

**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**

**FACULTAD DE AGRICULTURA**



**EVALUACION DE ECUACIONES PARAMETRICAS PARA LA  
PREDICCION DE LA EROSION EOLICA EN EL AREA  
DE ESTUDIO DEL CREZAS-CP.**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERO AGRONOMO  
ORIENTACION SUELOS**

**PRESENTA:**

**ALEJANDRO AMANTE OROZCO**

**1985.**



**UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**  
 Facultad de Agricultura

Expediente

Número

Febrero 10, 1963.

**C. PROFESORES**

ING. ARTURO CURIEL BALLESTEROS, DIRECTOR.  
 ING. [REDACTED] MONTECERANO, ASESOR.  
 ING. [REDACTED] ASESOR.

Con toda atención me permito hacer de su conocimiento que habiendo sido aprobado el Tema de Tesis:

“EVALUACION DE EDUCACIONES PARAMETRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA ERRORES EN EL AREA Y ESTADIO DEL CRECIMIENTO”

presentado por el PASANTE ALEJANDRO MARTÍNEZ ORZCO  
 han sido ustedes designados Director y Asesores respectivamente para el desarrollo de la misma.

Ruego a ustedes se sirvan hacer del conocimiento de esta Dirección su Dictamen en la revisión de la mencionada Tesis. Entre tanto me es grato reiterarles las seguridades de mi atenta y distinguida consideración.

“PIENSA Y TRAJAJA”  
 EL SECRETARIO.

ING. JOSE ANTONIO SANDOVAL MADRIGAL.

nlg.



# UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Facultad de Agricultura

Expediente

Número

Octubre 29, 1965.

ING. ANDRES ROBRIGUEZ GARCIA  
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE AGRICULTURA  
DE LA UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA.  
PRESENTE.

Habiendo sido revisada la Tesis del PASANTE \_\_\_\_\_  
ALEJANDRO AMANTE DROZCO \_\_\_\_\_ titulada,  
"EVALUACION DE ECUACIONES PARAMETRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA ERO-  
SION EOLICA EN EL AREA DE ESTUDIO DEL CREZAS-CP."

Damos nuestra aprobación para la impresión de la  
misma.

DIRECTOR.

ING. ARTURO CORTEL BALLESTEROS.

ASESOR.

ING. ERNESTO ALONSO MIRAMONTES LAU.



ASESOR  
ESCUELA DE AGRICULTURA  
BIBLIOTECA

ING. RUBEN ORNELAS REYNOSO.

hlg.

Este trabajo se realizó en el Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas del Colegio de Postgraduados (CREZAS-CP), como parte de su Programa de Becas para Tesis de Licenciatura en Agronomía y Biología.

## DEDICATORIA

A la memoria de mi padre:

*J. Asención Amante Solarzano<sup>†</sup>*

A mi madre con amor y respeto:

*Ma. del Refugio Orozco Patiño*

quienes gracias a su apoyo hicieron posible la  
realización de esta meta en mi vida.

A mis hermanos:

*Roberto*

*Jorge*

*Jaime*

*Ma. Lourdes*

*Teresa*

*Salvador*

con cariño y gratitud por su apoyo y comprensión.



## AGRADECIMIENTOS



### A Instituciones:

- Al Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas del Colegio de Postgraduados (CREZAS-CP), por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado.
- A la Universidad de Guadalajara (U. de G.) por su brillante desempeño en mi formación profesional.

### A Personas:

- Al Dr. Benjamín Figueroa Sandoval, Profesor-Investigador y Director del CREZAS-CP, por su oportuna asesoría en la realización del presente trabajo.
- A los catedráticos de la Facultad de Agricultura de la Universidad de Guadalajara: Ing. Arturo Curiel Ballesteros, Ing. Ernesto Miramontes Lau, e Ing. Rubén Ornelas Reinoso, Director y Asesores respectivamente de este trabajo, por su acertada revisión del escrito y sus valiosas sugerencias.
- A las Secretarías del CREZAS-CP; Esperanza Robledo M., Galita Figueroa B., Lidia López M. y Ma. Guadalupe Estrada de F., por su participación mecanográfica en las diferentes etapas del trabajo, en especial a la Srita. Esperanza por la eficiencia y amabilidad siempre mostrada.
- A mis compañeros y amigos del CREZAS-CP, por su ayuda incondicional, brindada durante mi estancia en este lugar. En particular a los Ings. Carlos E. Barragán Villaseñor y Andrés A. Estrada Luna.
- Y en general, a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización de este trabajo.

# C O N T E N I D O

	Página
1. INTRODUCCION	1
- Objetivos	2
- Supuestos	3
2. REVISION DE LITERATURA	4
2.1. Ocurrencia de la erosión del suelo por el viento	4
2.1.1. Características generales de las áreas afectadas por la erosión eólica	4
2.1.2. Daños de la erosión eólica	4
2.2. El proceso de la erosión del suelo por el viento	6
2.2.1. Iniciación del movimiento de las partículas del suelo	6
2.2.1.1. El viento superficial	6
2.2.1.2. Fuerzas en el umbral del movimiento de partículas	7
2.2.2. Transporte de las partículas del suelo	8
2.2.3. Progreso de la erosión viento abajo	11
2.2.4. Naturaleza de los depósitos superficiales y las formas erosionadas	12
2.3. Factores que influyen en la erosión eólica	14
2.3.1. Factores principales de erodabilidad	14
2.3.2. Factores de erosividad	18
2.4. Ecuación de predicción de la erosión eólica	23
2.4.1. Factores o parámetros de la ecuación	24
2.4.2. Relaciones entre variables	33
2.4.3. Aplicaciones de la ecuación	36
2.4.4. Ecuación de erosión eólica propuesta por la FAO	39
2.5. Principios del control de la erosión eólica	40
2.6. Erosión permisible	41
2.7. Clasificación de la erosión del suelo por intensidad de remoción	42
3. MATERIALES Y METODOS	44
3.1. Descripción del área de estudio	44
3.1.1. Ubicación	44



