

METODOLOGIA PARA LA CARTOGRAFIA DIGITAL DE LA EROSION HIDRICA DEL SUELO EN UN SECTOR DEL MUNICIPIO DE MOA

METHODOLOGY FOR THE DIGITAL MAPPING OF THE HYDRIC EROSION SOIL IN A SECTOR OF THE MUNICIPALITY OF MOA

OLGA VALLEJO RAPOSO

Universidad Politécnica de Madrid.
E-mail: ricardoc@minas.upm.es

ADRIAN MARTINEZ VARGAS

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

RESUMEN: Se expone la metodología empleada para el cálculo de la erosión hídrica actual en un sector del municipio de Moa. El cálculo se realiza de forma automatizada empleando como soporte un Sistema de Información Geográfica (SIG) y como técnica el cálculo por unidades discretas (píxeles) de 25 x 25 metros. Como resultado se obtiene un mapa de pérdida de suelo por erosión hídrica para toda el área industrial de Moa y zonas aledañas, que incluye casi la totalidad de los yacimientos lateríticos de níquel de la región.

Palabras claves: Erosión hídrica, SIG, ordenamiento minero-ambiental, planificación del medio físico.

ABSTRACT: In this work a methodology is exposed for the calculation of the current hydric erosion in a sector of Moa. This calculation is carried out in an automatized way using like support a Geographic Information System (GIS), and as technique the calculation for discreet units (pixel) of 25 x 25 meters. As a result a map of soil loss by hydric erosion is obtained for the whole industrial area of Moa, including the locations of nickel deposit of the region.

Key words: Hydric erosion, GIS, mining-environmental planning, physical medium planning.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es la principal y más importante causa de pérdida del suelo en la región minera de Moa, donde se deforestan grandes áreas de terreno, dejando el suelo desnudo. La erosión hídrica se clasifica en: laminar, regueros o surcos y barrancos o cárcavas, y en los suelos de la región están presentes estas tres formas, pero haremos referencia específicamente a la erosión laminar.

En este proceso erosivo influyen varios factores: la lluvia que provoca la erosión del suelo a través del impacto de las gotas sobre la superficie; la cobertura vegetal que constituye la defensa del suelo contra la erosión; la topografía a través de la cual se verifica la intensidad erosiva principalmente por la inclinación y el largo de las laderas y las propiedades de los suelos, sobre todo la textura, estructura, permeabilidad y densidad, al otorgar mayor o menor resistencia a la acción de las aguas.

La erosión es un fenómeno en extremo complejo desde el punto de vista físico y consecuentemente su análisis requiere del planteamiento de numerosas ecuaciones difíciles de aplicar en la práctica. La ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1958) es la más comprensiva y útil para el cálculo de la erosión hídrica del suelo. La aplicación de la ecuación universal al inventario y cartografía de la erosión actual y al riesgo de erosión futura, exige dividir el terreno en unidades de estudio: unidades homogéneas, cuencas y unidades geométricas. La aplicación de la ecuación universal en unidades tipo cuenca presenta una serie de dificultades, como la falta de homogeneidad de la cuenca, valores exagerados de R, etc., las cuales se eliminan si se emplean unidades geométricas de pequeño tamaño. El presente trabajo tiene como objetivo realizar el cálculo, de forma automatizada, de la erosión hídrica en la región de Moa, empleando para ello unidades geométricas de 25 x 25 metros.

ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO

El resultado de la estimación de cada uno de los parámetros que intervienen en la ecuación se presenta a seguir:

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

Donde:

A: pérdida de suelo.

R: índice de erosión pluvial.

K: índice de erosionabilidad del suelo.

L: longitud de pendiente.

S: pendiente de talud.

C: Cubierta vegetal y uso del suelo.

P: Práctica de conservación del suelo.

Índice de erosión pluvial (R)

La escasez de datos de pluviógrafos para la estimación de la intensidad de la precipitación, expresada por: P^2/p , donde P es la precipitación del mes más lluvioso y p es la precipitación media anual, obliga a utilizar el índice de torrencialidad calculado por Icona-Intecsa (1988) que establece la correlación entre el índice de erosión pluvial (R) y el índice de agresividad del clima, de Fournier.

Factor de erosionabilidad (K)

Este factor varía entre 0,3 y 0,7 y depende de las propiedades del suelo, especialmente del contenido de materia orgánica (MO), la textura, la estructura y la permeabilidad. Estos suelos fueron clasificados en seis clases según su tipo, sin tener en cuenta el subtipo.

