



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Herramienta para la automatización del cálculo del factor K de la USLE

CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, E.¹, DOMINGO-SANTOS, J.M.¹, RAPP-ARRARÁS, I¹ y JEREZ LÓPEZ, E.²

¹ Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva

² Universidad Autónoma de Madrid. Escuela Politécnica Superior

Resumen

El factor K propuesto por Wischmeier et al. (1971) para utilizar en la *Universal Soil Loss Equation* (USLE) es el índice más utilizado a nivel mundial para calcular la erosionabilidad del suelo. Sin embargo, su aplicación práctica, bien utilizando el nomograma desarrollado por estos autores o bien la ecuación subyacente, presenta una serie de dificultades. Uno de los principales problemas consiste en que los análisis de suelo ordinarios no facilitan el porcentaje de arena muy fina (AMF), dato de entrada fundamental para el cálculo del factor K . Además, la ecuación comentada sólo se puede aplicar cuando la fracción de limo más AMF es inferior al 70 %; para suelos con un porcentaje mayor, la única opción posible para calcular el factor K era recurrir al nomograma.

En este trabajo hemos empleado el software estadístico R para implementar un programa que permite la automatización del cálculo del factor K para todo el rango posible de valores de la fracción de limo más AMF, sin tener que recurrir al uso del nomograma, una vez revisados y mejorados otros trabajos previos. Además, en los casos en que se desconozca la fracción de AMF, la herramienta proporciona también una estimación puntual de dicha fracción, acompañada de un intervalo de predicción.

Palabras clave

RUSLE, arena muy fina, erosionabilidad, estimación de las pérdidas de suelo, textura del suelo.

1. Introducción

Entre los distintos índices propuestos para el cálculo de la erosionabilidad del suelo cabe destacar el factor K , desarrollado por Wischmeier et. al (1971) para utilizar en la *Universal Soil Loss Equation* (USLE). De hecho, la USLE y sus sucesoras, la *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) versión 1 (RUSLE1) (RENARD ET AL., 1997) y la RUSLE versión 2 (RUSLE2) (USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2013), son, actualmente, los modelos más utilizados a nivel mundial para la estimación de las pérdidas de suelo, tanto en el ámbito de la investigación como en el de la gestión (ALEWELL ET AL., 2019; AUERSWALD ET AL., 2014; LAFLÉN & MOLDENHAUER, 2003; PANAGOS ET AL., 2014; RENARD ET AL., 2011).

Algunos ejemplos de la importancia de este índice son la elaboración, por parte del *European Soil Data Centre* (ESDAC), del mapa de erosionabilidad del suelo en la Unión Europea (PANAGOS ET AL., 2012, 2014), completado con el mapa de erosionabilidad de Suiza (SCHMIDT ET AL., 2018); el elaborado en Australia por Teng et al. (2016) o el mapa de la región de África oriental (FENTA ET AL., 2020). En todos ellos utilizaron el factor K de la USLE.

El factor K se ha incluido también en una serie de modificaciones o extensiones de la USLE (AUERSWALD ET AL., 2014), tales como la MUSLE (WILLIAMS, 1975), la dUSLE (FLACKE ET AL., 1990), la USLE-M (KINNELL, 2007; KINNELL & RISSE, 1998) o la USLE-MM (BAGARELLO ET AL., 2008, 2010); y se ha integrado en otros modelos de predicción de la erosión más complejos (AUERSWALD ET AL., 2014; LAFLÉN & FLANAGAN, 2013) como, por ejemplo, los modelos EPIC (WILLIAMS ET AL., 1983), SWAT (ARNOLD ET AL., 1998), AGNPS (CRONSHEY & THEURER, 1998; YOUNG ET AL., 1989), Watem/Sedem (VAN ROMPAEY ET AL., 2001) o CSLE (BAOYUAN ET AL., 2002), entre otros. El uso de estos modelos es

también frecuente, como lo pone de manifiesto su mayor número de citas en revistas científicas frente a otro tipo de modelos independientes de la tecnología USLE/RUSLE (ALEWELL ET AL., 2019; AUERSWALD ET AL., 2014).

Actualmente, en el marco de la RUSLE2, los valores del factor K se deben seleccionar directamente de la base de datos del USDA-NRCS, donde estos valores están disponibles para la mayoría de los suelos en los EE. UU. (USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2008). Cuando estos datos no están disponibles, ya sea por condiciones específicas o por localizaciones fuera de EE.UU., el cálculo del factor K para un suelo dado se realiza utilizando el nomograma desarrollado por Wischmeier et al. (1971) o su ecuación subyacente (WISCHMEIER & MEYER, 1973) y, si es necesario, sus posteriores aproximaciones y extensiones algebraicas (AUERSWALD ET AL., 2014; CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, 2021; USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2013, Chapter 4).

El uso de estas ecuaciones presenta una serie de dificultades. En primer lugar, la limitación que supone el desconocimiento de alguna de sus variables de entrada, como la fracción de arena muy fina (AMF), dato que no suele estar disponible. En segundo lugar, cuando los valores de la fracción de limo más AMF son superiores al 70 % la ecuación original no es aplicable y es necesario recurrir a alguna de las extensiones que han sido propuestas (AUERSWALD ET AL., 2014; CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, 2021; USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2013, Chapter 4). Ahora bien, alguna de estas propuestas tienen un ajuste deficiente (CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, 2021) y, además, su uso no está muy generalizado, como se pone de manifiesto en la confección del ya comentado mapa de erosionabilidad del suelo en la Unión Europea (PANAGOS ET AL., 2014), cuyos autores excluyeron 212 muestras de sus cálculos y modificaron los datos de otras 718 por tener todas ellas valores de limo superiores al 70 %.

