

**MODELIZACION DE LAS PERDIDAS DE SUELO MEDIANTE INTEGRACION DE
IMAGENES DE SATELITE DE ALTA Y BAJA RESOLUCION
(LANDSAT-TM Y NOAA-AVHRR) EN UN ENTORNO S.I.G.**

M. RODRÍGUEZ, J.D. SÁNCHEZ, L.VILLAR, C. NAVARRO Y J.M. MOREIRA
CONSEJERIA DE MEDIO AMBIENTE
JUNTA DE ANDALUCIA

Comunicación presentada en el I Congreso Europeo sobre el Control de la Erosión. Sitges. Barcelona. Mayo de 1996

RESUMEN

La erosión del suelo constituye uno de los problemas de mayor incidencia sobre el sistema productivo básico de los países ribereños del Mediterráneo. Numerosas iniciativas han abordado, por métodos clásicos la creación de procedimientos de calificación del espacio en función de los niveles teóricos de pérdidas de suelo. De los métodos convencionales el más utilizado por su sencillez y validación en numerosos ámbitos es la ecuación universal de pérdidas de suelo elaborada por WISCHMEIER (1978).

El uso de la tecnología de Sistemas de Información Geográfica y de imágenes de satélite de alta y baja resolución permite abordar con eficacia la adaptación de estos modelos universales para obtener evaluación de pérdidas de suelos en territorios extensos, realizándose además un seguimiento multitemporal de este fenómeno a través del análisis de la variación de los factores más dinámicos como son la agresividad climática y el grado de protección de las cubiertas vegetales.

OBJETIVOS

La erosión es un proceso natural que junto a otros es en gran medida el responsable del modelado actual de nuestro entorno, generalmente actúa a velocidades que permiten un cierto equilibrio en la relación suelo creado - suelo perdido. Estos fenómenos erosivos se pueden ver muy acelerados por la acción del hombre. La alta capacidad de éste para efectuar cambios en el medio natural, fundamentalmente cuando actúa sobre el factor protector del suelo más importante, como es la cubierta vegetal, o cuando mantiene unos usos inadecuados de éste, provoca la pérdida o empobrecimiento de los suelos agrícolas y forestales que en conjunción con unas características climatológicas de tipo árido o semiárido desemboca en la desertificación.

Tradicionalmente la evaluación de esta problemática se ha limitado al análisis de los factores, ya sea sobre valores medios o para una situación concreta, que influyen sobre la misma, sin poder llevar a cabo un verdadero seguimiento y cuantificación de su incidencia. Las nuevas herramientas disponibles en la actualidad, nos han llevado a plantear el tratamiento del calculo estimativo de las pérdidas de suelo como un proceso dinámico donde un seguimiento continuado de los factores climáticos y de las coberturas vegetales y usos del suelo nos permite analizar tanto situaciones promedio como cuantificar y espacializar este proceso con una periodicidad al menos anual, obteniéndose un indicador ambiental cuantitativo con plena significación temporal y espacial.

MATERIAL Y METODOS

Este trabajo se ha desarrollado sobre la región de Andalucía (87.000 Km²) situada al sur de España, utilizando la información digital a escalas 1/100.000-50.0000 existente en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía, el cual utiliza como herramientas básicas ORACLE para datos alfanuméricos, ARCINFO para información vectorial y ráster, y AMATEL (Lobato,A. y Moreira,J.M.,1993) para información ráster y tratamiento de imágenes de satélite.

Tras el análisis de diferentes modelos de erosión se optó por aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Wischmeier, 1959), la cual recoge los principales parámetros físicos causantes de la erosión hídrica laminar y

en regueros, y que aunque no tiene la precisión de otros modelos más recientes, sí presenta una menor complejidad de aplicación a escalas de reconocimiento y semidetalle, adaptándose perfectamente a un análisis regional como el que nos ocupa.

La ecuación presenta la siguiente formulación:

$$A = R K L S C P$$

Requiriéndose para su empleo información de la agresividad climática (R), de la resistencia de los suelos a ser erosionados (K), del relieve del terreno (LS), del grado de protección de la cubierta vegetal (C) y por último, de la aplicación de medidas de protección (P), siendo A el valor de pérdida de suelo que se expresa en Tm/Ha/Año en el Sistema Internacional.

