

Acumulación y pérdida de suelo por erosión eólica en el norte de Zacatecas Soil loss and accumulation due to wind erosion north of Zacatecas

Francisco Guadalupe Echavarría-Chairez^{1*} , Miguel Nasyib Alvarado-Sabag² ,
Alfonso Serna-Pérez¹ , Guillermo Medina-García¹  y José Israel Casas-Flores¹ 

¹ Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria, Campo Experimental Zacatecas. Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5. 98500, Calera, Zacatecas, México.

² Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Agronomía. Carretera Zacatecas-Guadalajara km 15.5. 98170 Cieneguillas, Zacatecas, México

* Autor para correspondencia (echavarría.francisco@inifap.gob.mx)

Editor de Sección: Dr. Esteban Sánchez-Chávez

RESUMEN

Los cambios continuos en el uso del suelo en actividades agrícolas y pecuarias, así como, la ubicación geográfica en sitios afectados por corrientes continuas de viento, han provocado cambios en las características del suelo en un periodo de 40 años. Para identificar tales cambios, se llevó a cabo el presente estudio en la región norte del estado de Zacatecas. Se utilizaron resultados de análisis de laboratorio de 300 muestras obtenidas en 1976 que fueron comparadas contra un número igual de muestras obtenidas en 2016. Al ubicar los sitios de muestreo se generaron imágenes "raster", por interpolación con "kriging". Se encontraron diferencias de las determinaciones coincidentes entre ambas bases de datos, al sobreponer ambas imágenes. Se estimó la erosión eólica de 2016 y se asoció los niveles de erosión con los sitios donde se presentaron los cambios. El traslape de imágenes muestra un área de coincidencia donde se incrementó el contenido de arena y el pH del suelo. Tal superficie representa 401 907 ha, de un total de 2 118 000 ha cubiertas por las imágenes. En ella se encontró que en 40 años ha disminuido el calcio en 98% de la superficie, así como, el potasio (59%), la materia orgánica (59%), magnesio (49%) y sodio (35%) con lo que se identificaron áreas de acumulación y pérdidas de suelo asociadas a valores altos de erosión eólica. Se identificaron los vientos predominantes del suroeste que provocan la erosión eólica con valores de 8 a 32 Mg ha⁻¹ en 100 209 ha de acumulación y 233 587 ha de pérdidas en 40 años. Del total identificado 199 753 ha son áreas agrícolas y 202 154 son de uso pecuario. La identificación de áreas ayudará a definir planes y políticas públicas de intervención tecnológica.

Palabras clave: cambio de pH, degradación, transporte de arena, viento dominante.



check for
updates

Cita recomendada:

Echavarría-Chairez, F. G., Alvarado-Sabag, M. N., Serna-Pérez, A., Medina-García, G., & Casas-Flores, J. I. (2023). Acumulación y pérdida de suelo por erosión eólica en el norte de Zacatecas. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-14. e1649. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1649>

Recibido: 5 de septiembre de 2022.
Aceptado: 11 de abril de 2023.
Artículo. Volumen 41.
Agosto de 2023.

SUMMARY

The continuous changes in the use of soil for agricultural and livestock activities, as well the geographical location on sites affected by continuous wind currents, have caused changes in soil characteristics in a period of 40 years. To identify such changes, this study was performed in the north of the state of Zacatecas. The results of soil from 300 samples obtained in the laboratory analysis in 1976 were compared against an equal number of samples obtained in 2016. "Raster" images were generated by georeferencing the sampling sites and interpolating with "kriging". The coinciding determinations between databases showed the differences between them by overlapping both images. The wind erosion was estimated and the levels of erosion associated with the sites where the changes occurred. The image analysis shows a matching area where sand content and soil pH increased. Such surface

represents 401 907 ha of 2 118 000 ha covered by the images, where calcium has decreased in 98% of the surface, as well as potassium (59%), organic matter (58%), magnesium (49%) and sodium (35%) in 40 years, identifying areas of accumulation and soil loss associated with values of wind erosion. The prevailing SW winds that cause wind erosion were identified with values from 8 to 32 Mg ha⁻¹ in 100 209 ha of accumulation and 233 587 ha of losses in 40 years. Of the total identified, 199 753 ha are agricultural areas and 202 154 are for livestock use. The identification of areas should help define plans and public policies for technological intervention.

Index words: *pH changes, degradation, sand transport, prevailing wind.*

INTRODUCCIÓN

Gran parte de los suelos del norte de Zacatecas eran dedicados al pastoreo antes de ser abiertos al cultivo a principios del siglo veinte. La vegetación nativa de los grandes llanos del norte de Zacatecas fue principalmente pastizal. Velasco (1894) reportó para el estado de Zacatecas, una superficie de 3.27 millones de ha de pastizal a finales del siglo diecinueve, de un total de 7.5 millones de ha, misma que para 2013 se había reducido un 75%, quedando sólo 830 mil ha, de acuerdo con Fernández y Hernández (2020). La repartición de tierras promovida por agricultores y secundada por el gobierno federal como respuesta a las demandas, dio inicio a un cambio de uso de suelo acelerado (Echavarría y Rubio, 2020). Al comparar los cambios en el uso del suelo de pastizal hacia áreas de riego, de entre 1974 a 2004 (Echavarría-Chairez, 2013) delimitando superficies de acuíferos localizados al norte del Estado (Chupaderos, Calera y Aguanaval), se encontró que la superficie que en promedio realizó el cambio de uso de suelo en 30 años para las tres localidades fueron de 1991, 950 y 578 ha año⁻¹, respectivamente. Estos valores considerando sólo la agricultura de riego; se estiman son reducidos en comparación a cambios en el uso de suelo agricultura de temporal, ya que éstos fueron de mayor magnitud. El impacto dañino de los procesos acelerados de erosión del suelo, causados por la deforestación, el sobrepastoreo, labranza y otras prácticas agrícolas inadecuadas son conocidos y documentados (Borrelli *et al.*, 2013).

