

ELABORACION DE UN MODELO DE EVALUACION MULTITEMPORAL DE PERDIDAS DE SUELO UTILIZANDO IMAGENES DE SATELITE DE ALTA Y BAJA RESOLUCION (LANDSAT-TM Y NOAA-AVHRR).

J.M. Moreira; M. Rodríguez; J.D. Sánchez; C. Navarro y L. Villar
*Consejería de Medio Ambiente. D. Gral. de Planificación. Parque Tecnológico
Cartuja'93, Pabellón de Nueva Zelanda, Avda. de las Acacias, s/n. 41092-Sevilla.
Teléfono: 95-4480217 y Fax nº: 95-4480222.*

RESUMEN.- Se presenta un método para integrar imágenes de satélite de alta y baja resolución (Landsat-TM y NOAA) en un modelo de cálculo multitemporal de pérdidas de suelo. El modelo es de tipo paramétrico y considera como factores de cálculo de las pérdidas de suelo, la erosividad de la lluvia, la erodibilidad del suelo, la longitud y grado de la pendiente y la cubierta vegetal. Respetando las formulaciones del modelo en todos sus factores e introduciendo en el factor de cubierta vegetal diferentes procedimientos para su obtención a partir de imágenes de satélite, a diferentes escalas temporales y espaciales se determinan las pérdidas de suelo en una región de 87.000 km² de ámbito mediterráneo.

ABSTRACT.- A method for the integration of high and low resolution satellite images (Landsat-TM and NOAA-AVHRR) in a model to calculate soil loss multitemporally is proposed. The model works with parameters and regards rain erosivity, soil erodibility, slope degree and length and vegetation cover as factors to calculate soil loss. By taking into account all the factors in the formulation and also by introducing different satellite-derived procedures in the calculation of vegetation cover at different temporal and spatial scales, soil loss is determined in a 87.000 km² mediterranean region.

1.- INTRODUCCION

La erosión constituye uno de los problemas ambientales más graves que se ciernen sobre las regiones del norte y sur mediterráneo, siendo numerosos los programas internacionales y nacionales que se desarrollan para contrarrestar sus efectos. Sin embargo, el nivel de conocimiento de este fenómeno dista mucho de ser parejo a su importancia. Cabe destacar, en este sentido, la inexistencia de medidas sobre el terreno que permitan conocer las pérdidas de suelo que, en función de las variables que controlan la erosión, se pueden estar produciendo, ya que cuando estas medidas existen son puntuales, dispersas, no comparables y con escasa significación estadística. Hay que destacar, no obstante que, desde los años 60, han sido frecuentes estudios metodológicos que, aplicados a cuencas hidrográficas, unidades físico-naturales o administrativas, han tendido a evaluar las pérdidas de suelos generadas por diferentes procesos erosivos. De todas las formas en que se expresa la erosión es la llamada laminar y en regueros la más extendida, ya que cubre todo el espacio que es afectado por la precipitación. Para evaluar este tipo de erosión, desde los años 70, se ha generalizado el uso de la llamada ecuación universal de pérdidas de suelos (USLE). Esta ecuación parametriza las variables que intervienen en este tipo de erosión, habiéndose generado su formulación a través de numerosas experiencias en campo realizadas en Estados Unidos (Wichsmeier,

1976). La relativa sencillez de la ecuación y su, en principio, universalidad, la han convertido en el modelo más utilizado en el mundo para evaluar las pérdidas de suelos. Han sido, no obstante, numerosas las modificaciones y adaptaciones de la ecuación inicial que, sin embargo, y, dada la no existencia de validaciones en campo, sigue manteniendo su validez, siempre que sea considerada como un modelo que da lugar a resultados que, empíricamente, pueden ser utilizados para comparar niveles de pérdidas de suelo en lugares muy distanciados.

La notación que utiliza esta ecuación es la siguiente: $A = R \times K \times L_s \times C \times P$.