3.1.2. Clima	44
3.1.3. Orografía	48
3.1.4. Hidrografía	49
3.1.5. Geología	50
3.1.6. Suelos	50
3.1.7. Vegetación	51
3.1.8. Características sociales	53
3.2. Ecuaciones paramétricas utilizadas	54
3.2.1. Modelo paramétrico propuesto por la FAO	54
3.2.2. Ecuación paramétrica desarrollada por Woodruff y Siddoway	61
3.3. Estimación de la erosión eólica actual y potencial mediante el uso de las ecuaciones paramétricas a evaluar	66
3.4. Elaboración de los mapas de la erosión eólica actual y potencial	68
3.5. Evaluación de las ecuaciones paramétricas utilizadas	69
4. RESULTADOS	71
4.1. Ecuación paramétrica de la FAO	71
4.1.1. Factor de agresividad climática, "C"	71
4.1.2. Factor suelo, "S"	76
4.1.3. Factor topográfico, "T"	76
4.1.4. Factores de vegetación natural, "V" y de uso del suelo, "L"	78
4.2. Ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway	82
4.2.1. Erodabilidad del suelo, I'	82
4.2.2. Factor climático local, C'	85
4.2.3. Factor rugosidad del suelo, K'	90
4.2.4. Longitud equivalente del terreno, L' y cantidad equivalente de cubierta vegetativa, V	91
4.3. Erosión eólica actual y potencial estimada de las áreas estudiadas y mapas respectivos	91
4.3.1. Mapas de la erosión eólica actual y potencial estimadas con la ecuación de la FAO	91
4.3.1.1. Mapa de riesgo de erosión eólica (erosión eólica potencial)	91



4.3.1.2. Mapa de la erosión eólica actual	92
4.3.2. Mapas de la erosión eólica actual y potencial estimadas con la ecuación de Woodruff y Siddoway	96
4.3.2.1. Mapa de la erosión eólica potencial	96
4.3.2.2. Mapa de la erosión eólica actual	98
4.4. Evaluación de las ecuaciones paramétricas	100
5. DISCUSION	106
5.1. Factores de agresividad climática "C", suelo "S", vegetación natural "V" y uso del suelo "L", de la ecuación paramétrica propuesta por la FAO	106
5.2. Tasas estimadas de erosión eólica actual y potencial con la ecuación paramétrica de la FAO	113
5.3. Erodabilidad del suelo, I', factor climático local, C' y factor de rugosidad del suelo, K', de la ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway	115
5.4. Tasas estimadas de erosión eólica actual y potencial mediante la ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway	119
5.5. Significancia de las tasas estimadas de erosión eólica actual y potencial	121
5.6. Análisis de las ecuaciones paramétricas evaluadas	123
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
7. RESUMEN	130
8. BIBLIOGRAFIA	132
9. APENDICE	138

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Algunos efectos físicos de la erosión eólica (Wilson y Cooke, 1984)	5
2.2	Erodabilidad del suelo I con diferentes porcentajes de fracciones no erodables determinado por un tamizado en seco estandar (Woodruff y Siddoway, 1965)	27
2.3	Descripción de los grupos de erodabilidad eólica (GEE) (Lyles, 1975, 1977; Kimberlin et al., 1977)	28
2.4	Clasificación de la erosión por la intensidad de remoción del suelo (Zachar, 1982)	43
2.5	Clases de degradación del suelo por erosión eólica (FAO, 1980)	43
3.1	Superficie por estados del área de estudio (Aguirre et al., 1982)	44
3.2	Clasificación de las valoraciones del factor "C". FAO (1980)	57
3.3	Valoraciones para el factor suelo "S" adimensional. FAO (1980)	59
3.4	Valoraciones del factor vegetación natural "V" adimensional. FAO (1980)	60
3.5	Valoraciones del factor uso del suelo "L" (adimensional). FAO (1980)	61
4.1	Localización geográfica de las localidades en que se determinó el factor de agresividad climática "C". CREZAS-CP. 1985	72
4.2	Datos climáticos de tres localidades del área de estudio, necesarios para la determinación del factor de agresividad climática "C". CREZAS-CP. 1985	74
4.3	Factor de agresividad climática "C" (adimensional) para tres localidades del área de estudio. CREZAS-CP. 1985	74
4.4	Valoraciones asignadas a los tipos de vegetación que se presentan en el área de estudio. CREZAS-CP. 1985	80

4.5	Agregados del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro para algunas unidades de suelo del área evaluada y su erodabilidad "I". CREZAS-CP. 1985	83
4.6	Factor climático local, C', (porcentaje del de Garden City, Kansas) para tres localidades del Altiplano Potosino-Zacatecano. CREZAS-CP. 1985	88
4.7	Factor climático local, C', (porcentaje del de Garden City, Kansas) para las localidades utilizadas que se ubican fuera del área de estudio del CREZAS-CP. 1985	88
4.8	Tasas de erosión eólica actual y potencial estimadas mediante ecuaciones paramétricas y erosión eólica actual obtenida con medición directa de tres localidades de Zacatecas. CREZAS-CP. 1985	101
4.9	Tasas estimadas de erosión eólica actual corregidas por $I_s$ y $L'$ de tres localidades de Zacatecas. CREZAS-CP. 1985	103



## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Tipo de transporte de las partículas del suelo por acción del viento, en función de su tamaño (Hudson, 1971)	11
2.2	Pérdida de suelo potencial en colinas, expresada como el porcentaje de la que ocurriría en un suelo plano: (a) en la cima de la colina, (b) en el tercio más cercano a la cima (Chepil <u>et al.</u> , 1964a; Woodruff y Siddoway, 1965)	31
2.3	Gráfica para determinar el factor de rugosidad del suelo $K'$ a partir de la rugosidad del suelo $K_r$ (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968)	31
2.4	Gráfica de alineamiento para determinar la distancia a través de la faja de terreno a lo largo de la dirección prevaeciente de la erosión eólica (Woodruff y Siddoway, 1965)	34
2.5	Gráfica para determinar $V$ de $R$ o $R$ de $V$ de cultivos de grano pequeño vivos o muertos en estado de vástagos y plántula sobre la superficie del suelo, para cultivos en surcos de 8 cm de profundidad (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968)	34
2.6	Gráfica para determinar $V$ de $R$ o $R$ de $V$ de rastrojo de cultivos de grano pequeño en pie y extendido con cualquier ancho de hileras mayor de 25 cm de ancho (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968)	35
2.7	Gráfica para determinar $V$ de $R$ o $R$ de $V$ de rastrojo de sorgo en pie y extendido, con un grosor de tallos, follaje y cantidad de plantas sobre el suelo, promedio (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968)	35
2.8	Gráfica para determinar $E_4 = I', K', C', f(L')$ con $E_2 = I'K'$ , $E_3 = I'K'C'$ y la distancia desprotegida $L'$ a través del terreno (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968)	37
2.9	Gráfica para determinar $E_5 = E = I', K', C', f(L'), f(V)$ a partir de $E_4 = I'K'C', f(L')$ y el factor de cubierta vegetativa $V$ (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968)	38

