



POTENCIALIDAD DE LAS TÉCNICAS SIG PARA LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL: APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA EROSIÓN

Macario Rodríguez Entrena

Área de Economía y Sociología Agrarias (AESAs)
Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA)
macario.rodriguez.ext@juntadeandalucia.es

Recibido: 12 de Marzo de 2007

Aceptado: 7 de Mayo de 2007

RESUMEN

La pérdida de suelo por erosión constituye un problema medioambiental grave que, en el sudeste de la Península Ibérica, se manifiesta con bastante intensidad resultando de gran importancia el análisis de los riesgos potenciales para determinar las áreas de mayor vulnerabilidad a la erosión. En este campo, como en muchos otros, las aplicaciones basadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son múltiples y muy variadas, erigiéndose como la principal herramienta para una adecuada gestión del medio ambiente. En el presente trabajo se pretende mostrar el gran potencial de los SIG, a través de la implementación de una aplicación práctica, para el estudio de la erosión en el área de influencia de la Vega de Granada. Para ello, se utiliza el modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) como método para el cálculo de las tasas de pérdida de suelo, posibilitando la elaboración de una cartografía de estados erosivos, que permita la identificación de las áreas de especial sensibilidad a la erosión.

Palabras Clave: Erosión, USLE, Sistemas de Información Geográfica, Modelo Digital de Elevaciones.

GIS TECHNIQUES POTENTIAL FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT: AN APPLICATION TO EROSION ASSESSMENT

ABSTRACT

Soil loss due to erosion constitutes a serious environmental problem, its importance is even more severe in the southeast of the Iberian Peninsula. To manage this problem, areas that are more vulnerable to erosion must be identified through risk analysis in order to spatially target soil conservation measures. For this task, as for many others, most of the available tools can be based on Geographical Information Systems (GIS). This paper assesses the potential of GIS for erosion evaluation, applied to study the erosion in the Valley of Granada. Erosion is evaluated using the USLE model (Universal Soil Loss Equation) to calculate soil loss rates, this data is the base for creating erosive states cartography that allows the identification of the areas most susceptible to erosion.

Keywords: Erosion, USLE, Geographical Information Systems, Elevations Digital Model.

POTENTIALITÉ DES TECHNIQUES SIG POUR LA GESTION ENVIRONNEMENTALE: APPLICATION À L'ETUDE DE L'EROSION

RÉSUMÉ

La perte du sol par érosion constitue un problème environnemental grave qui, dans le sud-est de la Péninsule Ibérique, se manifeste d'une manière assez intense, résultant d'importance énorme l'analyse des risques potentiels pour déterminer les régions les plus vulnérabilité à l'érosion. Dans ce domaine, comme plusieurs autres, les applications basées sur le Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont multiples et très variées, étant le principal instrument pour une gestion adéquate de l'environnement. Le présent travail essaye de montrer le potentiel des SIG, à travers de la mise en œuvre d'une application pratique, pour l'étude de l'érosion dans les régions d'influence du Vallée de Granada. Ainsi, le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) est utilisé comme méthode pour le calcul des taux de perte du sol, permettant l'élaboration d'une cartographie des états érosifs qui permet l'identification des régions vulnérable à l'érosion.

Mots Clé : Érosion, USLE, Systèmes d'Information Géographique, Modèle Numérique d'Élévations.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de información geográfica son estructuras físicas, lógicas y organizacionales, con objetivos específicos que posibilitan la modelización de la realidad creando imágenes abstractas de una realidad más compleja permitiendo su estudio, análisis y gestión. La versatilidad de los sistemas de información geográfica, ha posibilitado que su campo de aplicación sea muy amplio, permitiendo su uso en la mayoría de las actividades con una componente espacial.

Este trabajo tiene como principal objetivo mostrar como es posible el estudio y análisis de problemas ambientales mediante técnicas SIG que nos permitirán una adecuada gestión de los mismos. Concretamente se pretende explicar el desarrollo de toda una metodología de trabajo basada en SIG, necesaria para el estudio de la erosión en el área de influencia de la Vega de Granada, a través de la implementación práctica de un método conocido como la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Para alcanzar estos objetivos el trabajo se ha estructurado en tres apartados adicionales. El segundo epígrafe está destinado a la presentación de la metodología empleada en el estudio. El tercer apartado ofrece los principales resultados obtenidos y el último y cuarto se destina a la presentación de las conclusiones.

2. METODOLOGÍA

El esquema metodológico a seguir, cuando se trabaja con SIG, se puede caracterizar en 3 fases bien diferenciadas: aquella destinada al ingreso de información al sistema, aquella destinada al procesamiento y manipulación de la información y aquella destinada a la generación de reportes y cartografía resultante de los análisis.

La correcta representación digital de los datos espaciales necesita la resolución de dos cuestiones: la geocodificación de los datos y la descripción en términos digitales de

las características espaciales. La primera consiste en un procedimiento mediante el cual un objeto geográfico recibe directa o indirectamente una etiqueta que identifica su posición espacial con respecto a algún punto común o marco de referencia. En un segundo lugar, se debe realizar una descripción de la posición geométrica de cada objeto y de las relaciones espaciales (la topología) que mantiene con los restantes objetos geográficos existentes en la realidad a estudiar. De esta manera, existen varios tipos de modelos de datos de los objetos geográficos: el modelo vectorial y el raster. La representación vectorial es más adecuada para la realización de gráficos y mapas precisos y, sobre todo, está más de acuerdo con la cartografía tradicional. El modelo raster tiene, por su parte, una organización muy simple de los datos que permite realizar con gran facilidad complejos procesos de análisis.

El software utilizado para el análisis espacial fue la familia Arc-Info (para el análisis vectorial y la presentación de mapas), el paquete Idrisi (ya que, como se comenta en el anterior párrafo, el formato raster presenta una gran potencialidad para el cálculo de algoritmos matemáticos) y un gestor de bases de datos.