Es necesario, por tanto, el desarrollo de una herramienta que facilite el procedimiento de cálculo del factor K , que supere las limitaciones de la ecuación original y que permita gestionar eficazmente grandes cantidades de datos. De esta forma se podría utilizar toda la información edáfica disponible, tan escasa y difícil de obtener, y se evitarían situaciones tan poco deseables como prescindir de los suelos más erosionables en la confección de un mapa de erosión del suelo.

2. Objetivos

En este trabajo hemos utilizado el software estadístico R para implementar un programa que permite el cálculo automatizado del factor K . En esta herramienta se han incorporado los trabajos de Corral-Pazos-de-Provens et al. (2018), que permite la estimación de la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas del USDA, y de Corral-Pazos-de-Provens (2021), donde se ofrece una nueva ecuación que reproduce fielmente el nomograma de Wischmeier et al. (1971).

3. Material y métodos

3.1. Ecuación general

El factor K de erosionabilidad del suelo de la USLE representa la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad de la lluvia medida en condiciones estándar (WISCHMEIER & SMITH, 1965). Para su cálculo se puede recurrir al nomograma desarrollado por Wischmeier et al. (1971) (Figura 1) o a la ecuación presentada por Wischmeier y Meyer (1973):

$$K = 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a) + 3,25 \cdot 10^{-2} \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot (c - 3), \quad (1)$$

donde:

M es el parámetro relativo al tamaño de las partículas del suelo, que se puede obtener a partir de la ecuación (2), sólo válida para valores de la fracción de limo más AMF inferiores al 70 %

$$M = (t + v) \cdot (100 - y) \quad 2)$$

t es la fracción de limo (0,002-0,05 mm), en porcentaje

v es la fracción de AMF (0,05-0,1 mm), en porcentaje

y es la fracción de arcilla (< 0,002 mm), en porcentaje

a es el contenido en materia orgánica (MO), en porcentaje, que debe ser inferior o igual a 4 %

b es el código que se asigna a la estructura del suelo

c es la clase de permeabilidad del perfil

Todos los datos de entrada se refieren al horizonte superior del perfil, excepto la clase de permeabilidad, que se refiere a la totalidad del perfil.

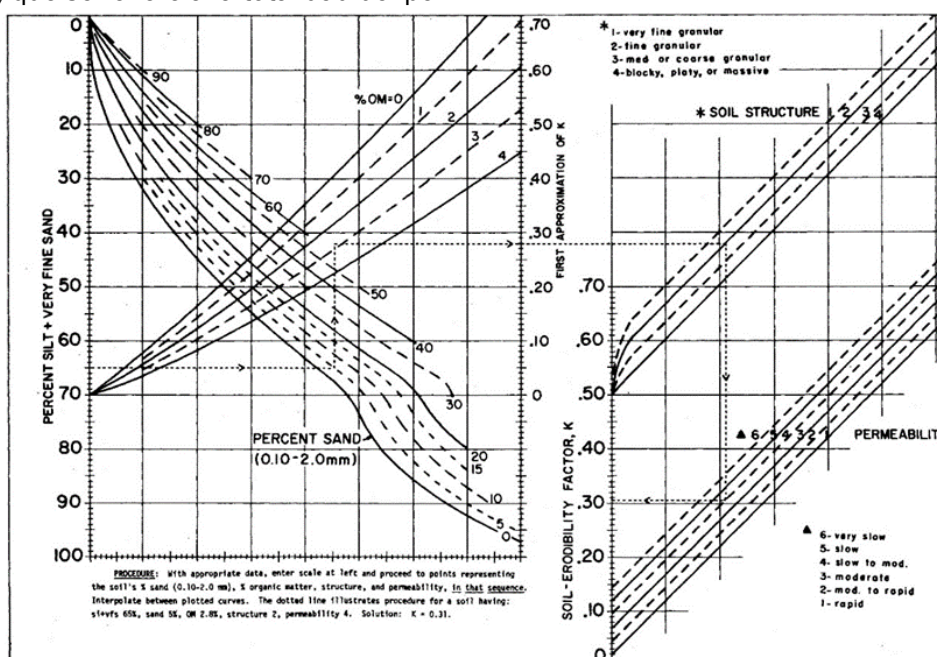


Figura 1. Nomograma para el cálculo del factor K de erosionabilidad del suelo (WISCHMEIER ET AL., 1971).

En su versión original, tanto el nomograma como la ecuación proporcionan valores del factor K en términos de las unidades tradicionales de EE. UU., concretamente en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{in})$. Para su conversión a las unidades del Sistema Internacional, por ejemplo en $(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{mm})$, hay que multiplicar el valor del factor K obtenido por 0,1317 (FOSTER ET AL., 1981).