3.1	Localización del área de estudio. CREZAS-CP. 1985	45
4.1	Factor agresividad climática "C" (adimensional) para el área de estudio. CREZAS-CP. 1985	75
4.2	Factor suelo "S" para el área de estudio. CREZAS-CP. 1985	77
4.3	Factores de vegetación natural, V, y uso del suelo, L, para el área de estudio. CREZAS-CP. 1985	79
4.4	Factor erodabilidad del suelo, I, de parte del Altiplano Potosino-Zacatecano. CREZAS-CP. 1985	84
4.5	Factor climático local, C' (porcentaje del de Garden City, Kansas), para el área de estudio. CREZAS-CP. 1985	89
4.6	Riesgo de erosión eólica en el área de estudio (método de la FAO). CREZAS-CP. 1985	93
4.7	Erosión eólica actual estimada para el área de estudio con la ecuación de la FAO. CREZAS-CP. 1985	94
4.8	Erosión eólica potencial de parte del Altiplano Potosino-Zacatecano estimada con la ecuación de Woodruff y Siddoway (1965). CREZAS-CP. 1985	97
4.9	Erosión eólica actual de parte del Altiplano Potosino-Zacatecano estimada con la ecuación de Woodruff y Siddoway (1965). CREZAS-CP. 1985	99

## 1. INTRODUCCION

El valor irremplazable del suelo, como medio de producción para la población humana, es algo admitido generalmente. En cambio su vulnerabilidad al abuso o descuido, quizás sólo la reconocen plenamente los especialistas en la materia.

El proceso de erosión eólica se presenta en aquellos ambientes naturales cuyas condiciones de suelo, vegetación y clima son conducentes, como es el caso de las zonas áridas y semiáridas, no obstante pocas regiones están enteramente a salvo de ella (Skidmore, 1977; Wilson y Cooke, 1984), estas zonas áridas y semiáridas ocupan el 52% de la superficie del país (Beltrán, 1964).

El daño más serio y significativo de la erosión eólica es la remoción de la porción más superficial del suelo, que en las zonas áridas y semiáridas representa la capa más fértil tanto para el desarrollo agrícola como para la conservación de la vegetación natural, y por lo tanto la disminución de su productividad actual y/o potencial, llegando en algunos casos a transformarlos de suelos fértiles a desiertos de arena (Chepil y Woodruff, 1963; Lyles, 1975; Skidmore, 1982).

La erosión eólica ha estado activa a través del tiempo, pero se ha vuelto más acelerada y más destructiva debido a los cambios climáticos y a la actividad del hombre. Este tipo de erosión "inducida o acelerada" es causada en algunos casos por la forma incorrecta del manejo que el hombre hace de la tierra con propósitos para los cuales ésta no manifiesta adaptación (Colegio de Postgraduados, 1977; Wilson y Cooke, 1984).

El área de estudio del Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas del Colegio de Postgraduados (CREZAS-CP) se ubica en el Altiplano

Potosino-Zacatecano. La apertura en esta región, de tierras no aptas para fines agrícolas, que antes se dedicaban al pastoreo y/o recolección de productos silvestres, propició en el área un grave problema de erosión eólica.

FAO (1980) y Zachar (1982) afirman que únicamente cuando se reconozca la gravedad del problema, será posible desarrollar las prácticas agrícolas y medidas de conservación pertinentes, que garanticen el uso seguro de la tierra, conservando el suelo productivo que queda e impidiendo que el problema se extienda a las áreas no afectadas todavía. La resistencia natural de la tierra a la erosión eólica, puede ser aumentada o disminuida en forma considerable con la actividad del hombre (FAO, 1980).

Con la finalidad de contar con un método que pueda servir de punto de partida, para evaluar qué riesgos entrañan determinados usos de la tierra, y qué resistencia adicional puede ser necesaria proporcionar, para obtener un aprovechamiento continuo de la tierra, se diseñó el presente trabajo el cual se realizó en el CREZAS-CP de mayo/84 a junio/85. Este mismo puede tener importancia para la vida rural y para la agricultura de la región, pues pretende servir como herramienta, en la planeación de la conservación de un recurso natural con un amplio uso potencial, como es el suelo.

Al cambiar las condiciones de suelo, vegetación y/o clima en el área estudiada, las estimaciones hechas ahora se tomarán obsoletas, por lo que deberán ser actualizadas mediante las modificaciones pertinentes.

Los objetivos del presente trabajo son:

1. Evaluar cuál de las ecuaciones paramétricas propuestas para la medición de la erosión eólica, una de ellas por Woodruff y Siddoway (1965), y la otra por la FAO (1980), nos permite una mejor estimación de la erosión eólica actual.

2. Realizar una evaluación en el área de estudio, de la degradación actual y potencial de los suelos ocasionada por la erosión eólica, por medio de ecuaciones paramétricas, basada en el acopio de los datos existentes y en la interpretación de los factores ambientales que influyen en la amplitud y la intensidad de esa degradación.
3. Elaborar un mapa de la degradación de los suelos ocasionada por la erosión eólica, en el cual quedarán plasmados los resultados obtenidos con la evaluación, de tal forma, que podrá ser utilizado posteriormente para desarrollar prácticas agrícolas e idear y aplicar medidas de conservación del suelo, de acuerdo a la intensidad de la erosión eólica del suelo de cada lugar.

Los supuestos que se hicieron para la ejecución de este trabajo son los siguientes;

- Con 3 o más años de datos de velocidad del viento es suficiente para determinar la agresividad del clima convenientemente
- La agresividad del clima en el año en que se llevó a cabo la medición directa se considera igual a la agresividad media del clima del periodo considerado.
- La ecuación a nivel general de la FAO, no difiere significativamente en su estimación con los demás niveles de detalle.
- Por último se supone que la pérdida de suelo en la época más ventosa del año, es muy similar al suelo perdido durante el año completo.



## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Ocurrencia de la erosión del suelo por el viento

#### 2.1.1. Características generales de las áreas afectadas por la erosión eólica

El término de erosión eólica abarca tanto la remoción y depósito de las partículas del suelo por la acción del viento, como los efectos abrasivos de las partículas móviles cuando éstas son transportadas.

Aunque generalmente se cree que es de ocurrencia exclusivamente de las zonas áridas y semiáridas, la erosión del suelo por el viento puede ocurrir dondequiera que las condiciones de vegetación, suelo y clima así lo permiten. Estas condiciones existen en aquellos lugares donde:

- a) el suelo es suelto, seco y en medida razonable finamente dividido
- b) la superficie del suelo es ligeramente suave, y la cubierta vegetativa ausente o muy dispersa
- c) el terreno es suficientemente largo, y
- d) el viento es suficientemente fuerte para ocasionar el movimiento del suelo

Aún cuando las encontramos más a menudo en las zonas áridas y semiáridas, esta combinación también ocurre en las subhúmedas y algunas veces aún en las regiones húmedas (FAO, 1960, 1980).

En la erosión eólica el factor más importante para la conservación del suelo es la vegetación, dicha importancia se incrementa con el incremento de la aridez (Zachar, 1982), y de acuerdo a FAO (1960) su ausencia es la causa básica en las áreas agrícolas.

#### 2.1.2. Daños de la erosión eólica

Wilson y Cooke (1984) mencionan que en aquellas áreas donde ocurre la ero

si3n e3lica y otros tipos de degradaci3n, se puede presentar varios efectos f3sicos (Cuadro 2.1), entre ellos; da3os al suelo, da3o a los cultivos y problemas relacionados, as3 como numerosas consecuencias econ3micas indeseables.

Cuadro 2.1. Algunos efectos f3sicos de la eros3n e3lica (Wilson y Cooke, 1984).

---

**Da3o al suelo**

- 1) El material fino, incluyendo materia org3nica, puede eliminarse por rearreglo, dejando un residuo grueso
- 2) Las estructuras del suelo pueden degradarse
- 3) Los fertilizantes o herb3cidas pueden perderse

**Da3o a los cultivos**

- 1) El impacto de la arena puede cortar plantas o da3ar el follaje
- 2) El fertilizante redistribuido en grandes concentraciones puede ser da3ino
- 3) Las enfermedades que se transmiten en el suelo pueden extenderse a otros campos
- 4) Los conejos y otras plagas pueden habitar las dunas atrapadas en los setos y alimentarse de los cultivos

**Otros da3os**

- 1) El suelo se deposita en zanjas, setos y en los caminos
  - 2) La maquinaria agr3cola puede "obstruirse"
- 

El m3s serio y significativo con mucho, sin embargo, es el cambio causado en la textura del suelo. Las fracciones m3s finas del suelo (limo, arcilla y materia org3nica) son removidas y transportadas por el viento, dejando atr3s las fracciones m3s gruesas. Esta acci3n no 3nicamente remueve el material m3s

importante desde el punto de vista de productividad y retención de humedad, sino que deja un suelo más arenoso, y por lo tanto más erodable que el suelo original (FAO, 1960).

## 2.2. El proceso de la erosión del suelo por el viento

El proceso de la erosión eólica consiste, en general, de tres fases distintas: a) iniciación del movimiento de las partículas del suelo, b) su transporte, y c) su deposición (Udden, 1894; citado por Stallings, 1951).

### 2.2.1. Iniciación del movimiento de las partículas del suelo

#### 2.2.1.1. El viento superficial

El movimiento de las partículas del suelo es causado por la energía cinética que desarrolla el viento como resultado de cierta fuerza de desplazamiento ejercida contra la superficie del suelo. A medida que el viento se mueve sobre la superficie, existe un gradiente de velocidad; la velocidad es más baja cerca del suelo y se incrementa en proporción al logaritmo de la altura por encima de la superficie. Es este gradiente en la velocidad el que determina la magnitud de la fuerza ejercida (FAO, 1960).

En algún punto muy cerca de la superficie del suelo, usualmente en el rango de 0.03 a 2.5 mm para una superficie desnuda y relativamente plana, la velocidad del viento es cero. A muy corta distancia por encima de este nivel, el flujo del aire es laminar, y por encima de éste el flujo del aire es turbulento (Colegio de Postgraduados, 1977; FAO, 1960). De acuerdo a Stallings (1951) la turbulencia del viento a campo abierto, está indicada por la fluctuación irregular de la velocidad conocida como "ráfagas". Esta turbulencia junto con la velocidad, es responsable de iniciar el movimiento del suelo en el proceso de erosión eólica.

Las partículas del suelo u otras proyecciones sobre la superficie, que penetran en esta capa de aire turbulento, absorben la mayor parte de la fuerza

ejercida sobre la superficie. Si son suficientemente grandes o están unidas a otras partículas (agregadas) pueden resistir la fuerza de los vientos fuertes. Si por el contrario, no están unidas (defloculadas) o no son demasiado pesadas, el viento puede levantarlas de la superficie iniciando el movimiento y transporte del suelo. Los factores determinantes son, entonces; el tamaño y densidad de las partículas desprendibles del suelo y la fuerza turbulenta que actúa sobre ellas (FAO, 1960).

Zingg y Chepil (1950) mencionan que los vientos superficiales son turbulentos para todas las velocidades por encima de aproximadamente 0.90 m/s, en tanto que FAO (1960) determina que es para todos los vientos de más de 0.45 a 0.90 m/s.

#### 2.2.1.2. Fuerzas en el umbral del movimiento de partículas

La velocidad mínima del viento requerida para iniciar el movimiento del suelo es conocida como velocidad umbral (Bagnold, 1941, citado por Stallings, 1951). El principal factor que afecta la velocidad umbral es el tamaño de las partículas del suelo (Chepil, 1945, citado por Stallings, 1951). La velocidad umbral más baja es para las partículas de 0.1 a 0.15 mm de diámetro. Estas requieren una velocidad de 3.6 a 4.0 m/s a 15 cm por encima del suelo. Mientras que la FAO (1960) y Skidmore y Woodruff (1968) mencionan una velocidad requerida de 4.5 y 5.4 m/s respectivamente, ambas a una altura de 30.5 cm.

