



APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR Y REDUCCIÓN DE LA EROSIÓN EÓLICA EN TIERRAS ÁRIDAS NO PROTEGIDAS

APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL TO PREDICT AND REDUCE WIND EROSION IN NON-PROTECTED ARID LANDS

N. I. Eltaif¹; M. A. Gharaibeh

Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Facultad de Agricultura, Universidad de Jordania de Ciencia y Tecnología, Apartado Postal: 3030, 22110. Irbid, Jordania. Correo-e: nieltaif@just.edu.jo (¹Autor para correspondencia).

RESUMEN

La erosión eólica es uno de los problemas más graves de la degradación del suelo en zonas áridas y semiáridas del mundo. El cálculo de la erosión potencial para el área de estudio, es en un promedio de $70.2 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. En un intento por reducir la erosión eólica se utilizó un modelo matemático. Los resultados mostraron que al utilizar longitudes pequeñas subsiguientes predeterminadas, se reduciría en gran medida la erosión eólica, pero no lo suficiente. La erosión eólica tiende a disminuir con la reducción de la distancia del campo; sin embargo, el nivel aceptable de pérdida de suelo no se obtuvo aplicando una longitud pequeña del campo de 50 metros y un valor de cresta de 0.5. El modelo utilizado permite extraer algunas conclusiones preliminares sobre las prácticas de conservación posibles (cubierta vegetal) para mitigar la erosión eólica. Los cálculos indican que el uso de 250 a $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de residuos vegetales parecen ser suficiente para disminuir la pérdida de suelo a un nivel aceptable ($\sim 2 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), independientemente de los valores de K y L.

Recibido: 23 de agosto, 2010
Aceptado: 4 de octubre, 2011
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.061
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE: Región árida, residuos de cosechas, la longitud del campo, la erosión potencial, la rugosidad del canto

ABSTRACT

Soil wind erosion is one of the most serious land degradation problems in the arid and semi-arid regions of the world. Calculation of the potential erosion for study area averaged $70.2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$. In an attempt was made to reduce wind erosion using a mathematical model. Results showed that applying short predetermined succeeding lengths reduced wind erosion greatly but not fairly enough. Wind erosion tends to decrease with decreasing field distance; however the tolerable level of soil loss was not achieved by applying a short field length of 50 m and a ridge value of 0.5. The used model helps to draw some preliminary conclusions about the possible conservation practices (vegetative cover) to mitigate wind erosion. Calculations indicated that using 250 to $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of plant residues seems to be adequate to diminish soil loss to a tolerable level ($\sim 2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) irrespective of K and L values.

KEY WORDS: Arid region, crop residues, field length, potential erosion, ridge roughness

INTRODUCCIÓN

La erosión eólica, en comparación con la erosión hídrica, es uno de los principales problemas de la degradación del suelo en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, son muy pocas las investigaciones que existen acerca de los procesos de erosión eólica en estos entornos. La desertificación en las regiones áridas de Asia y en la mayoría de la región de Irak se caracteriza por la salinización (Dregne, 1991). Por otra parte, la salinización en áreas de riego del sur de Irak es algo desafiante y difícil de controlar. Los suelos profundos de textura fina combinados con una topografía plana dificultan que se cuente con un drenaje adecuado para mantener un nivel

INTRODUCTION

Soil erosion by wind, compared to water erosion, is a major land degradation issue in arid and semi-arid environments. However, little research is available on wind erosion processes in these environments. Desertification in the arid regions of Asia and on a large scale in Iraq is characterized by salinization (Dregne, 1991). Moreover, salinization is challenging and difficult to control in irrigated areas of southern Iraq. Deep fine-textured soils combined with flat topography make it difficult to provide adequate drainage to maintain deep water table and to prevent salt accumulation. Soil and water management techniques suitable for Iraqi conditions have been developed and

freático profundo y que se evite la acumulación de sales. Se han desarrollado y aprobado con éxito las técnicas de manejo del agua y del suelo adecuadas para las condiciones de Irak, sin embargo los problemas técnicos son menos complicados de solucionar que los problemas sociales (Dougramedji, 1999). Una de las áreas identificada como propensa a erosión eólica se localiza en la parte central y alta de las llanuras sedimentarias al sur de Irak. Estas llanuras, que se extienden entre la parte oriental del río Éufrates y las áreas del sur de Bagdad, son las zonas más afectas por la erosión eólica. Las dunas de pseudo arena en esta área, que cubren aproximadamente un millón de hectáreas, se caracterizan por su sequedad y la erosión de la superficie del suelo, y esto en consecuencia limita el nacimiento de plántulas.

Las condiciones áridas y semiáridas prevaletes, con una precipitación media anual <120 mm impusieron restricciones significativas en la producción agrícola. Estas condiciones incluyen: tierra suelta, seca y finamente dividida; una superficie de suelo liso que carece de una cubierta vegetal; campos grandes y vientos fuertes que producen y aceleran una erosión eólica (FAO, 1994). El régimen de humedad del suelo es notablemente árido, los suelos contienen muy poca materia orgánica, con una textura franco-arenosa a franco-arcillosa y principalmente solución salina.

El singular clima actual, el manejo de la tierra y las escasas prácticas de manejo contribuyen significativamente a la degradación del suelo por erosión eólica. Las prácticas de manejo implican algunos cultivos en hileras utilizando árboles que resistan condiciones secas y que se adapten a los sistemas modernos de riego.

La ecuación de la erosión eólica (WEQ, por sus siglas en inglés) fue desarrollada por Woodruff y Siddoway (1965). Skidmore *et al.* (1970) aplicó una sencilla solución computacional para resolver la WEQ. La relación funcional general entre la variable dependiente E (el potencial de la pérdida media anual de suelo) y las variables equivalentes o factores principales es: $E = f(I, K, C, L, V)$, donde I es el índice de erodabilidad del suelo, K es el factor de rugosidad, C es el factor climático local, L es la longitud del terreno en la dirección prevaletente de los vientos y V es el equivalente de cobertura de vegetación.

El sistema de cultivo más común es la rotación tradicional de cebada-barbecho, donde la mayor parte el suelo se deja bajo un periodo largo de barbecho. Además, el sobrepastoreo podría aumentar el riesgo de erosión eólica en tierras barbechadas, principalmente durante los años de sequía cuando los bajos rendimientos del cultivo generan una cobertura de residuos insuficiente. Estos factores se analizarán más adelante con mayor detalle.

El objetivo de este estudio fue determinar la erosión

testada exitosamente, pero los problemas técnicos son menos difíciles de resolver que los sociales (Dougramedji, 1999). One of the identified areas prone to wind erosion is located in the central and upper part of southern sedimentary plains, south of Iraq. The southern sedimentary plains, extending between the eastern parts of Euphrates River and southern areas of Baghdad, are the most affected areas by wind erosion. The pseudo-sand dunes in that area covering about one million hectares are characterized by dryness and surface soil erosion, and this consequently limits seedling emergence.