3.2. Estimación de la fracción de arena muy fina

El análisis de la textura es uno de los más solicitados para la caracterización de los suelos (SOIL SURVEY STAFF, 2014, Chapter 3), pero, desafortunadamente, la información que proporcionan los laboratorios, o la que contienen muchas bases de datos, se reduce con frecuencia a las fracciones de arena, limo y arcilla (SKAGGS ET AL., 2001). El desconocimiento de la fracción de AMF puede causar un gran error en el cálculo del factor K (AUERSWALD ET AL., 2014), por lo que, como

requisito previo para la aplicación correcta de este índice de erosionabilidad, será necesaria su estimación.

En el trabajo de Corral-Pazos-de-Provens et al. (2018) se evalúa el rendimiento de los tres modelos existentes para estimar la fracción de AMF a partir de las tres fracciones texturales básicas USDA, a saber, la fórmula propuesta en la RUSLE2 (USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2013, Chapter 4), el método utilizado por el ESDAC (PANAGOS ET AL., 2014) y la teoría de Shirazi-Boersma (SHIRAZI ET AL., 1988, 2001). Sus resultados muestran un rendimiento muy deficiente de los tres modelos y proponen una nueva herramienta (Figura 2), basada en una regresión cuantílica local (segmentada), para realizar estimaciones puntuales de la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas USDA, además de proporcionar un intervalo de predicción del 50 % para las mismas.

La Figura 2 es la representación gráfica según curvas de nivel de tres archivos raster, uno para cada cuartil, en los que, para cada combinación posible de arena, limo y arcilla, se proporciona un valor de la fracción de AMF. Esta es la información que se utiliza en la herramienta que presentamos en este trabajo para estimar la fracción de AMF cuando no se dispone de este dato. La estimación puntual se obtendría a través del gráfico de la mediana condicional (Figura 2b) y los límites del intervalo de predicción estarían definidos por los valores proporcionados por el primer cuartil condicional (Figura 2a) y por el tercer cuartil condicional (Figura 2c). Además, aprovechando la circunstancia de que el factor K es una función monótona creciente de la fracción de AMF, esta información le permite al programa proporcionar también una estimación del factor K junto con un intervalo de predicción del 50%.

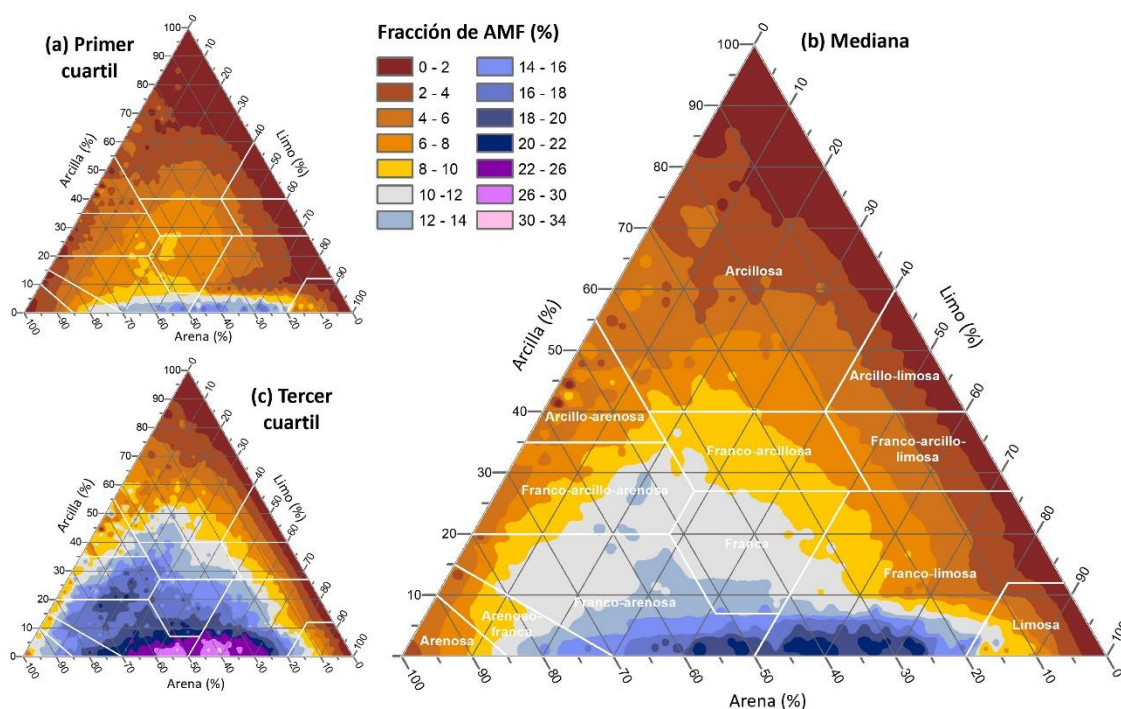


Figura 2. Nomogramas para la estimación de la fracción de AMF a partir de las fracciones de arena, limo y arcilla USDA. El gráfico de la mediana condicional proporciona el valor puntual de la fracción de AMF y los gráficos del primer y tercer cuartil condicional los límites del intervalo de predicción (CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS ET AL., 2018).