El estado de Zacatecas, por su ubicación y altura sobre el nivel del mar, forma parte de la altiplanicie mexicana. En este escenario, se ha observado que las corrientes de viento provenientes del Suroeste (SO) y Sureste (SE) del país, son las que predominan en una porción del estado y son las que producen cambios sobre la superficie del suelo, al transportar grandes cantidades de sedimentos en esa dirección. Al estudiar el potencial eólico del estado de Zacatecas (Ángeles-Camacho, Bañuelos y Badillo, 2011) y extrapolando a 80 m de altura sobre las 36 estaciones de una red climatológica del INIFAP, donde se realizó la medición, se encontró una predominancia de vientos de sureste y suroeste a noroeste, observándose esto principalmente en el norte del estado. Este fenómeno se observa principalmente en la temporada de otoño e invierno. Debido a que esta condición de corrientes de viento continuo responde a un patrón repetitivo y dada la explotación continua de las áreas agrícolas y el pastoreo excesivo, se ha intensificado la remoción y transporte del suelo, lo que trae como consecuencia su degradación.

Zacatecas cuenta con una superficie total de 7.5 millones de ha, de esa superficie sólo el 17% se aprovecha para uso agrícola. Se estima que alrededor de 1.3 millones de ha en promedio se cultivan anualmente; de éstas, 130 mil se cultivan bajo el sistema de riego y 1 120 000 ha se siembran bajo condiciones de temporal, el cual se caracteriza por su errática distribución e insuficiencia para cubrir las necesidades de los cultivos (Luna-Flores, Avelar, Lara y Llamas, 2020). El norte del Estado reúne a los municipios de mayor productividad y actividad agropecuaria, lugar donde se localiza la mayor área compacta de producción de cultivos de temporal.

Los cambios en las características y propiedades del suelo como la textura y el pH, cuando se presentan, se producen en el largo plazo. Comúnmente, estos cambios son consecuencia de la contaminación o por acumulación asociada a agentes externos como la erosión eólica. El tamaño de la partícula erosionada, determina su mecanismo de transporte, las partículas grandes serán transportadas a cortas distancias por saltación, mientras las partículas pequeñas podrán ser transportadas a grandes distancias por suspensión. Las partículas movidas por saltación influirán en procesos locales y las partículas suspendidas influirán en procesos regionales o globales (Floyd y Gill, 2011). Los procesos de arrastre, salteamiento y flotación de partículas, provocados por el flujo del viento, producen el traslado de partículas del suelo que conducen a la pérdida y acumulación de materiales afectando el rendimiento de los cultivos y las plantas forrajeras de los sitios de pastoreo (Wang *et al.*, 2020).

Los cambios en textura por efecto de acumulación de partículas pueden ser apreciados en el mediano plazo en la composición de las partículas del suelo, dominando las partículas grandes en áreas cercanas. En cambio, las diferencias del pH del suelo, atribuidos a la contaminación por procesos de arrastre de partículas, son difíciles de apreciar en el corto plazo, aunque los efectos llegan a ser notorios afectando el crecimiento de cultivos o especies nativas en su desarrollo (Trejo-Calzada, Pedroza, Reveles, Ruíz y Arreola, 2015). Asimismo, la disponibilidad de nutrimentos del suelo podría reducirse y contribuir a la disminución de la productividad (Castellanos, Uvalle y Aguilar, 2000).

La disminución en la capacidad de generar bienes y servicios es reconocida como degradación del suelo. La afectación generada por esta acumulación de arena e invasión de pastos exóticos como el Zacate agrarista o bermuda (*Cynodon dactylon*) ha sido observada por los productores agropecuarios de la zona de estudio. La continuación de este proceso de acumulación y traslado contribuirá a la formación de áreas de baja productividad y desertificación (Echavarría y Rubio, 2020). El objetivo del presente estudio fue la identificación de los cambios en características del suelo y ubicar los sitios más afectados por la erosión eólica en la región norte del estado de Zacatecas. Esto con la intención de alertar a tomadores de decisiones y generadores de políticas públicas para dirigir acciones de intervención tecnológica hacia los sitios donde se está afectando la productividad agrícola y pecuaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio y Muestreo

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Suelos del Campo Experimental Zacatecas, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIFAP). La primera parte de la información de suelos proviene de estudios realizados por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) en 1976 en el estado de Zacatecas y la segunda parte, proviene de muestras de suelo analizadas en 2016 por el INIFAP. En ambos casos, el número de muestras utilizadas fue de 300, las cuales fueron distribuidas en los municipios de Fresnillo, Sombrerete, Saín Alto, Río Grande, Nieves, Juan Aldama, Calera y Villa de Cos, todos localizados al norte del Estado (-103.5°, -102.25 ° O, 24.5°, 23.0° N.) y representan 2 118 000 ha. Cada sitio de muestreo fue georreferenciado.

Análisis de Suelos

El análisis de laboratorio incluyó determinaciones físico-químicas como: textura, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, pH, conductividad eléctrica (CE), contenido de materia orgánica (MO), y los macronutrientes nitrógeno inorgánico (NO₃), fósforo (P₂O₅) y potasio (K). En cuanto

a la determinación de cationes en el extracto de saturación, los análisis de 1976 sólo incluyeron calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na). Los análisis del año 2016 incluyeron aniones como cloro (Cl), bicarbonatos (HCO_3^-) y sulfatos (SO_4^-) y micronutrientes como el hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu) y manganeso (Mn).

Análisis Geoestadístico

Con la información se generaron imágenes raster de cada una de las determinaciones, utilizando modelos geoestadísticos (Isaaks y Srivastava, 1989) e interpolaciones con kriging (Wang *et al.*, 2020) por medio del programa IDRISI (Eastman, 2012). Con el mismo software se hicieron comparaciones entre imágenes de 1976 y 2016 por medio de tabulación cruzada, con lo que fue posible detectar los cambios, como acumulaciones o pérdidas de sedimentos. También fue posible estimar las superficies afectadas.

