

LA INVESTIGACIÓN DE SUELOS EROSIONADOS: MÉTODOS E ÍNDICES DE DIAGNÓSTICO

Investigation in eroded soils: methods and diagnosis indexes

Marina Beatriz VEGA-CARREÑO¹, José Manuel FEBLES-GONZÁLEZ²

(1) ISPJAE, Ciudad Habana. Email: marina_vega1311@yahoo.com (2) Universidad Agraria de La Habana

RESUMEN- La revisión de la literatura especializada sobre los métodos e índices de diagnóstico que se utilizan para evaluar la erosión de los suelos evidenció la amplia variedad de métodos que existen, por lo cual los investigadores teniendo en cuenta sus objetivos de trabajo y la disponibilidad de datos pueden seleccionar entre todos, los más apropiados. Se reconocen métodos basados en: la cartografía de formas de erosión, evaluación y cartografía temática de factores que influyen en la erosión, observaciones directas de campo, isótopos radioactivos y la modelación, destacándose la importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) en el desarrollo de algunos de ellos. Los métodos presentados se clasifican en cualitativos y cuantitativos por el tipo de resultado que ofrecen, agrupándose de esta forma para su descripción en este trabajo. Se revisaron además los métodos e índices de diagnóstico que han sido utilizados en Cuba durante las últimas décadas.

Palabras clave: Cuba, cartografía temática, erosión, métodos evaluación, modelos de erosión.

ABSTRACT- A wide and detailed review of specialized papers about methods and diagnose index used to soil erosion assessment was done. It was evident the variety of existent methods that allow researchers to select between all of them, those that better satisfy their aims and data availability. Methods based on erosion landform mapping, evaluation and thematic mapping of factors that influence on erosion, field observations, radioactive isotopes, and modeling are described, being remarkable the importance of Geographic Information Systems (GISs) for developing some of them. The exposed methods are classified in qualitative and quantitative taking into consideration the result type they offer. The methods and diagnose index used to soil erosion assessment in Cuba during the last decades was reviewed.

Key words: Cuba, thematic mapping, erosion, assessment methods, erosion models.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso vital y en gran parte no renovable, que está sometido a una presión en aumento (CENU, 2000). Cada vez se sabe más acerca de los problemas que atañen al suelo gracias a los estudios de prospección y los sistemas de vigilancia a través de las redes de datos (PNUMA, 2000). Uno de

estos problemas, quizás el más grave, lo constituye la erosión acelerada provocada por la actividad humana, como consecuencia del pobre o incorrecto uso de la tierra, ocasionando la degradación de extensos territorios.

Para predecir la degradación de los suelos por erosión hídrica se han utilizado ampliamente diferentes métodos que permiten identificar pérdidas actuales y potenciales no tolerables, sobre la base de las cuales se seleccionan las mejores prácticas de control de la erosión (Del Val, 1987). Las investigaciones en esta dirección se iniciaron a principios del siglo pasado y desde entonces se han desarrollado una amplia variedad de metodologías.

En este trabajo se presenta una síntesis formalizada de los diferentes enfoques de los métodos empleados para evaluar la erosión, los datos que requieren y el tipo de resultado que brindan, con el objetivo de ponerlas a disposición de los especialistas dedicados a esta temática de investigación teniendo en cuenta que hasta el presente, en Cuba está muy limitado el empleo de algunas de las metodologías, que tienen amplio uso a nivel mundial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para ejecutar la investigación se llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica sobre los métodos e índices de diagnóstico para evaluar la erosión. En este sentido las principales fuentes de información lo constituyeron las revistas dedicadas a las investigaciones en Ciencias del Suelo, Hidrología, Geomorfología, Procesos Exógenos y Evolución de Paisajes, entre las que pueden citarse Journal of Hydrology, Hydrological Science Bulletin, Earth Surface Processes and Landforms, Journal of Soil and Water Conservation, Hydrological Processes, Catena, Geomorphology, Edafología. Otros materiales fueron obtenidos de los sitios en Internet de Universidades y Centros de Investigación que investigan los procesos de degradación de los suelos, en particular, la erosión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las investigaciones iniciales fueron de tipo cualitativo, no obstante se propusieron varios índices para evaluar la susceptibilidad a la erosión por parte de los suelos (Bennett, 1926; Middleton, 1930; Baver, 1933; Bouyoucos, 1935; Henin et al., 1958). Además de estos índices, Zingg (1940) y Musgrave (1947) desarrollaron las primeras ecuaciones empíricas con el objetivo de predecir la erosión a las que sucedieron las de Smith y Whitt (1948), y Hudson (1961). Desde entonces hasta el presente se han desarrollado una amplia variedad de metodologías para el estudio de la erosión. Algunas están basados en observaciones directas de campo, otras en la evaluación de factores que influyen en la erosión, o

combinación de ellos; y otras fundamentalmente en la modelación (Gobin et al., 2003). Para su descripción han sido agrupados en cualitativos y cuantitativos de acuerdo con el tipo de resultado que ellos brindan.

Métodos cualitativos

Estos métodos evalúan el riesgo de erosión mediante la utilización de una cartografía temática de los factores que la controlan, o mediante el estudio de las formas erosivas.

Cartografía temática de factores

Consiste en la elaboración de mapas, cada uno de los cuales representa el comportamiento espacial, de un factor determinado. La síntesis de los mismos nos ofrece las características de los procesos erosivos presentes (Del Val, 1987; Aguilo, 1992; Porta et al., 1999). Han sido propuestas diferentes metodologías para la elaboración de mapas de riesgo de erosión (ITC, 1979; ICONA, 1982; Albaladejo et al., 1988; CORINE, 1992; RIVM, 1992; PAP/RAC, 1997; Rafaelli, 2003) entre otras, cada una de las cuales se basa en una combinación propia de los factores (Figs. 1-5).

Estudio de las formas erosivas

El objetivo es evaluar la presencia y grado de intensidad de las distintas formas de erosión. Se basa en la cartografía directa de las formas, que una vez identificadas se analizan y representan en un mapa, con apoyo de la teledetección, teniendo en cuenta la escala de trabajo y del objetivo del mismo (CEOTMA, 1984; Del Val, 1987; Aguilo, 1992; De Pedraza, 1996).

Métodos cuantitativos

Los métodos cuantitativos pueden estimar las pérdidas de suelo por erosión mediante evaluaciones directas o indirectas. Las tasas de erosión pueden ser medidas con precisión en experimentos a pequeña escala; para escalas grandes sólo pueden hacerse estimaciones (Lima et al., 2002).