The prevailing arid and semiarid conditions, with mean annual rainfall <120 mm imposed significant restrictions on agricultural production. These conditions include loose, dry, finely divided soil; smooth soil surface devoid of vegetative cover; large fields and strong winds promote and accelerate wind erosion (FAO, 1994). Soil moisture regime is markedly aridic and soils are very low in organic matter, sandy loam to clay loam texture and mostly saline.

The unique current climate, land use and poor management practices contribute significantly to land degradation by wind erosion. Management practices involve some strip cropping using trees that tolerate dry conditions and adapting modern irrigation systems.

The wind erosion equation (WEQ) was reported by Woodruff and Siddoway (1965). Skidmore *et al.* (1970) applied a simple computer solution to solve the WEQ. The general functional relationship between the dependent variable, E (the potential average annual soil loss) and the equivalent variables or major factors is: $E = f(I, K, C, L, V)$ Where I is soil erodibility index, K is soil ridge-roughness factor, C is a climatic factor, L is the unsheltered median travel distance of wind across a field and V is the equivalent vegetative cover. The most common cropping system is the traditional barley-fallow rotation, where most of the time the land is left under a long-fallow period. In addition, overgrazing may also intensify the risk of wind erosion in fallow lands, especially in dry years when low crop yields result in insufficient residue cover. These factors will be discussed in more detail later.

The objectives of this study were to determine the annual expected wind erosion in a fallow arid land with regard to existing soil and climate conditions and to evaluate possible measures to reduce wind erosion during the most critical period of fallow using an estimated value of soil loss from the Wind Erosion Equation.

MATERIALS AND METHODS

Field characterization

Six fallow barley fields with mean annual rainfall <120 mm were randomly selected within the main dryland

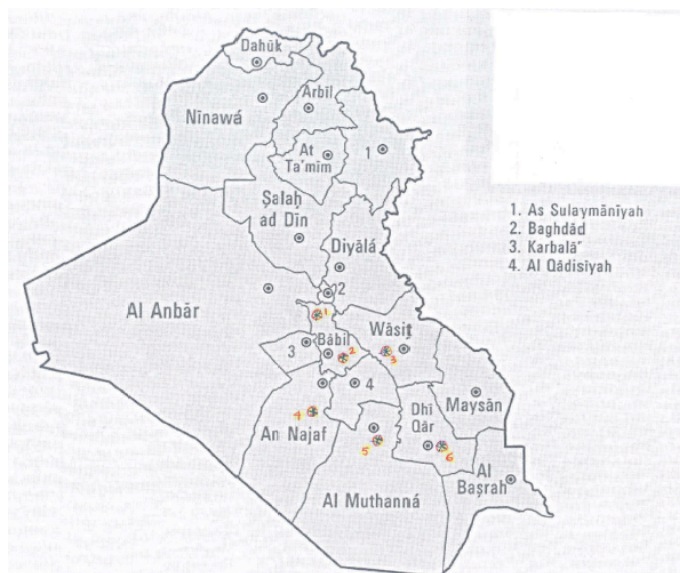


FIGURE 1. Studied area and sampled soil locations.

FIGURA 1. El área estudiada y los sitios de donde se tomaron las muestras de suelo

eólica anual en una tierra árida en barbecho con respecto a las condiciones de suelo y clima existentes y evaluar las medidas posibles para reducir la erosión eólica durante los periodos más críticos de barbecho utilizando un valor estimado de pérdida de suelo a partir de la Ecuación de la Erosión Eólica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del terreno

De las principales zonas áridas de las llanuras al sur de Bagdad, Irak se seleccionaron al azar seis campos de cebada en barbecho (Figura 1). Estos sitios se seleccionaron de acuerdo al tipo de suelo, la topografía y el clima. Estos campos se localizaron entre las latitudes $32^{\circ} 32' N$ y $31^{\circ} 12' N$ y las longitudes $44^{\circ} 25' E$ y $46^{\circ} 21' E$, cubriendo un área total de 1 Mha, de las cuales 0.2 Mha son tierras en barbecho. Estas tierras son casi planas aunque algunas cuentan con una topografía con pendientes entre 2 y 10 %. Se recabaron muestras de la superficie del suelo (15 cm) para determinar la distribución del tamaño de las partículas utilizando el método de la pipeta descrito por Gee y Bauder (1986), la conductividad eléctrica, la $CaCO_3$, el yeso, el EC y el pH de acuerdo a los métodos estándar descritos por Page *et al.* (1982).

Las encuestas salinas realizadas en diferentes áreas del proyecto en Irak revelan que los suelos de los llanos del Tigris y Éufrates, al sur de Bagdad, son altamente salinos ($EC\ 15-30\ dS\cdot m^{-1}$). Casi 0.5 Mha (>50 % de las áreas cultivadas) tienen una conductividad eléctrica $>16\ dS\cdot m^{-1}$ (suelos superficiales). Estos suelos no son adecuados para el cultivo ni muy tolerantes a la salinidad y con muy

areas of semiarid sedimentary plain south of Baghdad, Iraq (Figure 1). Field sites were chosen according to soil type, topography and climate. The fields were located between latitudes $32^{\circ} 32' N$ and $31^{\circ} 12' N$ and longitudes $44^{\circ} 25' E$ and $46^{\circ} 21' E$, covering a total area (in mega hectare) of about 1 Mha, 0.2 Mha of which are fallow lands. The lands are almost flat but some had topography with slopes between 2 and 10 %. Surface soil samples (15 cm) were collected to determine particle size distribution using the pipette method described by Gee and Bauder (1986), electrical conductivity, $CaCO_3$, gypsum, EC and pH by the standard methods described by Page *et al.* (1982).

Salinity surveys carried out in different project areas in Iraq revealed that the soils of Tigris and Euphrates plains, south of Baghdad, are highly saline ($EC\ 15-30\ dS\cdot m^{-1}$). Nearly 0.5 Mha (>50 % of the cultivated areas) have an electrical conductivity $>16\ dS\cdot m^{-1}$ (surface soils). These soils are unsuitable for growing even very salt tolerant and with very few exceptions some are alkaline. Although the pH of the soil paste seldom exceeds 8.5, exchangeable sodium percentage (ESP) above 50 is quite common. The average ESP for all saline soils (surface soils) is estimated to be between 20 and 25 %, calcium carbonate 20 to 30 % and gypsum content of 0.5 %.

Soil erodibility estimation (I)

The percentage of dry soil fraction was determined by a conventional flat sieve (Skidmore, 1994). One kg of dry surface layer (0-15cm) was weighed and sieved using a 0.84 mm diameter opening until aggregates less than 0.84 mm diameter were passed through. The percentage of soil aggregates $>0.84\ mm$ characterize soil aggregate status during the erosion period. Generally, soil erodibility by wind is often estimated by the following equation:

$$I = 662 - 148 \ln(X) \quad (1)$$

Where I is soil erodibility ($mg\cdot ha^{-1}$), X is the percentage of dry soil fraction $> 0.84\ mm$.