Para la estimación de la pérdida de suelos, por el efecto de la erosión, comúnmente son utilizados: USLE, RUSLE, modelo de Fournier, fórmula de Fleming, modelo de Gravišovic y Djorovic, entre otros. En este caso, se utiliza el método USLE, donde las pérdidas de suelo **A** (en $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ expresadas en el Sistema Internacional) vienen dadas por la siguiente expresión: $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, donde **R** ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hora^{-1}$) es un índice de erosión pluvial (parámetro que representa la energía cinética de la lluvia), **K** ($t \cdot m^2 \cdot hora \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$) un factor de erodibilidad del suelo (parámetro que define su mayor o menor capacidad para ser disgregado), **L** el factor longitud de pendiente (ladera de máxima pendiente), **S** el factor pendiente (como variable que condiciona la mayor o menor escorrentía del agua), **C** un factor de cultivo (como variable capaz de proteger al suelo de la actuación de la energía cinética de la lluvia) y **P** un factor prácticas de cultivo (se refiere a las prácticas de labranza que modifican la susceptibilidad del suelo a ser erosionado). Para la determinación de los factores se han elaborado distintas capas temáticas, obtenidas algunas a través de fuentes de información secundarias aunque la mayoría son de elaboración propia (véase fig. 1). Entre las mismas destacan;

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE).
- Mapa de pendientes.
- Imagen del satélite Landsat 7.
- Fotografías aéreas de la Vega de Granada.
- Mapa digitalizado de cultivos y aprovechamientos.
- Mapa hidrogeológico digitalizado del acuífero de la Vega de Granada.
- Mapa digitalizado de unidades geomorfológicas.
- Mapa de isoerodientes (erosividad de la lluvia).

Las ventajas de transformar la información de un formato analógico a digital, radican en la gestión y funcionalidad de la misma. Esta transformación se realizó a través de la tableta digitalizadora.

3. RESULTADOS

3.1 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Para la elaboración de un MDE es necesario disponer de un mapa topográfico digital de la zona de estudio. Para ello se procedió a la digitalización en pantalla de cartografía de la zona, en formato tiff, a escala 1:10000 (véase fig. 2). A partir de las curvas de nivel, del mapa topográfico, se levanta el MDE que de forma intuitiva nos permite interpretar la superficie de la zona de estudio (véase fig. 3). El levantamiento del MDE se elaboró a través del módulo Intercon del paquete Idrisi que realiza una interpolación lineal, a partir de las curvas de nivel, basada en el cálculo de la altitud (z) de un punto, entre dos puntos muestrales en la dirección de la pendiente máxima (Eastman, 1992). Por último se aplicó un filtro de media (usando el módulo Filter, 3X3) para suavizar la superficie del MDE y mitigar los posibles artefactos creados en la interpolación. De otra parte, también se utilizó interpolación TIN que para levantar el MDE utiliza una red irregular de triángulos a partir de los datos de las curvas de nivel.

3.2 Índice de erosión pluvial: Factor R

El factor R, que representa la erosividad de la lluvia, se calcula según la expresión:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t}$$

esta formulación matemática es conocida como el Índice Modificado de Fournier (IMF), donde p_i^2 es la precipitación mensual y P_t la precipitación anual. Arnoldus (1978) fue quién propuso la corrección del Índice de Fournier (IF), en la que se consideran no sólo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses obteniendo el IMF (Fournier, 1960). Para el cálculo de este factor se han obtenido los registros de precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas para un año medio (véase tabla 1). A continuación se procedió a la georeferenciación de las estaciones meteorológicas, junto con la base de datos pluviométricos asociada, para poder obtener doce mapas mensuales de precipitación y uno de precipitación anual. Posteriormente se rasterizaron los mapas, para realizar la interpolación de la pluviometría a través del módulo Interpol, que utiliza el método de las medias móviles. Se basa en la idea intuitiva de que las observaciones más cercanas deben tener más peso en la determinación del valor interpolado en un punto no muestral. La formulación matemática sería;

$$P^*(x_j) = \left(\sum_{i=1}^n P(x_i) \cdot d_{ij}^{-\alpha} \right) / \left(\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-\alpha} \right) \quad \text{donde:}$$

P^* ; es el valor de la precipitación estimada

x_j ; son los puntos para los cuales se hace la interpolación

x_i ; son los puntos muestrales en el vecindario

P ; es el valor de la precipitación en un punto muestral dentro del vecindario

d_{ij} ; es la distancia entre el punto muestral x_i y el punto interpolado x_j

$-\alpha$; es el factor de ponderación de la distancia

Los valores más usuales del exponente son $\alpha = 1$ y $\alpha = 2$ (Lam, 1983), aunque algunos autores establecen que el exponente 2 (utilizado en esta aplicación) suele ofrecer unos resultados empíricos más satisfactorios, además de requerir un menor esfuerzo computacional (Declercq, 1996).

Por último, en formato raster y a través del paquete Idrisi, se aplica la ecuación anteriormente descrita y se obtiene la distribución espacial del factor R (véase fig. 4).

3.3 Índice de erodibilidad del suelo: Factor K

El factor K de erodibilidad del suelo representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. Se obtiene a partir de una ecuación de regresión que relaciona K con parámetros que determinan algunas propiedades físicas del suelo como son: textura, materia orgánica, estructura y permeabilidad. Sin embargo, en la zona de estudio se ha optado por relacionar las diferentes litologías con valores de erodibilidad obtenidos a partir de estimaciones del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Granada (CIDA) (véase tabla 2). Las unidades litológicas se han obtenido a partir de la digitalización de los mapas geológicos existentes de la zona a escala 1:50.000, que se cotejaron con la cartografía hidrogeológica existente para identificar y subsanar posibles incongruencias (véase fig. 5). Una vez identificadas y digitalizadas las litologías, se realizó un trabajo de reclasificación para identificar las mismas con su valor del factor K y obtener así la distribución espacial de la erodibilidad de los suelos (véase fig. 6).