La evaluación de la cubierta vegetal se ha intentado realizar, a veces, utilizando imágenes de satélite (Bleeker, P., 1978), deduciendo, a partir de la fotointerpretación o clasificación de distintos tipos de coberturas vegetales, unos índices de protección de la vegetación. Para realizar esto último siempre se han empleado referencias a unas tablas fijas definidas en el modelo original (ICONA, 1987), si bien, simplificando extraordinariamente las clases de coberturas a utilizar (Pilesjö, P. and Ardö, J., 1995).

Hay que considerar, asimismo, que todas las aplicaciones de la USLE o sus adaptaciones, suelen contemplar situaciones promedio, cambiando sólo, en el análisis multitemporal, la erosividad de la lluvia, pero casi nunca la cubierta vegetal que, sobre todo en tierras de cultivo, es extraordinariamente cambiante en su ciclo anual. En este sentido, dada la complejidad de recoger la dinámica multitemporal de la vegetación en el espacio, la mayor parte de los modelos aplicados contemplando la misma lo son sobre espacios territoriales muy restringidos.

2.- OBJETIVOS

En esta comunicación se plantea el uso de imágenes de satélite de alta (Landsat-TM) y baja resolución (NOAA) para integrar, en el uso de la USLE, la dinamicidad temporal y espacial de la cubierta vegetal en territorios de gran extensión y se busca hacer de los valores derivables de la USLE, así aplicada, un indicador ambiental que facilite conocer la magnitud del problema erosivo mes a mes y año a año en una región de ámbito mediterráneo.

Igualmente, el uso de las diferentes imágenes deberá permitir, de una parte, obtener resultados de valor del factor C para escalas de reconocimiento (NOAA) y semidetalle (Landsat-TM) de forma directa y de otra, servir para espacializar, en tierras labradas, los valores de cubierta vegetal para distintos ciclos de cultivo, hasta ahora sólo conocidos a nivel local a través de parcelas concretas en bases de datos de referencia exclusivamente administrativa.

3.- MATERIAL

Para el desarrollo de este trabajo se han utilizado informaciones relativas a energía e intensidad de la lluvia obtenidas de 132 estaciones automáticas y de estaciones meteorológicas con datos diarios. Asimismo, datos relativos a perfiles de suelos asignados a cartografía edáfica digitalizada de la región de Andalucía, un modelo digital del terreno de 20 m de resolución, mapas de vegetación clímax (Rivas Martínez, S. 1986); vegetación en 1976 (De la Rosa, D. y Moreira, J.M., 1987), 1987 (Moreira, J.M. y Fernández, A., 1994) y 1991 (González, A. et al., 1995) integrados todos ellos en el Sistema de información ambiental de Andalucía (SinambA).

Imágenes de satélite Landsat-TM de junio a agosto de 1987 constituyen la base de interpretación de usos y coberturas vegetales del suelo empleados para definir, a través de tablas fijas, el factor de protección de la cubierta vegetal. De igual modo, imágenes Landsat-

TM han sido utilizadas para actualizar dicha cubierta a fecha de 1991. Las informaciones de cartografía de vegetación y las imágenes Landsat-TM son utilizadas para escalas de semidetalle.

Para poder realizar un análisis intraanual, de una parte, y para evaluar los años en que no se dispone de datos de cobertura vegetal con alta resolución, por otra, se han empleado series mensuales de imágenes NOAA-AVHRR-11 y 14 que cubren los años 1991 a 1995.

El tratamiento de la cartografía digital vectorial se ha efectuado mediante el "software" ARC-INFO, mientras que el tratamiento de la información ráster se ha realizado a través del "software" AMATEL, habiéndose desarrollado la ejecución de todas las fases para la obtención de las variables que intervienen en el modelo de la USLE, en el Sistema de información ambiental de Andalucía.

Una base de datos de alternativas, ciclos de cultivos y porcentaje de cubiertas a nivel de municipio de toda Andalucía completa la información de campo para análisis locales.

4.- METODOS

Desde un punto de vista metodológico, se han seguido tres procesos para obtener la espacialización del factor C de protección de la cubierta vegetal. Por una parte, los diferentes mapas digitales de vegetación han sido analizados en sus leyendas y se les han asignado las tablas originales de Wischmeier. Este procedimiento ha sido ejecutado sobre el mapa de vegetación clímax, el de vegetación en 1976, en 1987 (60 clases) y 1991 (143 clases), dando lugar a mapas de factor C complejos, directamente utilizables en el cálculo de la USLE, para generar mapas de pérdidas de suelo a escalas de reconocimiento y semidetalle. El papel de la teledetección, en este caso, está en servir de soporte a la interpretación plurianual de los diferentes tipos de vegetación.