Evaluaciones directas

Este tipo de evaluación se realiza por cualquiera de los siguientes métodos: analizando el rebajado de la superficie topográfica, ubicando clavos o varillas verticales en el suelo; realizando sucesivos levantamientos microtopográficos en laderas; evaluando el volumen de surcos y cárcavas; por análisis de la carga sólida y en disolución arrastrada por el agua, ya sea a nivel de ladera o de cuencas fluviales;

ensayos en parcelas experimentales; mediante simuladores de lluvia; o efectuando mediciones de parámetros asociados a los sedimentos o al suelo como es el caso de los isótopos radioactivos (Del Val, 1987; De Pedraza, 1996; Porta et al., 1999; Jordán, 2000).

El empleo de costosas parcelas de erosión se ha generalizado. Sin embargo, la utilidad de la información obtenida, y de las investigaciones realizadas en ellas está limitada por la falta de continuidad en el tiempo, para la obtención de dicha información. El uso de simuladores de lluvia, aunque tienen la ventaja de poder realizar mediciones con una lluvia, cuyos parámetros son conocidos, cuando se emplean en parcelas extensas encarece el trabajo y los resultados no siempre son extrapolables a las condiciones de campo (Jordán, 2000).

La distribución de los isótopos radiactivos ofrece información valiosa acerca de los procesos de erosión de los suelos y la sedimentación (Zapata y García-Agudo, 2000). El ^{137}Cs , isótopo del Cesio es el más usado; el mismo procede de su deposición en la superficie de la tierra, como consecuencia de los ensayos atómicos desarrollados en las décadas de los años 50 y 60 (Bernard y Laverdière, 2000). La base de este método fue desarrollado en E.U. por Ritchie et al. (1974) y posteriormente Ritchie y Mc Henry (1995), Walling y Quine (1995) han contribuido a su documentación. La estimación de la pérdida o ganancia de ^{137}Cs se obtiene comparando el nivel de base del elemento con respecto de los niveles de concentración en el momento del muestreo. La tasa de erosión se calcula asumiendo que la pérdida de suelo es directamente proporcional a la cantidad de ^{137}Cs perdido, habiéndose desarrollado diferentes relaciones empíricas y modelos teóricos, para convertir las mediciones de ^{137}Cs , a estimados cuantitativos de erosión y sedimentación (Walling y Quine, 1990; Walling y He, 1997).

Evaluaciones indirectas

Este tipo de evaluación se basa en el uso de modelos matemáticos desarrollados sobre bases estadísticas, empíricas o de leyes físicas. La utilización de gran número de variables importantes, relacionadas con los procesos de degradación y sus interacciones, para determinar probabilidades y riesgos de erosión de suelos y su influencia en la producción de cultivos y daños ambientales, puede facilitarse con su integración en modelos (Pla, 1994). Aunque los modelos no den una simulación exacta de las situaciones reales, permiten obtener resultados aproximados de acuerdo con las simplificaciones asumidas. Ellos ayudan a entender situaciones complejas, mediante una descripción cuantitativa de los procesos más significativos, y por ello pueden usarse como herramientas para la toma de decisiones, que contribuyan a reducir o eliminar riesgos de degradación de suelos y aguas.

Cuando los modelos se integran con Sistemas de Información Geográfica (SIGs), la modelación y el monitoreo pueden proveer la base para la planificación del uso y manejo sostenible de las tierras.

El enfoque inicial de la modelación cuantitativa fue la investigación experimental y teórica tradicional; posteriormente este tipo de técnica comenzó a desarrollarse utilizando las computadoras. Aparecieron así otros modelos más complejos por su fundamento, la cantidad de datos de entrada, y el tipo de área natural a estudiar.

Atendiendo a la forma Almorox et al. (1994), y Morgan (1997), clasifican los modelos de erosión en tres categorías: modelos físicos, construidos en laboratorio a escala reducida con los que se intenta reproducir la situación dinámica del mundo real; modelos analógicos, que simulan el proceso erosivo mediante sistemas mecánicos o eléctricos análogos a los investigados; y modelos digitales, entre los que se encuentran una amplia variedad; pero todos requieren de computadoras para procesar la información vinculada al proceso erosivo. No obstante, la forma más común de categorizar los modelos digitales de erosión es de acuerdo con el enfoque que hacen del proceso erosivo (De Roo et al., 1989; Jones et al., 1992; Almorox et al., 1994; Favis-Mortlock et al., 1996; Mitasova, y Mitas, 1998). Según este criterio se consideran dos tipos de modelos: empíricos y basados en procesos.

Los modelos empíricos están basados en análisis estadísticos del comportamiento de factores importantes en el proceso de erosión de los suelos, a partir de lo cual se obtienen las relaciones empíricas, que lo caracterizan, produciendo solamente salidas probables y aproximadas. En los modelos basados en procesos, la física del proceso erosivo real está altamente simplificada y conceptualizada (Bogaart, 2003) por lo cual se utilizan relaciones físico – matemáticas para describirlo, las cuales deben, en principio, dar resultados más exactos (Hammond y Mc Cullagh, 1980); se caracterizan por necesitar muchos datos de entrada.

También es frecuente que se tome en cuenta la distribución espacial de los datos. De acuerdo con eso, los modelos se clasifican en masivos (*lumped*) o distribuidos (De Roo et al., 1989; Aguilo, 1992; Mitasova y Mitas, 1998; Garen et al., 1999). Los modelos masivos describen una respuesta promedio del área (Beasley, 1986) por lo que debido a la variabilidad espacial de los factores que intervienen en el proceso de erosión, estos modelos apenas hacen una descripción de la situación física, sin embargo, poseen simplicidad computacional. Por el contrario, un modelo de parámetros distribuidos, trata de aumentar la precisión de la simulación, utilizando información concerniente a todos los procesos espacialmente variables y no uniformes incorporados dentro del modelo. Estos modelos tienen la habilidad de simular las condiciones en todos los puntos del interior del área simultáneamente y de predecir el patrón espacial de las condiciones hidrológicas (Beven, 1985). La

ventaja de este enfoque es su potencialidad para caracterizar con precisión la influencia de los cambios espaciales, aunque tienen la desventaja de la gran demanda computacional y de datos (Purdue University, 2005).

El área en la cual se puede aplicar el modelo permite categorizarlos en modelos a escala de parcela, o a escala de cuenca (Jones et al., 1992; Favis-Mortlock, 1996; Jetten et al., 1999). El tiempo de duración del evento de lluvia, que se va a considerar en la modelación es otro elemento a tener en cuenta, al clasificar los modelos. Se habla de modelos basados en eventos o de simulación continua (Jones et al., 1992; Jetten et al., 1999).

En la práctica, un modelo puede ser clasificado atendiendo a varios de los anteriores enfoques. No obstante algunos criterios de clasificación tienen más aplicación que otros, dependiendo de la cantidad de información disponible y el nivel de detalle deseado. La tendencia desde las últimas décadas del pasado siglo ha sido la creación y empleo de modelos con bases físicas.