Los valores de K en los suelos de la región varían de 0,1 en la zona urbana a 0,64 en los suelos pardos. Los suelos pardos son los que presentan un mayor factor de erosionabilidad debido a que poseen un elevado contenido de materia orgánica (5,13 %) y su permeabilidad es baja. Por el contrario, el suelo tipo ferralítico es el que menor K presenta, debido a su bajo contenido de materia orgánica (promedio de 3 %) y a su buena permeabilidad, la cual llega a ser excesiva en algunas zonas.

TABLA 1. CRITERIOS DE EVALUACION DEL PARAMETRO K

TIPO	PARAMETRO K
Ferralítico	0,37
Fersialítico	0,44
Pantanosos	0,46
Ferrítico	0,50
Aluviales	0,56
Pardo	0,64

Longitud (L) y de pendiente (S) del talud

Estos dos factores suelen evaluarse conjuntamente como factor topográfico (LS). Ellos afectan la capacidad de la escorrentía para desprender y transportar los materiales de los suelos al aumentar la velocidad y, por consiguiente, el potencial erosivo del agua.

Partiendo del modelo digital del terreno (MDT) es posible calcular el valor de la pendiente y su orientación, y a partir de ellos la longitud del talud en cada píxel.

El factor de cubierta vegetal y uso del suelo (C)

Este factor incluye los efectos interrelacionados del tipo de cubierta vegetal y la secuencia de la misma en el caso de cultivos, entre otros. Este parámetro se toma por analogía (Tabla 2) y aparece tabulado en la bibliografía (Aguilo y otros, 1998; Instituto Tecnológico Minero de España, 1989).

TABLA 2. CRITERIOS DE EVALUACION DEL PARAMETRO C

TIPO DE VEGETACION	PARAMETRO C
Maleza y arbustos	0,07
Plantas herbáceas y matorrales	0,16
Cultivos anuales (café)	0,25
Bosque de mangle	0,28
Arbolado	0,39
Frutales	0,40
Suelo removido	1

El parámetro C toma valores entre 0 y 1. En la región de Moa el valor más bajo es 0,07 para el suelo cubierto por maleza y arbustos, y el valor máximo corresponde a suelos removidos, como es el caso de las áreas minadas y zonas de cárcavas.

Factor de práctica de conservación o de cultivo (P)

Expresa la influencia que ejercen las prácticas de cultivo, corrección y conservación en la erosión hídrica. Para este trabajo se tomó el valor de 1, ya que no se realizan prácticas de conservación de cultivo.

CÁLCULO AUTOMATIZADO DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Para realizar el cálculo de la erosión de forma automatizada se siguió la filosofía de trabajo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG están formados por un conjunto de módulos o paquetes que realizan funciones muy específicas. Éstos pueden trabajar con dos formatos de datos fundamentales: los datos matriciales (raster) y los vectoriales. Los datos raster forman una red regular de puntos (píxeles), donde cada uno tiene un valor correspondiente a una variable. La información almacenada de forma vectorial puede ser representada en forma de puntos, líneas o áreas (ER Mapper 5.5, User Manual, 1997). La computadora sólo almacena los pares de coordenadas y un atributo o código que caracterice el objeto digitalizado. En este caso, el objetivo es obtener una representación raster de las variables incluidas en el cálculo de la erosión. La obtención de las capas raster se realizó a partir de datos vectoriales de tipo puntual, lineal y areal.

Para que pueda comprenderse mejor la metodología que a continuación se expone, haremos referencia primeramente a algunos de los conceptos básicos de los SIG en relación con el análisis de capas raster:

Álgebra de mapas: Permite obtener el resultado esperado a partir de las operaciones matemáticas de los píxeles con coordenadas similares para lograr un nuevo raster (superposición lógico-aritmética). La superposición cruzada o el cruce de mapas es una de las herramientas más usadas de las capacidades analíticas de los SIG. Dos mapas con un conjunto de categorías son super-

puestos y dan origen a un tercer mapa que contiene las intersecciones de los límites creados entre los dos mapas originales (superposición lógica). El álgebra de mapas permite transformar matemáticamente los valores de los datos con operaciones estándares; por ejemplo, los valores de pendiente expresados en grados pueden ser transformados en %.