La velocidad umbral se incrementa para aquellos granos del suelo con un diámetro mayor o menor de 0.1 a 0.15 mm (Stallings, 1951). Las partículas de cerca de 0.1 mm de diámetro, según la FAO (1960), tienen una relación tamaño/peso la cual es más propicia a la iniciación del movimiento. Si la superficie es plana, resaltan a suficiente altura para absorber una fuerza

apreciable, y aún son bastante livianas para ser fácilmente movidas. Las partículas más pequeñas muestran una fuerte cohesión y no resaltan apreciablemente en la capa turbulenta. Las más grandes son bastante pesadas en relación a la distancia que resaltan, de modo que son requeridos vientos más fuertes para iniciar su movimiento.

Chepil (1945) citado por Wilson y Cooke (1984), observó que en un túnel del viento el umbral de la velocidad de corte variaba con la mezcla de granos erosionables y no erosionables, porque estos últimos tienden a disipar el arrastre. Este y otros factores (tratados a continuación) significan que para suelos en el campo no hay un umbral único.

### 2.2.2. Transporte de las partículas del suelo

Después de que el movimiento de las partículas es iniciado, ellas son transportadas por el viento en tres tipos de movimientos, dependiendo de su tamaño en relación a la velocidad y turbulencia del viento (FAO, 1960).

#### a) Saltación

El primer tipo de movimiento de las partículas del suelo, es una serie de saltos conocido como "saltación". Entre más alto salten los granos, más energía derivan del viento (Chepil y Woodruff, 1963).

Después de ser empujados a lo largo de la superficie del suelo por el viento, repentinamente saltan las partículas casi verticalmente al impactarse contra otras partículas del suelo o algún obstáculo (Chepil, 1945, citado por Stallings, 1951). Otra explicación del salto repentino de las partículas del suelo se basa en el "efecto Venturi", que establece que aumentar la velocidad de un fluido sobre un cuerpo, propicia una disminución en la presión del fluido sobre éste. Así, al fluir el viento con mayor velocidad sobre una partícula situada en la superficie del suelo, genera una fuerza de atracción sobre

ésta, lanzándola hacia arriba (FAO, 1960; Hudson, 1971; Colegio de Postgraduados, 1977). Algunos granos alcanzan únicamente una corta distancia, otros saltan 30 cm o más alto, dependiendo directamente de la velocidad de elevación desde el suelo. Las partículas al ser presionadas por el viento ganan energía en forma de aceleración. No obstante esta aceleración, los granos descienden casi en línea recta con un ángulo promedio de descenso de entre 6 a 12 grados de la horizontal (Chepil, 1961), los que al golpear el suelo, de acuerdo a Stallings (1951), o rebotan y continúan su movimiento por saltación o pierden la mayor parte de su energía golpeando otros granos (causando la elevación de éstos) y penetrando en el suelo para formar parte del movimiento por arrastre superficial.

Aquellas partículas que usualmente se mueven de esta manera, son las de diámetro comprendido entre 0.05 y 0.5 mm (FAO, 1960). Wilson y Cooke (1984) mencionan que la mayoría de los investigadores están de acuerdo en que la saltación es cuantitativamente el proceso más importante, puesto que el arrastre superficial y la suspensión no ocurrirán, sin que previamente haya habido saltación.

#### b) Arrastre superficial

Al movimiento de las partículas más grandes, por rodamiento o deslizamiento a lo largo de la superficie, se le conoce como "arrastre superficial", "secundario" o "reptación" (FAO, 1960). Bagnold (1941) citado por Stallings (1951) observó que los granos de cuarzo son demasiado pesados para ser movidos por saltación, pero son empujados a lo largo de la superficie, por el impacto de las partículas en saltación para formar el arrastre superficial. Asimismo, asevera que a diferencia de los granos en saltación, los cuales reciben la mayor parte de su energía de impacto de la presión directa del viento, los granos que se mueven por arrastre superficial obtienen su energía cinética,

del impacto de los granos que se mueven por saltación.

El porcentaje de partículas que se mueven por arrastre superficial, es mucho menor que el de las que lo hacen por saltación, esto se debe, a que muy pocas avanzan por la presión directa del viento (FAO, 1960). Las partículas que usualmente se mueven por arrastre superficial son aquellas cuyos diámetros van de 0.5 y 2.0 mm, aunque esto no indica, que partículas de mayor tamaño no lo hagan también (Colegio de Postgraduados, 1977).

### c) Suspensión

Las partículas pequeñas transportadas en suspensión entran a la corriente de aire, cuando el suelo es bombardeado por el impacto de las partículas en saltación. Una vez que entran en la corriente de aire, son suspendidas por la turbulencia del viento (Stallings, 1951). De igual manera, indica que este polvo fino es transportado a grandes alturas y a grandes distancias de su localidad original, y así puede ser considerado una pérdida para el área afectada, en tanto que, el suelo movido en saltación y arrastre superficial, usualmente permanece dentro del área afectada, especialmente cuando los vientos erosivos soplan de varias direcciones.

Woodruff (1966) señala que las partículas de polvo muy fino que se mueven en suspensión, en general son menores de 0.1 mm de diámetro, y que por lo tanto, además de ser muy espectacular el movimiento por suspensión, también es un proceso mediante el cual se pierde una gran porción del mejor suelo superficial.

La proporción de los tres tipos de movimiento del suelo, varía grandemente para los diferentes suelos (Chepil, 1945; citado por Chepil y Woodruff, 1963). La presencia de granos gruesos (con un diámetro mayor de aproximadamente 0.5 mm) y partículas muy finas (con diámetros menores de alrededor de los 0.05 mm), según Chepil (1958), obstruyen el movimiento en saltación. Los granos gruesos

obstaculizan el movimiento protegiendo a los granos más finos (con diámetros entre los 0.05 y 0.5 mm aproximadamente) y más erodables del viento, en tanto que las partículas más finas dificultan el movimiento uniéndose a los granos y a otras partículas finas.

Chepil y Woodruff (1963) citan que Chepil (1945) en los suelos que estudió, encontró que entre el 50 y 75% del peso del suelo fue transportado en saltación, del 3 al 40% en suspensión y del 5 al 25% por arrastre superficial. También Chepil (1945); citado por Colegio de Postgraduados (1977) afirma que en los primeros 5 cm superficiales es donde se lleva a cabo el 50% del transporte de las partículas en erosión, mientras que en los primeros 30 cm se verifica el 90% del movimiento.