Wischmeier y Smith, (1978) propusieron la USLE (Universal Soil Loss Equation), que ha sido el modelo de erosión empírico, más ampliamente aceptado y utilizado para evaluar las pérdidas de suelo, a lo largo de más de 30 años. A pesar de su uso difundido y la amplitud de experiencias que ha incorporado, la ecuación sufre del defecto conceptual de que los factores del suelo y de la precipitación pluvial (entre otros), no pueden simplemente multiplicarse juntos debido al efecto sustractivo de la capacidad de infiltración del suelo para generar escurrimiento erosivo a partir de una precipitación pluvial determinada (Kirby y Morgan, 1984).

Este modelo, originalmente muy sencillo ha sido objeto de varias revisiones dando lugar a otros modelos derivados. Williams (1975) desarrolló la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE) y Renard et al. (1991), propusieron la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Varios modelos hidrológicos (Tabla 2) han incorporado las citadas ecuaciones empíricas como método para estimar la erosión.

Por otro lado, el criterio de que los modelos diseñados sobre bases físicas estiman mejor la erosión hizo que muchos investigadores e instituciones dedicaran grandes esfuerzos a desarrollarlos (Tabla 3). Estos modelos utilizan ecuaciones matemáticas para modelar el movimiento del agua y las partículas de suelo sobre la superficie, así como la infiltración hacia el subsuelo. En la mayoría de los casos aprovechan las posibilidades de los SIGs como herramienta de análisis espacial para desarrollar la modelación del proceso erosivo.

Principales metodologías de investigación aplicadas en Cuba en las últimas décadas

La utilización de nomenclaturas y técnicas de medición diferentes, han generado problemas de comparación y son frecuentes estimaciones de pérdidas disímiles del estado de erosión de los suelos en el país (Febles et al., 1985).

Durante la década del 70 cobró relativa prioridad el método geográfico-comparativo, tomando como base el Mapa Genético de Suelos de Cuba a escala 1: 250 000 (Instituto de Suelos, 1971) y utilizando en calidad de patrones, perfiles considerados típicos de cada Agrupamiento, para establecer los grados de erosión.

A partir de lo anterior muchos investigadores utilizaron este método y la diferencia en la aplicación del mismo estuvo dada por los índices utilizados en la comparación de los “perfiles patrones”. Lareshin y Golovchenko (1974); DGSF (1981); MINAGRI (1982), Riverol (1985) y Soca (1987), tomaron como índices fundamentales la profundidad relativa de los horizontes genéticos A y B. Hernández y et al., (1980), y Ascanio et al., (1983) investigaron acerca de la erosión de los suelos Pardos con Carbonatos de Cuba, utilizando como índices la potencia de los horizontes A y B, contenido de materia orgánica y lavado de de los horizontes en perfiles patrones; Pérez et al., (1984), empleó igualmente este último enfoque pero en el contexto de una toposecuencia. Shepashenko et al., (1982), Shepashenko et al., (1984), Riverol (1989), Riverol y Shepashenko (1989), emplearon los indicadores de profundidad, composición mecánica, estructura, contenido de humus, composición del complejo adsorbente, etc. para realizar una evaluación cuantitativa que permitiera determinar la resistencia antierosiva de los principales suelos de Cuba, evaluando cada tipo de suelo mediante una escala de 0-100 puntos.

En este contexto de enfoques metodológicos Febles (1988) y Gonou (1997), incorporan el método morfoedafológico para describir e investigar la dinámica del medio biofísico, demostrando que la erodibilidad de los suelos Ferralíticos Rojos y subtipos asociados en las regiones cársicas de la provincia La Habana, no es posible estudiarla mediante los mismos métodos, medios y escalas de representación utilizados en otros geoeosistemas.

Por otra parte, en años recientes comenzó a utilizarse la cartografía temática de factores para valorar la erosión de los suelos aprovechando las bondades de los SIGs. Los factores seleccionados por los diversos autores (Díaz et al., 2001; Cabrera, 2002; Díaz et al. 2005) son diferentes. La evaluación de la erosividad de la lluvia en general se realiza sin tener en cuenta la energía cinética o algunos de los

índices de agresividad climática basados en datos pluviométricos que están reportados en la literatura mundial especializada (Fournier, 1960; Arnoldus, 1978; Oliver, 1980).

La utilización de isótopos radioactivos ha sido otra de las metodologías aplicadas en el país, aunque de forma limitada. Gil et al. (2003) exponen la experiencia de la estimación de tasas de erosión en suelos agrícolas, empleando el ^{137}Cs en el occidente del país.

Respecto al empleo de los modelos de erosión fue Planas (1985) el pionero en la aplicación de este método, realizando el análisis de la aplicabilidad de la USLE en Cuba. En su trabajo se expone una metodología para el cálculo del factor R de la ecuación (erosividad de la lluvia) a partir de datos colectados en pluviógrafos del país que le sirvieron de base para construir un mapa de isoerosivas a escala 1:250 000 para toda Cuba. Muchos años después Vallejo (2000) y Reyes (2004) retoman el modelo USLE implementando el mismo en aplicaciones SIG.

Recientemente Garea (2003) propone un procedimiento metodológico para el diseño, implementación y explotación de un SIG para suelos en regiones de laderas cubanas, tendente a aumentar la eficiencia en el proceso de toma de decisiones en el uso y conservación de los suelos en estos ambientes, mientras que Ponce (2003), valida una metodología para determinar las reservas de carbono orgánico (RCOS), como indicador de la calidad y estado de conservación de los suelos minerales de Cuba, también con el empleo de tecnologías de información geográfica.

CONCLUSIONES

La revisión realizada resume la diversidad de métodos desarrollados internacionalmente para evaluar la erosión de los suelos. Cada uno de ellos revela un enfoque particular y en general, su selección está condicionada por los objetivos específicos de la investigación y la disponibilidad de los datos. En este contexto, se destaca el auge de los reportes de aplicaciones en las que se emplean los métodos de cartografía temática de los factores, y los modelos de erosión basados en procesos utilizando parámetros distribuidos, para evaluar la erosión de los suelos. A ello ha contribuido el desarrollo de los SIGs y las facilidades que brindan estos sistemas, como herramienta de análisis espacial y modelación. El modelo USLE mantiene su vigencia aun cuando son muchos los especialistas que alertan acerca de su empleo en cualquier región del planeta, sin tener en cuenta que fue desarrollado para condiciones climáticas y edafológicas propias de Estados Unidos donde se realizaron las investigaciones que sirvieron de base para su propuesta.