Operadores de distancia: Por ejemplo, sobre la representación vectorial de las fallas se crea una red de píxeles a cada uno de los cuales se les asigna la distancia a la falla más cercana. El resultado puede emplearse posteriormente para el pronóstico metalogénico o en el análisis de riesgos por sismicidad, deslizamientos, etcétera.

Operadores de contexto: Los operadores de contexto tienen un sinnúmero de aplicaciones sobre los MDT. Se desplaza una ventana de un tamaño determinado (3x3, 5x5 píxeles) sobre el raster y se opera una función matemática con los valores vecinos del píxel dentro de la ventana, cuyo resultado es asignado al píxel central. Entre las aplicaciones de estos operadores está la creación de mapas de pendientes, redes de drenaje, mapas de sombreado, de gradiente, morfométricos y filtros kernel, entre otras.

METODOLOGÍA

La metodología seguida para el cálculo del factor A es similar a la utilizada para cuencas, con la salvedad de que el proceso se realiza de forma automática y se divide el área de estudio en unidades discretas. Para poder automatizar el cálculo se parte de la digitalización,

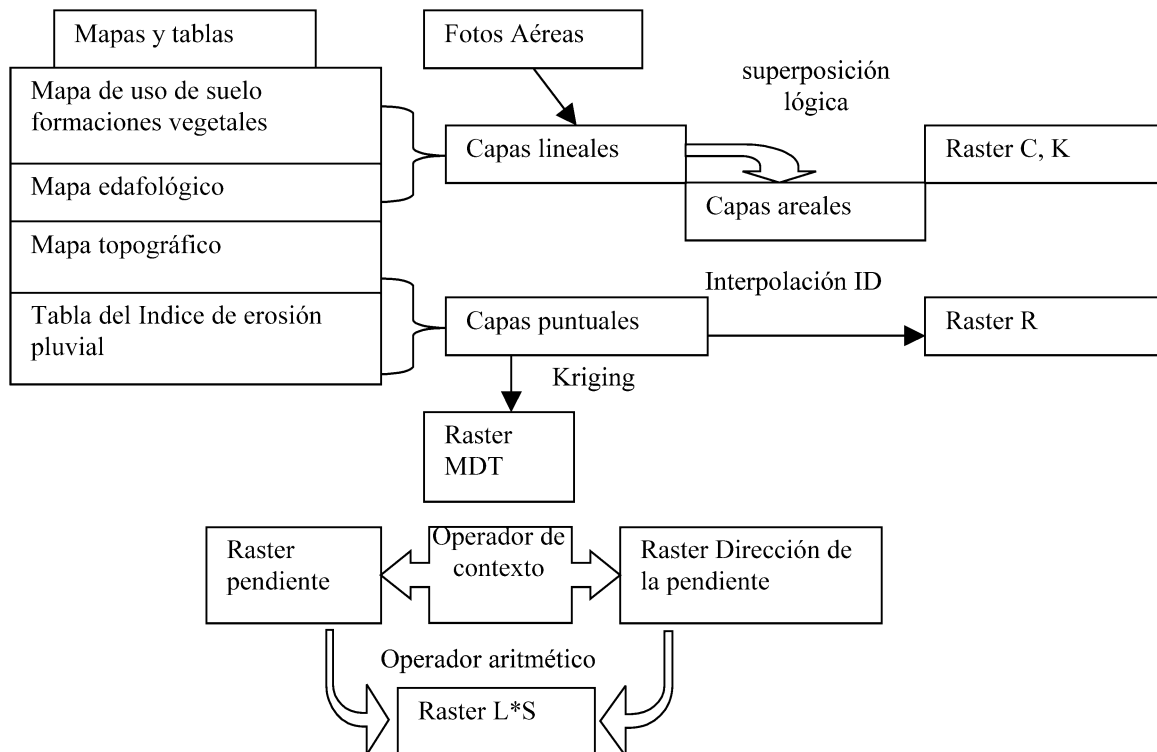


Figura 1. Metodología seguida para la obtención de los raster de los factores C, K, R y LS.