Ridge roughness factor estimation (K)

The ridge-roughness factor (K) determines the fractional reduction of erosion caused by non-erodible aggregates and it is influenced by ridge spacing and height.

$$KR = 4HR^2 / IR \quad (2)$$

Where KR is the ridge roughness (mm), HR is the ridge height (mm) and IR is the ridge interval (mm). The

pocas excepciones, algunos son alcalinos. Aunque muy pocas veces el pH de la pasta del suelo sobrepasa el 8.5, es muy común que el porcentaje de sodio intercambiable (ESP, por sus siglas en inglés) se encuentre por arriba de 50. Se estima que el promedio de ESP para todos los suelos salinos (suelos superficiales) se encuentre entre el 20 y 25 %, el carbonato de calcio entre 20 y 30 % y el contenido de yeso en un 0.5%.

Valoración de erodabilidad del suelo (I)

El porcentaje de la fracción de suelo seco se determinó utilizando un tamiz plano convencional (Skidmore, 1994). Se pesó y tamizó 1 kg de capa superficial seca (0-15 cm) utilizando un diámetro de apertura de 0.84 mm hasta que los agregados pasaran por un diámetro menor a los 84 mm. El porcentaje de los agregados del suelo >0.84 mm caracteriza el estado de los agregados del suelo durante el periodo de erosión. La erodabilidad del suelo provocada por el viento, a menudo se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$I = 662 - 148 \ln(X) \quad (1)$$

Donde I es la erodabilidad del suelo ($\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1}$), X es el porcentaje de la fracción de suelo seco > 0.84 mm.

Estimación del factor de rugosidad de la cresta (K)

El factor (K) determina la reducción factorial de la erosión ocasionada por los agregados no erosionables y está influenciado por el espaciamiento y la altura de la cresta.

$$KR = 4HR^2/IR \quad (2)$$

Donde KR es la rugosidad de la cresta (mm), HR es la altura de la cresta (mm) e IR es el intervalo de la cresta (mm). El factor (K) es una función de la rugosidad de la cresta, expresado por la siguiente ecuación.

$$K = 1.0, KR < 2.27 \quad (3)$$

$$K = 1.125 - 0.153 \ln(KR) \quad 2.27 < KR < 89 \quad (4)$$

$$K = 0.336 \exp(0.00324 KR) \quad KR \geq 89 \quad (5)$$

Sin embargo, Zachar (1982) sugirió que el valor de K para los campos elevados puede ser calculado de la siguiente manera:

$$K = (IR_{1:4}/IR_{1:X})HR \quad (6)$$

ridge-roughness factor K is a function of ridge roughness expressed by the following equations.

$$K = 1.0, KR < 2.27 \quad (3)$$

$$K = 1.125 - 0.153 \ln(KR) \quad 2.27 < KR < 89 \quad (4)$$

$$K = 0.336 \exp(0.00324 KR) \quad KR \geq 89 \quad (5)$$

However, Zachar (1982) suggested that K value for ridged field can be calculated as follows:

$$K = (IR_{1:4}/IR_{1:X})HR \quad (6)$$

Where $R_{1:4}$ is standard ridge spacing (1:4), $R_{1:4}$ is measured ridge spacing (1:X), HR is ridge height.

Saleh (1994) developed a simple method to measure soil surface roughness using a roller chain. This method is based on the principle that when a chain of given length (L_1) is placed upon a surface, the horizontal distance between chain ends (L_2) will decrease as the roughness increases. Soil surface roughness (Cr) is calculated using the L_2/L_1 ratio and as follows:

$$Cr = (1 - L_2/L_1) * 100 \quad (7)$$

Ridge orientation was determined with respect to the dominant wind direction.

Wind erosivity calculation (C)

Chepil *et al.* (1962) proposed a climatic factor to determine average annual soil loss for a determined climate conditions. It is an index of wind erosion as influenced by moisture content of soil surface and average wind speed.

The climatic factor was expressed as:

$$C = 386 U^3 / (PE)^2 \quad (8)$$

Where U is the mean annual wind speed corrected to 9.1m and PE is the Thornthwaite precipitation-effectiveness index (Thornthwaite, 1931). The value of 386 is the factor attributed to conditions at Garden City, KS, USA. As the PE index gets smaller when precipitation is slight, as in arid regions, the climate factor in Eq. 8 approaches infinity.

In 1979, Food and Agriculture Organization (FAO) modified the Chepil index (Chepil *et al.*, 1962) and proposed a climatic factor (C) to determine average annual soil loss for

Donde $R_{1.4}$ es el espaciamento estándar de la cresta (1:4), $R_{1.4}$ es el espaciamento medido de la cresta (1: X), HR es la altura de la cresta.

Saleh (1994) desarrolló un sencillo método para medir la rugosidad de la superficie del suelo empleando una cadena de rodillos. Este método se basa en los principios cuando una cadena con longitud determinada (L_1) se coloca sobre una superficie, la distancia horizontal entre el final de la cadena (L_2) disminuirá al aumentar la rugosidad. La rugosidad de la superficie del suelo (Cr) se obtiene usando la proporción L_2/L_1 de la siguiente manera:

$$Cr = (1 - L_2/L_1) * 100 \quad (7)$$

La orientación de la cresta se determinó con respecto a la dirección predominante del viento.

Estimación de la erosividad del viento (C)

Chepil *et al.* (1962) propuso un factor climático para establecer la pérdida promedio anual de suelo para las condiciones de clima determinadas. Este factor es un índice de erosión eólica, influenciado por el contenido de humedad de la superficie del suelo y la velocidad media del viento.

El factor climático se expresó de la siguiente manera:

$$C = 386U^3 / (PE)^2 \quad (8)$$

Donde U es la velocidad media anual del viento corregida a 9.1 m y PE es el índice de efectividad de las precipitaciones de Thornthwaite (Thornthwaite, 1931). El valor 386 es el factor atribuido a las condiciones en Garden City, KS, EE.UU. Así como el índice PE se reduce cuando la precipitación es escasa, como ocurre en las regiones áridas, el factor climático en la ecuación 8 tiende a infinito.

En 1979, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) modificó el índice de Chepil (Chepil *et al.*, 1962) y propuso un factor climático (C) para determinar la pérdida media anual de suelo para las condiciones climáticas áridas y semiáridas. El factor climático propuesto se considera con un índice para la erosión eólica y es influenciado por la precipitación (P), la evapotranspiración potencial (PE) y la velocidad media de los vientos.

$$C = 1/100 \sum U^3 ((PE_i - P_i) / PE_i) D \quad (9)$$

Donde U es la velocidad media mensual del viento a 2 m de altura; $m \cdot sec^{-1}$, PE_i es la evapotranspiración potencial

arid and semiarid climatic conditions. The proposed climate factor is considered as an index for wind erosion and is influenced by precipitation (P), potential evapotranspiration (PE) and average wind speed (U).

$$C = 1/100 \sum U^3 ((PE_i - P_i) / PE_i) D \quad (9)$$

Where U is average monthly wind speed at 2 m height; $m \cdot sec^{-1}$, PE_i is monthly potential evapotranspiration (mm), P_i is monthly rainfall amount (mm) and D is number of days in corresponding month. As precipitation approaches zero, wind speed dominates the climatic factor. Conversely, as precipitation approaches potential evaporation, the climatic factor approaches zero.