3.4 Factor Topográfico LS

La USLE tiene en cuenta la topografía del terreno mediante la introducción del factor L, longitud de la pendiente del terreno, y del factor S de pendiente. Ambos factores topográficos se pueden aunar en uno, el factor LS. Para el cálculo del factor topográfico LS, se emplea la siguiente expresión;

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m (0,065 + 0,045S + 0,0065S^2) \quad \text{donde;}$$

L = longitud de ladera expresada en metros

S = pendiente del terreno expresada en forma de tanto por ciento

m = constante que depende de la pendiente y que presenta la siguiente distribución;

$$m = \begin{cases} 0,5 & \text{si } S \geq 5\% \\ 0,4 & \text{si } 3\% < S < 5\% \\ 0,3 & \text{si } 1\% \leq S \leq 3\% \\ 0,2 & \text{si } 1\% > S \end{cases}$$

Para poder aplicar la expresión anterior, es necesario disponer de un mapa de pendientes y longitudes de las mismas. Para ello, a través del modelo digital de elevaciones (MDE) que habíamos levantado, se obtuvo un mapa de pendientes (utilizando el módulo slope de Idrisi) que refleja los distintos valores del factor S. De otra parte, el factor L se promedió para asignarlo a un gradiente de pendientes como el

que se muestra en la tabla 3, obteniendo finalmente los valores del factor LS para la zona de estudio (véase fig. 7).

3.5 Índice de cobertura vegetal del suelo: Factor C

Al analizar la influencia de la cubierta vegetal sobre la erosión del suelo todos los estudios parecen coincidir en que es éste el factor fundamental a modificar si se pretende conseguir una eficaz protección contra los procesos erosivos (Moreira, 1991).

El factor C indica la protección que la cobertura vegetal presta al suelo al interceptar las gotas de lluvia y amortiguar su energía de impacto y de escorrentía disminuyendo el efecto erosivo. El valor de este factor es una relación entre las pérdidas de suelo fértil con la cobertura vegetal actual y las que tendría si estuviese en barbecho continuo. Para la obtención del mapa de usos del suelo se recurrió a la digitalización de cartografía analógica que fue actualizada a través de la superposición, de imágenes del Landsat 7 y fotografías aéreas recientes de la zona. Una vez se tienen las clases de cubiertas georeferenciadas, la asignación de índices del factor C (véase tabla 4) sobre cada una de ellas se obtiene a partir de una serie de índices tabulados cuyo valor depende de la tipología de la cobertura vegetal, obteniendo finalmente un mapa con la distribución espacial del factor C (véase fig. 8).

3.6 Índice de prácticas de conservación de suelos: Factor P

El factor P de prácticas de cultivo, incluye modalidades como el cultivo siguiendo curvas de nivel o el cultivo en fajas. Cuando no existen o no es posible el conocimiento, de estas prácticas de control de la erosión ni de manejo de las actividades productivas, el factor P se considera 1.

3.7 Aplicación de la USLE

Una vez obtenidas todas las capas temáticas en formato raster, correspondientes a todos los factores descritos en el método USLE, se calculan los valores de las tasas de erosión multiplicando los mapas correspondientes.

$$A \left(\frac{t}{ha \cdot año} \right) = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Por último, se obtiene el mapa de estados erosivos para la zona de estudio que se ha gradado, atendiendo a la intensidad del fenómeno erosivo, para identificar aquellas zonas que presentan las tasas más altas de pérdida de suelo (véase fig. 9).

4. CONCLUSIONES

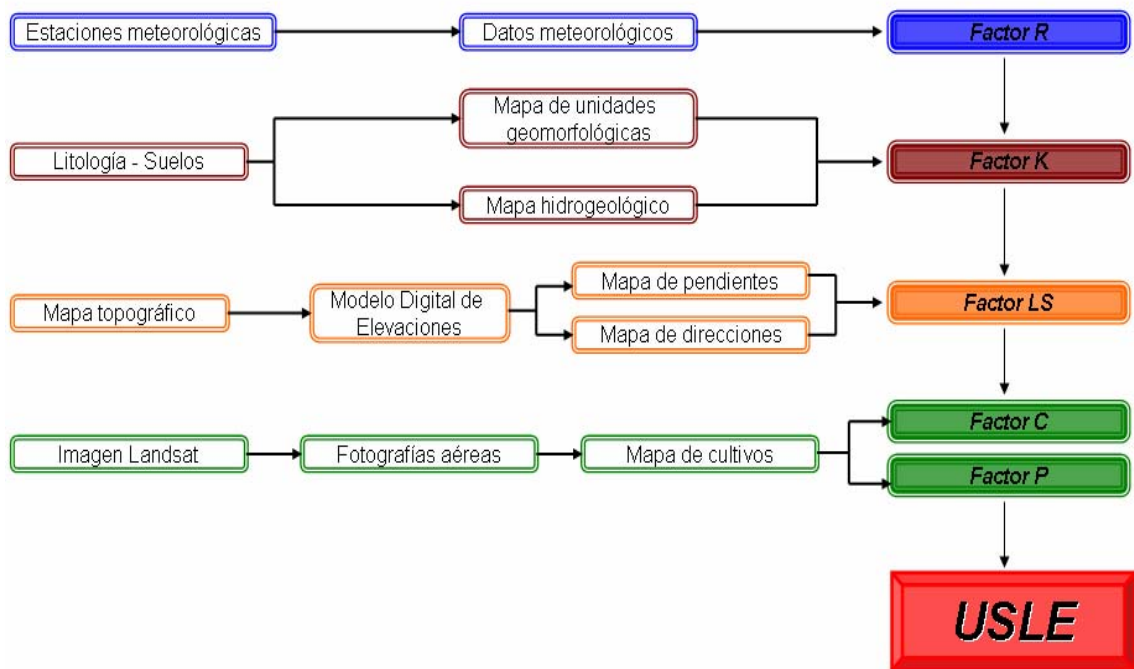
Los resultados obtenidos mediante la USLE indican donde y en que cantidad se produce el fenómeno erosivo, es decir, es posible conocer la localización espacial del fenómeno y su intensidad. La consecuencia inmediata de este tipo de estudios radica en que se puede analizar qué variables son las responsables del agravamiento del fenómeno erosivo permitiendo, llevar a cabo, la implementación de medidas de conservación del suelo adecuadas. Tanto es así que se pueden elaborar planes de acción (cambio de prácticas culturales, de aprovechamiento del suelo, etc.), cuya ejecución se realizaría a nivel de finca mediante la integración de la cartografía catastral. La