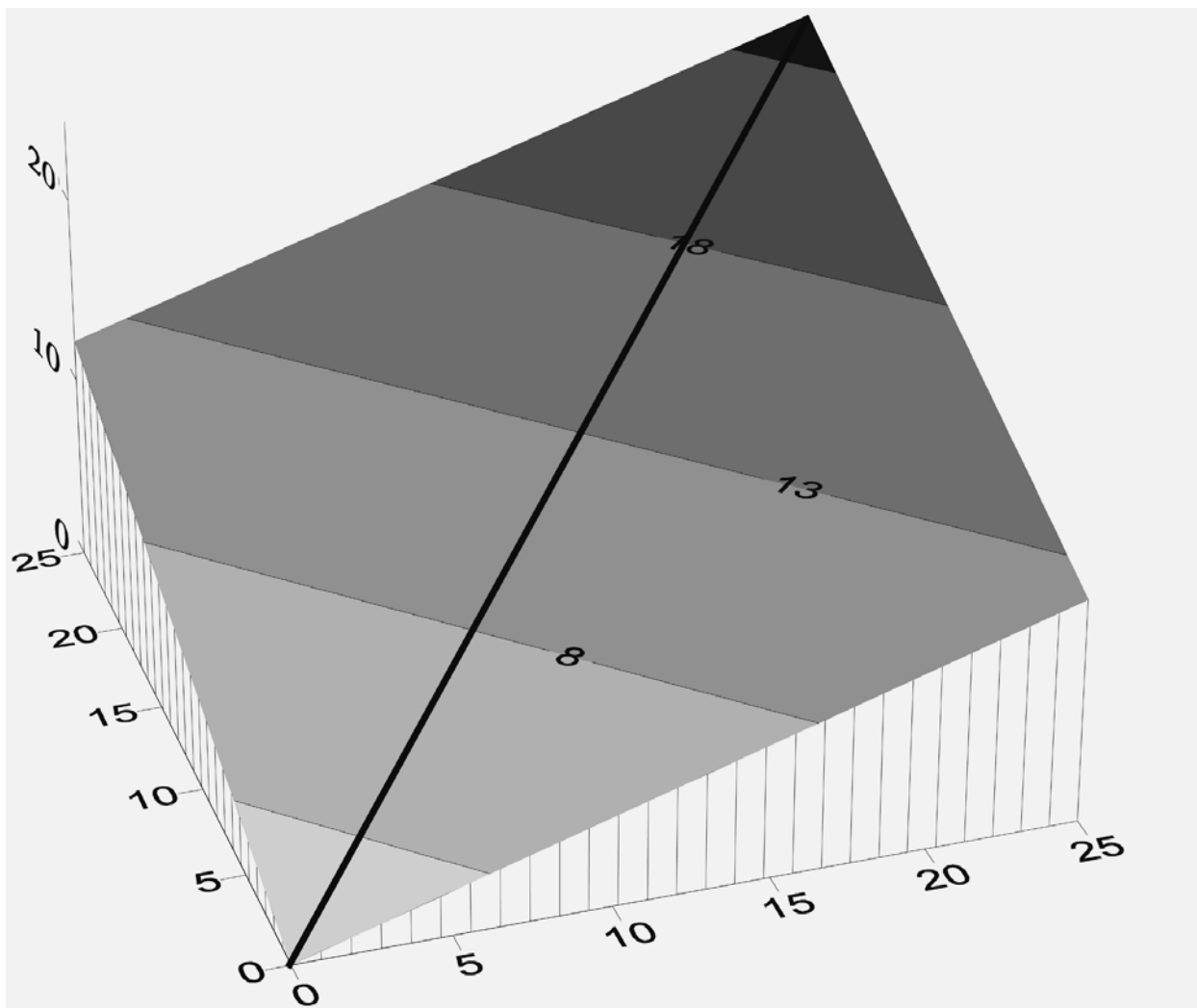


Figura 2. Esquema de un píxel del raster de la topografía; la altura topográfica se le asigna al centro del píxel.

transformación, estimación e interpretación de la información primaria existente del valor de cada uno de los píxeles de las capas raster iniciales o primarias del proyecto SIG.

En el caso de variables discretas se obtiene la capa raster a través de la rasterización de las capas areales, y se les asigna a los píxeles contenidos dentro de la vecindad de cada polígono el valor del atributo analizado; en este caso, el factor de cubierta vegetal y uso del suelo, y el factor de erosionabilidad.

