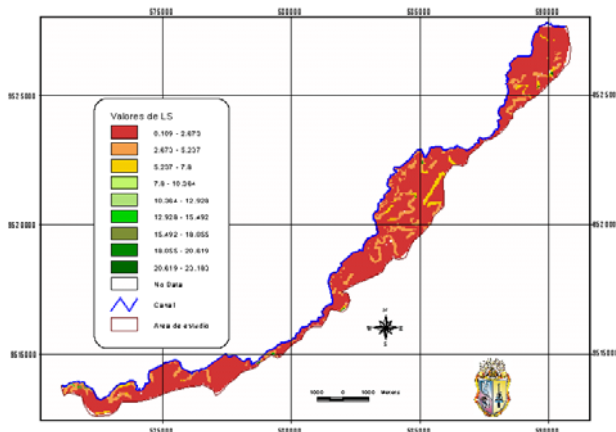
$$m = 0.1342 * Ln\phi + 0.192 \quad (8)$$

Donde:

$m$  es el exponente de la longitud de la pendiente  
 $\phi$  es el ángulo de pendiente [%]

Para encontrar el factor LS se procedió a construir un modelo digital del terreno utilizando ArcView 3.2ª, con la ayuda del Geo-HMS, un preprocesador de información geográfica para modelamiento hidrológico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, se confeccionó un mapa de cursos de agua a fin de determinar el potencial recorrido de los escurrimientos, para posteriormente calcular su longitud y en base a interpolación definir un mapa de longitud de la pendiente. A partir del mapa de pendientes, se realizó el calculo del coeficiente m según la formula (8). Finalmente de aplico la formula (7) para construir un mapa del factor LS aplicando el Map Calculador de ArcView.

**GRAFICO No. 4: Factor LS de longitud y grado de la pendiente**



**Factor de cobertura del suelo**

El factor de cobertura del suelo C, contempla las diferencias de comportamiento del suelo frente a la erosión en función de su cobertura. El coeficiente C considera el efecto de la cobertura sobre la erosión según características del ecosistema tales como la especie o especies, el estado del ecosistema en sincronización con los periodos de lluvias las características de la materia orgánica acumulada sobre la superficie del suelo, las labores sobre el suelo (en sentido diferente a las prácticas de conservación), etc.

La relación de pérdida de suelo por vegetación y manejo de residuos de cultivo se calcula en base de 5 subfactores, con la expresión:

$$SLR = PLU * CC * SC * SR * SM \quad (9)$$

Donde:

$SLR$  es la relación de pérdida de suelo debido a la vegetación, cultivos y prácticas de arado de suelo.

$PLU$  es el subfactor de uso de suelo previo.

$CC$  es el subfactor de cobertura de dosel.

$SC$  es el subfactor de cobertura de la superficie.

$SR$  es el subfactor de rugosidad de la superficie.

$SM$  es el subfactor de humedad del suelo

Los subfactores individuales calculados por el programa RUSLE, están expresados en función a una o más variables, incluyendo cobertura de residuos, cobertura de dosel, altura de dosel, rugosidad de la superficie, biomasa del subsuelo (masa de raíz más residuos incorporados), cultivos previos, humedad del suelo y tiempo. En el presente caso fue necesario tomar muestras de los residuos vegetales y determinar in situ la altura promedio de dosel, en base a muestras de suelo se determinó su contenido de humedad y se realizó estimaciones de la rugosidad de la superficie a fin de calcular cada un de los subfactores y encontrar el valor de SLR. El coeficiente C se calcula con la expresión:

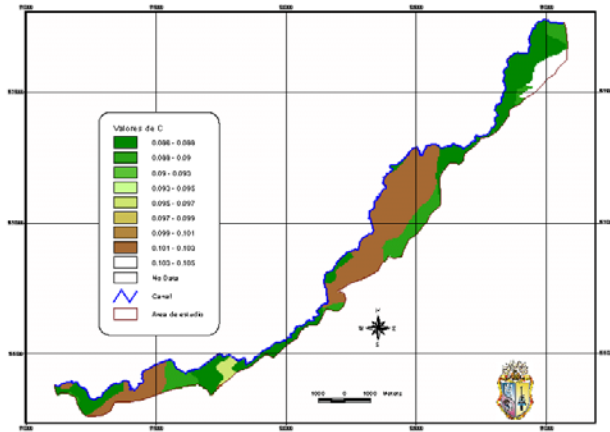
$$C = \frac{SLR_1 EI_1 + SLR_2 EI_2 + \dots + SLR_n EI_n}{EI_t} \quad (10)$$

El coeficiente C posee una variación temporal en base a los cambios de cosecha, de estación e incluso de las etapas de crecimiento de los cultivos. En el caso presente, por tratarse de una zona en la que durante el año las condiciones ambientales no varían considerablemente, se ha trabajado con valores



anuales de PLU, CC, SC Y SR, lo que simplifica considerablemente los cálculos.

**GRAFICO No. 5: Factor de cobertura C**

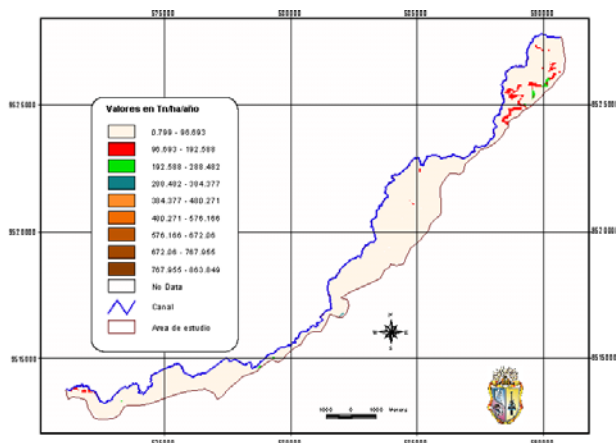


*Factor de práctica de control de la erosión*

El factor P considera las pérdidas del suelo con respecto a las prácticas de labranza en pendiente, tendientes a disminuir esta pérdida. Estas prácticas al modificar los patrones de flujo y el grado y dirección de la superficie de escurrimiento, influyen directamente en la conservación o no del suelo. Para las prácticas de soporte de tierras cultivadas, generalmente incluye contorno, cultivos en faja, terraceo y drenaje subsuperficial.