En Cuba el método geográfico - comparativo, ha sido el más empleado en los estudios de erosión utilizando en calidad de patrones, perfiles típicos de cada agrupamiento. Sólo en años recientes se han

incorporado a las investigaciones los modelos de erosión, fundamentalmente la USLE y la cartografía temática de factores. La evaluación de la erosividad de la lluvia en general se realiza sin considerar la energía cinética o algunos de los índices de agresividad climática ampliamente reconocidos en la literatura mundial especializada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, y J. Rasmussen, 1986: "An introduction to the European Hydrological System, Système Hydrologique Européen, "SHE", 1. History and philosophy of a physically-based distributed modelling system". *Journal of Hydrology*, Netherlands, 87:45-59.
- Aguilo, M., M. P. Aramburu, A. Blanco, T. Calatayud, R. M. Carrasco, et al., 2004: *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología. Serie Monografías*. Centro de Publicaciones, Secretaría general Técnica, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 809 pp.
- Albadalejo, J. R. Ortiz Silla, y M. Martínez MENA, 1988: "Evaluation and mapping of erosion risks. An example for SE Spain". *Soil Technology*, 1:77 – 87.
- Almorox, J., R. De Antonio, R. Sao, M. C. Díaz, y R. Montes, 1994: *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, Madrid, 175 pp.
- Arnold, J.G., J. R. Williams, R. H. Griggs, y N. B. Sammons, 1990: SWRRB. A basin scale simulation model for soil and water resources management. URL: http://www.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/swrrbwq.html (2003).
- Arnold, J.G., P. M. Allen, G. Bernhardt, 1993: "A comprehensive surface-groundwater flow model". *Journal of Hydrology*, Netherlands, 142:47-69.
- Ascanio, O., M. Riverol, y J. M. Pérez, 1983: Antecedentes históricos de la erosión como fenómeno de empobrecimiento de los suelos cubanos. Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, (Reporte de Investigación No. 8), 13 pp.
- Baver, L. D., 1933: "Some factors affecting erosion". *Agricultural Engineering*, United Kingdom, 14:51-52.
- Beasley, D. B., L.F., Huggins, y E. J. Monke, 1980: ANSWERS. "A model for watershed planning". *Trans. of the ASAE*, USA, 234:938-944.
- Beasley, D. R., 1986: "Distributed parameter hydrologic and water quality modelling". En: Giorgini, A., y Zingales, F. Eds. ; *Agricultural Nonpoint Source Pollution. Model selection and application. Developments in Environmental Modelling* 10, Elsevier Science Publishing Company Inc. Amsterdam, pp. 84 -97.
- Bennett, H. H., 1926: "Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate american soils". *Soil Science*, USA, 21:349-375.
- Bernard, C., y M.R. Laverdière, 2000: "Using 137Cs as a tool for the assessment and the management of erosion/sedimentation risks in view of the restoration of the Rainbow Smelt (*Osmerus mordax*) fish population in the Boyer River basin (Québec, Canada)". *Acta Geológica Hispánica*, Barcelona, 35(3-4): 321-327.
- Beven, K., 1985: "Distributed models". En: M. G. Anderson, y T. P. Burt Eds.: *Hydrological forecasting*, John Wiley & Sons Ltd., pp. 100-125
- Beven, K. J., y M. J., Kirkby, 1979: "A physically based variable contributing area model of basin hydrology". *Hydrol. Sci. Bull.*, United Kingdom, 241: 43-69.

- Bogaart, P., 2003: Process-based modelling of fluvial response to rapid climate change with reference to the River Maas during the Last Glacial-Interglacial Transition. Vrije Universiteit, Amsterdam, Netherlands. (PhD thesis), 208 pp. URL: <http://www.dow.wau.nl/whh/hydro/patrick.bogaart/thesis/pwbthesis.pdf> (2004)
- Bouyoucos, G. J., 1935: "The clay ratio as a criterion of susceptibility to erosion". *Journal of the American Society Agron.*, USA, 27:738-741.
- Cabrera, J., 2002: Introducción al catastro ingeniero geológico y geoambiental de la provincia de Pinar del Río aplicando tecnología SIG. Universidad de Pinar del Río, (Tesis doctoral), 120 pp.
- CENU, 2000: Estado de los bosques en Europa. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa y Comisión Europea (Executive Report)
- CEOTMA, 1984: *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Segunda Edición Serie Manuales 3, Madrid, 572 pp.
- CORINE, 1992: Soil erosion risk and important land resources. An assesment to evaluate and map the distribution of land quality and soil erosion risk. Office of the European Communities. EUR 13233. Luxemburgo, 124 pp. URL: http://reports.eea.eu.int/COR0-soil/en/tab_content_RLR (2004)
- De Jong, S.M., M.L. Paracchini, F. Bertolo, S. Folving, J. Megier, et al., 1999: "Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data". *Catena*, Amsterdam, 37:291-308.
- De Pedraza, J., 1996: *Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda, 413 pp.
- De Roo, A. P., L. Hazelhoff y P. Burrough, 1989: "Soil erosion modelling using ANSWERS and Geographical Information Systems". *Earth Surface Processes and Landforms*, Netherlands, 14:517-532.
- De Roo, A. P., C. G. Wesseling, y C. J., Ritsema, 1996: "LISEM. a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I. Theory, input and output". *Hydrological Processes*, Netherlands, 108:1107-1117.
- Del Val, J., 1987: "Factores que controlan los procesos de erosión sedimentación". *Riesgos Geológicos*. Serie Geológica Ambiental. ITGE, Madrid, pp.20-33.
- DGSF, 1981: Instructivo técnico para la confección del mapa de grados de erosión 1:25 000 de las provincias. Dirección General de Suelos y Fertilizantes, Ministerio de la Agricultura, La Habana, (Informe Interno), 30 pp.
- Díaz J. L., R. Carral, R. Rivada, N. Ponce, A. Castellanos, et al., 2001: Resultados vinculados con la erosión hídrica en los estudios geólogos ambientales de los territorios y las cuencas hidrográficas. En: IV Congreso de Geología y Minería, La Habana, Memorias, (CD ROM)
- Díaz, J. L., A. Castellanos, N. Ponce, R. Carral, y R. Rivada, 2005: Análisis de la susceptibilidad a la erosión para el reordenamiento ambiental de la cuenca hidrográfica del Río Bacuranao. En: 1ra Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, Memorias, (CD ROM)
- Favis-Mortlock, D., Quinton, J., y W. Dickinson, 1996: "The GCTE validation of soil erosion models for global change studies". *Journal of Soil and Water Conservation*, 515, 397 - 403
- Febles, J. M., et al., 1985: Limitaciones objetivas del "perfil patrón" como índice diagnóstico para evaluar la intensidad de la erosión en Cuba. En: Memorias, 3ra Jornada Científica del Instituto de Suelos. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, pp. 227 - 232.
- Febles, J.M., 1988: La erosión de los suelos en las regiones cársicas de la provincia de La Habana. Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana, (Tesis doctoral), 125 pp.