Es posible clasificar la información necesaria para modelizar las pérdidas de suelos en dos tipologías en función de su velocidad de variación temporal.

Por una parte, consideramos información "relativamente" estática la correspondiente al relieve del terreno (factor LS) y a la que nos describe las características de los suelos (factor K), ya que sus dinámicas temporales son lo suficientemente lentas como para no experimentar cambios apreciables en periodos más o menos largos de tiempo.

De otra parte, la información meteorológica (factor R) y la de usos y coberturas vegetales del suelo (factor C), serán consideradas como información dinámica, especialmente la primera de ellas que puede presentar cambios temporales y espaciales muy acusados más allá de las lógicas variaciones estacionales.

Bajo este planteamiento espacio-temporal los datos meteorológicos se integrarán en el Sistema de Información Ambiental con una alta periodicidad, llevándose a cabo el análisis de los diferentes usos y coberturas vegetales del territorio bajo dos perspectivas diferentes: por una parte el uso de sensores remotos de alta resolución espacial, LANDSAT y SPOT, como medio de elaboración cuatrienal de la cartografía de estos usos y coberturas a escala de semidetalle, y de otra el uso de satélites de baja resolución espacial y alta periodicidad temporal (NOAA), para el análisis del grado de desarrollo-protección de las coberturas vegetales a escala de reconocimiento, especialmente en las zonas agrícolas, con una cadencia diaria, permitiendo la monitorización de las variaciones estacionales de éstas.

Es la calidad de la información y su cadencia de recogida y tratamiento lo que va a conferir el aspecto novedoso al proceso metodológico que planteamos en este estudio. Tradicionalmente los estudios de los riesgos o procesos erosivos realizados con métodos analógicos se corresponden a valoraciones promedios para situaciones concretas de los usos y coberturas del medio. Además la complejidad de realizar levantamientos periódicos de información detallada para territorios extensos ha hecho que la estimación de las pérdidas de suelo se realicen simplificando en gran medida los requerimientos de información que necesitan los modelos de evaluación y en muchos casos infiriendo los factores de manera indirecta a partir de otras informaciones ya generadas. A continuación se plantea una estrategia de adquisición-tratamiento de la información mediante el empleo de las nuevas tecnologías.

En relación al cálculo y representación espacial de las variables destacaremos:

La erosividad de la lluvia, parámetro de gran peso en el cálculo de las pérdidas de suelo, y que refleja la energía cinética que tienen las gotas de lluvia que impactan con el suelo, requiere para ser calculado directamente la existencia de datos continuos de intensidades de lluvia, al menos por periodos de 30 minutos.

Los datos necesarios para realizar su cálculo han sido recopilados de

estaciones meteorológicas automáticas procedentes de diversos organismos públicos, y aunque el número de partida fue elevado (132) se desecharon la gran mayoría al no superar los controles mínimos de calidad y coherencia de la información. A partir de estos datos ya depurados se calculó la erosividad empleando la siguiente ecuación:

$$R_t = E_t - I_{30} = \left[\sum_{k=1}^p (e_k) \right] - I_{30} = \left[\sum_{k=1}^p \left[(0.119 + 0.0873 \log_{10}(i_k)) * V_k \right] \right] - I_{30}$$

donde:

- e_k : Energía cinética correspondiente al intervalo de tiempo t_k y para cada unidad de precipitación. (Mj/ha.mm).
- V_k : Cantidad de lluvia caída en el intervalo de tiempo t_k . k varia entre 1 y p , siendo p el número de intervalos en que está dividida una tormenta.
- i_k : Intensidad de la lluvia (mm/h).

Para espacializar este factor en el ámbito regional se recurrió al auxilio de una red de estaciones diarias con datos depurados, estaciones que se agruparon en zonas pluviométricamente homogéneas en base al comportamiento de los frentes nubosos a su paso por la región y su interacción con el relieve, y teniendo en cuenta la cartografía de precipitaciones máximas basadas en métodos estadísticos. (ICONA, 1979). Paralelamente se realizó una correlación de los valores de R obtenidos a partir de las estaciones automáticas con diferentes variables relacionadas con la pluviometría, obteniéndose altas correlaciones con la agrupación decenal de la precipitación (entre 0.93 y 0.98)

Las ecuaciones de regresión obtenidas se aplicaron a cada una de las estaciones diarias en función del área de influencia de las distintas estaciones automáticas, determinando una erosividad mensual, resultando el valor anual como suma de éstas. Estos datos puntuales se espacializaron a través de un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.) en un mapa de isoerodientes.