3.3. Campo de definición textural del nomograma

El uso correcto del nomograma de Wischmeier et al. (1971), o de su ecuación subyacente (WISCHMEIER & MEYER, 1973), pasa por conocer sus limitaciones, derivadas, en su mayoría, de su origen empírico-estadístico. Ni el nomograma ni la ecuación se deberían utilizar, por tanto, con datos que queden fuera de su campo de definición, es decir, más allá de los datos que se utilizaron para su elaboración.

Para el caso concreto de la textura, Corral-Pazos-de-Provens (2021) concretaron las clases texturales de las muestras de suelo que fueron utilizados para obtener el nomograma (Figura 3), clases en las que el ajuste del nomograma será mejor, y concluyeron que los puntos del triángulo de textura localizados en las clases texturales arcillosa, arcillo-arenosa, franco-arcillo-arenosa y limosa no pertenecen al campo de definición del factor K. Por tanto, si se calcula el factor K para suelos con estas texturas, debemos ser conscientes de que estamos realizando una extrapolación.

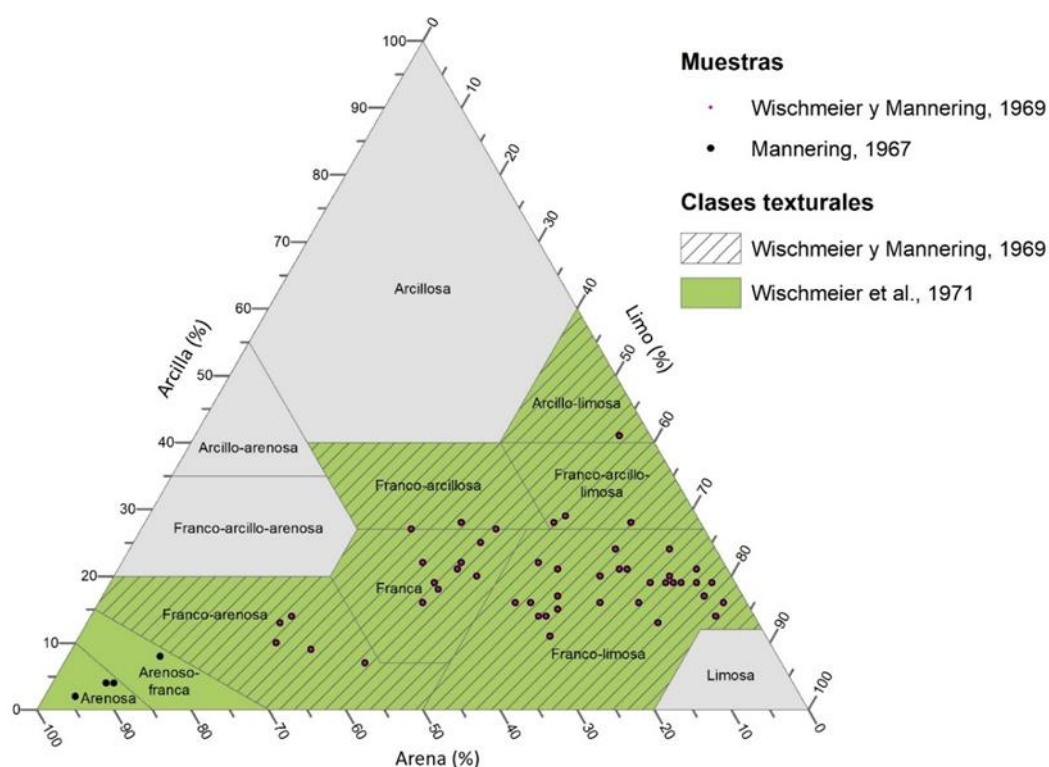


Figura 3. Identificación de las clases texturales de las muestras de suelo utilizadas por Wischmeier et al. (1971) para la elaboración del nomograma. Se indica también la localización en el triángulo de textura de las muestras utilizadas por Mannering (1967) y de las utilizadas por Wischmeier y Mannering (1969), junto con sus clases texturales. Figura tomada de Corral-Pazos-de-Provens (2021).

3.4. Una nueva ecuación para el cálculo del factor K

La ecuación subyacente al nomograma de Wischmeier et al. (1971), presentada por Wischmeier y Meyer (1973), no siempre se puede aplicar, pues no reproduce fielmente ciertas zonas del nomograma. Nos referimos, por un lado, a la parte de la familia de curvas que permite el cálculo del parámetro M cuando los valores de la fracción de limo más AMF son superiores al 70 %; por otro, a los segmentos curvos de la familia de líneas que representan las distintas estructuras.

Cuando nos encontramos en alguna de estas dos circunstancias, para poder calcular el factor K será necesario recurrir al nomograma o bien utilizar alguna de las adaptaciones existentes, a saber, la que proponen en la RUSLE2 (USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2013, Chapter 4) o la que fue desarrollada por Auerwald et al. (2014). Corral-Pazos-de-Provens (2021) comprobaron que la calidad del ajuste de estas adaptaciones era deficiente y presentaron un nuevo conjunto de ecuaciones que reproduce fielmente las diferentes partes del nomograma, por lo que permite prescindir totalmente de él para el cálculo del factor K :

$$M = \begin{cases} t' \cdot (t' + d') & \text{si } t' \leq 67\% \\ M_1 & \text{si } t' > 67\% \text{ y } M_1 \leq 8.000 \end{cases}$$