metodología presentada y los resultados obtenidos, muestran la utilidad de los sistemas de información geográfica en la aplicación de métodos cuantitativos de pérdida de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

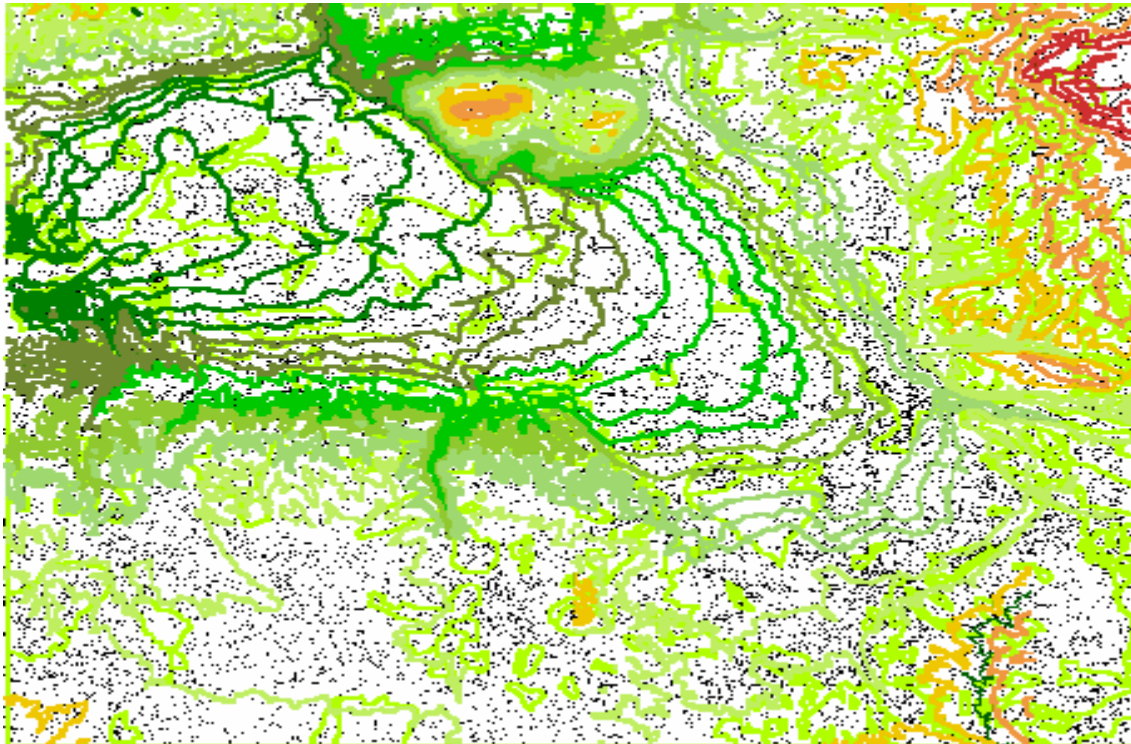
- ARNOLDUS, H. M. (1978): "An aproximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation". En: De Boodst, M., y Gabriels, D., (eds.) *Assessment of erosion*: 127-132. John Wiley y Sons, Inc. Chichester, Gran Bretaña.
- DECLERCO, F.A.N. (1996): "Interpolation methods for scattered sample data: accuracy, spatial patterns, processing time". En: *Cartography and Geographic Information Systems*, 23(3): 128-144.
- EASTMAN, J.R. (1992): *IDRISI Version 4.1, User's Guide and Technical References*. Clark University Graduate School of Geography. Worcester MA, USA.
- FOURNIER, F. (1960): *Climat et érosion*. Presses Universitaires de France, Paris.
- LAM, N.S. (1983): "Spatial interpolation methods: A review". En: *The American Cartographer*, 10(2): 129-149.
- MOREIRA, J.M. (1991): "Capacidad de uso y erosión de suelos: Una Aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía". Agencia de Medio Ambiente. Consejería de Cultura y Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- PINILLA, C. (1995): "Elementos de Teledetección". Ra-ma, Madrid.