A los efectos del cálculo, cada píxel se considera como un talud de determinada longitud ($\lambda_{\text{píxel}}$) y pendiente ($S_{\text{píxel}}$). El valor de R se interpoló directamente a partir del valor calculado en cada pluviómetro, utilizando como método de interpolación el inverso de la distancia, debido a la insuficiente cantidad de datos para el empleo de otros métodos de interpolación, como el Kriging o la triangulación. Los factores S y L se calcularon de forma conjunta a través de la fórmula:

$$LS = \begin{cases} \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} (0,065 + 0,0454S + 0,0065S^2) & \text{para } S < 9\% \\ \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \left[\frac{S}{9} \right]^{1,3} & \text{para } S > 9\% \end{cases} \quad (2)$$

El parámetro S es la pendiente expresada en % y se calcula a partir del valor de los nodos vecinos a través de la fórmula siguiente (Moore et al., 1993):

$$S_T \cong \frac{200}{\pi} \arctan \left[\sqrt{\left(\frac{Z_E - Z_W}{2(X_E - X_W)} \right)^2 + \left(\frac{Z_N - Z_S}{2(Y_N - Y_S)} \right)^2} \right] \quad (3)$$

donde Z es el valor de altura topográfica del píxel vecino, y el sufijo indica la posición del mismo (N: norte; S: sur; E: este; W: oeste). El parámetro λ es la longitud de la pendiente y si no se cuenta con un software que automatice el cálculo, su determinación requiere de varios pasos: 1) Cálculo de la pendiente; 2) Cálculo de la dirección de

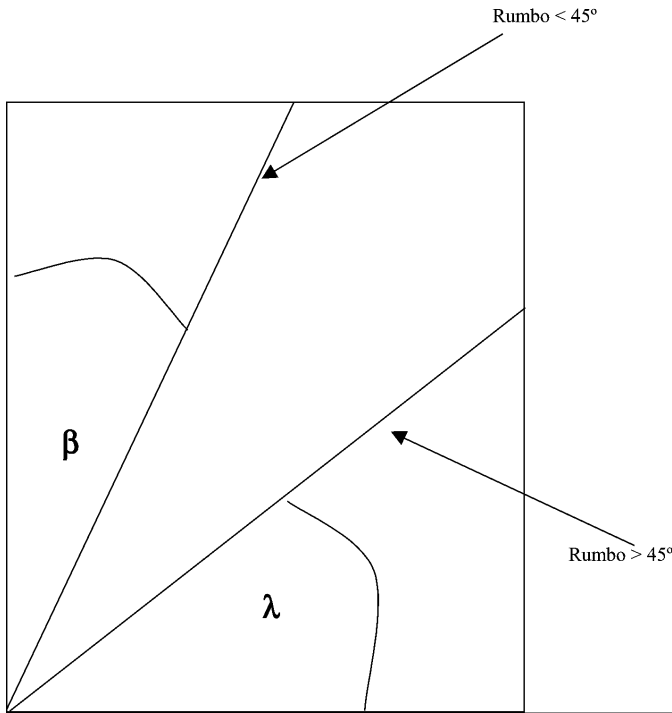


Figura 3. Posibles condiciones para tener en cuenta en el cálculo de la longitud de la traza de la pendiente en el plano XY.

la pendiente; 3) Cálculo de la longitud de la traza de la pendiente en el plano XY, y 4) Cálculo de $\lambda_{(pixel)}$.

La dirección de la pendiente se determina a partir de la expresión siguiente (Moore et al., 1993):

$$Acimut \cong 270 - \frac{360}{2\pi} \arctan 2 \left[\left(\frac{Z_E - Z_W}{2(X_E - X_W)} \right) + \left(\frac{Z_N - Z_S}{2(Y_N - Y_S)} \right) \right] \quad (4)$$

La longitud de la traza de la pendiente en el plano XY se calcula condicionalmente según la amplitud del acimut:

De esta manera, la longitud de la traza será:

$$Lt = \begin{cases} \frac{Lc}{\cos(\beta)} & \text{si } \beta \leq 45^\circ \\ \frac{Lc}{\sin(\beta)} & \text{si } \beta \geq 45^\circ \end{cases} \quad (5)$$

donde Lc es el tamaño del lado del píxel (25 metros) y β es la dirección de la máxima pendiente. Disponiendo de

TABLA 3. CLASIFICACION DE FAO-PNUMA-UNESCO (1981)

Perdidas de suelo	Grado de erosión h drica
< 10	Ninguna o ligera
10- 50	Moderada
50 - 200	Alta
> 200	Muy alta

Lt estamos en condiciones de calcular λ , y éste es un cálculo bastante simple.

$$\lambda = \frac{Lt}{\cos(\alpha)} \quad (6)$$

donde α es la pendiente expresada en grados.