El tamaño de la partícula determina considerablemente el tipo de desplazamiento de la misma (Hudson, 1971), y esto se puede observar en la Figura 2.1. Asimismo, considera que estos límites de separación de tamaños de partículas, no son muy estrictos, sino que, lo más probable es que se presente cierto traslape.

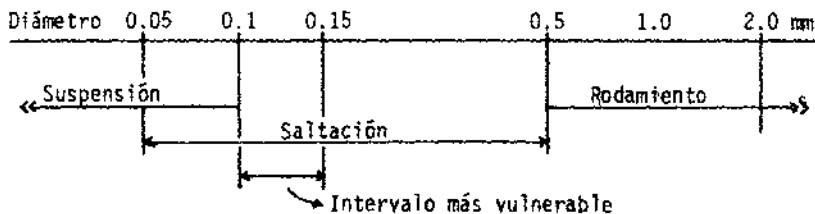


Fig. 2.1. Tipo de transporte de las partículas del suelo por acción del viento, en función de su tamaño. (Hudson, 1971).

### 2.2.3. Progreso de la erosión viento abajo

La intensidad del movimiento de partículas incrementa progresivamente con



la distancia a través del área en erosión (Chepil, 1946). La intensidad del movimiento en la orilla a barlovento de una área en erosión, que puede ser la orilla de un terreno o el comienzo de una mancha altamente erodable en el terreno, es aproximadamente cero (Stallings, 1951). De este punto la cantidad de suelo que es movido puede incrementar progresivamente hasta cierto límite si no se presenta alguna obstrucción o trampa de cualquier clase.

Una vez que los granos del suelo son aflojados y el movimiento es iniciado, el impacto de las partículas en saltación abrasionan severamente la superficie, lo cual da lugar al rompimiento de los terrones, la destrucción de las costras estables, y el deterioro de los residuos vegetativos y la vegetación. Por lo tanto, los granos en saltación, no únicamente causan el movimiento tanto de las partículas más pequeñas como de las más grandes, sino que también rompen los terrones en tamaños erodables y reducen la efectividad de la cubierta vegetativa protectora (FAO, 1960). Entre más grande es el terreno en erosión, mayor es el número de veces que las partículas individuales golpean la superficie a medida que ellas se mueven con el viento. Consecuentemente, se incrementa el número de partículas puestas en movimiento, a medida que la erosión se mueve hacia donde sopla el viento. A esto se le conoce como efecto de "avalancha" (FAO, 1960; Chepil y Woodruff, 1963).

#### 2.2.4. Naturaleza de los depósitos superficiales y las formas erosionadas

Todas las partículas transportadas por el viento acaban depositándose, esta deposición es determinada, al igual que el tipo de movimiento, por el tamaño de las partículas (Hudson, 1971). La deposición ocurre cuando el viento aminora, reduciendo o agotando su capacidad de transporte, o cuando obstrucciones como setos, cultivos y material edáfico no erosionable (o sea, una mayor aspereza superficial), alteran la velocidad y la estructura turbu

lenta (Stallings, 1951; Woodruff, 1966).

Daniel (1936) y Chepil (1957a) mencionan que entre más finas son las partículas erosionadas, mayor es su velocidad, altura y distancia de recorrido. Las partículas más finas tienen mayor movilidad no obstante el hecho de que son menos erodables.

Chepil y Woodruff (1963) consideran que el efecto separador del viento sobre el suelo produce cuatro formaciones de material superficial como sigue:  
a) Materiales y fragmentos de roca que permanecen en su lugar; a) Agregados, gravas y arenas rezagadas que comprende los granos semierodables movidos principalmente por arrastre superficial; 3) Dunas de arena y arcilla formadas por la acumulación de granos altamente erodables transportadas por saltación, allí donde determinadas barreras disminuyen la velocidad del viento, como lo son las cercas, setos y zanjas; y 4) Los loess formados por la deposición del polvo transportado por el viento, en capas uniformes tanto cercas como tejos de las dunas.

Chepil (1957b) afirma que no existen diferencias marcadas de tamaño entre los cuatro grados de materiales separados por el viento. Los límites de tamaño de un grado, se traslapan considerablemente con los límites de tamaño de otro grado.

Algunas veces, el viento remueve virtualmente la superficie del suelo. Esta "remoción no selectiva" está asociada principalmente con los loess que fueron separados y depositados durante las pasadas eras geológicas (Zingg, 1954; Chepil, 1957a,b). Otro tipo es la "remoción selectiva" que ocurre sobre suelos desarrollados por la acción glacial, de material residual, deslave de montañas y suelos arenosos de varios orígenes, sobre los cuales el viento tiende a remover el limo y la arcilla, y a dejar atrás las arenas y gravas. Este proceso causa a menudo que la superficie del suelo se vuelva

progresivamente más arenosa y por lo tanto más erodable y menos productiva.

### 2.3. Factores que influyen en la erosión eólica

La intensidad con que se presenta el proceso de la erosión eólica, siempre será determinada por la erodabilidad del suelo, así como por la erosividad del viento y los factores que la afectan (Wilson y Cooke, 1984).

#### 2.3.1. Factores principales de erodabilidad

Chepil y Woodruff (1963) mencionan que el diámetro, densidad y forma de los granos individuales determinan su erodabilidad (susceptibilidad a ser erosionados). Aunque predominan los terrones de partículas individuales unidas por diversas fuerzas en la mayoría de los suelos, cuyo estado y estabilidad (contra la abrasión) determina la erodabilidad de un suelo.

Los suelos arcillosos, son los únicos que presentan una estructuración, un suelo al estar estructurado se dice que está flocculado, por lo tanto existe una resistencia a la erosión, y la abrasión es mínima. En cambio, un suelo de estructura débil con partículas erosionables se puede desgastar muy pronto (Wilson y Cooke, 1984). Muchos factores afectan el estado y la estabilidad de las unidades estructurales, y entre los principales se cuenta a la humedad, textura, materia orgánica y el carbonato de calcio (FAO, 1960; Chepil y Woodruff, 1963; Wilson y Cooke, 1984).