- Flanagan, D.C., y M.A. Nearing Eds., 1995: USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. Indiana, USA, (Report) URL: <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/docs/abstract.pdf>. (2003).
- Garea, E., 2003: Métodos para el manejo de la información de suelos en las regiones montañosas de Cuba mediante técnicas digitales Instituto Técnico Militar José Martí, La Habana. (Tesis doctoral), 114 pp.
- Garen, D., D. Woodward. F. Geter, 1999: "A User agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modeling". *Catena*, 37:277-289.
- Gil, R., J. L. Peralta, J. Carrazana, J. Gonzáles, M. Riverol, et al., 2003: Aplicación de las determinaciones de ¹³⁷Cs para evaluar niveles de erosión en suelos agrícolas en Cuba. Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, La Habana, Ministerio de Ciencia y Tecnología (Informe), 10 pp.
- Gobin, A., G. Govers, R. Jones, M. Kirkby, C. Kosmas, 2003: Assessment and reporting on soil erosion. Background and workshop report. European Environment Agency. (Technical report 94), URL: http://reports.eea.eu.int/technical_report_2003_94/ (2004).
- Gounou, E., 1997: Aplicación del enfoque morfoedafológico al estudio de la variabilidad de algunos suelos en un geosistema cársico. Instituto Superior de Ciencias Agropecuaria, La Habana, (Tesis doctoral).
- Hammond, R., y P. S. McCullagh, 1980: *Quantitative techniques in geography. An Introduction*. Second Edition, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom. 225 pp.
- Henin, S., G. Mounier, y A. Combeau, 1958: "Methode pour l'etude de stabilite structurale des sols". *Anal. Agron.* Francia, 1:71-90.
- Hernández, A., L. M. Herrera, E. Iznaga, y G. S. Tatevosian, 1980: "La erosión en los suelos Pardos con Carbonatos (Pardos con Carbonatos) de Cuba". *Ciencias de la Agricultura*, (5):39-50.
- Hootsmans, R., A. Bouwman, R. Leemans, y E. Kreileman, 2001: Modelling land degradation in IMAGE 2. National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven. Netherlands, (Report), 33 pp. URL: http://arch.rivm.nl/image/index.html?models/land_degradation.html. (2003)
- Hudson, N. W., 1961: *An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall*. Rhodesia Science Association Proceedings 49, 14-25, New York, 320 pp.
- ICONA, 1982: *Paisajes erosivos en el sureste español. Ensayo de metodología para el estudio de su cualificación y cuantificación*. Monografía 26. ICONA, MAPA. Madrid.
- Instituto de Suelos, 1971: Mapa Genético de Suelos de Cuba a escala 1:250 000. Instituto de Suelos, ACC, La Habana..
- ITC, 1979: *Terrain analysis and classification using aerial photographs. Textbook of Photointerpretation*. Vol VII. Enschede, Holanda, 320 pp.
- Jetten, V., A. de Roo, D. Favis-Mortlock, 1999: "Evaluation of field - scale and catchment - scale soil erosion models". *Catena*, 37(3-4):521-541.
- Jones, C., R. Griggs, J. Williams, y R. Srinivasan, 1992: Predicción de la erosión hídrica del suelo. En: Taller sobre la Utilización de un SIG en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial Santiago de Chile. URL: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S03.htm> (2003).
- Jordán, A., 2000: El medio físico del Campo de Gibraltar. unidades geomorfoedáficas y riesgos de erosión. Universidad de Sevilla, (Tesis doctoral), 472 pp.

- Kirkby, M.J., 1998: Modelling across scales. The MEDALUS family of models. En: Boardman, J., Favis-Mortlock, D. T., Eds., *Modelling soil erosion by water*, Springer, Berlin pp. 161 - 174.
- Kirkby, M.J. y R. P. Morgan, 1984: *Erosión de suelos*. Editorial Limusa, México, 375 pp.
- Knisel, W. G., 1980: CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. URL: http://www.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/creams.html. (2003).
- Krysanova V., D. I. Müller-Wohlfeil, y A. Becker, 1996: Mesoscale Integrated Modelling of Hydrology and Water Quality with GIS Interface. En: Proceedings of the 3rd. International Conference and Workshop on Integrating Geographical Information Systems and Environmental Modeling, California. (CD-ROM).
- Lareshin, V., y I. Golovchenko, 1974: Significado de las medidas de conservación de los suelos. DGSF, INRA, Isla de Pinos, (Informe), 17 pp.
- Leonard, R. A., W. G. Knisel, y D. A. Still, 1987: GLEAMS. Groundwater loading effects on agricultural management systems. <ftp://ftp.nrcs.usda.gov/centers/itc/applications/wqmodels/>
- Lima, S., Q. de Jong, G. Sparovek y D. Flanagan, 2002: "Erosión database interface, a Computer program for georeferenced application of erosion prediction models". *Computers & Geoscience*, USA .28: 661-668.
- Middleton, H. E., 1930: Properties of soil which influence soil erosion. USDA. Washington, (Tech. Bull)178.
- MINAGRI, 1982: Metodología provisional para evaluar la degradación de los suelos. Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios, Ministerio de la Agricultura, (Informe) 26 pp.
- Mitasova, H., L. Mitas, W. M. Brown, y D. Johnston, 1996: Multidimensional soil erosion/deposition modeling. Part III. Process based erosion simulation. University of Illinois, at Urbana – Champaign, URL: <http://web.aces.uiuc.edu/watershed/model.htm>, (2002).
- Mitasova H., y L. Mitas, 1998: Process Modeling and Simulations, NCGIA Core Curriculum in GIScience. URL: <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u130/u130.html> (2002)
- Morgan, R. P. C., 1997: *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones. Mundi-Prensa. Madrid, 354 pp.
- Morgan, R. P. C., 2001: "A simple approach to soil loss prediction. a revised Morgan–Morgan–Finney model". *Catena*, Netherlands, 44:305 – 322.
- Morgan, R.P.C., J. N. Quinton, R. J. Rickson, 1993: EUROSEM user guide version 3.1. Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, UK, URL: <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/eurosem/eurosem.htm>, (2002).
- Musgrave, G. W., 1947: "The quantitative evaluation of factors in water erosion - a first approximation". *Journal of Soil and Water Conservation*, USA, 2:133-138.
- PAP/RAC 1997: Guidelines for Mapping and Measurement of Rainfall-Induced Erosion Processes in the Mediterranean Coastal Areas. PAP-8/PP/GL.1. Split, Priority Actions Programme Regional Activity Centre MAP/UNEP, with the cooperation of FAO. pp xii+70. (Informe), URL: <http://www.fao.org/landandwater/agll/photolib/docs/soilerosioneng.pdf>, (2004).
- Pérez, J. M., J. Durán, O. Portuondo, y B. Lemus, 1984: Utilización de las toposecuencias para el diagnóstico de los suelos erosionados., Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, (Reporte de Investigación. No.11), 16 pp.
- Pla, I., 1994: Soil degradation and climate-induced risks of crop production in the tropics. En: 15th ISSS Congress. Acapulco, México, (CD-ROM).
- Planas, G., 1986: *Pérdidas por erosión hídrica de los suelos de Cuba*. Instituto de Hidroeconomía, La Habana, 60 pp.