El valor de la erosión hídrica para cada píxel se obtiene multiplicando cada uno de los raster de los parámetros (R, K, LS, y C).

CÁLCULO DEL ERROR

El error de la determinación de la erosión hídrica se obtiene mediante la suma del error de estimación de todos los factores que intervienen en el cálculo, multiplicados por un coeficiente que pondera la influencia de las variaciones de los factores en el resultado del cálculo:

$$Error_{(A)} = C_1 Error_{(R)} + C_2 Error_{(K)} + C_3 Error_{(LS)} + C_4 Error_{(C)} \quad (7)$$

El problema fundamental está en lo subjetivo que resulta la estimación de los factores C y K, y el tratamiento de estas dos variables como discretas. Los valores de K y C se asignan a partir de una media estimada para zonas de comportamiento relativamente homogéneo de las características edafológicas y de uso de suelo. En realidad, los valores de C y K varían en determinados rangos en forma continua, por lo que la introducción de un valor medio para cada una de estas variables introduce un determinado error, a esto se suman los errores de geometrización de la distribución espacial de las zonas homogéneas antes mencionadas, que son representadas como polígonos.

En el caso del factor LS, el error depende de la estimación de la altura topográfica y no es difícil demostrar que el error de estimación de LS es función lineal del valor del error de estimación de la altura topográfica, es por ello que se asume que:

$$Error_{(LS)} = Error_{(Z)} \quad \text{si se expresa en \%} \quad (8)$$

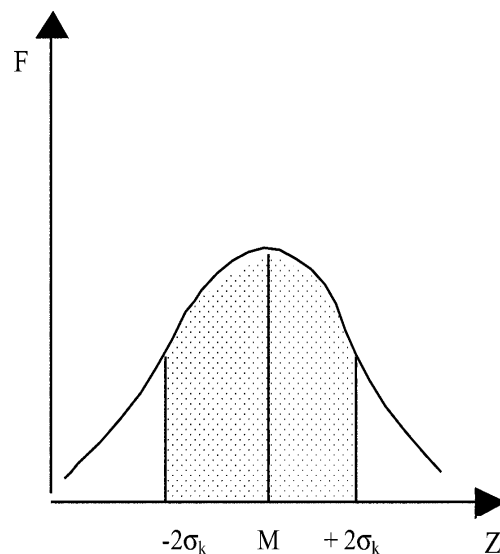


Figura 4. Distribución probabilística de los valores estimados de la altura topográfica.