El factor K se obtuvo al aplicar la ecuación propuesta por Wischmeier, Johnson y Cross (1978) a los datos morfológicos y fisicoquímicos de los perfiles de suelos representativos de cada unidad cartográfica de un mapa de suelos en formato digital (De la Rosa y Moreira, 1987).

El factor LS se dedujo a partir de un Modelo Digital del Terreno (DTM) con una resolución de 20 metros. Para cada píxel se calculó su pendiente y orientación, y a partir de esta última la longitud de la pendiente hasta el extremo inferior del mismo. A los resultados de pendientes y longitudes de ladera se les aplicó la ecuación desarrollada por Foster y Wischmeier (1974), para el cálculo de pérdidas de suelos en pendientes irregulares. Cada píxel se consideró como un tramo de igual pendiente, quedando definida la ecuación utilizada como:

$$LS_j = \frac{S_j}{x(22,13)^m} (X_j^{m+1} - X_{j-1}^{m+1})$$

donde:

S_j : Factor pendiente del píxel j

X_j : Longitud de la ladera hasta la parte inferior del píxel j

x : Longitud del píxel

Es en el cálculo del factor C donde el procedimiento de cálculo ha sido más laborioso y novedoso gracias a la aportación de la teledetección, que permitirá el seguimiento multitemporal y espacializado de este factor.

El factor C tradicionalmente se obtiene aplicando una serie de valores tabulados a cada tipo de cobertura vegetal en función de su altura y densidad de la cubierta para formaciones de vegetación natural (US Soil Conservation Service, 1975) o bien, combinando una serie de valores tabulados (Wischmeier, 1978) según la alternativa de cultivo en las tierras agrícolas con la distribución anual de la erosividad. Ambos métodos plantean una serie de inconvenientes que hacen, por una parte, que en el primer caso el cálculo esté supeditado a una interpretación personal al utilizar como documentos de referencia leyendas no adaptadas a estas tablas, optándose, en la mayoría de los casos, por simplificar el número de clases analizadas, y de otra, la complejidad del cálculo para las tierras agrícolas, donde la necesidad de contar con información espacial detallada de las alternativas de cultivo y de la distribución anual de la erosividad anual de la lluvia hace prácticamente imposible su aplicación a territorios amplios, adoptándose generalmente valores anuales promedios en función de su dedicación agrícola.

Mediante el uso de imágenes de satélite nos hemos planteado una doble estrategia de actualización inter e intraanual del factor C.

Se han empleado imágenes LANDSAT-TM corregidas geométricamente y con apoyo de fotointerpretación, para la identificación de los usos y coberturas vegetales del suelo a un nivel de resolución adecuado para una escala de semidetalle (1:50000). Para ello se han identificado un número de clases suficiente (143 clases estructuradas jerárquicamente) para aplicar las tablas promedio de C y con una resolución temporal que hace que se actualice esta información cuatrienalmente. Los criterios de identificación atienden a la estructura vertical, densidad y taxón a nivel genérico para las zonas de vegetación natural y a los usos u orientaciones de uso para el resto del territorio.