Field length estimation

Field length was considered as the length of a field in the prevailing wind erosion direction (Woodruff and Siddoway, 1965). However, sometimes much of the wind occurs from different directions, therefore there is essentially no prevailing wind erosion direction. In some of the modeling efforts, the procedure for determining L in the wind erosion equation was simplified by ignoring wind direction distributions.

Determining vegetative cover (V)

Siddoway *et al.* (1965) quantified the specific properties of vegetative cover influencing soil erodibility. Regression equations were derived relating soil loss by wind to selected amounts, kinds and orientation of vegetative covers, wind velocity and soil cloddiness. Woodruff and Siddoway (1965) related soil loss to the equivalent vegetative cover of small grain and sorghum stubble for various orientations (flat, standing) and heights. Lyles and Allison (1981) determined equivalent wind-erosion protection from selected range grasses and crop residue. They found the following equation:

$$(SG)_e = aX^b \quad (10)$$

Where (SG), is flat small-grain equivalent (kg/ha), X is the quantity of residue or grass to be converted and a , b are constants obtained from already prepared tables (Lyles and Allison, 1981).

An average equation was determined from pooling all crop data with rows running perpendicular to wind direction yielded 8.9 and 0.9 for a and b , respectively. Either the equivalent, flat, small grain or the vegetative factor is needed for the various procedures to estimate wind erosion. The relationship between equivalent, flat, small grain and vegetative cover was demonstrated graphically by Woodruff and Siddoway (1965). Williams *et al.* (1984)

mensual (mm), P_e es la cantidad de lluvia mensual (mm) y D es el número de días en el mes correspondiente. A medida que la precipitación se aproxima a cero, la velocidad del viento domina el factor climático. Por el contrario, cuando la precipitación se acerca a la evapotranspiración potencial, el factor climático se aproxima a cero.

Estimación de la longitud del campo

La longitud del campo fue considerada como la longitud del campo en la dirección prevaleciente de la erosión eólica (Woodruff and Siddoway, 1965). No obstante, en algunas ocasiones los vientos provienen de diferentes direcciones, por ello prácticamente no existe dirección de la erosión eólica. En algunos de los esfuerzos de modelación, el procedimiento para determinar L en la ecuación de la erosión eólica fue simplificado haciendo caso omiso a las distribuciones de la dirección del viento.

Determinación de la cobertura vegetal (V)

Siddoway *et al.* (1965) cuantificó las propiedades específicas de la cobertura vegetal que influyen en la erodabilidad del suelo. Las ecuaciones de regresión se obtuvieron en relación a la pérdida de suelo por los vientos para los montos seleccionados, los tipos y la orientación de las coberturas vegetales, la velocidad del viento y los terrones del suelo. Woodruff y Siddoway (1965) relacionaron la pérdida del suelo con la cobertura vegetal equivalente para granos pequeño y rastrojo de sorgo para diversas orientaciones (horizontal o vertical) y alturas. Lyles y Allison (1981) determinaron el equivalente a la protección por erosión eólica a partir de pastos y residuos de cultivo que se seleccionaron. Lyles y Allison formularon la siguiente ecuación:

$$(SG)_e = aX^b \quad (10)$$

Donde (SG), es el equivalente de grano pequeño plano (kg/ha), X es la cantidad de residuos o hierbas a convertir y a , b son las constantes que se obtuvieron a partir de los cuadros ya preparados (Lyles and Allison, 1981). Se determinó una ecuación promedio a partir de la agrupación de todos los datos de los cultivos con hileras perpendiculares a la dirección del viento, 8.9 y 0.9 para a y b , respectivamente. Se requiere tanto del equivalente de grano pequeño plano o del factor vegetativo para los distintos procedimientos para estimar la erosión eólica. La relación entre el equivalente de grano pequeño y plano y la cobertura vegetal fue demostrada gráficamente por Woodruff y Siddoway (1965). Williams *et al.* (1984) creó una ecuación para la relación gráfica:

$$V = 0.2533 (SG)_e^{1.363}$$

fitted an equation to the graphical relationship to give:

$$V = 0.2533 (SG)_e^{1.363} \quad (11)$$

The vegetative cover (V), shown in Eq.11, is expressed as a function of the small-grain equivalent. If a small grain equivalent is desired for tall grasses, the field sample could be clipped to a proper grazed height before determining a real dry weight.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Wind erosion equation application.

Several approaches may be applied to achieve the solution of WEQ using graphs, figures, tables, slide rule, computer, etc. The interrelationship among the variables is complex. The following series of equations may be used to solve the equation (Skidmore, 1994).

The first step is to determine soil erodibility, I .

$$E1 = I \quad (12)$$

Accounting for ridge roughness:

$$E2 = IK \quad (13)$$

and climate factor

$$E3 = IKC \quad (14)$$

The inclusion of field length is:

$$E4 = (WF^{0.348} + E3^{0.348} - E2^{0.348})^{2.87} \quad (15)$$

Where

$$WF = E2(1.0 - 0.122(L/L_o)^{-0.383}) \exp(-3.33 L/L_o) \quad (16)$$

and

$$WL = 1.56 \times 10^6 (E2)^{-1.26} \exp(-0.00156 E2) \quad (17)$$

Where WF is a field length factor and accounts for the influence of field length on reducing erosion estimate and L_o is maximum field length for the reducing wind-erosion estimate.

The role of equivalent vegetative cover is expressed by

$$E5 = \Psi_1 E4^{\Psi_2} \quad (18)$$

The parameters Ψ_1 and Ψ_2 are functions of the factor V as described by Williams *et al.* (1984).

(11) **CUADRO 1. Porcentaje de agregados $\geq 0.84\text{mm}$ y erodabilidad del suelo correspondiente (I).**

TABLE 1. Percentage of aggregate $\geq 0.84\text{mm}$ and corresponding soil erodibility (I).

Region #	soil texture	Percentage of aggregate $\geq 0.84\text{mm}$	soil erodibility (I) $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$
1	SL	8	354
2	SL	28	169
3	L	36	132
4	CL	48	89
5	SiL	68	38
6	SiCL	78	17
Geometric mean			87.7

La cubierta vegetal (V), observada en la ecuación. 11, es una función del equivalente de grano pequeño. Si éste se desea para los tallos de altura, la muestra podría ser cortada a una altura adecuada antes de determinar un peso real en seco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicación de la ecuación de la erosión eólica.

Se han aplicado varios métodos para alcanzar la solución de la WEQ utilizando graficas, figuras, cuadros, reglas de cálculo, computadoras, etc. La interrelación entre las variables es complicada. Las siguientes series de ecuaciones pueden ser utilizadas para resolver la ecuación (Skidmore, 1994).