#### a) Humedad del suelo

La erodabilidad está en función de las fuerzas cohesivas entre las partículas del suelo (fuerza de atracción que las mantiene unidas), rodeadas por una película de agua adsorbida (Zachar, 1982). Únicamente las partículas secas del suelo son fácilmente movidas por el viento, mientras que las húmedas o mojadas, son virtualmente estables debido a que existe cohesión entre las partículas y el agua del suelo (Chepil, W.S. 1960a).

Chepil (1956) encontró que la tasa de movimiento del suelo es inversamente proporcional al cuadrado de la humedad efectiva del suelo superficial, puesto que la erodabilidad del suelo disminuía a medida que la humedad del suelo aumentaba, hasta un porcentaje de 15 atmósferas (aproximadamente igual al punto de marchitez permanente) donde no ocurrió erosión. Igualmente Belly (1964); citado por Wilson y Cooke (1984) demostró que al aumentar el contenido de humedad, el umbral de la velocidad de corte aumenta rápidamente, hasta que al 2 ó 3% de humedad, este umbral es bastante alto.

Otro efecto del agua es la formación, por el impacto de las gotas de lluvia, de costras superficiales formadas con limos y arcillas, quedando las arenas sueltas en la superficie, que al secarse, son movidas fácilmente por el viento iniciando la abrasión, la cual se facilita por lo liso de la costra, aumentando el efecto de avalancha, y así la costra puede destruirse rápidamente (Chepil y Woodruff, 1963).

#### b) Textura del suelo

Chepil (1953) observó que la textura del suelo afecta a la erodabilidad, esencialmente por la estructura de los agregados secos que es capaz de producir. Los suelos de textura gruesa, carecieron de suficiente limo y arcilla para unir los granos de arena; los de textura fina, tuvieron demasiada arcilla, la cual, bajo la acción del intemperismo causó la desintegración de los terrones, en una condición erodable finamente granulada; en los suelos de textura media, por otro lado, la proporción de limo y arcilla pareció ser suficiente para unir los granos de arena, y no tan alta aún, como para causar el agrietamiento y la consecuente granulación.

En otro estudio similar, Chepil (1955a) encontró que el primer 5% de limo o arcilla mezclados con arena, es igualmente efectivo en crear terrones, pero

aquellos formados con arcilla y arena son más duros y menos sujetos a la abrasión. Para proporciones del 5 al 100%, la fracción de limo creó más terrones, pero los terrones son más suaves y más fácilmente destruidos que aquéllos formados con arcilla y arena. También determinó, que la mayor proporción de terrones no erodables, que muestran un alto grado de estabilidad mecánica y resistencia a la abrasión, es obtenida en suelos que contienen del 20 al 30% de arcilla, del 40 al 50% de limo, y del 20 al 40% de arena.

#### c) Materia orgánica

La descomposición de la materia orgánica (M.O) por microorganismos produce varios cementantes (Chepil y Woodruff, 1963; Wilson y Cooke, 1984). Chepil (1957c) menciona que la M.O. tiene un efecto variable en la erodabilidad del suelo, de acuerdo a su grado de descomposición. Chepil (1955b) observó que con adiciones del 1 al 6% de M.O. al suelo, se producen más terrones, lo que disminuye su erodabilidad, esto al principio de la descomposición (menos de un año), pero la erodabilidad se aumenta al disminuir la producción de terrones, después de cuatro años, por lo que recomienda una adición continua de M.O. dejada sobre la superficie, ya que se descompone más lentamente que cuando es mezclada por la labranza con arado.

#### d) Carbonato de calcio

Hopkins (1935); citado por Chepil y Woodruff (1963) observó en Canadá que los suelos con alto contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) libre, o cal, y materia orgánica, han sido erosionados severamente por el viento. Estudios iniciales de laboratorio en algunos suelos de Canadá comprobaron, en general, las observaciones de Hopkins (Can Dept. of Agric., 1949; citado por Chepil, 1954).

Chepil (1954) realizó estudios extensivos de campo sobre el efecto de añu

dir  $\text{CaCO}_3$  al suelo. Para todas las texturas probadas, excepto la arena francosa, la adición de  $\text{CaCO}_3$  precipitado disminuyó la terronosidad y la estabilidad mecánica de los terrones, incrementando la erodabilidad. Las diferencias en la erodabilidad producida por la adición de diferentes cantidades de  $\text{CaCO}_3$  fueron por lo general altamente significantes, los efectos mayores fueron obtenidos con cerca del 3% de  $\text{CaCO}_3$ , cantidades mayores o menores tuvieron efectos algo menores.

En la arena francosa, entre más  $\text{CaCO}_3$  se adicionó, mayor fue el incremento en la terronosidad y la estabilidad mecánica de los terrones y la disminución en la erodabilidad. Se supone que los resultados con arena habrían sido similares a aquéllos de la arena francosa.

En el mismo estudio Chepil (1954) encontró que el efecto negativo del  $\text{CaCO}_3$  en la erodabilidad, es incrementado en aquellos suelos que contienen un alto porcentaje de humus. Por lo tanto, se registró la mayor erodabilidad en los suelos que contienen la mayor cantidad tanto de  $\text{CaCO}_3$  como de humus.

El efecto del  $\text{CaCO}_3$  precipitado sobre la arena y la arena francosa es similar en algún aspecto al efecto del limo de cuarzo. Probablemente esto se debe a que los cristales en el  $\text{CaCO}_3$  precipitado cuando es agitado en agua son predominantemente del tamaño del limo. El limo es un agente cementante blando y es parcialmente responsable de la formación de terrones frágiles (Chepil y Woodruff, 1963). Como lo muestra en un estudio previo Chepil (1953), pequeñas cantidades iniciales de limo son muy efectivas para reducir la erodabilidad de la arena.

Sobre las demás texturas la acción del  $\text{CaCO}_3$  precipitado es considerablemente diferente que el limo. En los suelos que contienen una considerable proporción de arcilla, el  $\text{CaCO}_3$  parece debilitar la fuerza cementante de la arcilla y causa el ablandamiento y la granulación de los terrones. Esto prin

principalmente debilita los lazos de unión que mantienen juntos a los agregados estables en agua para formar terrones. Es probable que esta acción básicamente se deba al fenómeno de floculación, el cual puede ser observado claramente cuando el  $\text{CaCO}_3$  precipitado es agitado en agua (Chepil y Woodruff, 1963).