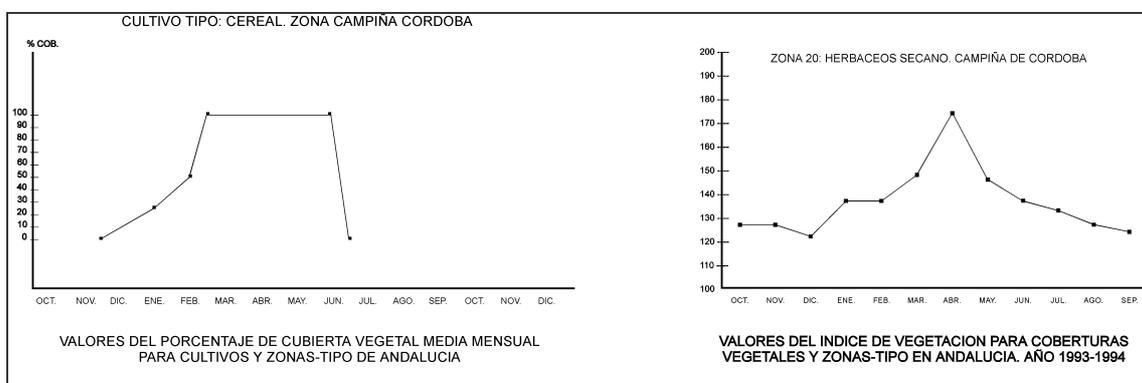
Actuando sobre esta información con el empleo o asignación de valores de C mediante tablas y alternativas promedio se pueden realizar análisis actuales e históricos, así como seguimientos de la evolución de los fenómenos erosivos en la región.

Pero si se considera que el factor C es extraordinariamente cambiante a lo largo del año, sobre todo en regiones Mediterráneas, y en general en todas las zonas con régimen estacional, puede ser interesante utilizar sensores con mayor resolución temporal que recogiesen la variación de la cobertura que ofrece la vegetación durante su ciclo anual. El uso de imágenes NOAA en territorios amplios y a nivel de reconocimiento puede permitir llegar a conocer esta posible variación anual.

Este proceso se ha realizado a partir de un índice de actividad clorofílica (NDVI) obtenido a partir de este sensor y bajo la hipótesis de trabajo de su estrecha relación con la disponibilidad hídrica de las plantas, el Índice de Area Foliar, y por ende con el grado de desarrollo de los cultivos y su cobertura en zonas agrícolas con dedicación a herbáceos

anuales, áreas donde con los métodos tradicionales es imposible espacializar las ocupaciones anuales, utilizándose usualmente valores promediados del factor C de los cultivos más frecuentes. Por otra parte, en zonas de vegetación estable un cambio del NDVI no implica necesariamente un cambio de la cobertura de la vegetación, sino que el uso de este índice vendría a matizar pequeñas oscilaciones estacionales de esa cubierta vegetal.

Esta relación se comprobó, tras realizar un análisis de los valores del NDVI para diferentes usos y coberturas del suelo en numerosas ventanas y series de imágenes, identificando los umbrales máximo y mínimo de % de cobertura e índice de vegetación. A estos valores mínimos y máximos se les hizo equivaler, suponiendo una relación de linealidad, los valores mínimo y máximo que podría tomar el factor C y que oscilarían entre 0.001 y 1 para zonas de vegetación estacional y entre otros límites más cerrados para zonas de vegetación permanente o natural con los que se intenta recoger las variaciones estacionales de éste. Estas zonas son inferidas utilizando la información cuatrienal agrupada en amplias clases como una máscara sobre las imágenes NOAA.



Bajo este planteamiento ha sido posible obtener a escala de reconocimiento y a partir de una serie temporal anual de imágenes NOAA una aproximación, al menos mensual, del factor de protección de la cobertura vegetal.

RESULTADOS

La utilización de la información de base, así como la aplicación de la sistemática de recogida, elaboración e integración de la información dinámica en un SIG, propuesta en este trabajo, conforma un proceso metodológico relativamente fácil de aplicar a diferentes escalas en la evaluación de los fenómenos erosivos. A nivel de semidetalle se han utilizado los estudios cuatrienales de los usos y coberturas del suelo y datos anuales de la erosividad de la lluvia, aplicándose a escalas de reconocimiento una aproximación al valor de C a partir de imágenes con una gran resolución temporal, y de datos mensuales de la agresividad climática.

La concepción de la erosión como una problemática dinámica, cuyo reconocimiento requiere levantamientos periódicos y continuados de información permite obtener toda una serie de resultados con plena significación espacial (figuras 1,2,3, y 4), que además posibilita extraer resultados cuantitativos (cuadro 2) y que obviamente deberán interpretarse teniendo en cuenta las lógicas limitaciones que nos impone la ecuación de estimación de pérdidas de suelo elegida (Wischmeier, 1976).