El primer paso es determinar la erodabilidad del suelo, I .

$$E1 = I \tag{12}$$

Representación de la rugosidad de la cresta:

$$E2 = IK \tag{13}$$

El factor climático

$$E3 = IKC \tag{14}$$

La inclusión de la longitud del campo es la siguiente:

$$E4 = \left(WF^{0.348} + E3^{0.348} - E2^{0.348} \right)^{2.87} \tag{15}$$

Donde

$$WF = E2 \left(1.0 - 0.122 \left(L/L_o \right)^{-0.383} \right) \exp(-3.33 L/L_o) \tag{16}$$

y

$$WL = 1.56 \times 10^6 \left(E2 \right)^{-1.26} \exp(-0.00156 E2) \tag{17}$$

Donde WF es el factor de la longitud del campo y representa la influencia de la longitud en el cálculo de la reducción de la erosión y L_o es la longitud máxima del campo para calcular la reducción de la erosión eólica.

La función de la cobertura vegetal equivalente se expresa de la siguiente manera:

$$E5 = \Psi_1 E4^{\Psi_2} \tag{18}$$

$$\Psi_1 = \exp \left(-0.759V - 4.74 \times 10^{-2} V^2 + 2.95 \times 10^{-4} V^5 \right) \tag{19}$$

$$\Psi_2 = 1.0 + 8.93 \times 10^{-2} V + 8.51 \times 10^{-3} V^2 - 1.5 \times 10^{-5} V^3 \tag{20}$$

where V is (Mg ha^{-1}) determined by Eq. [11].

Application WEQ on studied area to foresee potential soil loss

Soil erodibility (I) was calculated for the six locations by applying Eq.1 and values are presented in Table 1. The soil ridge roughness factor (K) takes into account the resistance of ridges to wind erosion and it is represented by the relation between ridge height and ridge spacing. Since there were no established ridges in studied area a value of 1 was assigned to K thereby, erodibility value (I) should not be affected by tillage roughness.

The climate factor (C) was calculated using equation 9 and reported in Table 2. However, C is based on wind erosion speed and accounts for the influence of precipitation, potential evapotranspiration, and wind speed. The annual expected wind erosion in the fallow fields with regard to existing soil and climate conditions was obtained from equations 13 & 14 and estimated for the six locations (Table 2). The potential wind erosion ranged from 24.3 to 159.3 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ with geometric mean value of 70.2 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ (Table 2). The data indicated that regions having relatively low climatic factor were jointed with high soil erodibility factors whereas regions with high climatic factor were jointed with low erodibility values.

Table 2 indicates that potential wind erosion ranged from 24.3 to 159.3 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ with geometric mean value of 70.2 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$. Eltaif *et al.* (1989) reported potential wind erosion of 65 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ in a different

TABLE 2. Evaluation the quantity of potential wind erosion (E3) according to soil surface roughness factors (K) and climate for regions used in study.

CUADRO 2. Evaluación de la cantidad de erosión eólica potencial (E3) de acuerdo a la rugosidad de la superficie del suelo del factor (K) y al clima de las zonas utilizado en el estudio.

Location	E1 =I Mg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹	K	E2 = I.K Mg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹	C	E3 =E2.C Mg·ha ⁻¹ ·year ⁻¹	Observations
1	354	1	354	0.45	159.3	Region of low climatic factor
2	169	1	169	0.45	76.1	
3	132	1	132	0.45	59.4	
4	89	1	89	1.43	127.3	
5	38	1	38	1.43	54.3	Region of high climatic factor
6	17	1	17	1.43	24.3	
Geometric mean	87.7	1	87.7	0.80	70.2	

Los parámetros Ψ_1 y Ψ_2 son las funciones del factor V tal como lo describe Williams *et al.* (1984).

$$\Psi_1 = \exp\left(-0.759V - 4.74 \times 10^{-2} V^2 + 2.95 \times 10^{-4} V^5\right) \quad (19)$$

$$\Psi_2 = 1.0 + 8.93 \times 10^{-2} V + 8.51 \times 10^{-3} V^2 - 1.5 \times 10^{-5} V^3 \quad (20)$$

Donde V esta ($\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) determinada por la ecuación [11].

Aplicación de la WEQ en el área estudiada para prevenir la pérdida potencial del suelo

Se calculó la erodabilidad del suelo (I) para los seis sitios utilizando la ecuación 1, los valores se presentan en el Cuadro 1. El factor (K) toma en cuenta la resistencia que tienen las crestas a la erosión eólica, este factor está representado por la relación entre la altura y el espacio de la cresta. Debido a que no existían crestas establecidas en el área estudiada, se asignó el valor de 1 al factor K , por ello, el valor de la erodabilidad (I) no deberá verse afectado por la rugosidad provocada por la labranza.

El factor climático (C) fue calculado utilizando la ecuación 9, la cual se presenta en el Cuadro 2. Sin embargo C se basa en la velocidad de la erosión eólica y representa la influencia de la precipitación, la evapotranspiración potencial, y la velocidad del viento.

La erosión eólica esperada anualmente en los campos barbechados con respecto al suelo existente y a las condiciones climáticas se obtuvo a partir de las ecuaciones 13 y 14 para los 6 sitios (Cuadro 2). La erosión eólica potencial osciló entre 24.3 a 159.3 $\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ con un valor de la media geométrica de 70.2 $\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Cuadro 2). Los datos indicaron que las regiones que relativamente tenían un factor climático bajo se unieran con los factores altos de erodabilidad del suelo, mientras que las regiones con un factor climático alto se unieran con los valores bajos de erodabilidad.

location with similar soil surface and climate conditions. According to the FAO classification (FAO, 1994), the predicted wind erosion was high to very high in all surveyed fallow fields in the same area ranging from 24.3 to 159.3 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. High values, of predicted wind erosion, were explained by either the severity of climatic factor or the high erodibility of weakly aggregated saline soils that can easily be blown away when they dry out at the surface. In addition, the low amounts of crop residue coupled with the large unsheltered field widths would definitely increase the risk of erosion in studied area in lack of some control practices.

However, the study areas with a mean value of 70.2 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ presenting high risk of wind erosion (Mchugh *et al.*, 2005). Generally, the soil loss from WEQ was overestimated in low rainfall regions and underestimated in high rainfall regions (Fryrear *et al.*, 2001). It is worthwhile to point out that improved wind erosion model (RWEQ) has been developed with field data. Erosion estimation by such model was much closer to measured values for any cropping system or climatic region than erosion estimation with WEQ (Fryrear *et al.*, 2000). In this study, WEQ estimation of erosion is used to design optimal measures to control wind erosion by determining which combination of K , L and V is required to reduce soil losses to a tolerable level.

Wind erosion control practices to reduce potential erosion to the tolerable level using a mathematical model.

Practices suggested by wind erosion equation for controlling soil loss include: stabilizing erodible surface with different materials, producing a rough cloddy surface, reducing field length or the distance that wind travels in crossing an unprotected field with barriers and strip crops, and establishing and maintaining sufficient vegetative cover (Skidmore, 1994).