Por otra parte, un segundo procedimiento se ha utilizado para analizar la posibilidad de realizar un seguimiento multitemporal e intraanual de este factor con imágenes NOAA.

Si consideramos la extraordinaria variabilidad del factor C a lo largo de un año en zonas de vegetación estacional y analizamos la posibilidad de hacer su seguimiento con sensores de alta resolución temporal, como NOAA, podríamos hacer las siguientes hipótesis de trabajo.

i) Derivar del NDVI la posible relación con el porcentaje de cubierta del suelo y, a partir de éste, relacionar con la erosividad de la lluvia existente en el período analizado y de ahí, derivar el factor C anual, tal y como es propio del modelo original. Esta hipótesis dará lugar a un tercer procedimiento de obtención del factor C.

ii) Suponer que, puesto que el NDVI está relacionado con las disponibilidades hídricas y ésta, en zonas cultivadas, con crecimiento/cubierta del cultivo, y en zonas naturales con follaje y cubierta herbácea, podría existir también una relación clara entre NDVI y valor final de C para las situaciones que reflejan las imágenes NOAA.

La primera hipótesis significa un proceso muy complicado de cálculo en tiempo real (sería preciso ir calculando continuamente la erosividad acumulada al día de la fecha).

La segunda simplifica el cálculo al obviar la erosividad acumulada y la necesidad de contemplar cultivos tipo de las complejas tablas originales del modelo, ya que tiende a derivar el valor de C directamente de los valores de la imagen NOAA.

Para desarrollar lo anterior es preciso encontrar una relación entre NDVI y porcentaje de cubierta y de valor de C equivalente para cada píxel a lo largo de un ciclo anual. Esto permitiría cálculos de situaciones específicas dentro de un año y de situaciones acumuladas para un año completo.

En relación a lo anterior, el margen de variación anual del factor C debería de responder al establecido por el modelo original (0,001 a 1). No obstante, dadas las diferencias de

comportamiento de distintos tipos de vegetación natural permanente y estacional o cultivada, en función de sus estructuras, es lógico pensar que el margen de variación del factor C deberá estar restringido, en su rango de oscilación, al nivel que queda definido por las tablas del modelo para grupos de vegetación (se diferencian bosques, matorrales, pastizales,...). A través de 48 ventanas de control se definió, para imágenes NOAA de 1991 a 1995, el nivel digital en el que el NDVI muestra el suelo desnudo. Asociando este valor al porcentaje de cubierta, igual a cero (valor de $C=1$) y el máximo valor de actividad, de cubiertas con 100% de cobertura, a valor de $C=0,001$, se generó una sistemática para derivar los valores de C a partir del índice NDVI con la siguiente notación: $C=1-0,00999 \times \% \text{Cubierta}$. Siendo los valores de referencia de $\text{NDVI} > 171 = 100\%$ de cobertura, $< 126 =$ suelo sin cubierta vegetal.

Para poder establecer los valores de C de los píxeles de imágenes NOAA dentro de los rangos de variación lógicos de cada tipo de vegetación, se generó un neocanal de información a partir de la agregación de tipologías de vegetación definidas por la interpretación de imágenes Landsat-TM de fecha más próxima. De esta forma, mientras en zonas cultivadas el margen de variación posible recorre toda la escala de C, en las zonas de vegetación natural, temporal o permanente, éste varía según rangos con márgenes más estrechos definidos por las tablas del modelo original sobre la base de imágenes Landsat.

Establecido el procedimiento de obtención del factor C a partir de una imagen se ejecuta el procedimiento para su cálculo semanal, mensual o anual.