$$M_1 = 67 \cdot (67 + d') + (t' - 67) \cdot (-2,416 \cdot d' - 17,03 \cdot t' + 0,02491 \cdot d'^2 + 0,1103 \cdot t'^2 + 0,03238 \cdot t' \cdot d' + 730,8)$$

$$k_t = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot M^{1,14}$$

$$k_o = (12 - a) \cdot 10^{-1} \quad \text{si } a \leq 4\%$$

$$K_1 = k_t \cdot k_o$$

$$K_s = 3,25 \cdot 10^{-2} \cdot (b - 2)$$

$$K_{1s} = \begin{cases} K_1 + K_s & \text{si } K_1 + K_s \geq 0,106 \\ K'_{1s} & \text{si } K_1 + K_s < 0,106 \end{cases}$$

$$K'_{1s} = (0,8726 + 1,3913 \cdot b - 0,3117 \cdot b^2 + 0,0238 \cdot b^3) \cdot K_1^2 + (-0,0843 + 0,1099 \cdot b - 0,0608 \cdot b^2 + 0,0215 \cdot b^3) \cdot K_1 + 0,07$$

$$K_p = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot (c - 3)$$

$$K = K_{1s} + K_p \quad (3)$$

donde:

M es el parámetro relativo al tamaño de las partículas

t' es la fracción de limo más AMF (0,002-0,1 mm), en porcentaje

d' es la fracción de arena no muy fina (0,1-2 mm), en porcentaje

k_t es el subfactor correspondiente a la textura

k_o es el subfactor función de la MO

a es el contenido en MO, en porcentaje

K_1 es la primera aproximación de K

K_s es el subfactor correspondiente a la estructura

b es el código que se asigna a la estructura del suelo

K_{1s} es el valor obtenido tras aplicar la información de la estructura a la primera aproximación de K

K_p es el subfactor de la permeabilidad

c es la clase de permeabilidad del perfil

Los valores del parámetro M superiores a 8000 y de la MO mayores del 4 % no se contemplan en el nomograma, por lo que la ecuación no será aplicable en esos casos.

Este conjunto de ecuaciones es el que se utiliza en la herramienta que ofrecemos en este trabajo, que agiliza y facilita el cálculo automático del factor K . Recordamos que los valores del factor K que proporciona esta ecuación vienen expresados en $(0.01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{in})$; para su conversión a las unidades del Sistema Internacional, por ejemplo en $(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{mm})$, hay que multiplicar el valor del factor K obtenido por 0,1317.

4. Resultados: descripción de la herramienta

Presentamos un programa, implementado con el software estadístico R, que permite calcular, para un suelo dado, el valor del factor K de erosionabilidad de la USLE para todo el rango posible de valores de la fracción de limo más AMF. El programa contempla dos situaciones posibles (Figura 4):

- Opción 1. Cuando todas las variables de entrada son conocidas.
- Opción 2. Cuando conocemos todas las variables de entrada, excepto la fracción de AMF.

Dicho programa se encuentra disponible en el siguiente enlace:
<https://github.com/evacorral/Computing-factor-K-from-basic-texture-fractions>