- PNUMA, 2000: Guidelines for erosion and desertification control management. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (Informe). 90 pp.
- Ponce, D., 2003: Las reservas de carbono orgánico de los suelos minerales de Cuba. Aporte metodológico al cálculo y generalización espacial. Universidad Agraria de La Habana, (Tesis doctoral) 125 pp.
- Porta, J., M. López-Acevedo, y C. Reguero, 1999: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 849 pp.
- Purdue University, 1998: AGEN 526 glossary: model. URL: <http://pasture.ecn.purdue.edu/~engelb/agen526/glossary.html?model> (2000).
- Rafaelli, S. G., 2003: Paisaje erosivo en cuencas de montaña. Modelación con extrapolación espacial ascendente. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, (Tesis doctoral) URL: <http://www.corebe.org.ar/OTROS%20PROYECTOS/web%20iruya.htm>, 196 pp. (2005)
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, y J.P. Porter, 1991: "Revised Universal Soil Loss Equation". *J. of Soil and Water Conservation*, USA, 46: 30-33.
- Reyes, G., 2004: Diseño de una aplicación para el cálculo de la Ecuación de Universal de Pérdida de Suelos (USLE). En: IV Congreso Internacional de Geomática, La Habana, [CD ROM] ISBN 959-237-117-2
- Ritchie, J. C., J. A. Spraberry, y J. R. McHenry, 1974: Estimating soil erosion from the redistribution of fallout ¹³⁷ Cs. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, USA, 38: 137-139.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R., 1995: ¹³⁷Cs use in erosion and sediment deposition studies. promises and problems. En: Use of nuclear techniques in studying soil erosion and siltation. International Atomic Energy Agency. (IAEA-TECDOC-828), pp.111-201.
- Riverol, M., 1985: La erosión potencial de los suelos de Cuba y los métodos para su mapificación. " Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana,(Tesis doctoraql), 130 pp.
- Riverol, M., 1989: Mapa de erosión actual a escala 1:2 000 000 En: Nuevo Atlas Nacional de Cuba Instituto de Geografía de la ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.
- Riverol, M., y G. Shepashenko, 1989: Mapa de erosión potencial a escala 1:2 000 000 En: Nuevo Atlas Nacional de Cuba Instituto de Geografía de la ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía
- RIVM, 1992: Image Model. National Institute of Public Health and the Environment URL: http://arch.rivm.nl/image/index.html?models/land_degradation.html, (2003).
- Rose, C. W., K. J. Coughland, y B. Fentie, 1998: Griffith University Erosion System Template GUEST Modelling soil erosion by water. En: J. Boardman y D. Favis-Mortlock Eds. *NATO ASI Series Global Environmental Change*, Vol. 55.
- Schmidt, J., 1991: "A mathematical model to simulate rainfall erosion. In. Bork, H.-R., De Ploey, J., Schick, A.P. Eds., Erosion, Transport and Deposition Processes—Theories and Models". *Catena*, Supplement 19:101–109.
- Shepashenko, G.; M. Riverol, A., Hernández, 1982: "Resistencia antierosiva de los principales suelos agrícolas de Cuba". *Cien. Agric.*, Academia de Ciencia de Cuba, (16):105-118.
- Shepashenko, G., M., Riverol, N., Calzada, 1984: La erosión hídrica y los métodos de combatirla en los países en vías de desarrollo con clima tropical y subtropical y subtropical. Instituto de Suelos, Academia de Ciencias de Cuba, (Reporte de Investigación. No.10)40 pp.
- Smith, D. D., y Whitt, D. M., 1948: "Evaluating soil losses from field areas". *Agric. Eng.* 29:394-396.

- Soca, M. T., 1987: Diagnóstico y características de los principales suelos erosionados de las regiones agrícolas de Cuba. Instituto de Suelos, MINAGRI, La Habana, (Tesis doctoral), 110 pp..
- Tucker, G., N. Gasparini, S. Lancaster y R. Bras, 1997: An Integrated hillslope and channel evolution model as an investigation and prediction tool. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, (Annual Report), <http://platte.mit.edu/~child/overview.pdf>, 60 pp (2002).
- U. S. Environmental Protection Agency, 2001: Better Assessment Science Integrating Point and Non Point Sources BASINS. Version 3.0. User's Manual. EPA's Office of Water. URL: <http://www.epa.gov/waterscience/basins/bsnsdocs.html>, (2004).
- Vallejo, O., y A. Martínez, 2000: "Metodología para la cartografía digital de la erosión hídrica del suelo en un sector del municipio de Moa". *Minería y Geología*, XVI(3-4):11-17.
- Walling, D.E., Quine, T.A., 1990: "Calibration of Caesium 137 measurement to provide quantitative erosion rate data". *Land Degrad. Rehabil.*, United Kingdom, 2:161-175.
- Walling, D.E., Quine, T.A., 1995: Use of radionuclide measurements in soil erosion investigations. In: Nuclear Techniques in Soil-Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation. International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna, Austria (Informe) pp. 597-620..
- Walling, D.E., Q. He, 1997: Models for converting ¹³⁷Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils. University of Exeter, U. K., (Report) 30 pp.
- Werner, M.v., 1995: A computer - based model for the simulation of soil erosion by water. URL: <http://www.geognostics.de>, (2003).
- Williams, I.R., 1975: Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (Report S-40), pp. 244-252.
- Williams, J.R., P.T. Dyke, y C.A. Jones, 1983: EPIC. a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. In W.K. Laurenroth et al., Eds., *Analysis of Ecological Systems. State-of-the-Art in Ecological Modeling*. Elsevier, Amsterdam, pp. 553-572.
- Wischmeier, W. H., y Smith, D. D., 1978: *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agriculture. Handbook No. 537*, United State Department of Agriculture, Washington. 58 pp.
- Woolhiser, D.A., R.E. Smith, y D.C. Goodrich, 1990: *KINEROS, A kinematic runoff and erosion model. documentation and user manual*. USDA-Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.
- Young R.A., C.A. Onstad, D.D. Bosch, W.P. Anderson, 1989: "AGNPS. A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds". *Jour. of Soil and Water Conservation*. USA, 44(2)
- Zapata F., y E. García-Agudo, 2000: "Future prospects for the ¹³⁷Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates". *Acta Geologica Hispanica*, Barcelona, 35(3-4):197-205
- Zingg, A. W., 1940: "Degree and length of land slope as it affect soil loss in runoff" *Agricultural Engineering*, United Kingdom, 21:59-64.