Finalmente, un tercer procedimiento obtiene para cada píxel NOAA el porcentaje de cobertura de vegetación, utilizando la diferencia hasta 100 como el porcentaje de pérdidas que se puede producir en la fecha analizada. Multiplicando este valor por la erosividad acumulada hasta la fecha se deriva, para cada píxel, un procedimiento de cálculo similar al de alternativa de cultivo a nivel local. El Gráfico 1 recoge esquemáticamente el conjunto de procesos seguidos.

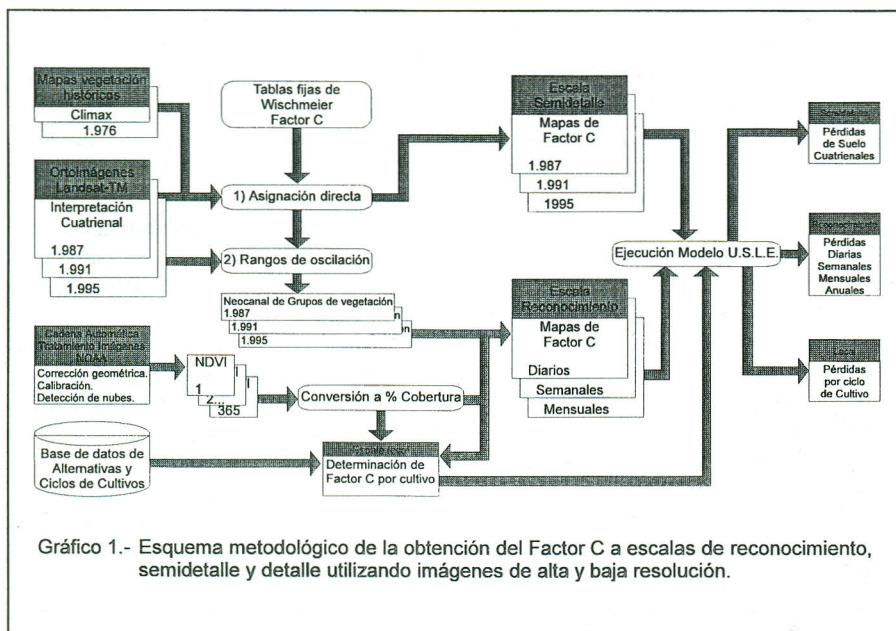


Gráfico 1.- Esquema metodológico de la obtención del Factor C a escalas de reconocimiento, semidetalle y detalle utilizando imágenes de alta y baja resolución.

5.- RESULTADOS

El procedimiento metodológico diseñado permite obtener varios tipos de resultados relativos al factor de protección de la cubierta vegetal.

En primer lugar, la asignación directa de los valores de C del modelo original de Wischmeier a mapas históricos obtenidos mediante fotointerpretación cuatrienal de imágenes Landsat (Figura 1), permite efectuar análisis multitemporales de la variación de este factor, así como establecer comparaciones con situaciones pasadas. La Tabla I sintetiza los resultados finales de pérdidas de suelos derivables a partir de la ejecución del modelo general utilizando este procedimiento. Este tipo de análisis permite volcar mapas finales de escala 1/50.000-1/100.000, si bien, entre una y otra fecha sólo podremos variar la erosividad de la lluvia, manteniendo fijo el factor C. De los resultados de la Tabla I destaca el hecho de que la erosión, como proceso natural, ha pasado a multiplicarse por 5 por el efecto de la alteración de la vegetación clímax. La mencionada tabla refleja igualmente un descenso de las pérdidas de suelo en 1992 como consecuencia de una grave sequía regional que se desencadena a partir de dicho año.

En segundo lugar, el uso del neocanal de imagen Landsat sobre imágenes diarias NOAA, da lugar a valores diarios, semanales, mensuales (Figura 2) y anuales (Figura 3) del factor C. La Tabla II presenta los resultados obtenidos por este procedimiento para el mes de abril de 3 años diferentes, observándose cómo al final del ciclo de sequía que ha afectado a la región (1992-1995), los valores de C alcanzan un índice de menor capacidad de protección del suelo. Este hecho permite confirmar la importancia de la variación intraanual de este factor de cara a la evaluación de pérdidas de suelo. Dada la resolución de las imágenes NOAA (1,1 km) los mapas finales de pérdidas de suelo se limitan, en principio, a escalas de reconocimiento territorial (Figura 4).