Erosión Eólica

Para la estimación de la erosión eólica se utilizó la ecuación de la erosión eólica (WEQ por sus siglas en inglés) que fue desarrollada por Woodruff y Siddoway (1965), y que ha sido utilizado en áreas agrícolas del mundo (Skidmore, Fisher y Woodruff, 1970; Eltaif y Gharaibeh, 2011). El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$E = f(I', K', C', L', V') \quad (1)$$

Donde:

I' = Erosionabilidad del suelo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

K' = Rugosidad del suelo (adimensional)

C' = Factor climático (%)

L' = Longitud equivalente del terreno (m)

V' = Cantidad equivalente de cubierta vegetal (Mg ha^{-1})

La relación entre los factores de la ecuación no se expresa como una función de las cinco variables independientes, por lo que, la ecuación es resuelta en cinco pasos independientes, donde los dos últimos involucran soluciones gráficas; en cada paso se evalúa el efecto de una variable adicional. Para mayor detalle de la solución se refiere al lector a la metodología definida por Figueroa *et al.* (1991), y el desarrollo de la misma en imágenes raster en Echavarría-Chairez *et al.* (2009).

Datos Climatológicos

Los datos del viento utilizados provinieron de 38 estaciones de la Red de Monitoreo Agroclimático del estado de Zacatecas del INIFAP; se obtuvieron valores promedio mensuales y anuales los cuales se asociaron a las coordenadas geográficas de las 38 estaciones involucradas, lo que permitió su interpolación por medio de análisis geoestadístico. Finalmente, las áreas compactas de acumulaciones o pérdidas fueron superpuestas sobre el mapa de erosión eólica potencial (overlay) para conocer la intensidad de erosión eólica que las afecta específicamente. Para determinar el viento dominante y la dirección promedio mensual, se utilizaron los datos de diez estaciones climatológicas automatizadas, de las 38 estaciones climatológica disponibles y se seleccionaron las diez estaciones que están dentro y alrededor del área de mayor intensidad de erosión eólica potencial estimada para el estado de Zacatecas.

Análisis Estadístico

Se compararon los valores de las diversas determinaciones de suelo mediante una prueba de "t" de Student. También se compararon las clases de erosión asociadas a pérdidas y acumulación de suelo por medio de un análisis de *chi* cuadrada, con el cual fue posible comprobar si la superficie donde coincide la erosión eólica y las pérdidas o acumulaciones de nutrientes fueron significativamente diferentes. Asimismo, se compararon las frecuencias de predominancia de viento de las estaciones climatológicas utilizando la prueba de *chi* cuadrada. Los datos se analizaron por medio del programa SAS (SAS Institute, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinaciones de Suelo y Distribución Espacial

Las determinaciones de suelos realizadas en 1976 y 2016 en las que hubo coincidencia de métodos y unidades se presentan en el Cuadro 1, así como los parámetros de media y desviación estándar de cada determinación ($n = 300$). Existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los años estudiados, presentando los valores más altos en el año 1976 en arena, arcilla, MO, pH, CE, Ca, Mg, Na y K, sólo el fósforo es más bajo en 1976 y el porcentaje de limo en la textura del suelo, presentó valores iguales ($P > 0.05$). Una interpretación preliminar del Cuadro 1, sería que, en 40 años, se ha presentado una disminución paulatina en los porcentajes de arena y arcilla, que la MO y pH, así como, los contenidos de los cationes analizados en ambos momentos (Ca, Mg, Na y K) y consecuentemente, también la CE han disminuido. Sólo el fósforo presenta valores más altos en 2016 y el porcentaje de limo se mantuvo igual. Sin embargo, el asociar los sitios de muestreo con las coordenadas geográficas y generar imágenes, se puede observar su distribución espacial, lo que proporciona una percepción diferente del fenómeno, lo cual no puede ser mostrado por los parámetros estadísticos como la media o desviación estándar (Cuadro 1). Al sobreponer las imágenes de 1976 y 2016, con ayuda del software utilizado (Eastman, 2012), se identificaron áreas comunes en las que se presentaron algunas coincidencias o contrastes entre imágenes de diferentes determinaciones.

Al disponer de imágenes se genera una percepción de la distribución espacial que los parámetros estadísticos no pueden mostrar, en cambio, la información univariada genera una idea de homogeneidad y sin cambios en el espacio (Isaaks y Srivastava, 1989), (Cuadro 1). Sin embargo, al utilizar las imágenes y sobreponerlas entre sí, las coincidencias en algunas determinaciones ayudaron a identificar los cambios que

Cuadro 1. Valores medios y desviación estándar de las determinaciones químicas y físicas semejantes, realizadas en 1976 y 2016, en el norte de Zacatecas.

Table 1. Mean values and standard deviation of similar chemical and physical determinations performed in northern Zacatecas, Mexico in 1976 and 2016.

Año	Parametro	Arena	Arcilla	Limo	MO	pH	P	CE	Ca	Mg	Na	K
		- - - - - % - - - - -					mg kg ⁻¹	dS m ⁻¹	- - - - - me L ⁻¹ - - - - -			
1976	Media	61.8 a*	24.6 a	16.4 a	1.6 a	7.6 a	4.4 b	2.1 a	14.2 a	4.2 a	1.1 a	1.5 a
	DE	13.8	11.8	14.2	1.2	0.8	8.3	1.0	9.6	4.1	2.8	1.7
2016	Media	60.9 b	22.8 b	16.3 a	1.3 b	7.4 b	10.0 a	0.5 b	3.1 b	1.9 b	0.6 b	0.4 b
	DE	13.9	7.4	8.2	0.7	0.9	11.1	0.6	4.1	1.3	1.4	0.4

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($P < 0.05$). DE = desviación estándar; CE = conductividad eléctrica; MO = materia orgánica.

*Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$). DE = standard deviation; CE = electrical conductivity; MO = organic matter.

se han presentado en partes específicas de la región estudiada. Dichos cambios se refieren a incrementos o disminuciones en algunas características y propiedades del suelo. Una porción de la superficie de suelo estudiada mostró valores de pH más altos que los valores medios medidos en 1976. Asimismo, los valores del porcentaje de arena se incrementaron, precisamente donde se encontraron los valores altos de pH del suelo. Al unir las superficies que coincidieron con pH alcalino y alto contenido de arena, se encontró que la superficie que presenta tales incrementos fue de 401 907 ha, y su distribución espacial se muestra en la Figura 1. Esta área, que es la más afectada por los cambios en pH y acumulación de arena incluye los municipios de Juan Aldama, Fresnillo, Río Grande y Cañitas, en el estado de Zacatecas.

El Cuadro 2, muestra los valores medios obtenidos de las mismas determinaciones presentadas en el Cuadro 1, pero utilizando únicamente los valores de la superficie seleccionada. El Cuadro 2 permite observar que específicamente en el área indicada, los valores medios y su desviación estándar del año 2016, se modifican. En particular refiriéndose al contenido de arena, en esta porción del terreno, los valores se incrementan hasta más de 65% y se disminuye la arcilla y el limo. También se disminuye aún más, el contenido de MO, se incrementa el pH del suelo, se incrementa ligeramente el contenido de calcio, magnesio y sodio, disminuyendo el potasio y fósforo, lo que indica que en esta porción del terreno, los valores promedio son diferentes al resto del terreno, lo cual pudiera estar asociado a un fenómeno de transporte de suelo, provocando una acumulación y pérdida de éste, el cual ha sido reportado con anterioridad (Echavarría-Chairez *et al.*, 2009; Arroyo-Salazar, Sandoval y Santos, 2010). Esto se puede apreciar mejor al hacer una comparación de las imágenes raster de 1976 a 2016, las cuales muestran los cambios en términos de superficie que sufrió algún cambio, ya sea pérdida o acumulación de cationes, MO u otras determinaciones de laboratorio realizadas. En el Cuadro 3 se presentan las superficies que cambiaron específicamente en el área seleccionada, las que se mantuvieron sin cambios y las que sufrieron pérdidas, tanto en contenido de MO, como en Ca, Na, Mg y K entre 1976 y 2016. Sobresale por su magnitud el contenido de Ca, el cual se redujo en esa porción del terreno en un 98%, seguido por el contenido de K con un 59%, la MO del suelo que se redujo en el 58% de la superficie y el sodio en un 35%, lo que se obtuvo al comparar ambas imágenes raster y medir las superficies donde se presentó tal reducción (Figura 2).

Las pérdidas se explican como consecuencia de la nula incorporación de material orgánico, la continua mineralización de la MO y prácticas de laboreo en meses de intenso viento en la época invernal (Figura 2). La disminución en el contenido de materia orgánica es un proceso generalizado y continuo que se presenta en todo el Estado y se le considera como una parte de la explicación de la degradación biológica que prevalece y que se ha generalizado (Echavarría-Chairez *et al.*, 2009).

La disminución de gran importancia son las pérdidas de calcio en el 98% de la superficie de referencia, lo que parece contrario al incremento en el pH del suelo. Respecto al contenido de sodio, se observó una acumulación en el 27%, una pérdida

Cuadro 2. Valores medios y desviación estándar estimadas de imágenes raster de determinaciones químicas y físicas semejantes, realizadas entre 1976 y 2016, en el área de valores altos de arena y pH de suelo, al norte de Zacatecas, México.

Table 2. Mean values and standard deviation of similar chemical and physical determinations performed in the area of high sand and soil pH values in northern Zacatecas, Mexico in 1976 and 2016.

Año	Parametro	Arena	Arcilla	Limo	MO	pH	P	CE	Ca	Mg	Na	K
		----- % -----					mg kg ⁻¹	dS m ⁻¹	----- me L ⁻¹ -----			
2016	Media	65.8	21.0	11.5	1.1	8.2	3.7	0.7	4.6	2.1	1.0	0.4
	DE	9.5	5.1	5.2	0.4	0.2	2.4	0.5	2.9	0.4	1.1	0.2

DE = desviación estándar; CE = conductividad eléctrica; MO = materia orgánica.
DE = standard deviation; CE = electrical conductivity; MO = organic matter.

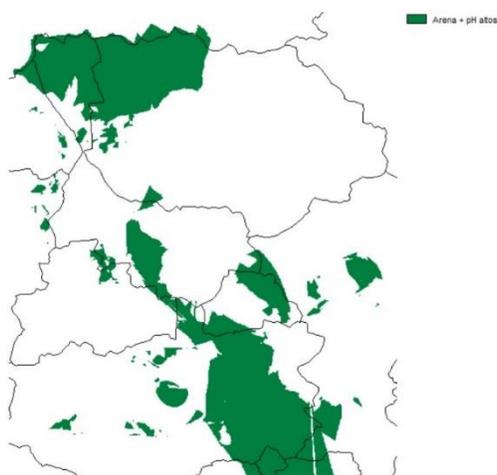


Figura 1. Área de coincidencia de acumulación de arena e incremento de valores de pH del suelo.
Figure 1. Coincidence area of sand accumulation and increase in pH values.

en el 35% y sin cambios en el 37% de la superficie de referencia. La columna central del Cuadro 3 permite observar que las pérdidas en esta área seleccionada son importantes y representan un 60% de la superficie. En cambio, la acumulación es menor y sólo representa un 7% de la misma superficie.

Por otro lado, dados los cambios de pH en el suelo, que en esta área son de 8.18 (Cuadro 2), ligeramente más elevados que el resto del terreno (7.40) Cuadro 1, se estimó la relación de absorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Los valores medios calculados de 1976 fueron más altos que los de 2016

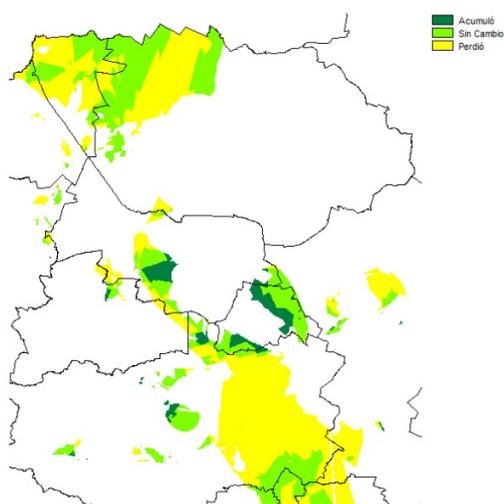


Figura 2. Cambios en el contenido de materia orgánica en el suelo entre 1976 y 2016 en un área de acumulación de arena e incremento de valores de pH del suelo, al norte de Zacatecas.
Figure 2. Changes in organic matter of soil in 1976 and 2016 in a sand accumulation area and increase of pH values in northern Zacatecas, Mexico.