FIGURAS Y TABLAS

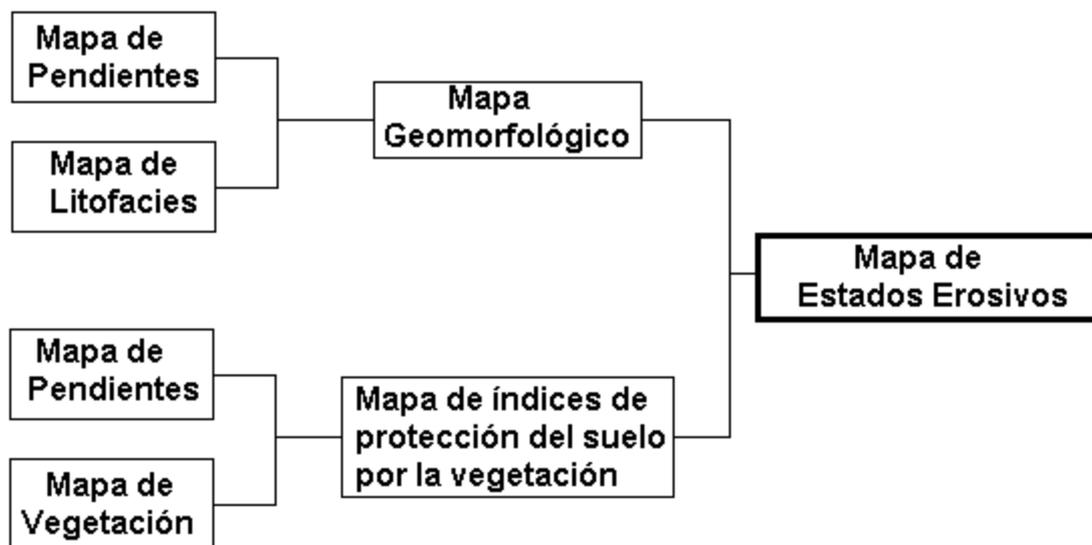


FIGURA 1. Metodología de ICONA (1982)

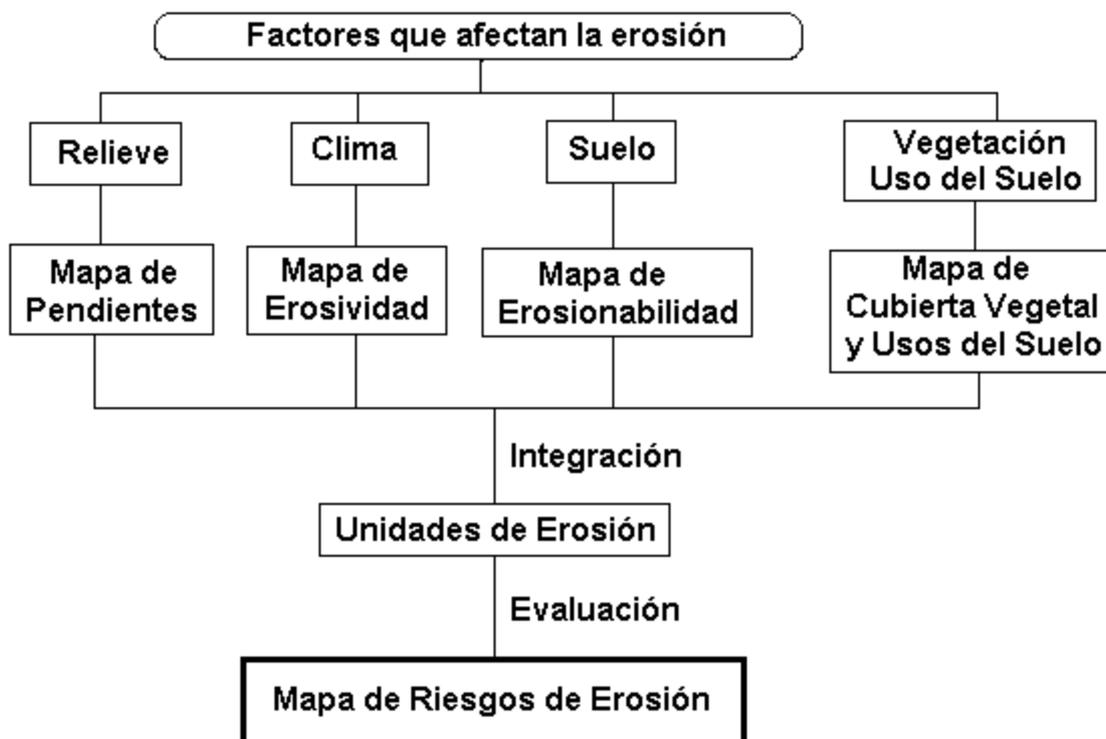


FIGURA 2. Metodología de Albaladejo et al. (1988)