Figura 1. Esquema metodológico de la USLE



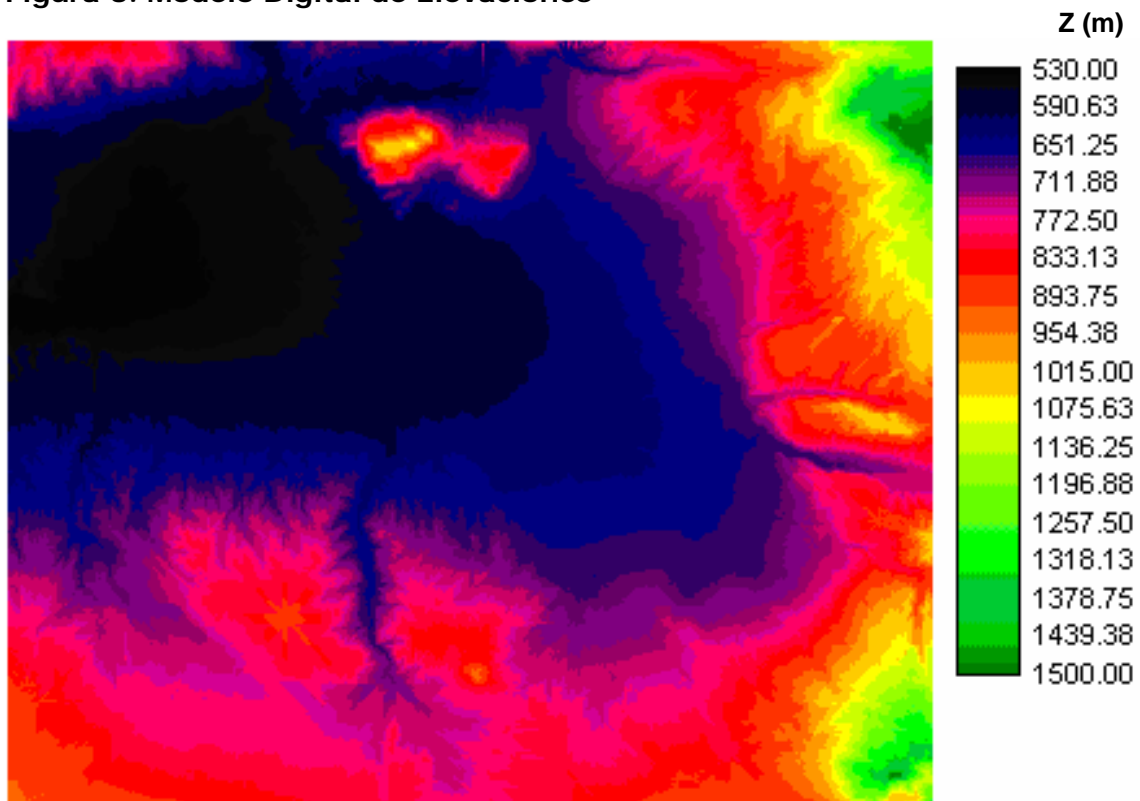
Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Mapa Topográfico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones



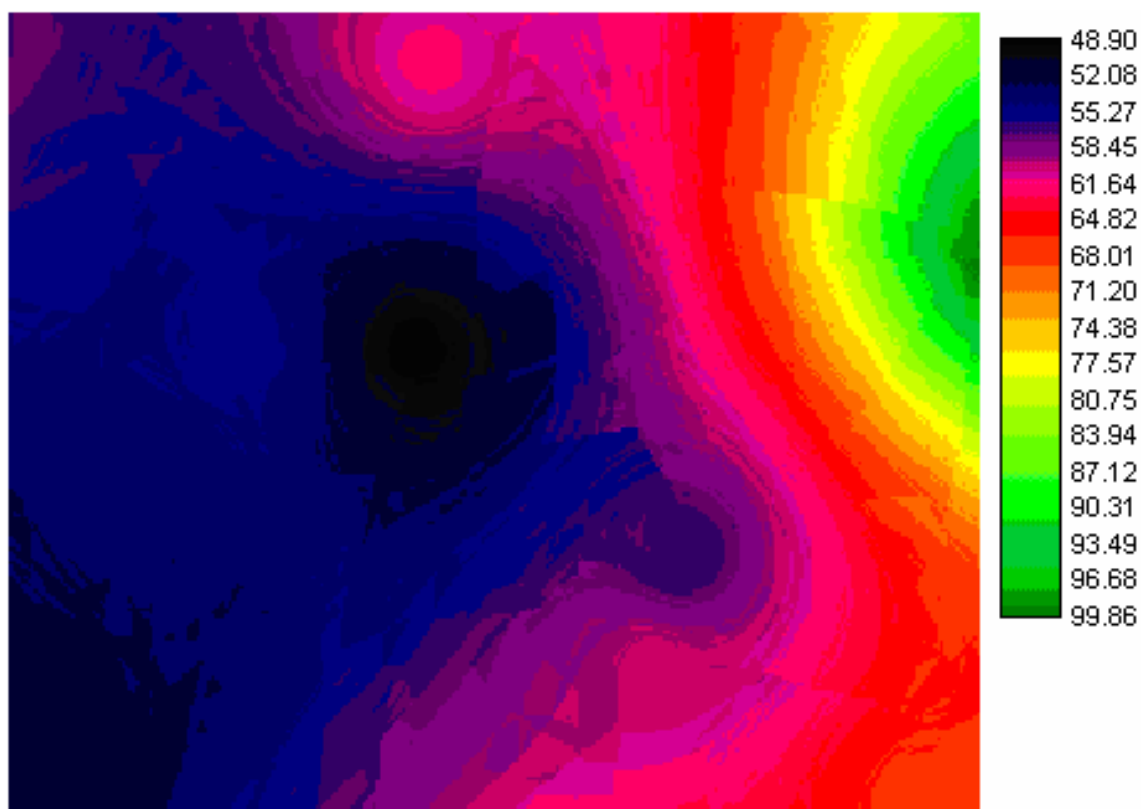
Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Estaciones meteorológicas