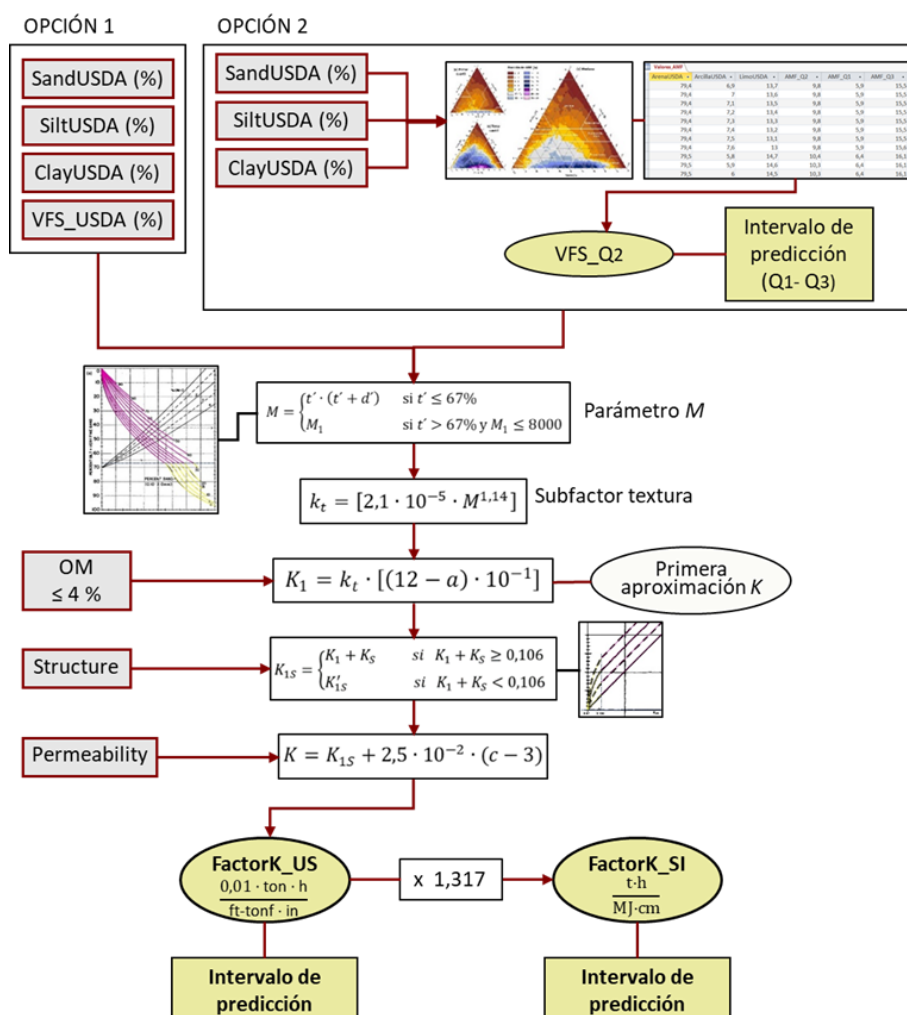


Figura 4. Esquema de funcionamiento de la herramienta presentada en este trabajo. Se representan en gris las variables de entrada y en verde las variables de salida.

4.1. Datos de entrada

Cuando se descarga el programa, dentro de la carpeta “Computing-factor-K-from-basic-texture-fractions-main” se incluye un archivo en formato Excel (Input_data.xlsx) donde se deben añadir los datos de entrada de los suelos cuyo factor K se quiere calcular.

Los tres primeros campos corresponden a las tres fracciones texturales básicas según el esquema del USDA, en porcentaje (SandUSDA, SiltUSDA y ClayUSDA). La suma de estas tres fracciones texturales siempre tiene que ser igual a 100; si los datos de entrada no cumplen esta condición, el programa avisa del error y no proporciona ningún resultado.

El siguiente campo corresponde a la fracción de AMF (VFS_USDA), en porcentaje. En el caso de que no se disponga de este dato, esta celda se dejará vacía; tras el análisis, el programa proporcionará una estimación de esta fracción junto con un intervalo de predicción. Lógicamente, la fracción de AMF nunca podrá ser mayor que la fracción de arena; si los datos de entrada no cumplen esta condición, el programa avisa del error y no devuelve ningún resultado.

Los valores de las fracciones texturales se tienen que escribir como porcentajes y con un único decimal. Si los datos de entrada tienen dos o más decimales, el programa emite un aviso y no devuelve ningún resultado.

En el quinto campo (OM) hay que añadir el porcentaje de materia orgánica. Este valor tiene que estar comprendido entre 0 y 4 %, ambos incluidos. Si el dato de entrada es mayor, el programa avisa del error y no proporciona ningún resultado.

Los dos últimos campos corresponden al código de la estructura (Structure) y a la clase de permeabilidad (Permeability). Recordamos que todos los datos de entrada se refieren al horizonte superior del perfil, excepto la clase de permeabilidad, que se refiere a la totalidad del perfil.

La estructura se describe a través de tres cualidades: el tipo, que considera la forma y disposición de los agregados; la clase, que indica su tamaño, y el grado, que se refiere a la diferenciación de las unidades (SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017, Chapter 3). Wischmeier et al. (1971) concluyeron que el grado no tenía un efecto significativo sobre la erosionabilidad, de manera que sólo tuvieron en cuenta el tipo y la clase para el establecimiento de las 4 categorías del código de la estructura que se indican en el nomograma (Tabla 1). Estas categorías están definidas de acuerdo con las descripciones del USDA *Soil Survey Manual* (SOIL SURVEY STAFF, 1951).

Tabla 1. Códigos de la estructura utilizados en el nomograma, definidos según las descripciones del Soil Survey Manual del USDA (SOIL SURVEY STAFF, 1951)

b	Descripción
1	Granular muy fina
2	Granular fina
3	Granular media o gruesa
4	Bloques, laminar o masiva

En cuanto a la permeabilidad, para su descripción se utilizan 6 clases (Tabla 2), tal y como se propone en el USDA *Soil Survey Manual* (SOIL SURVEY STAFF, 1951). En la estimación de la permeabilidad hay que considerar la totalidad del perfil del suelo, a diferencia de lo que sucede en el resto de subfactores, que consideran sólo el horizonte superior. De hecho, cuando aparece algún

tipo de capa restrictiva, el código de permeabilidad se debe ajustar a esas circunstancias (USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, 2013, Chapter 4).

Tabla 2. Clases de permeabilidad utilizadas en el nomograma, definidas según las descripciones del Soil Survey Manual del USDA (SOIL SURVEY STAFF, 1951)

c	Descripción
1	Rápida
2	Moderada a rápida
3	Moderada
4	Lenta a moderada
5	Lenta
6	Muy lenta

Si el dato de entrada con el código de la estructura o con la clase de permeabilidad es diferente a los establecidos, el programa avisa del error y no proporciona ningún resultado.

4.2. Análisis de los datos

Una vez que se han introducido los datos de entrada, se debe abrir el archivo “computingK” desde R y correr el código. Se crea entonces la función “computingK” en los Environment, que habrá que ejecutar para realizar el cálculo del factor K .