In this study, an attempt was made to control wind erosion by determining which combination (K , L and V) is required to reduce soil losses to a tolerable level. Thus, for the fields with the highest erosion risk, where ridges are used perpendicularly to the prevailing direction, a random

Eltai *et al.* (1989) reportó una erosión eólica potencial de $65 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en un sitio diferente con una superficie similar de suelo y con condiciones climáticas similares. De acuerdo con la clasificación establecida por la FAO (FAO, 1994) la erosión eólica prevista fue alta a muy alta en todos los campos en barbecho estudiados en la misma zona que van de 24.3 a $159.3 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Los valores altos, de la erosión eólica prevista, son explicados ya sea por la gravedad de los factores climáticos y por la alta erodabilidad de los suelos salinos débilmente agregados que fácilmente pueden ser llevadas por el viento cuando se secan en la superficie. Además, las cantidades pequeñas de los residuos del cultivo junto con los extensos campos desprotegidos podrían definitivamente aumentar el riesgo de erosión en el área de estudio en ausencia de algunas prácticas de control.

Sin embargo, las áreas estudiadas con un valor promedio de $70.2 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ presentaron un alto riesgo de erosión eólica (Mchugh *et al.*, 2005). En general, la pérdida de suelos a partir de la WQE fue sobreestimada en regiones con poca precipitación y subestimada en zonas con altas precipitaciones (Fryrear *et al.*, 2001).

Cabe mencionar que el modelo de erosión eólica perfeccionado (RWEQ) has sido desarrollado utilizando los datos de campo. La estimación de la erosión manejando este modelo, fue más aproximada a los valores medidos para cualquier sistema de cultivo o región climática que la estimación de la erosión con la WEQ (Fryrear *et al.*, 2000). En el presente estudio, la estimación de la erosión a partir de la WEQ se utiliza para designar medidas óptimas para controlar la erosión eólica al determinar cual combinación (K , L y V) es la que se requiere para reducir la pérdida de suelos a un nivel aceptable.

Prácticas de control de erosión eólica para reducir la erosión potencial a un nivel aceptable utilizando un modelo matemático.

Las prácticas sugeridas por la ecuación de la erosión eólica para controlar la pérdida de suelo incluyen: estabilizar la superficie erodible con materiales diferentes, producir una superficie áspera con terrones, reducir la longitud del campo o la distancia por la cual el viento viaja para cruzar un campo sin protección con barreras y cultivos en hileras, y establecer y mantener una cubierta vegetal suficiente (Skidmore, 1994).

En el presente estudio, se realizó un intento para controlar la erosión eólica al determinar cual combinación (K , L y V) es requerida para reducir la pérdida de suelo a un nivel aceptable. Así, para los campos con mayor riesgo a erosión, donde las crestas son utilizadas perpendicularmente a la dirección predominante, una rugosidad del suelo al azar K de 0.5 relacionada con condiciones específicas reduciría la erosión eólica

soil roughness K of 0.5 associated with specific conditions would reduce the expected wind erosion by about 50% . In this case, when $K=0.5$, $E_1 = 87.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, therefore $E_2 = 87.7\cdot 0.5 = 43.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. $E_3 = 43.9\cdot 0.80 = 35.1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. The soil ridge-roughness factor and the condition of the field surface at a particular time during wind erosion analysis, such as the ridges and cloddiness made by tillage and planting implements, are usually described by K value which is a decimal from 0.1 to 1.0 . Moreover, when the effectiveness of ridges and roughness increases, the K value decreases.

In this study the following conditions were randomly considered for K value.

1. Fields with no ridges roughness ($K_R < \text{about } 2 \text{ mm}$): $K=1$
2. Fields with random ridges roughness ($K_R=12 \text{ mm}$): $K=0.75$
3. Fields with random ridges roughness ($K_R=60 \text{ mm}$): $K=0.50$

However, in semiarid regions such as Iraq, where the production of adequate residue is limited; soil surface roughness induced by tillage is the primary means for effective wind erosion control. On unprotected eroding fields, the rate of soil flow is zero on the windward edge and increases with distance until reaching a maximum value. However, a field length of about 300 m may be needed in many situations to approach transport capacity for saltation flux in bare agricultural fields (Zobeck *et al.*, 2003). Therefore, this research is proposing fields with different lengths ($50, 100, 200, 300, 400$ and 500 m) to evaluate the wind erosion with the aid of equations. 15, 16 and 17. Soil losses by wind when $K=1, 0.75$ and 0.5 are given in Table 3.

TABLE 3. Soil loss E_4 ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$) at different field lengths (L) and surface roughness factor (K).

CUADRO 3. Pérdida de suelo E_4 ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$) en distintas longitudes de los campos (L) y el factor de la rugosidad de la superficie (K).

L (m)	K		
	1	0.75	0.5
50	32.95	19.54	7.59
100	43.42	28.27	14.39
200	43.42	28.27	14.39
300	56.95	39.33	22.82
400	60.07	41.83	24.67
500	62.39	43.68	26.04

esperada en un 50 %. En este caso, cuando $K = 0.5$, $E_1 = 87.7 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, por ello $E_2 = 87.7 \cdot 0.5 = 43.9 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. $E_3 = 43.9 \cdot 0.80 = 35.1 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

El factor de la rugosidad de la cresta del suelo y la condición de la superficie del campo en un momento determinado durante el análisis de erosión, tal como la cresta y los terrones ocasionados por la labranza y los implementos de siembra, son usualmente descritos por el valor K , el cual es un decimal de 0.1 a 1.0.

Por otra parte, cuando la eficacia de las crestas y de la rugosidad aumenta, el valor K disminuye.

En éste estudio las siguientes condiciones fueron consideradas al azar para el valor K .

1. Campos sin rugosidad de las crestas ($K_R <$ aproximadamente 2 mm): $K = 1$

2. Campos con rugosidad aleatoria de las crestas ($K_R = 12$ mm): $K = 0.75$

3. Campos con rugosidad al azar de las crestas ($K_R = 60$ mm): $K = 0.50$

No obstante, en las regiones semiáridas como Irak, donde la producción de residuos apropiados es limitada; la rugosidad de la superficie del suelo mediante la labranza es el principal medio para un control eficaz de la erosión eólica. En los campos erosionables desprotegidos, la tasa de flujo del suelo es de cero en el borde de barlovento y aumenta con la distancia hasta alcanzar un valor máximo. Sin embargo, un campo con una longitud aproximada de 300 m podría necesitar en muchos casos aproximarse a la capacidad de transporte para la saltación de flujo en los campos de cultivo al descubierto (Zobeck *et al.*, 2003). Por ello, esta investigación propone campos con longitudes diferentes (50, 100, 200, 300, 400 and 500 m) para evaluar la erosión eólica con la ayuda de las ecuaciones 15, 16, y 17. La pérdida de suelo por viento cuando $K = 1$, 0.75 y 0.5 se observa en el Cuadro 3.