Cuadro 3. Superficies y porcentajes asociados a modificaciones en el contenido de diversos cationes y materia orgánica entre 1976 y 2016 en el área de valores altos de arena y pH de suelo de 401 907 ha, al norte de Zacatecas.

Table 3. Surfaces and percentages associated with changes in the content of some cations and organic matter in the area of high sand and soil pH of 401 907 ha in northern Zacatecas, Mexico in 1976 and 2016.

Determinación	Acumulación	%	Pérdida	%	Sin Cambios	%
	ha		ha		ha	
Materia Orgánica	20008	4.98	236696	58.89	145242	36.13
Calcio	2921	0.73	397366	98.86	1659	0.41
Sodio	108938	27.10	141766	35.27	151243	37.63
Magnesio	0	0.00	197267	49.08	204680	50.92
Potasio	308	0.08	237849	59.17	163789	40.75
Media	26435	6.58	242188.8	60.25	133322.6	33.17

(RAS = 0.41 y 0.35, PSI = 0.61 y 0.5, respectivamente) (Figura 3). La reducción de los valores de calcio y de sodio dentro del área seleccionada, indica que el riesgo de incremento de salinidad y sodicidad, ha disminuido con el tiempo y permite descartar que el incremento de pH del suelo sea provocado por salinidad o sodicidad. Por otro lado, al observar la distribución espacial de los cambios, los sitios donde el valor de PSI sufrió un decremento se localizan al sur de la imagen de referencia y los incrementos en valores de PSI se localizan al norte de la misma superficie (Figura 3), lo que sirve para ubicar los sitios donde se ha propiciado una pérdida o acumulación de cationes y es un indicio de que existe un patrón de cambios de sur a norte. Por otro lado, el potasio se perdió en el 59% del área y se mantuvo sin cambios en el 40%. En lo que respecta al magnesio, este se muestra sin cambios en el 51% y pérdidas en el 49% de la superficie de referencia.

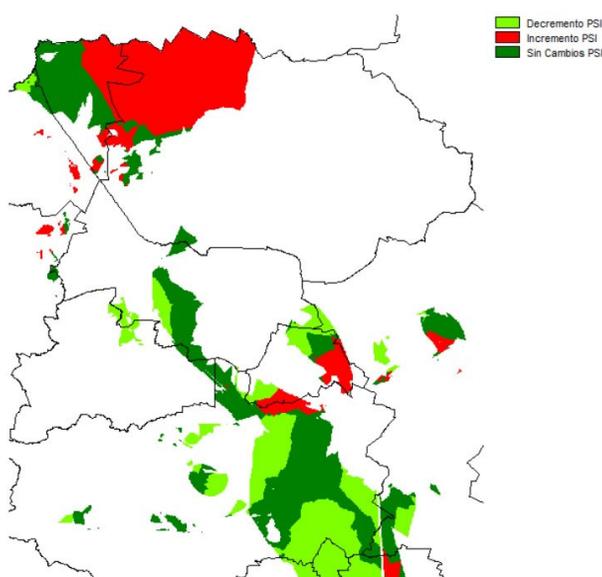


Figura 3. Cambios en valores de Porcentaje de Sodio Intercambiable de 1976 a 2016 en el norte de Zacatecas, México.

Figure 3. Changes in percentage of exchangeable sodium values from 1976 to 2016 in northern Zacatecas, Mexico.

Aniones y Microelementos no Comparados

Otros aniones y microelementos disponibles en el año 2016, no pudieron ser comparados, debido a que no fueron evaluados en 1976. De los evaluados en 2016 sobresale el contenido de bicarbonatos con concentraciones de 4 a 6 Me L⁻¹ en el 16.9% del área, y concentraciones de 2 a 4 Me L⁻¹ en el 83.1% del área de referencia, lo que pudiera explicar en parte los valores altos de pH en el área, ya que, de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000), se considera un suelo alcalino aquellos cuyo pH es superior a 8.2-8.4 y deben su alcalinidad a la presencia de bicarbonatos. La concentración de bicarbonatos raramente excede de 10 Me L⁻¹ en ausencia de carbonatos, y si el pH del extracto es 7 o menos rara vez pasará de 3 a 4 Me L⁻¹ (Richards, 1964). Tomando en cuenta sólo el valor medio del pH del extracto de suelo de 2016 (7.42), ya que no se cuenta con valores de esta variable en 1976, pero, considerando que los valores de calcio y magnesio de 2016 son bajos, así como, valores ligeramente mayores de bicarbonatos y, además, sabiendo que los valores de pH del extracto promedio están en el rango de 7 a 7.5 (7.42), esto es una indicación de que carbonatos de metales alcalino-térreos pudieran estar presentes, de acuerdo con Richards (1964). Esto contribuye a explicar el porqué de valores de pH del suelo se han elevado en la porción de terreno seleccionada.

También sobresalen otros aniones evaluados sólo en 2016, como el cloro con 50% de la superficie con valores de 0-4 me L⁻¹ y de 0-2 me L⁻¹ de sulfatos en el 77%. En lo que respecta a microelementos, de 0-4 mg kg⁻¹ de zinc en el 99%, de 0-4 mg kg⁻¹ de fierro en el 90% y de 0-1 mg kg⁻¹ de cobre en el 99%, así como, de 0-4 mg kg⁻¹ en el 91% de manganeso. Dado que, los valores de estos microelementos son bajos, se sabe que la baja disponibilidad de estos últimos cuatro microelementos mencionados se asocia a suelos con pH alcalino (Castellanos *et al.*, 2000; Roca, Pazos y Beche, 2011).