En tercer lugar, la combinación de datos de campo relativos a ciclos de cultivo y la información de porcentaje de cobertura multitemporal derivable de las imágenes NOAA, permite realizar, a nivel de zonas de cultivo (segregadas mediante la zonificación fina de imágenes Landsat), tablas de comportamiento del factor C en función del tipo de cultivo y la erosividad acumulada existente en la zona. Un ejemplo de este tipo de resultados lo muestra la Tabla III en la que se refleja la gran similitud entre los datos calculados directamente en campo y los derivados del uso de imágenes NOAA.

6.- DISCUSION

Si consideramos como resultados de referencia sobre el terreno los utilizados a través de una base de datos existente para alternativas de cultivos-tipo (Moreira, J.M., 1992), y los que a través de imágenes Landsat se derivan al asignar valores de tablas fijas de Wischmeier a años de referencia, se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Es posible llegar a construir el factor C para alternativas específicas de cultivo utilizando datos derivables de imágenes NOAA. No obstante, la complejidad del cálculo, la necesidad de disponer de información de erosividad acumulada en tiempo real y el hecho de que la espacialización del resultado sólo sea posible a nivel de píxel NOAA hace excesivamente oneroso el procedimiento.

- Si bien los mapas de C derivables de imágenes Landsat fotointerpretadas son una excelente fuente para llegar a mapas de semidetalle de pérdidas anuales de suelos, este procedimiento no resuelve ni la variabilidad intraanual, ni permite un seguimiento anual continuado, dado los elevados costes económicos que produciría este sistema si se realizase todos los años.

- La espacialización del factor C intraanualmente a través de imágenes Landsat, como

neocanal y NOAA, da lugar a unos resultados que muestran una extraordinaria similitud, si contemplamos el mismo año de referencia, con los obtenidos a través de la asignación directa de las tablas de Wichsmeier. La Tabla IV es un reflejo de lo anterior. No obstante, se comprueba que el cambio de resolución en la ejecución del modelo tiene una fuerte incidencia en la variación de los valores de erosión que suben al bajar la resolución debido al efecto de simplificación que, en zonas de relieve, sufren los interfluvios en vaguadas condicionados por el factor de longitud y grado de pendiente. Una simplificación del mapa de C derivado de imagen Landsat y su utilización en el modelo general de la USLE a la misma resolución que la generada, para el mismo año con imágenes NOAA evidencia la gran similitud de resultados para similar resolución (Tabla IV).

7.- CONCLUSIONES

El procedimiento desarrollado permite derivar múltiples resultados utilizables a diferentes escalas de trabajo para resolver el problema del seguimiento multitemporal de pérdidas de suelo en regiones mediterráneas. Si bien no existen parcelas experimentales con las que poder calibrar los resultados derivados, la comparación con los datos que se obtendrían por procedimientos convencionales (asignación de tablas fijas) permiten confiar en la bondad de los resultados como indicadores ambientales que facilitan realizar análisis históricos y comparaciones entre puntos distantes en el espacio en relación a los niveles de gravedad del fenómeno erosivo.

8.- REFERENCIAS

- Bleecker, P. 1978. *The application of Landsat Imagery to Soil Degradation Mapping*. Estudios de la Dependencia de Teledetección de FAO. Roma.
- De la Rosa, D. y Moreira, J.M. 1987. *Evaluación ecológica de recursos naturales*. Ed. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- González, A., Fernández, A., Moreira, J.M., Carranza, J. y Ruíz, J. 1995. El mapa de ocupación del suelo de Andalucía y su integración en un programa de seguimientos de cambios del territorio. En *6ª Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*. Valladolid.
- ICONA. 1987. *Mapas de estados erosivos. Cuenca hidrográfica del Guadalquivir*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Moreira, J.M. 1992. *Capacidad de uso y erosión de suelos. Aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía*. Ed. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Moreira, J.M. y Fernández, A. 1995. *Usos y coberturas vegetales del suelo en Andalucía. Seguimiento a través de imágenes de satélite*. Ed. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Pilesjö, P. and Ardö, J. 1995. Localising areas with increased soil erosion susceptibility in the Krusme Hory mountains, using satellite data and digital elevation data. In *Earsel Advances in Remote Sensing. Proceedings of the Earsel Workshop*. 15-18 May
- Rivas Martínez, S. 1986. *Mapas de series de vegetación de España*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Wichsmeier, W.H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. In *Journal Soil and Water Conservation*, nº 31: 5-9.