METEOID	MXUTM	MYUTM	METEOCOTA	METEONOM
5509	454110	4119414	1022	HUETOR-SANTILLAN
5514	443944	4110228	680	GRANADA/BASE AEREA
5517	451179	4102788	980	DILAR 'CENTRAL ELECTRICA'
5520	443182	4107090	745	ALHENDIN 'I.N.M.'
5529	436217	4116295	579	SANTA FE
5530E	431089	4116302	570	GRANADA/AEROPUERTO
5548	436650	4124613	613	ATARCE, CAPARACENA
5560	428543	4112654	640	CHAUCHINA LA OLA
5562E	420389	4124289	778	ILLORA 'MOLINO REY'
5562O	420056	4115200	580	PINOS PUENTE FUENSANTA
5574	417375	4105825	680	PRESA DE CACIN
5578	414132	4114640	627	MORALEDA DE ZAFAYONA 'CANAL
5580	407130	4117181	488	HUETOR-TAJAR
6249	444232	4097899	753	PADUL
6250	446700	4097264	740	PADUL AGUADERO

Fuente: Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía

Figura 4. Mapa de isoerodientes. Factor R



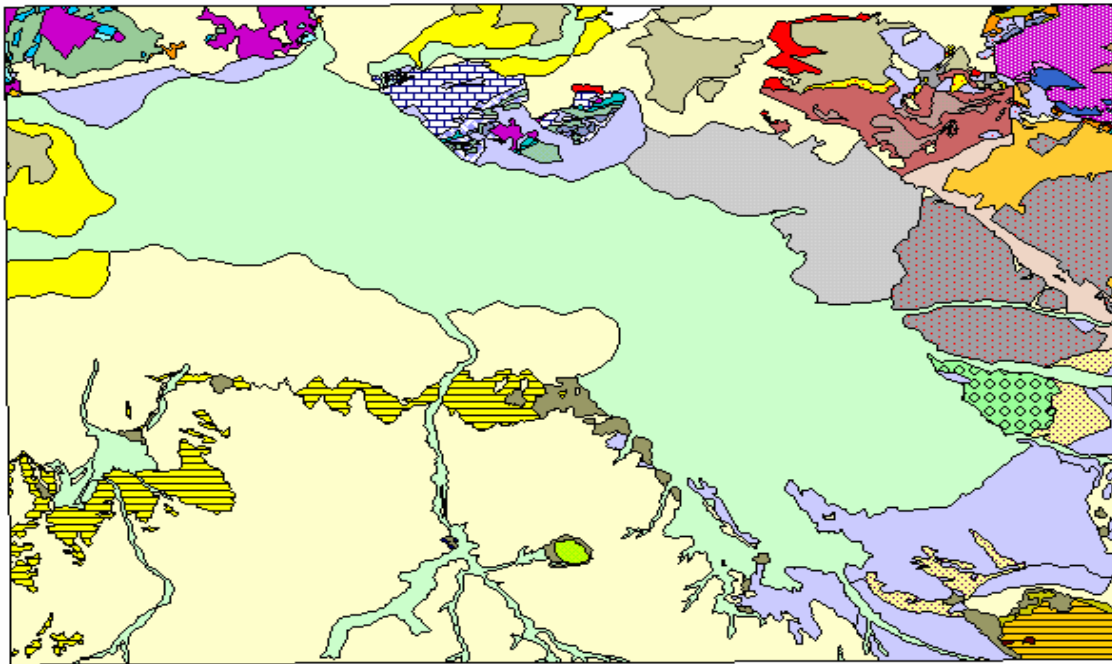
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Índices de erodibilidad de los suelos. Factor K

Materiales	Índice K
Conglomerados y arenas aluviales	0.48
Gravas y arenas	0.40
Derrubios y brechas cementados	0.25
Esquistos y filitas	0.35
Mármoles, calizas y dolomías	0.20
Calcoesquistos y mármoles intercalados	0.30
Cuarcitas	0.15
Áreas urbanizadas	0.05

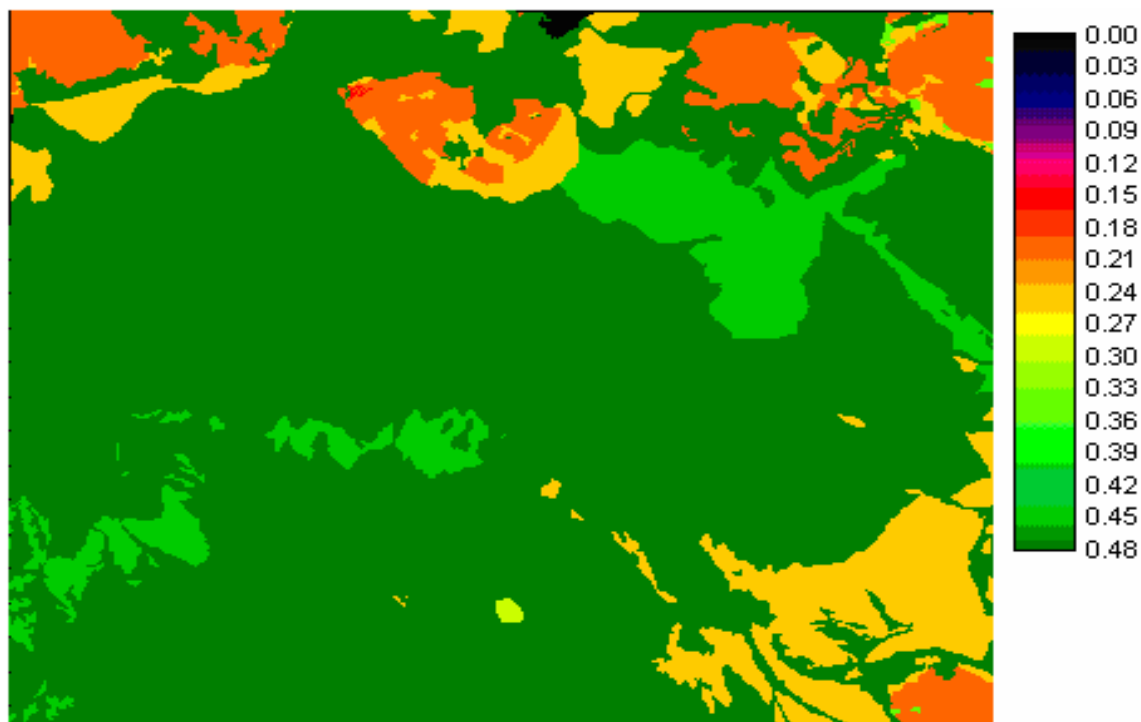
Fuente: CIDA de Granada

Figura 5. Mapa litológico



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Mapa de erodibilidad de los suelos. Factor K