Pérdidas		Situaciones				
Tm/Ha/Año	CLIMAX	1976	1987	1991	1992	
< 1	60,02	26,31	26,04	24.73	26.75	
1 - 4	19,36	12,59	11,67	10.56	12.17	
4 - 8	7,49	8,62	8,15	8.17	8.88	
8 - 12	3,27	5,63	5,32	5.75	6.02	
12 - 20	2,96	7,58	7,24	8.12	8.33	
20 - 50	3,07	13,97	13,88	15.73	15.30	
50 - 75	0,91	5,66	5,87	6.43	5.92	
75 - 100	0,58	3,60	3,82	4.02	3.64	
100 - 200	1,17	7,02	7,68	7.57	6.62	
> 200	1,16	8,98	10,32	8.90	6.36	

Cuadro 2.- Resultados cuantitativos expresados como relación porcentual de las pérdidas de suelos promedio en Andalucía para los diferentes supuestos

Así mismo, el carácter periódico de adquisición y tratamiento de la información ha permitido crear una base de datos histórica, de carácter gráfico y alfanumérico, que será una herramienta especialmente útil en el estudio de la evolución de los procesos erosivos y su incidencia en la desertificación.

CONCLUSIONES

El análisis espacial y temporal de la erosión va a depender en gran medida de la calidad y periodicidad de la información que se maneje en el modelo, debiendo entenderse los resultados como un indicador ambiental que permitirá seguir la evolución de los procesos así como realizar comparaciones espaciales entre distintas zonas, pero que sólo adquirirá plena validez cuantitativa mediante un proceso de validación experimental de los resultados en la zonas estudiadas.

La versatilidad que presentan los SIG para el manejo y análisis de la información espacial hacen que sean una eficaz herramienta para la modelización, permitiendo realizar múltiples procesos similares bajo diferentes supuestos de evolución de los factores implicados en las pérdidas de suelo, de una manera rápida y sencilla.

Asimismo, este planteamiento de adquisición-tratamiento de forma sistemática y periódica de la información en la evaluación de los procesos erosivos será de extraordinaria utilidad en la gestión y evaluación ambiental de las actuaciones que en materia de reforestación se están llevando a cabo en el territorio regional.

BIBLIOGRAFIA

- Elías Castillo F. y Ruiz Beltrán L. (1979). Precipitaciones máximas en España. Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Monografía 21, Madrid.
- De la Rosa D y Moreira J.M. (1987). Evaluación Ecológica de Recursos Naturales (1987). Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- Foster G.R. y Wischmeier W.H. (1974). Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Trans, ASAE 17:305-309
- Lobato A. y Moreira J.M. (1993). AMATEL un software abierto para el tratamiento de información ráster en un sistema de información ambiental. 5ª Reunión Científica de la Asociación Española de teledetección. Las Palmas.

- Moreira J.M. (1992). Capacidad de uso y erosión de los suelos. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- Moreira J.M. y col. (1995). Elaboración de un modelo de evaluación de pérdidas de suelo utilizando imágenes de satélite de alta y baja resolución (Landsat-TM y NOAA-AVHRR). VI Reunión científica de la asociación española de teledetección. Valladolid, Septiembre de 1995.
- Rivas Martínez S. (1986). Mapas de Series de Vegetación de España. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza.
- Rodríguez M., Sánchez J.D. (1995). Distribución espacio-temporal de las pérdidas de suelos en Andalucía utilizando tecnología S.I.G. e imágenes de satélite. XXV Jornadas AME sobre desertificación y degradación de suelos. Vilaseca, Septiembre de 1995.
- U. S. Soil Conservation Service. (1975). Procedure for comouting sheet and rill erosion on project areas. Technical Release 51.
- Wischmeier W.H., Johnson C.B., Cross B.V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J. Soil and Water Cons. 26, 189-193.
- Wischmeier W.H. (1977). Soil erodibility by rainfall and runoff. Erosion: Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery. 45-56.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E. (1958). Evaluation of the factors in the soil-loss equation. Agricultural Engineering. 39 (8), 458-462.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., Uhland R.E. (1978). Predicting rainfall erosion losses, U.S.D.A. Agricultural Handbook 537. (8), 458-462.