Acumulaciones y Pérdidas de 1976 a 2016

La suma de pérdidas y acumulaciones de los elementos que pudieron ser evaluados en ambos momentos, representa el 96% de la superficie de referencia (Figura 4). Esto pudo ser realizado gracias a la sobre posición de imágenes raster y la tabulación cruzada disponible en el sistema de información geográfica

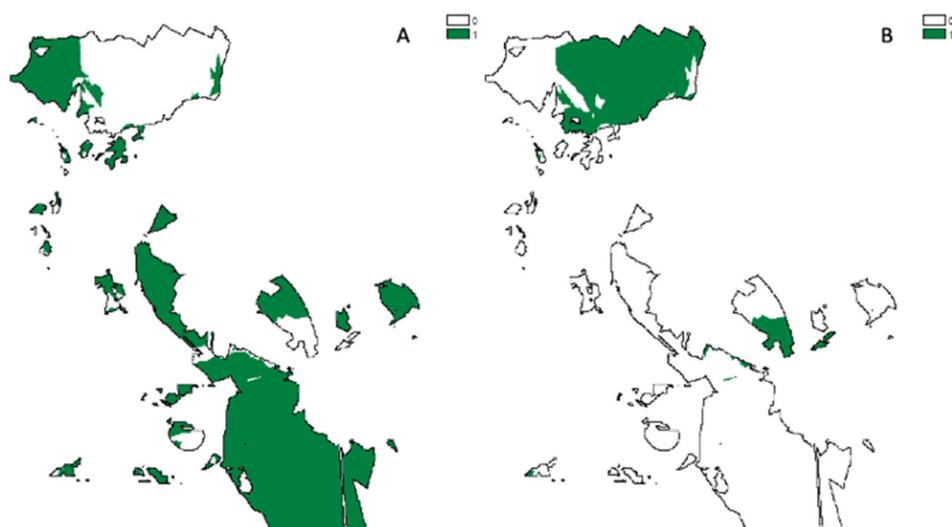


Figura 4. Sitios de pérdida (A) y acumulación (B) de cationes, dentro del área de mayor acumulación de arena y cambios de pH.

Figure 4. Sites of loss (A) and accumulation of (B) cations, within the area of greatest accumulation of sand and pH changes.

(Eastman, 2012). Esto significa que dichos cambios en pH de suelo y acumulación de arena, se asocian a su vez a un patrón de pérdidas y acumulaciones de elementos, sin incluir en este patrón los aniones y microelementos no evaluados en 1976. Además, del patrón observado de acumulaciones y pérdidas, se asoció con una coincidencia de pérdidas en el sur y un área de acumulación en el norte, lo que, a su vez, se asocia este comportamiento con el patrón de vientos dominante en esa zona norte del estado de Zacatecas. Se identificó el viento dominante y la dirección promedio mensual con los datos de diez estaciones climatológicas automatizadas que se localizan al norte del Estado y que se ubican dentro y alrededor del área de mayor intensidad de erosión eólica potencial estimado para el estado de Zacatecas (Figura 5). Para esto, se sobrepuso el mapa de pérdidas y acumulaciones sobre el mapa de erosión eólica potencial (Figura 6 A, B y C). Al sobreponerlo, se comprobó la asociación entre intensidades de erosión y áreas de acumulación o pérdida (Cuadro 4). El Cuadro 4 muestra que los valores de 8 a 16 y de 16 a 32 Mg ha⁻¹ son los rangos que presentan los valores más altos de erosión eólica, con superficies de 100 209 ha y 233 587 ha en las áreas de acumulación y pérdidas, respectivamente. Para comprobarlo, se utilizaron los datos de viento predominante mensual de 192 meses que corresponden a datos históricos de cada estación seleccionada, desde 2003 a 2019 (Figura 5), con pequeñas diferencias en el año de inicio en funciones de cada estación. Al agruparlos por las cuatro direcciones básicas (N, S, E, O) y compararlos mediante una prueba de *chi* cuadrada, se encontraron diferencias ($P > 0.05$) entre las direcciones predominantes, siendo el sur la dirección dominante, la cual presenta valores de 1028 meses en esa dirección predominante (1028 meses de un total de 1962 meses de diez estaciones, en 13 años), seguido de la dirección Este, con 667 meses, del Norte con 245 y finalmente la dirección Oeste con 22 casos de vientos, la frecuencia del suroeste y sur-suroeste (SO y SSO) son diferentes al resto de las direcciones ($P < 0.05$) y juntas representan el 37.8% del total de los meses en que se ha llevado registro de velocidad y dirección de viento de las diez estaciones seleccionadas (Figura 4).

Le siguen en importancia, los vientos predominantes que provienen del este-suroeste (ESE) y del Este en un 23.8% de los meses estudiados. Sumando las 4 direcciones mencionadas, se obtiene que un 61.6% de meses en los que el viento predominante en el estado de Zacatecas es del SO o del ESE. Además, al organizar por número de meses con la misma dirección predominante en las diez estaciones seleccionadas, nos muestra que en ocho meses (de octubre a mayo) el viento

Cuadro 4. Superficies asociadas a valores de erosión eólica (Mg ha⁻¹) en áreas de acumulación o pérdida de cationes del suelo.
Table 4. Surfaces associated with values of wind erosion (Mg ha⁻¹) in accumulation or loss of soil cations areas.