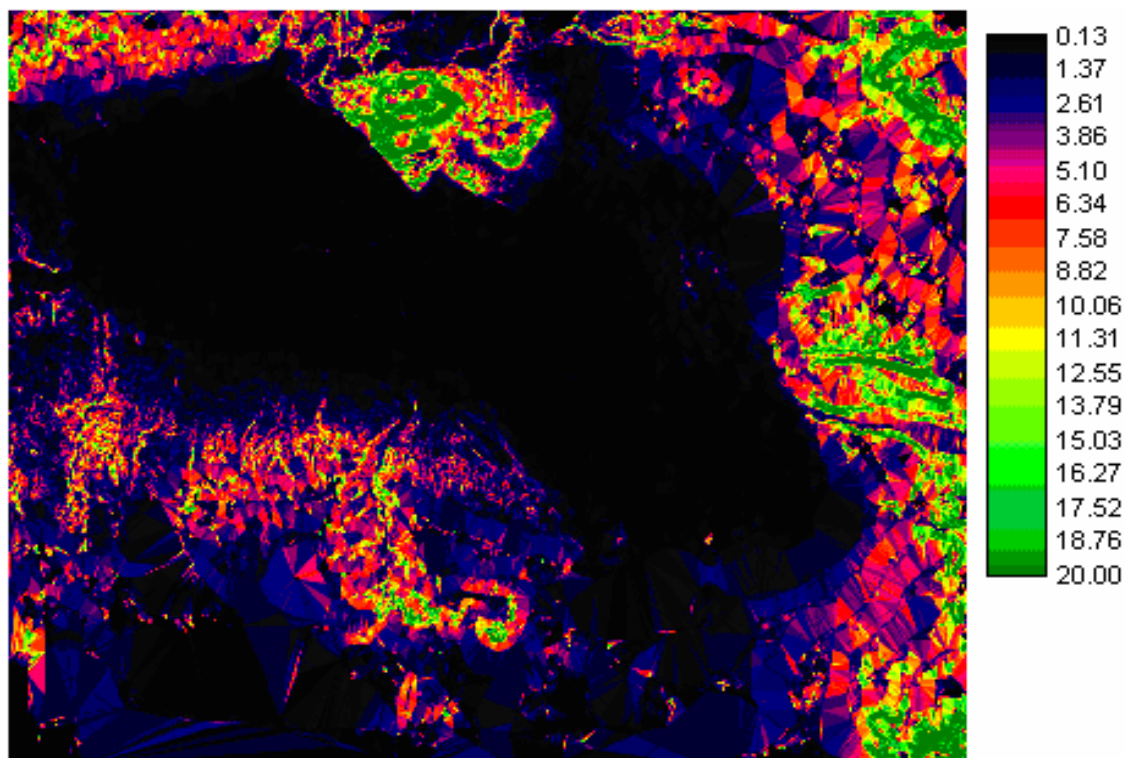
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Valores del factor L

<i>Intervalos de pendiente</i>	<i>Longitud de la pendiente</i>
0 % – 5 %	125 m
5 % - 20 %	100 m
> 20 %	80 m

Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Mapa del factor topográfico LS



Fuente: Elaboración propia

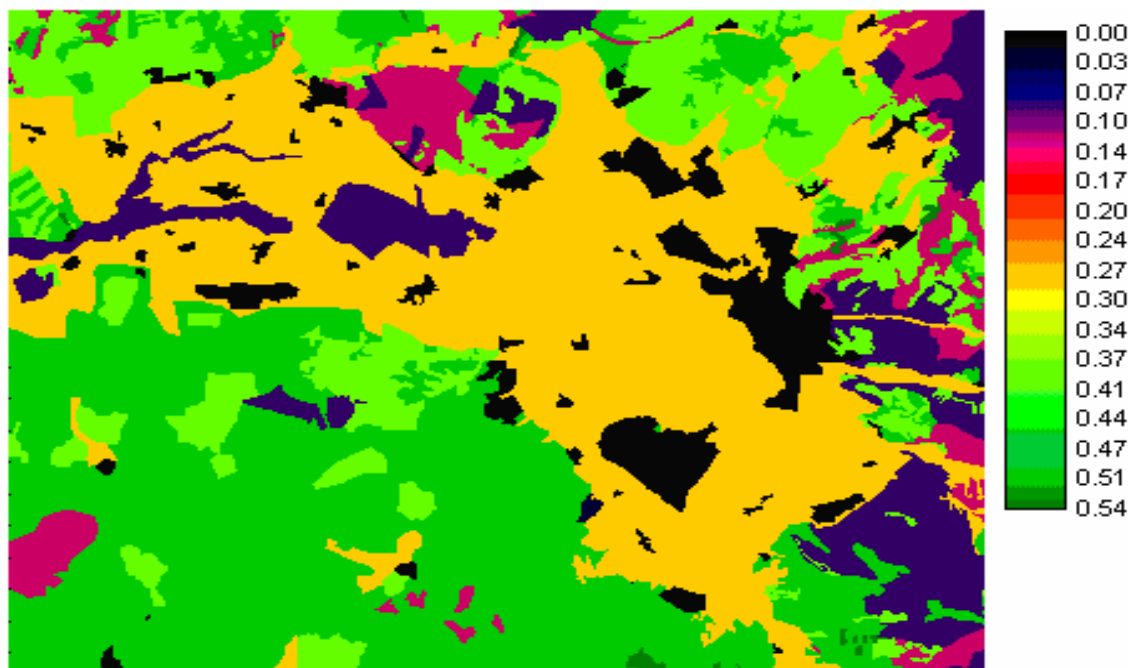
Tabla 4. Índices del Factor C

	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
	0-1	1-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Praderas, prados y pastizales	0,45	0,32	0,20	0,12	0,07	0,02
Bosque con sotobosque apreciable	0,45	0,32	0,16	0,08	0,01	0,006
Bosque sin sotobosque apreciable	0,45	0,32	0,20	0,10	0,06	0,01