Las soluciones de la WEQ muestran la cantidad de erosión eólica esperada anualmente (E_4) para las diferentes longitudes de los campos agrícolas. En todos los valores de K , se mostró una tendencia creciente en la pérdida de suelos al adoptar campos con longitudes más cortas. Mchugh *et al.*, (2005) indicó que la erosión es un proceso implícito natural que no puede ser evitado pero que puede ser controlado a un índice aceptable. Dado que se sabe poco acerca del índice de formación del suelo, salvo que son extremadamente lentos, en algunas ocasiones se acepta un valor de $1 \text{ mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (equivalente a $0.1 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$) como la tasa media anual para la temperatura de las áreas. En un enfoque más pragmático, se considera que

Solution of WEQ gives the expected annual amount of wind erosion (E_4) for different lengths of agricultural fields. At all K values, there was a decreasing trend in soil loss when adopting fields with shorter lengths. Mchugh *et al.*, (2005) stated that erosion is a natural implicit process that can't be prevented but can be controlled to acceptable rate. As little is known about rates of soil formation, except that they are extremely slow, a value of $1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (equivalent to $0.1 \text{ mm} \cdot \text{year}^{-1}$) is sometimes accepted as an average annual rate for temperate areas. A more pragmatic approach is to consider the environmental damage that can occur if no control measures are in place. However, even with using the shortest field length (50 m) and the lowest ridge value (0.5), soil loss was $7.59 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ whereas the tolerable level was $\sim 2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Table 3).

Vegetation is widely used to control wind erosion. By exerting a drag on air flow, vegetation can reduce the velocity of wind below that required to initiate erosion and can enhance the deposition of soil already being carried in the air. Cover crops, wherever grown, give effective wind erosion protection and their protective value and variations can be estimated using equations 15 through 20.

This study suggested the following plant residues: 0, 100, 200, 250 and $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Results presented in Figure 2 indicated that irrespective of K and L values, 250 to $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ was adequate to reduce soil loss to the tolerable level ($2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Carter and Findlater (1989) indicated that at least 40-60 % vegetative soil cover is required to reduce wind erosion to acceptable levels on sandy soils in Western Australia. However, USDA (1993) stated that either 30 % vegetative soil cover or $450 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ are considered enough to control wind erosion. Our calculations with regard to the prevailing conditions in Iraq, using 250 to $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ of plant residues seems to be adequate to diminish soil loss. Lyles & Allison (1981) assured that there is no wind erosion hazard if the amount of grasses in the field exceeds $2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. An assessment of more than 50 years of cover crop research in soil erosion control suggests its essential role in reducing erosion hazards. Plant residues over the surface protect the soil from the direct impact from deflation by wind and help to conserve soil moisture by minimizing evaporation.

Residues and growing crops weight have a considerable role to reduce wind forces and to control soil erosion. Protection offered by a particular crop depends on crop type, cover weight (growing crop and residue or residue by itself) and the orientation of its residue (at standing).

CONCLUSIONS

Wind erosion is a major problem in arid and semi-arid regions especially during the fallow period of land. The two

puede ocurrir un daño ambiental si no se toman medidas de control en el lugar. No obstante, aún cuando se usó el campo con la longitud más pequeñas (50 m) y con el valor más bajo de la cresta (0.5), la pérdida del suelo fue de $7.59 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, mientras que el nivel aceptable fue de $\sim 2 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Cuadro 3).

La vegetación es utilizada ampliamente para controlar la erosión eólica. Al ejercer una carga para el flujo del aire, la vegetación puede reducir la velocidad del viento debajo de lo requerido para iniciar la erosión y puede mejorar la deposición del suelo que se lleva el aire. Los cultivos de cobertura, dondequiera cultivados, dan una protección eficaz contra la erosión eólica y su valor protector y las variaciones pueden ser estimadas utilizando las ecuaciones del 15 al 20.

El presente estudio recomienda los siguientes residuos de plantas: 0, 100, 200, 250 y 500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Los resultados presentados en la Figura 2 indicaron que cualquiera que fuese el valor de K y L , lo adecuado para reducir la pérdida de suelo a un nivel aceptable era 250 a 500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Carter and Findlater (1989) señalaron que al menos un 40-60 % de la cobertura vegetal del suelo es requerida para reducir la erosión eólica a un nivel aceptable en suelos arenosos en Australia Occidental.

No obstante, el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés) (1993) señaló que tanto el 30 % de la cubierta vegetal del suelo o los $450 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ son considerados como suficientes para que exista un control de la erosión eólica. Nuestros cálculos con respecto a las condiciones que prevalecen en Irak, al utilizar de 250 a 500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de residuos de plantas parecen ser adecuados para disminuir la pérdida de suelo. Lyles & Allison (1981) aseguraron que no existe riesgo de erosión eólica sí la cantidad de pastos en el campo sobrepasa los $2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Una evaluación de más de 50 años sobre la investigación de cultivos de cobertura en el control de la erosión del suelo sugirió su rol esencial en la reducción de los peligros de erosión. Los residuos de plantas sobre la superficie protegen el suelo del impacto directo de la erosión ocasionada por el viento y ayuda a conservar la humedad en el suelo reduciendo la evaporación al mínimo.

El peso de los cultivos y los residuos juegan un papel importante en la reducción de la fuerza del viento y para controlar la erosión del suelo. La protección ofrecida por un cultivo en particular depende del tipo de cultivo, el peso de la cubierta (el cultivo en crecimiento y sus residuos o sus residuos por si solos) y la orientación de sus residuos (en pie).

CONCLUSIONES

La erosión eólica es un gran problema en las zonas áridas y semiáridas, especialmente durante el periodo

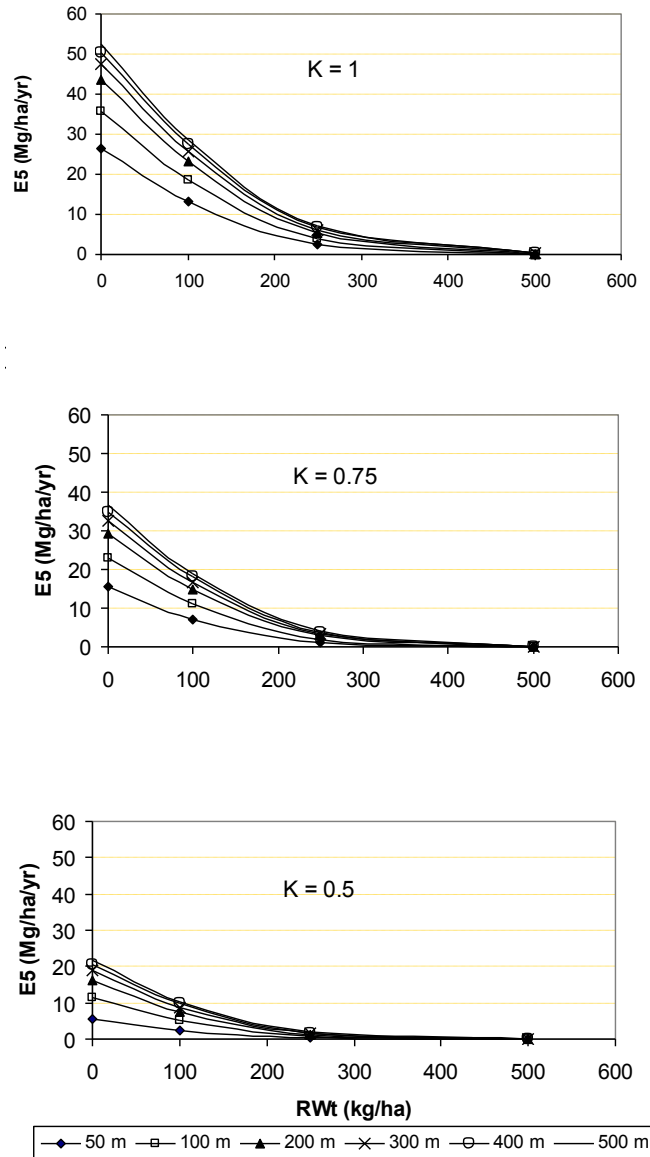


FIGURE 2. Soil losses (E5) with aboveground dry weight of the crop (RWt) of 0, 100, 250 and 500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ at different field lengths.