Antes de crear el archivo de salida con los datos calculados, el programa realiza un análisis de los datos de entrada, avisando de los posibles errores o incidencias. Tal y como ya se ha comentado, el programa emite un aviso en las siguientes situaciones:

- cuando la suma de las fracciones de arena, limo y arcilla no es igual a 100,
- cuando la fracción de AMF es mayor que la fracción de arena,
- cuando los valores de la textura se han escrito con más de un decimal,
- cuando la MO es mayor del 4 %,
- cuando el código de la estructura o la clase de permeabilidad no se ajustan a los establecidos.

El programa también avisa cuando al calcular el parámetro M su valor es mayor de 8000, valores no contemplados en el nomograma. En todos estos casos, el programa no realiza el cálculo del factor K y en el archivo de salida las celdas correspondientes quedan vacías.

Cuando los valores texturales de los datos de entrada están fuera del rango de definición del factor K , es decir, suelos de la clase arcillosa, arcillo-arenosa, franco-arcillo-arenosa o limosa, el programa sí realiza el cálculo del factor K , pero avisa que se está realizando una extrapolación.

4.3. Datos de salida

Tras analizar los datos de entrada, el programa genera un nuevo archivo en formato Excel (Output_data.xlsx), en el que se incluyen los resultados calculados. Para ello se añaden 10 nuevos campos al archivo inicial:

- Cuando no se tiene el dato de la fracción de AMF, el programa proporciona una estimación de su valor (VFS_Q2) junto con un intervalo de predicción. El límite inferior de este intervalo lo proporciona el primer cuartil (VFS_Q1) y el límite superior el tercer cuartil (VFS_Q3).

- El valor del factor K , expresado tanto en unidades tradicionales de EE. UU. (FactorK_US), en concreto en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})$, como en unidades del Sistema Internacional (FactorK_SI), en $(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{cm})$.
- Cuando se desconoce el dato de la fracción de AMF, el valor del factor K que se proporciona es un valor estimado y viene acompañado de un intervalo de predicción. El límite inferior de este intervalo está definido por el primer cuartil (FactorK_Q1_US y FactorK_Q1_SI) y el límite superior por el tercer cuartil (FactorK_Q3_US y FactorK_Q3_SI). Los valores vienen expresados tanto en unidades tradicionales de EE.UU. $[(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})]$ como en unidades del Sistema Internacional $[(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{cm})]$.
- Un último campo (Check), que avisa si los valores de la textura están fuera del rango de definición del factor K .

El programa también cuenta con una ayuda, “help_K()”, que incluye la definición de todos los campos.

5. Conclusiones

La herramienta que presentamos en este trabajo agiliza y facilita el cálculo del factor K de erosionabilidad de la USLE, pero, sobre todo, soluciona algunas de las limitaciones de la ecuación original.

El programa utiliza para los cálculos un conjunto de ecuaciones que se ajustan perfectamente al nomograma de Wischmeier et al. (1971), por lo que es posible su aplicación en cualquier situación, sin la restricción de la ecuación original de que los valores de la fracción de limo más AMF sean superiores al 70 %.

Una gran novedad del programa es que informa cuando el cálculo se realiza en suelos cuya textura no pertenece al campo de definición del factor K , avisando que estamos realizando, por tanto, una extrapolación.

Además, incorpora la posibilidad de obtener una estimación del factor K cuando se desconoce la fracción de AMF, con la ventaja añadida de proporcionar también un intervalo de predicción.

6. Bibliografía

ALEWELL, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. & PANAGOS, P.; 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 7(3) 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. & WILLIAMS, J. R.; 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part 1: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34(1) 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

AUERSWALD, K.; FIENER, P.; MARTIN, W. & ELHAUS, D.; 2014. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena* 118 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.008>

BAGARELLO, V.; DI PIAZZA, G. V.; FERRO, V. & GIORDANO, G.; 2008. Predicting unit plot soil loss in Sicily, south Italy. *Hydrol. Process.* 22(5) 586–595. <https://doi.org/10.1002/hyp.6621>

BAGARELLO, V.; FERRO, V. & GIORDANO, G.; 2010. Testing alternative erosivity indices to predict event soil loss from bare plots in Southern Italy. *Hydrol. Process.* 24(6) 789–797. <https://doi.org/10.1002/hyp.7538>

BAOYUAN, L.; KELI, Z. & YUN, X.; 2002. An Empirical Soil Loss Equation. *XII ISCO Conf.*, 21–25.

CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, E.; 2021. Mejoras en la estimación de la textura del suelo y su aplicación al factor *K* de erosionabilidad: una aproximación cuantílica [Tesis doctoral]. Universidad de Huelva <http://hdl.handle.net/10272/20216>

CORRAL-PAZOS-DE-PROVENS, E.; DOMINGO-SANTOS, J. M. & RAPP-ARRARÁS, Í.; 2018. Estimating the very fine sand fraction for calculating the soil erodibility *K* -factor. *L. Degrad. Dev.* 29(10) 3595–3606. <https://doi.org/10.1002/ldr.3121>

CRONSHEY, R. G. & THEURER, F. D.; 1998. AnnAGNPS: Non-point pollutant loading model. *Proc. First Interag. Hydrol. Model. Conf. April 19-23, 1998, Las Vegas, Nevada Vol. 1, 1, 9–16.*

FENTA, A. A.; TSUNEKAWA, A.; HAREGEWEYN, N.; POESEN, J.; TSUBO, M.; BORRELLI, P.; PANAGOS, P.; VANMAERCKE, M.; BROECKX, J.; YASUDA, H.; KAWAI, T. & KUROSAKI, Y.; 2020. Land susceptibility to water and wind erosion risks in the East Africa region. *Sci. Total Environ.* 703 135016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135016>

FLACKE, W.; AUERSWALD, K. & NEUFANG, L.; 1990. Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17(4–5) 383–397. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(90\)90040-K](https://doi.org/10.1016/0341-8162(90)90040-K)

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G. & MOLDENHAUER, W. C.; 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *J. Soil Water Conserv.* 36(6) 355–359.