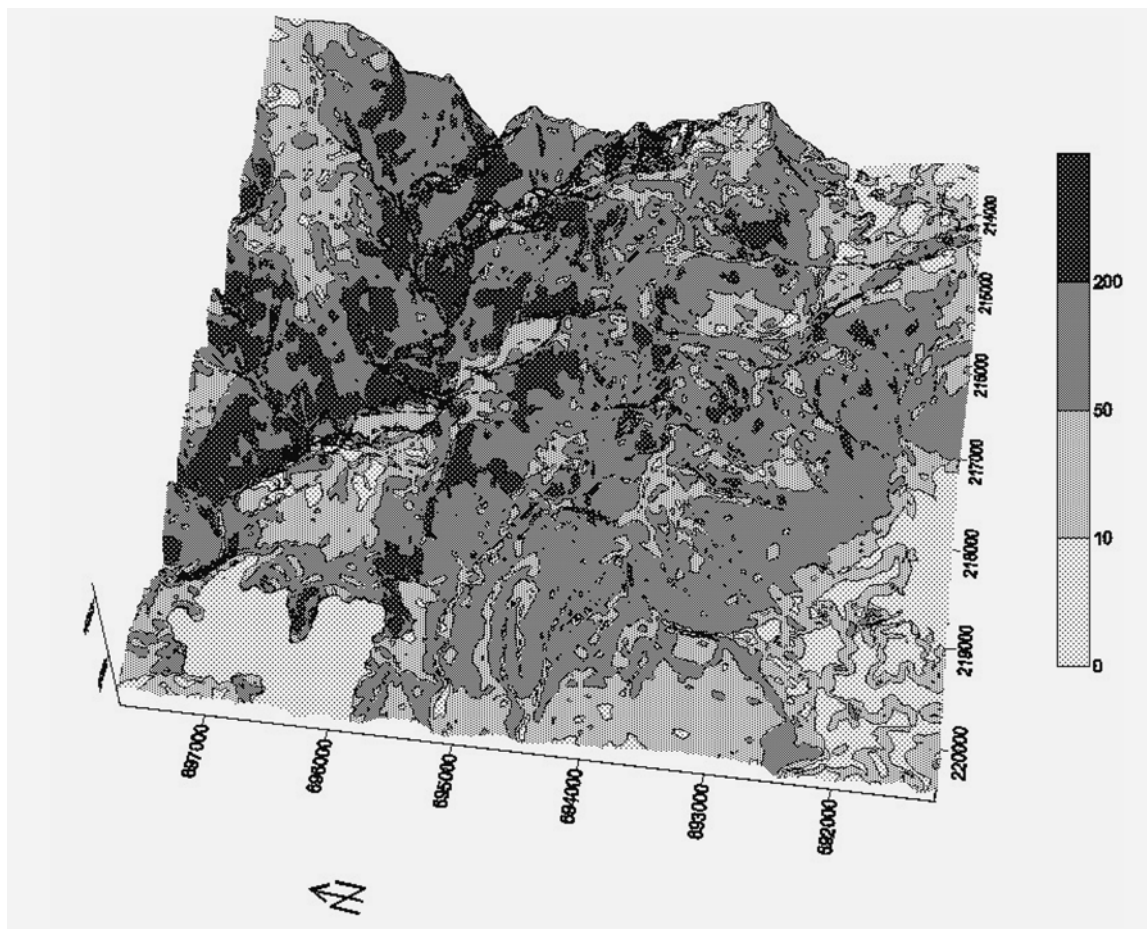


Figura 5. Sector del mapa de erosión hídrica del suelo.

Donde $Error_{(LS)}$ es el error de estimación del factor LS y $Error_{(z)}$ es el error de estimación de la altura topográfica. Para estimar el error de la altura topográfica y del factor R se empleó la técnica de validación cruzada, utilizándose la fórmula del error medio cuadrático. En el caso de la altura topográfica, el error puede determinarse también empleando su probabilidad de ocurrencia a partir de la varianza de estimación y la distribución probabilística de la data (Fig. 4).

En la figura 4, M es la media de todos los valores de altura estimados y σ_k es la desviación estándar de la estimación por Kriging. De esta forma el error será

$$P\{E[Z(v)] = Z_e^*\}$$

es decir, el área bajo la curva, la cual se estima a partir de la expresión siguiente:

$$P = \int_{-2\sigma_k}^{+2\sigma_k} F_{(z)} dz \tag{9}$$

$F_{(z)}$ en este caso es la ecuación correspondiente a la distribución normal.

Para determinar el peso de cada variable, en la ecuación (6) se utilizó la regresión multivariada de los valores de cada factor. En nuestro caso el error se determinó mediante la fórmula siguiente:

$$Error_{(A)} = -89,4116 + 0,317385 Error_{(R)} + 20,0344 Error_{(K)} + 31,1048 Error_{(LS)} + 70,1614 Error_{(C)} \tag{10}$$

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se obtiene una capa raster de pérdida de suelo para un sector del municipio de Moa. La figura 5 muestra una sección de este mapa. Los intervalos de las isofranjas (Tabla 3) empleados en la figura se tomaron de la clasificación de Fao- Pnuma- Unesco (1981).

La mayor pérdida del suelo se produce en los cañones de los ríos, pues el grado de erosión hídrica en estas zonas es muy alto (>200 t/ha año). La menor pérdida de suelo en el área, es decir, grado ligero y moderado (<10 y 10-50 t/ha año, respectivamente), tiene lugar en la zona norte del área, donde el relieve es suave y los valores de C y K son bajos, a excepción del de R que es alto para toda el área de estudio.

La estimación por el método de áreas discretas garantiza un grado de homogeneidad superior en la unidad donde se realiza el cálculo con respecto al método tradicional. Normalmente, en este último cada sección supera varias veces el largo de un píxel que alcanza alrededor

de un kilómetro o mucho más para grandes cuencas. El resto de los pasos en el cálculo es similar para ambos métodos. De esta manera, para obtener el valor medio en la cuenca se calcula el valor medio de todos los píxeles que se encuentran dentro del perímetro de la misma, este valor se puede comparar con datos estadísticos que caractericen el resultado, tal es el caso de la varianza y la dispersión estándar del valor medio calculado, ambos son indicadores del error de cálculo.