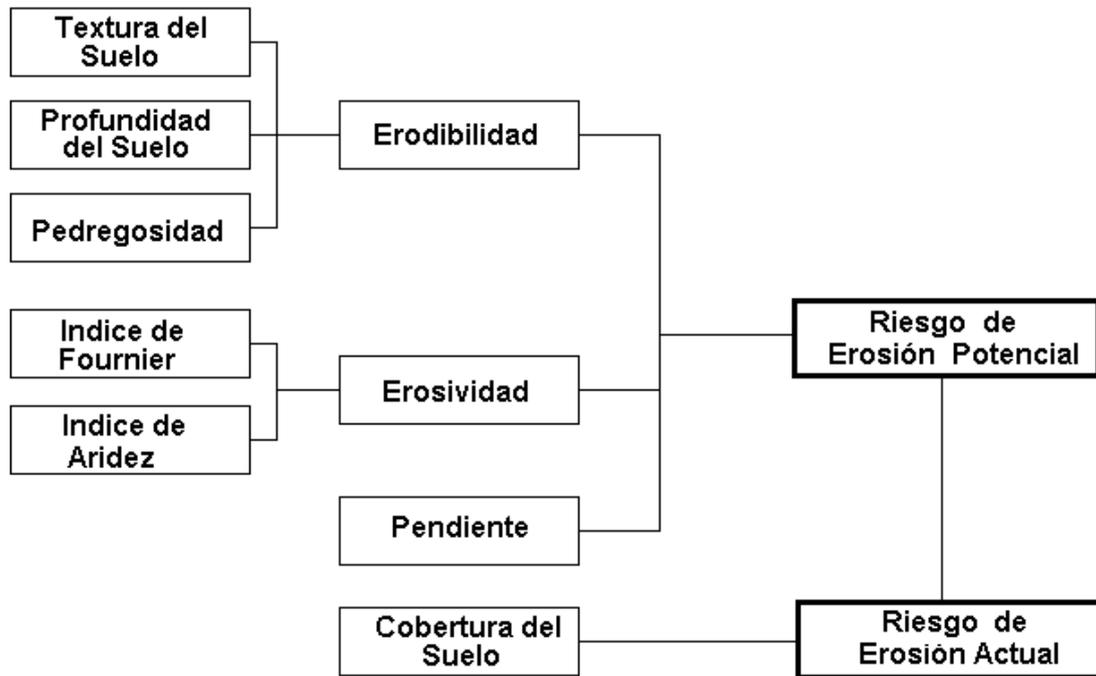


FIGURA 3. Metodología de CORINE (1992)

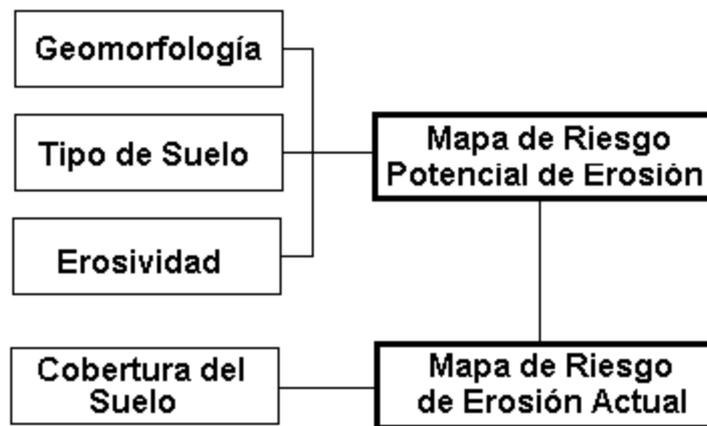


FIGURA 4. Metodología de RIVM (1992)

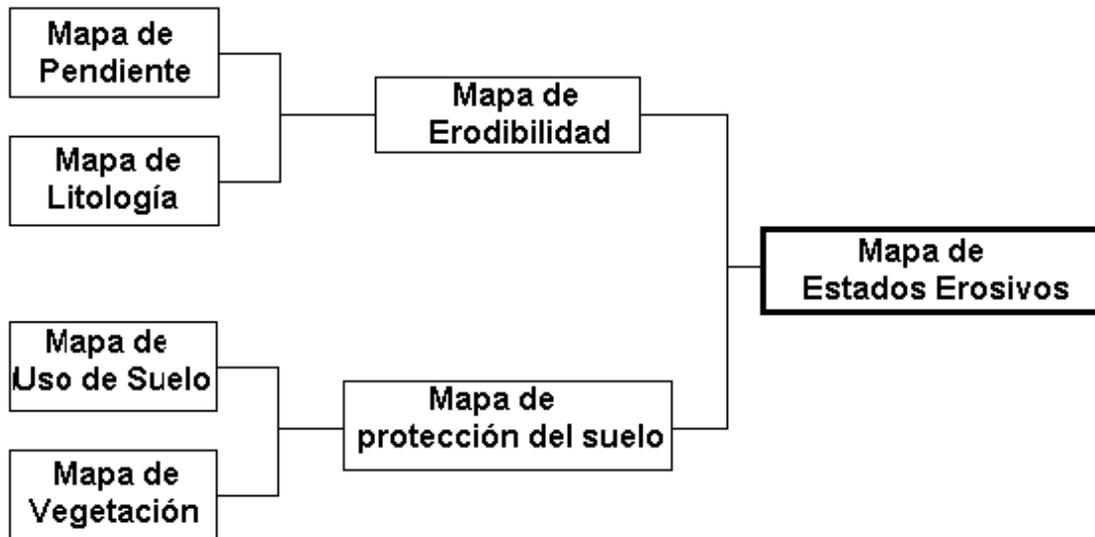


FIGURA 5. Metodología de PAP/RAC (1997)

TABLA 1 MODELOS HIDROLÓGICOS Y DE EVOLUCIÓN DE PAISAJES QUE EVALUAN LA EROSIÓN CON ECUACIONES EMPÍRICAS

Acrónimo	Nombre Modelo	Autor	Evalúa la erosión
CHILD	Channel Hillslope Integrated Landscape Development	Tucker et al.,(1997)	USLE
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems	Knisel, 1980	USLE
LDM	Land Degradation Model	Hootsmans et al., (2001)	USLE
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	Arnold et al., (1993)	USLE
EPIC	Erosion/Productivity Impact Calculator	Williams et al., (1983)	RUSLE MUSLE
AGNPS	Agricultural Non Point Source pollution model	Young, et al., (1989)	RUSLE
SWIM	Soil and Water Integrated Model	Krysanova et al., (1996)	MUSLE
SWRRBWQ	Simulator for Water Resources in Rural Basins-Water Quality	Arnold et al., (1990)	MUSLE

TABLA 2 MODELOS DE EROSIÓN DESARROLLADOS A PARTIR DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO.

Acrónimo	Nombre Modelo	Autor
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation	Beasley et al., (1980)
BASINS	Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources	U. S. Environmental Protection Agency, (2001)
EROSION 2D	EROSION 2D	Schmidt (1991)
EROSION 3D	EROSION 3D	Werner (1995)
EUROSEM	European soil erosion model	Morgan et al., (1993)
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	Leonard et al., (1987)
GUEST	Griffith University Erosion System Template	Rose et al., (1998)
KINEROS2	Kinematic runoff and erosion model	Woolhiser et al., (1990) ;
LISEM	Limburg soil erosion model	De Roo et al.,(1996)
MMF	Morgan Morgan Finney Model	Morgan (2001)
MEDALUS	Family of models: MEDALUS, MEDRUSH y CSEP	Kirkby (1998)
SEMMED	Soil Erosion Model for Mediterranean Areas	De Jong,et al., (1999)
SIMWE	SIMulation of Water Erosion	Mitasova et al., (1996)
SHE	Système Hydrologique Européen	Abbott et al., (1986)
TOPMODEL	TOPMODEL	Beven y Kirkby, (1979)
WEPP	Water Erosion Prediction Project	Flanagan y Nearing, 1994