Nivel Pérdidas Tm/ha/año	Porcentaje de superficie regional afectada en situaciones tipo				
	CLIMAX	1976	1987	1991	1992
< 1	60,0	26,3	26,0	24,7	26,7
1 - 4	19,4	12,6	11,7	10,5	12,2
4 - 8	7,5	8,6	8,1	8,2	8,9
8 - 12	3,3	5,6	5,3	5,7	6,0
12 - 20	2,9	7,6	7,2	8,1	8,3
20 - 50	3,1	14,0	13,9	15,7	15,3
50 - 75	0,9	5,6	5,9	6,4	5,9
75 - 100	0,6	3,6	3,8	4,0	3,6
100 - 200	1,2	7,0	7,7	7,6	6,6
> 200	1,2	9,0	10,3	8,9	6,4
Pérdidas Totales Tm/año	712.234	3.735.781	4.057.988	3.924.185	3.301.958
Pérdidas Medias Tm/ha	8,2	42,8	46,5	45,0	37,8

Tabla I.- Comparación de niveles de pérdidas de suelo en diferentes situaciones tipo utilizando una resolución de 75 m.

Valor factor C	Porcentaje de superficie regional afectada en el mes de abril		
	Año 1991	Año 1994	Año 1995
No evaluado	1,7	1,7	1,7
< 0,002	12,2	5,8	2,8
0,002 - 0,005	18,8	22,0	18,8
0,005 - 0,010	8,9	10,7	9,5
0,010 - 0,015	4,9	5,9	4,7
0,015 - 0,020	6,0	6,1	2,5
0,020 - 0,030	16,2	17,4	10,1
0,030 - 0,040	17,3	15,9	8,4
0,040 - 0,050	7,5	7,4	15,0
0,050 - 0,060	4,7	5,5	14,2
0,060 - 0,070	0,9	0,9	8,5
> 0,070	0,7	0,5	3,6

Tabla II.- Distribución del índice de cubierta vegetal obtenido mediante imágenes NOAA para el mes de abril en tres años de referencia

Período	Fechas	% Erosividad Acumulada	Proporción C	Valor C en campo	Valor C NOAA
Barbecho	15/09-30/10	19,9	80	0,1592	0,1850
Siembra	30/10-30/12	30,4	75	0,2280	0,2250
Implantación	30/12- 1/04	33,2	45	0,1492	0,1597
Crecimiento	1/04-15/06	3,3	15	0,0049	0,0230
Residuos	15/06-30/11	43,1	3	0,0129	0,0180
Valor C anual				$\Sigma = 0,5542$	$\Sigma = 0,6107$

Tabla III.- Comparación de los valores del factor C calculados para un cultivo de cereal sobre el terreno y el derivado a través de imágenes NOAA para el mismo tipo, en la zona de Pedroches.

Nivel de Pérdidas Tm/ha/año	Porcentaje de superficie regional afectada		
	Landsat 1991 Resolución 75 m	Landsat 1991 Resolución 1.100 m	NOAA 1991 Resolución 1.100 m
< 1	24,7	9,5	10,3
1 - 4	10,5	8,6	8,8
4 - 8	8,2	7,4	7,9
8 - 12	5,7	5,9	6,2
12 - 20	8,1	9,9	9,8
20 - 50	15,7	22,0	20,0
50 - 75	6,4	9,8	8,6
75 - 100	4,0	6,1	5,6
100 - 200	7,6	10,9	10,8
> 200	8,9	9,8	12,0
Pérdidas Totales Tm/año	3.924.185	5.064.644	5.260.570
Pérdidas Medias Tm/ha	45,0	58,0	60,0

Tabla IV.- Comparación de niveles de pérdidas de suelo para un año tipo (1991) utilizando diferentes resoluciones y sensores.