FIGURA 2. Pérdida de suelo (E5) con un peso seco sobre la superficie de la cosecha (RWt) de 0, 100, 250 y 500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en distintas longitudes de los campos.

main objectives of this study were to evaluate the risk of wind erosion in arid region and to test mathematically the practices that have to be adopted to decrease soil loss to the tolerable level ($\sim 2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Each conservation practice to control wind erosion has an advantage and application, but establishing and maintaining vegetative cover, when economically feasible, remains the best protection against wind erosion. According to our results, the best control of wind erosion conceivably is to establish and maintain adequate ground cover. In some situations, it is not possible to maintain a vegetative cover on soil surface for different reasons, in these circumstances, reducing the field length to 50 m or less and tilling to maintain the soil in rough

de barbecho de la tierra. Los dos objetivos principales del presente estudio fueron evaluar el riesgo de erosión eólica en una zona árida y comprobar de forma matemática las prácticas que se tienen que adoptar para disminuir la pérdida de suelo a un nivel aceptable ($\sim 2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Cada práctica de conservación para controlar la erosión eólica tienen un ventaja y una aplicación, pero estableciendo y manteniendo la cubierta, cuando sea económicamente viable, esa sigue siendo la mejor protección contra la erosión eólica. De acuerdo con nuestros resultados, el mejor control contra la erosión eólica es establecer y mantener una cubierta de suelo adecuada. En algunos casos y por distintas motivos no es posible mantener una cubierta vegetal en la superficie del suelo, en estas circunstancias, lo que se podría hacer es reducir la longitud del campo a 50 m o menos y labrar la tierra para mantener el suelo en condiciones ásperas con terrones. Este estudio confirma que los modelos matemáticos pueden ser utilizados con éxito para evaluar algunas de las prácticas de conservación y manejo tal como la rugosidad de la superficie del suelo, la longitud del suelo y el mantenimiento de los residuos de cultivo.

cloddy condition may be used. This study confirms that mathematical models can be successfully used to evaluate some of the conservation management practices such as surface roughness, field length and maintenance of crop residues.

End of English Version

LITERATURE CITED

- SALEH, A. 1994. Measuring and predicting ridge-orientation effect on soil surface roughness. *Soil Sci Soc Am J.* 58: pp. 1228-1230.
- CARTER, D.; FINDLATER, P. 1989 Erosion potential of phomopsis-resistant lupin stubbles. *WestAus J Agric.* 30: 11-14 pp.
- CHEPIL, W. S.; SIDDOWAY, F. H.; ARMBRUST, D. V. 1962. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *J Soil Water Conserv.* 17: 162-165 pp.
- DOUGRAMEDI, J. S. 1999. Aeolian sediment movements in the lower alluvial plain, Iraq, *Desertification Control Bulletin* No. 35. 45-49 pp.
- DREGNE, H. 1991. A new assessment of the Wold status of desertification. *UNEP, Desertification Control Bulletin.* 6-18 pp.
- ELTAIF, N. I.; ABBAS, M. K.; KOUZOUKIAN, A. H. 1989. Estimating potential wind erosion in Baiji. *Iraq J Agric Sci.* 20: 620-628. pp.
- FAO. 1994. *Land Degradation in South Asia: Its severity, causes and effects upon the people.* World Soil Resources Report 78. FAO: Rome.
- FRYREAR, D. W.; BILBRO, J. D.; SALEH, A.; SCHOMBERG, H.; STOUT, J. E.; ZOBECK, T. M. 2000. RWEQ: Improved Wind Erosion Technology. *J Soil Water Conser.* 55(2): 183-189 pp.
- FRYREAR, D. W.; SUTHERLAND, P. L.; DAVIS, G.; HARDEE, G.; DOLLAR, M. 2001. Wind Erosion Estimates with RWEQ and WEQ. In: *Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm, 10th International Soil Conservation*
- Organization Meeting, Purdue University. May 24-29, 1999, 760-765 pp.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. 1986. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 1: physical and mineralogical methods.* 2nd ed. Agronomy No. 9. Madison: American Society of Agronomy. 383-411 pp.
- LYLES, L.; ALLISON, B. E. 1981. Equivalent wind-erosion protection from selected crop residues. *Transactions of the ASAE.* 24: 405-408 pp.
- MCHUGH, M.; CLARKE, M.; DUZANT, J.; MORGAN, R.; RICKSON, J. 2005. Soil Erosion and Control Practices. In: LEHR, J. and KEELEY, J. (eds.). *Water Encyclopedia.* Vol. 3. Hoboken, NJ: Wiley. 565-570 pp.
- PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical And Microbiological Properties.* 2nd Edition. Agronomy No. 9. Madison: American Society of Agronomy. 1159 p.
- SIDDOWAY, F. H.; CHEPIL, W. S.; ARMBRUST, D.V. 1965. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control. *Tran Am Soc Agric Eng.* 8: 327-331 pp.
- SKIDMORE, E. L.; FISHER, P. S.; WOODRUFF, N. P. 1970. Wind erosion equation: Computer solution and application. *Soil Sci Soc Am Proc.* 34: 931-935
- SKIDMORE, E. L. 1994. Wind Erosion. In: LAL, R. (eds.). *Soil Erosion Research Methods,* 2nd Edition. Delray Beach, Florida: St. Lucie Press. 265-293 pp.
- USDA (United States Department Of Agriculture). 1993. *Farmers expand use of crop residue management.* Agricultural Resources and Environmental Indicators. 118-142 pp.
- WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans Am Soc Agric Eng (ASAE).* 27: 129-144.
- WOODRUFF, N. P.; SIDDOWAY, F. H. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci Soc Am Proc.* 29: 602-608 pp.
- THORNTON, C. W. 1931. *Climates of North America according to a new classification.* *Geogr Rev.* 21: 633-655.
- ZACHAR, D. 1982. *Soil Erosion. Developments in Soil Sciences* 10. Elsevier, Amsterdam. 547 p.
- ZOBECK, T. M.; STERK, G.; RAJOT, R. F. J. L.; STOUT, J. E.; VAN PELT, R., S. 2003. Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. *Earth Surf Proc Land.* 28 (11): 1163-1188.