En este estudio no se ha considerado este factor ya que en la zona de proyecto no se implementa ningún plan de manejo y conservación y lo que se pretende determinar son las zonas en las que el potencial erosivo requiere intervención para su conservación.

**GRAFICO No. 6: Mapa de pérdida de suelo**



**Resultados obtenidos**

En la zona de estudio se ha encontrado que los valores de erosividad de la lluvia (R) oscilan entre 3188 y 5500 Mj mm/ha h. El factor de erodabilidad del suelo (K) tuvo una variación entre 0.01 y 0.07. El factor topográfico (LS) tuvo un rango de variación entre 0 y 23. Los valores de C oscilaron entre 0.086 y 0.105, obteniéndose valores de pérdida de suelo (A) que oscilan entre 0.7 y 850 t/ha/año.

**Discusión de resultados**

Como se puede observar en el gráfico No. 11 el 55% de la superficie posee valores de erosión entre leve y moderado, el 40% equivalente a fuerte y el 5% valores considerados como muy fuertes. La zonas con valores de perdida de suelo muy fuertes se encuentran predominantemente en los lugares donde la pendiente es considerablemente fuerte. El factor R evidencia a las claras que la zona de estudio está sometida a tormentas con un alto poder erosivo y aunque la zona es seca durante gran parte del año, en la época lluviosa se presentan tormentas de gran intensidad, como se evidencia al analizar las ecuaciones (4) y (5). Los valores de erodabilidad del suelo probablemente se deban a la presencia de altos porcentajes de arena, del orden de 40 al 75%, contribuyendo a que el suelo se disgregue más fácilmente a pesar de que el contenido de arcilla es del orden del 11 al 25 %, adicionalmente el contenido de materia orgánica no sobrepasa el 3.5%, por lo que el suelo no posee la suficiente cohesión. Los valores del Factor LS son relativamente bajos especialmente debido a que las longitudes de la escorrentía son relativamente pequeñas ya que se presentan variaciones significativas de la pendiente en tramos cortos, ocasionando depósitos intermedios. Los valores más bajos del coeficiente C corresponden a zonas en las que se realizan prácticas agrícolas, lo que hace notar que los cultivos reducen considerablemente los procesos erosivos, no siendo este el caso del bosque seco, al que le corresponden los valores más altos del coeficiente C, y más aún si se considera que se trata de áreas en las que no se ha realizado prácticas de conservación. Las áreas que se identifican según el nivel de erosión se resumen en el cuadro No. 1



**CUADRO NO. 1: Superficies del área de estudio, según niveles de erosión.**

NIVEL EROSION	SUPERFICIE (ha)	%
Leve (<10ton/ha/año)	7.923	0.35
Moderada (10 - 50 ton/ha/año)	1237.24	54.81
Fuerte (50 - 200 ton/ha/año)	866.46	38.39
Muy Fuerte (>200 ton/ha/año)	145.63	6.45

### Conclusiones

- Los valores bajos de pérdida de suelo se presentan en las zonas en las que se realizan prácticas agrícolas y los valores altos se registran en lugares sometidos a deslizamientos.
- El cálculo de factor de erosividad de la lluvia a partir de una tormenta típica que permite la aplicación de la RUSLE en zonas donde la información pluviográfica es escasa.
- La zona de estudio se ve sometida a tormentas de alta intensidad durante los primeros meses del año en los que se concentra la mayor pérdida de suelo anual.
- La presencia de cantidades significativas de arena y la baja presencia de materia orgánica en los suelos producen aumentos significativos de la erodabilidad del suelo.
- El uso y cobertura del suelo influye decisivamente en el control de los procesos erosivos ya que los menores valores de pérdida de suelo se presentan en zonas en las que se realizan práctica agrícolas.
- La implementación de prácticas de control de los procesos erosivos contribuirá al mejor funcionamiento del proyecto reduciendo considerablemente los rubros correspondientes al mantenimiento.
- El realizar el cálculo del factor topográfico LS en base a la aplicación del álgebra de mapas en formato raster permite estimar con mejor precisión la influencia de este factor en la pérdida de suelos en la zona de estudio.
- El empleo de Sistemas de Información Geográfica, permite implementar planes de manejo en base a una simulación de diversos escenarios facilitando considerablemente la toma de decisiones.

### Bibliografía

- Antesana Coca, J. C.** 2001 *Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca taquiña.* "Cochabamba, Bolivia, UMSS.
- Foster, G. R. Y Wischmeier, W. H.,** *Evaluating Irregular Slopes for Soil loss Prediction.* Transaction of the ASAE, 17
- Montes León, M. A., Domínguez Cortazar, M. A. y Ventura Ramos, E.** 2000 *Utilización de un SIG para la Estimación del Riesgo de Erosión Hídrica en la Cuenca Santa Catarina, Querétaro, México* UAQ
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane L. J.** 1989. *A Process-based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project Technology.* American Society of Agricultural Engineers USA,
- Renard, K. G. y Foster G. R.** 1995. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* USDA, USA
- Rodríguez Fiallos, L.** 1999 *Estudio de Lluvias Intensas,* Quito INAMHI
- USDA.** 1993. *User's guide, Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).* United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D.D.** 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning* USDA
-