KINNELL, P. I. A.; 2007. Runoff dependent erosivity and slope length factors suitable for modelling annual erosion using the Universal Soil Loss Equation. *Hydrol. Process.* 21(20) 2681–2689. <https://doi.org/10.1002/hyp.6493>

KINNELL, P. I. A. & RISSE, L. M.; 1998. USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62(6) 1667–1672. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200060026x>

LAFLEN, J. M. & FLANAGAN, D. C.; 2013. The development of U. S. soil erosion prediction and modeling. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 1(2) 1–11. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30034-4](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30034-4)

LAFLEN, J. M. & MOLDENHAUER, W. C.; 2003. Pioneering Soil Erosion Prediction-The USLE Story (Spec. Pub., Vol. 1). World Association of Soil and Water Conservation-WASWC. 54. Beijing.

MANNERING, J. V.; 1967. The relationships of some physical and chemical properties of soils to surface sealing. [Ph. D. Thesis] Purdue University. University Microfilms, Inc., Ann Arbor, Michigan.

PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; ALEWELL, C. & MONTANARELLA, L.; 2012. Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe. *Environ. Model. Softw.* 30 143–145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.002>

PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; BALLABIO, C.; BORRELLI, P. & ALEWELL, C.; 2014. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Sci. Total Environ.* 479–480(1) 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K. & YODER, D. C.; 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook 703. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 403. Washington, DC

RENARD, K. G.; YODER, D. C.; LIGHTLE, D. T. & DABNEY, S. M.; 2011. Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. In Morgan, R. P. C.; Nearing, M. A. (eds.), *Handbook of Erosion Modelling* (1st edition). 135–167. Blackwell Publishing Ltd <https://doi.org/10.1002/9781444328455.ch8>

SCHMIDT, S.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; PANAGOS, P. & MEUSBURGER, K.; 2018. Filling the European blank spot-Swiss soil erodibility assessment with topsoil samples. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 181(5) 737–748. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800128>

SHIRAZI, M. A.; BOERSMA, L. & HART, J. W.; 1988. A Unifying Quantitative Analysis of Soil Texture: Improvement of Precision and Extension of Scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52(1) 181–190. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010032x>

SHIRAZI, M. A.; BOERSMA, L. & JOHNSON, C. B.; 2001. Particle-Size Distributions: Comparing texture systems, adding rock and predicting soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(2) 300–310. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652300x>

SKAGGS, T. H.; ARYA, L. M.; SHOUSE, P. J. & MOHANTY, B. P.; 2001. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(4) 1038–1044. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0009684822&partnerID=40&md5=f2dc0c8efb4ee3ee8566578daf1c9545>

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF; 2017. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, & H. C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office. 639. Washington, D.C.

SOIL SURVEY STAFF; 1951. Soil survey manual. Agriculture Handbook 18. USDA Agricultural Research Administration. 503. Washington, D.C.

SOIL SURVEY STAFF; 2014. Soil survey field and laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 487. Lincoln, Nebraska.

TENG, H.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; SHI, Z.; BEHRENS, T.; CHAPPELL, A. & BUI, E.; 2016. Assimilating satellite imagery and visible–near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environ. Model. Softw.* 77 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.024>

USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE; 2008. User's reference guide: Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2 (RUSLE2). USDA Agricultural Research Service. 444. Washington, D.C.
https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_User_Ref_Guide.pdf

USDA AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE; 2013. Science Documentation: Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2 (RUSLE2). USDA Agricultural Research Service. 335. Washington, D.C.
https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf

VAN ROMPAEY, A. J. J.; VERSTRAETEN, G.; VAN OOST, K.; GOVERS, G. & POESEN, J.; 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surf. Process. Landforms* 26(11) 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>

WILLIAMS, J. R.; 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. *Present Prospect. Technol. Predict. Sediment Yield Sources*, ARS-S-40, 244–252.

WILLIAMS, J. R.; RENARD, K. G. & DYKE, P. T.; 1983. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *J. Soil Water Conserv.* 38(5) 381–383.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B. & CROSS, B. V.; 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26(5) 189–193.

WISCHMEIER, W. H. & MANNERING, J. V.; 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33 131–137.

WISCHMEIER, W. H. & MEYER, L. D.; 1973. Soil erodibility on construction areas. *Proc. Conf. Soil Eros. Causes Mech. Prev. Control. January 26, 1973, Spec. Rep.* 135, 20–29.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D.; 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation. Agriculture Handbook 282. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 49. Washington, D.C.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D. & ANDERSON, W. P.; 1989. AGNPS – A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J. Soil Water Conserv.* 44(2) 168–173.