Las ventajas del método de cálculo por unidades discretas son:

- a) Es más preciso, fundamentalmente en lo que concierne al cálculo de los parámetros LS y R.
- b) El cálculo se agiliza, en especial cuando los parámetros varían considerablemente en cortas distancias. En estos casos es imposible alcanzar un alto grado de precisión si se emplea el método tradicional para grandes extensiones.
- c) Permite rectificar el cálculo si ocurre un cambio de las condiciones iniciales, esto es muy frecuente en zonas donde la actividad antrópica es alta y se producen cambios en la cubierta vegetal, donde se realiza minado a cielo abierto, o si se mejora la cantidad y calidad de información primaria empleada en el cálculo de los factores C, K, R, LS, P.
- d) Da la posibilidad de emplear al máximo la información de fotos satélite u otro tipo de respuesta del medio ante determinado método geofísico si se tiene una función:

$$F = f(G)$$

donde F es el factor analizado y G es la respuesta del método geofísico empleado.

- e) Es posible estimar la cantidad de suelo que se erosiona en un período de tiempo determinado en un área relativamente pequeña, también es fácil mejorar el cálculo empleando métodos de cómputo que permitan alcanzar un resultado más fiable, por ejemplo: el valor medio, la moda, la mediana de la distribución probabilística de los píxeles en una zona seleccionada o aplicando los mismos métodos con los datos de ventanas móviles.
- f) Permite realizar correlaciones y valorar la influencia de C, R, K, LS y P en el resultado de la erosión de forma local, aspecto muy importante a la hora de tomar medidas de prevención o recuperación.
- g) Permite una evaluación más exacta y matemáticamente fundamentada del error cometido en el cálculo, lo que es imprescindible en la validación y utilización de los resultados.

CONCLUSIONES

Como resultado se obtiene una capa raster que caracteriza la pérdida anual de suelo por erosión hídrica, expresada en toneladas erosionables en una hectárea de relieve para toda el área industrial de Moa y zonas aledañas, incluyendo casi la totalidad de los yacimientos lateríticos de níquel de la región.

Se estableció una metodología para el cartografiado digital de la erosión hídrica, empleando unidades discretas, lo cual facilita la utilización de los resultados y mejora considerablemente el grado de precisión de la estimación. Un logro importante de esta metodología es la estimación del error global de cálculo de la erosión, cuestión que da un criterio muy importante de la posibilidad de aplicación y forma de utilización de los resultados alcanzados.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILO, M. y otros: Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología, 3. ed., Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 1998.
- ALFONSO ROCHE, JOSÉ R.: Estadísticas en las ciencias geológicas, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1986.
- ER Mapper version 5.5, User Manual: Copyright © Earth Resource Mapping Pty Ltd, 4370 la Jolla Village Drive Suite 900 San Diego, Ca 92122-1253, USA, 27 Feb 1997.
- HAROSLAV, HYLKY: Erosión en cárcavas, Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geología, La Habana, 1973.
- Idrisi for Windows version 2.00, User Manual: Clark Labs, The Idrisi Project, Clark University Graduate School of Geography 950 Main St. Worcester, MA 01610-1477 USA, 1997.
- LEGRÁ LOBAINA, A. A., ORIS R. SILVA D. Y O. BELETE F.: "Modelación de una superficie topográfica a partir de la relación entre el Kriging y la interpolación lineal en Rn", *Minería y Geología*, XVI (1):58-61, 1999.
- LEGRÁ LOBAINA, A. A. Y R. L. GUARDIOLA ROMERO: "Contribución a la práctica del análisis variográfico y la estimación por Kriging", *Minería y Geología*, XVI (2) :83-92, 1999.
- Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería, Instituto Tecnológico Geominero de España, Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 1989.
- MITASOVA, HELENA AND JAROSLAV HOFIERKA: "Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis", *Mathematical Geology*, 25 (6) :657-669, 1993.
- MOORE, I. D., A. LEWIS AND J. C. GALLANT: "Terrain Attributes: Estimation Methods and Scale Effects", In: Jakeman A. J. et al. (editors) *Modeling Change in Environmental Systems* John Wiley and Sons, New York, 1993.
- WISCHMEIER, W. H. & O. D. SMITH: "Predicting rainfall-erosion losses from cropland of the Rocky Mountains", *Agriculture Handbook*, 282. US Department of Agriculture, Washington DC, 1965.
- : "Rainfall energy and its relationship to soil erosion", *Trans. Am Geophys. Un.*, 39:285-291, 1958.