Erosión eólica en áreas de acumulación			Erosión eólica en áreas de pérdida		
Clase	Superficie	Erosión eólica	Clase	Superficie	Erosión eólica
	ha	Mg ha ⁻¹		ha	Mg ha ⁻¹
1	209.2	0-2	1	1524.5	0-2
2	308.5	2-4	2	7312	2-4
3	4097.5	4-8	3	31817.2	4-8
4	33385.7	8-16	4	152551.4	8-16
5	66823.9	16-32	5	81036.5	16-32
6	5782.1	32-64	6	373.7	32-64
7	408.9	>64	7	428.2	>64
Total	111016.06		Total	275043.9	

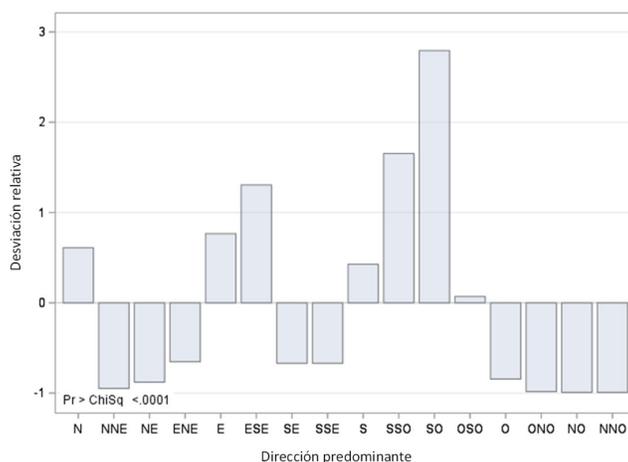


Figura 5. Desviación relativa de 16 direcciones de viento observado en 10 estaciones del norte del estado de Zacatecas.
Figure 5. Relative deviation of 16 wind directions observed in 10 stations in the northern Zacatecas, Mexico.

predominante fue con dirección SO y sólo de junio a agosto el viento predominante proviene del ESE y en el mes de septiembre, el viento que predomina proviene del E. Esto permite asegurar que existen vientos dominantes que se asocian con valores de erosión eólica que producen pérdidas de suelo en la parte sur del área de estudio y tales partículas de suelo al ser removidas, se han depositado al norte del área, las que aquí se han identificado como de acumulación de arena y que ha provocado cambio de pH.

La superficie afectada por cambios de acumulación de arena y de pH del suelo, es de 401 907.3 ha (Figura 1), sin embargo, de acuerdo con la cartografía de uso del suelo y vegetación, serie V, de INEGI (2013), del total mencionado, al superponerse sobre la superficie de referencia, ésta se reduce a 199 753 ha dedicadas a uso

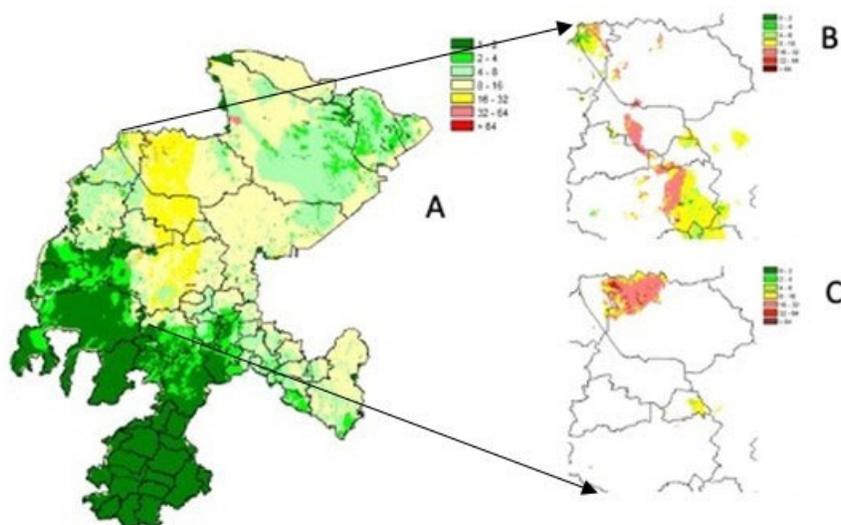


Figura 6. Mapas de erosión eólica del estado de Zacatecas en 2006 (A) pérdida de cationes (B) y acumulación (C) asociados a clases de erosión eólica.
Figure 6. Wind erosion maps of the state of Zacatecas, Mexico in 2006 (A), cation loss (B) and accumulation (C), both associated with wind erosion classes.

agrícola (49.7%). De esta superficie dedicada exclusivamente a labores agrícolas, 38 670 ha son donde se presentan acumulaciones de los cationes estudiados y 151 356 ha es la superficie donde momentáneamente provienen las pérdidas de suelo. Si la superficie total de referencia son 401 907.3 ha, y sólo 199 753 son dedicadas a labores agrícolas, esto representa un 49.7% y el resto es de uso pecuario. Sin embargo, el proceso de remoción y traslado de partículas de suelo está presente en un área mayor, aunque afectando en menor proporción las áreas aledañas y aquí sólo se detecta el área con mayor afectación (Figura 6B y C),

La degradación de los suelos agrícolas sigue siendo un problema grave, difícil de controlar y monitorear debido a la actividad antrópica, el crecimiento poblacional y el desarrollo económico. En este sentido, el conocimiento de los mecanismos involucrados en el desarrollo de la erosión exacerbada en suelos agrícolas, es un factor para recomendaciones en el tratamiento de suelos agrícolas degradados. Esto implica el desarrollo de métodos de investigación más eficientes para el diagnóstico temprano de la erosión del suelo, que permita iniciar oportunamente el tratamiento de regeneración, que, a su vez, permitiría disminuir los problemas de disminución del rendimiento de los cultivos y evitar la degradación del suelo para generaciones futuras (Echavarría-Chairez *et al.*, 2009; Trejo-Calzada *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

La mayor intensidad de la erosión eólica se observó en el norte del estado de Zacatecas. En un periodo de 40 años, de 1976 al 2016, se han producido cambios en algunas características de los suelos de esa región. Se ha determinado en este estudio que hay un patrón de pérdidas y acumulaciones de sur a norte del estado que se observa como acumulación de arena y modificaciones en el pH del suelo y coincide con los vientos predominantes que siguen esa misma dirección. Durante este período de tiempo la actividad agrícola y las prácticas mecánicas usadas, han contribuido a incrementar el efecto negativo de la erosión eólica. La identificación de áreas problema como el usado en este estudio puede ayudar a definir planes y políticas públicas de intervención tecnológica.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Contactar autor para correspondencia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: F.G.E.C. y A.S.P. Metodología: F.G.E.C., A.S.P., M.N.A.S. y G.M.G. Software: F.G.E.C., G.M.G. y J.I.C.F. Investigación: F.G.E.C., M.N.A.S. y G.M.G. Preparación de borrador original: F.G.E.C., M.N.A.S., A.S.P., G.M.G. y J.I.C.F. Escritura, revisión y edición: F.G.E.C. y A.S.P.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los productores del norte de Zacatecas por compartir información y permitir el muestreo de suelos, así como al Ing. Arturo Reyes de la Rosa y el MC. Enrique Medina Martínez.