Cultivos de secano	Valor del factor C	Cultivos de regadío	Valor del factor C
Trigo/avena	0,38	Algodón/algodón	0,29
Trigo/ barbecho	0,44	Algodón/trigo	0,17
Trigo/garbanzos	0,60	Algodón/remolacha	0,21
Trigo/cebada	0,57	Algodón/maíz	0,51
Trigo/girasol	0,55	Algodón/girasol	0,49
Trigo/habas	0,31	Maíz/maíz	0,53
Trigo/remolacha	0,29	Maíz/remolacha	0,45
Cebada/girasol	0,63	Tabaco/tabaco	0,53
Cereal/cereal	0,31	Cereal/girasol	0,36
Cereal/barbecho	0,40	Patata/girasol	0,36
Cereal/girasol	0,70	Patata/sandia	0,04
Algodón/algodón	0,14	Arroz/arroz	0,04
Olivar	0,40	Olivar	0,40
Viñedo	0,54	Hortalizas	0,04
Almendra	0,54		

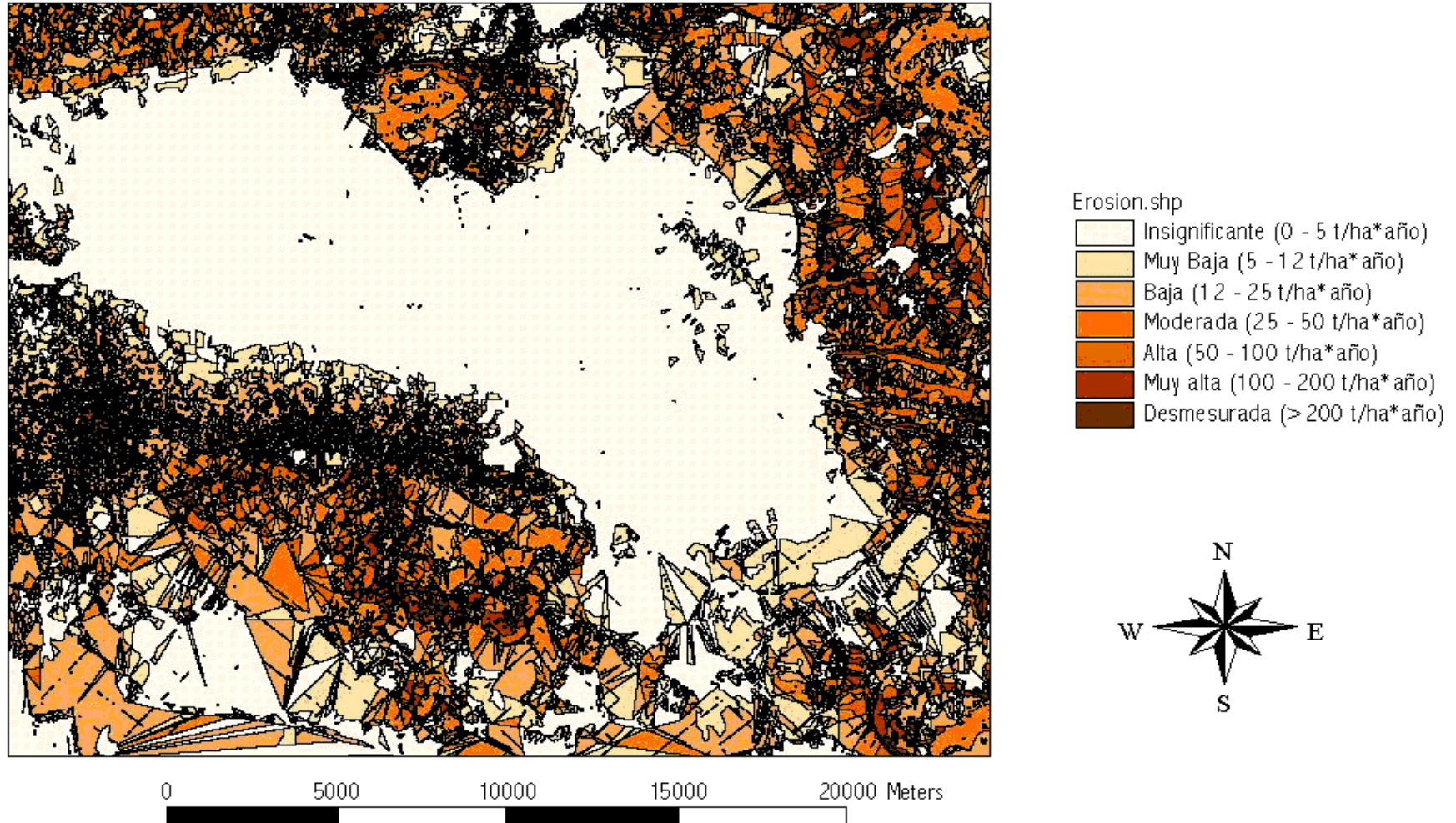
Fuente: CIDA de Granada

Figura 8. Mapa de cobertura vegetal del suelo. Factor C



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Mapa de Estados Erosivos



Fuente: Elaboración propia