LITERATURA CITADA

- Ángeles-Camacho, C., Bañuelos-Ruedas, F., & Badillo-Fuentes, J. F. (2011). *El recurso eólico en el estado de Zacatecas: Características del viento en 36 localidades*. Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería.
- Arroyo-Salazar, P., Sandoval-González, V. J., & Santos-Chávez, V. M. (2010). *Diagnóstico del sector agropecuario del estado de Zacatecas*. Zacatecas, México: Comité Técnico Estatal de Evaluación-SEDAGRO.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... Panagos, P. (2013). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 1-13. <http://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Instituto de capacitación para la productividad agrícola. Guanajuato, México: Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva. Guide to GIS and image processing*. Worcester, MA, USA: Clark University.
- Echavarría-Chairez, F. G., Medina-García, G., Rumayor-Rodríguez, A. F., Serna-Pérez, A., Salinas-González, H., & Bustamante-Wilson, J. A. (2009). *Diagnóstico de los recursos naturales para la planeación de la intervención tecnológica y el ordenamiento ecológico*. Calera, Zacatecas, México: INIFAP-CIRNOC-CEZAC.
- Echavarría-Chairez, F. G. (2013). Recurso suelo; clasificación, uso, degradación y disponibilidad. En D. F. B. Mojarro, M. H. E. De León, F. C. F. Junes, & C. Bautista (Eds.). *Agua Subterránea en Zacatecas. Diagnóstico y gestión sustentable de seis acuíferos* (pp. 243-259). Zacatecas, México: Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Echavarría-Chairez, F. G., & Rubio-Aguirre, F. A. (2020). Deterioro de los pastizales por agricultura y ganadería. En: A. Cruz-Angon, D. López-Higareda, K. C. Nájera-Cordero, E. D. Melgarejo, & D. Hernández-Ramírez (Coord.). *La biodiversidad en Zacatecas. Estudio de Estado* (pp. 407-411). Zacatecas, México: CONABIO, México. ISBN: 978-607-8570-37-9
- Eltaif, N. I., & Gharaibeh, M. A. (2011). Aplicación de un modelo matemático para predecir y reducción de la erosión eólica en tierras áridas no protegidas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 195-206. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.061>
- Fernández-Candelas, F., & Hernández-Ramírez, D. (2020). Ecosistemas terrestres. En: A. Cruz-Angon, D. López-Higareda, K. C. Nájera-Cordero, E. D. Melgarejo, & D. Hernández-Ramírez (Coord.). *La biodiversidad en Zacatecas. Estudio de Estado* (pp. 110-124). Zacatecas, México: CONABIO, México. ISBN: 978-607-8570-37-9
- Floyd, K. W., & Gill, T. E. (2011). The association of land cover with Aeolian sediment production at Jornada Basin, New Mexico, USA. *Aeolian Research*, 3(1), 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.002>
- Figueroa, S. B., Amante, O. A., Cortés, H. G., Pimentel, L. J., Osuna, E. S., Rodríguez, J. M., & Morales, F. J. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. México: Colegio de postgraduados.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000, serie V. Consultado el 20 de abril, 2019, desde <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *Applied geostatistics*. New York, NY, USA: Oxford University Press. ISBN: 13978-0-19-505013-4
- Luna-Flores, M., Avelar-Mejía, J. J., Lara-Herrera, A., & Llamas-Llamas, J. J. (2020). La agricultura y el deterioro ambiental. En: A. Cruz-Angon, D. López-Higareda, K. C. Nájera-Cordero, E. D. Melgarejo, & D. Hernández-Ramírez (Coord.). *La biodiversidad en Zacatecas. Estudio de Estado* (pp. 397-406). Zacatecas, México: CONABIO, México. ISBN: 978-607-8570-37-9
- Richards, L. A. (1964) *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. (3ª ed.). México: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas.
- Roca N., Pazos, M. S., & Beche, J. (2007). Disponibilidad de Cobre, Hierro, Manganeso, Zinc en suelos de NO argentino. *Ci. Suelo (Argentina)*, 25(1), 31-42, 2007.
- SAS Institute. (2012). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.3*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.

- Skidmore, E. L., Fisher, P. S., & Woodruff, N. P. (1970). Wind erosion equation. Computer solution and application. *Soil Science Society of America Journal*, 34(6), 931-935.
- Trejo-Calzada, R., Pedroza-Sandoval, A., Reveles-Hernández, M., Ruíz-Torres, J., & Arreola-Ávila, J. G. (2015). Especies vegetales de zonas áridas para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. En A. Moreno-Reséndez, J. L. Reyes-Carrillo, & C. Márquez-Hernández (Coord.). *Tópicos selectos de sustentabilidad: un reto permanente*. Volumen III (pp. 87-104). Durango, México: Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Velasco, A. L. (1894). *Geografía y estadística del Estado de Zacatecas*. Distrito Federal, México: Oficina Tipográfica de la Secretaría de Fomento.
- Wang, Y., Dong, Y., Su, Z., Mudd, S., Zheng, Q., Hu, G., & Yan, D. (2020). Spatial distribution of water and wind erosion and their influence on the soil quality at the agropastoral ecotone of North China. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 253- 265. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.05.001>
- Woodruff, N. P., & Siddoway, F. H. (1965). A wind erosion equation. *J. Soil Science Society America Journal*, 29(5), 602-608. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900050035x>