Thompson (1952); citado por Chepil y Woodruff (1963) afirma que la presencia en los suelos de grandes cantidades de calcio usualmente presente en la forma de  $\text{CaCO}_3$  tiende a desarrollar una estructura del suelo granular. Si los granos son lo suficientemente pequeños, serán erosionados fácilmente por el viento.

En las regiones semiáridas los suelos se caracterizan por una capa de acumulación de  $\text{CaCO}_3$ , la cual normalmente está situada abajo del suelo. Esta capa es a menudo traída a la superficie por los implementos de labranza, especialmente donde los suelos han sido removidos por la erosión. La exposición de la capa de  $\text{CaCO}_3$  incrementa el peligro de erosión eólica. Los suelos más altos, como las colinas, comúnmente son erosionados hasta exponer esta capa, lo que frecuentemente causa la erosión de las tierras adyacentes, ya que sirven como fuentes de las cuales el  $\text{CaCO}_3$  puede ser propagado. Tales áreas son un serio peligro de erosión para los terrenos circundantes, y deben ser protegidos especialmente con pasto (Chepil, 1954).

### 2.3.2. Factores de erosividad

Los factores que afectan la fuerza erosiva del viento pueden agruparse en dos categorías principales: las que se relacionan con la naturaleza del flujo atmosférico mismo y las que se relacionan con la restricción a ese flujo, que es la aspereza superficial general (Wilson y Cooke, 1984).

#### a) Factores de flujo atmosférico

Varios investigadores (por ejemplo: Bagnold, 1943 y Chepil, 1945; citados

por Skidmore y Woodruff, 1968; Zingg, 1953) encontraron que cuando la velocidad del viento fue mayor que aquélla requerida únicamente para iniciar el movimiento del suelo (velocidad umbral de corte), la tasa de movimiento del suelo fue directamente proporcional a la velocidad de fricción al cubo.

Se han realizado varias evaluaciones sobre la fuerza erosiva del viento, pero el método propuesto por Skidmore (1965) y Skidmore y Woodruff (1968) parece ser el más detallado (Wilson y Cooke, 1984). Este análisis se basa en el principio mencionado en el párrafo anterior, aunque solamente se considera como vientos erosivos a aquéllos cuyas velocidades promedio por hora son mayores de 5.4 m/s. Este método de análisis incluye tres factores:

1) La "magnitud" de las fuerzas de erosión eólica o la capacidad del viento para causar erosión sobre suelos desprotegidos, 2) La "dirección" prevaliente de la erosión eólica, y 3) La "preponderancia" de las fuerzas de erosión eólica en la dirección prevaliente de la erosión por el viento.

La magnitud se calcula para cada mes y para los 16 puntos cardinales, la magnitud total para cada mes se obtiene sumando la magnitud de cada dirección. Cuando en una línea de orientación "x", la proporción (simbolizada por R) de las fuerzas paralelas a la línea "x", en relación a aquéllas perpendiculares a la misma es máxima ( $R_m$ ), "x" está orientada en la dirección prevaliente, y el valor de este  $R_m$  nos indica la preponderancia de la erosión por el viento en esta dirección.

#### b) Factores de aspereza superficial general

La principal resistencia opuesta al flujo del viento es llevada a cabo por los siguientes factores principales que forman parte de la aspereza superficial general.



## 1) Vegetación

El material vegetativo vivo o muerto, protege grandemente la superficie del suelo de la acción del viento. No solo reduce la velocidad del viento en la superficie, sino que también absorbe mucha de la fuerza ejercida por el mismo. Además actúa como trampa de las partículas del suelo, deteniendo el efecto de avalancha del material del suelo en la dirección donde sopla el viento (FAO, 1960). La altura y la densidad son las características más importantes de la cubierta vegetal desde el punto de vista de aspereza superficial (Wilson y Cooke, 1984).

La importancia de la protección que proporciona al terreno la vegetación, no puede ser sobrevalorada. Es el único método aplicable generalmente para un control permanente y efectivo (FAO, 1960; Chepil y Woodruff, 1963). Chepil (1944) reconoció el valor de los residuos de cosecha para controlar la erosión eólica y reportó relaciones cuantitativas. Zingg (1954) al reportar resultados de estudios de diferentes superficies, estableció que diferentes cantidades, tipos y orientaciones de residuos, eliminan del 5 al 95% de la fuerza directa del viento de la superficie inmediata.

En un estudio realizado por Chepil, Woodruff y Zingg (1955); citados por Skidmore (1979) el rastrojo de pie fue mucho más efectivo que el rastrojo extendido. El rastrojo de sorgo en pie con las hileras perpendiculares a la dirección del viento, controló mucho más efectivamente la erosión eólica, de como lo hicieron las hileras paralelas a la dirección del viento (Englehorn et al., 1952; Zingg et al., 1952; Skidmore et al., 1966).

Siddoway et al. (1965) cuantificaron las propiedades específicas de la cubierta vegetativa, que afectan la erodabilidad del suelo y relacionaron la pérdida de suelo por el viento con la cantidad, clase y orientación de las cubiertas vegetativas, velocidad del viento y ternosidad del suelo mediante

ecuaciones de regresión. De estos estudios derivó la relación desarrollada por Woodruff y Siddoway (1965), que muestra la influencia de un equivalente de cubierta vegetativa, del rastrojo de cultivos de grano pequeño y de sorgo, para varias orientaciones (extendido, de pie, altura), ellos relacionaron entonces la pérdida de suelo con el equivalente de cubierta vegetativa. Esos estudios demuestran que entre más erectos, más finos y más densos son los residuos, más pequeña es la cantidad de erosión (Chepil y Woodruff, 1963).

Tal vez las cubiertas vegetativas naturales son las más efectivas, las más fáciles y las más económicas de mantener en las áreas agrícolas. Los pastos y las leguminosas, son usualmente más efectivos una vez que son establecidos, ya que proporcionan una cubierta completa y densa (Chepil y Woodruff, 1963).

## 2) Terrones y fracciones no erosionables

En un suelo que contiene fracciones erodibles y no erodibles la erosión continúa hasta que cierto número de fracciones no erodibles se descubren y alcanzan una altura crítica que protege a las fracciones erodibles, entonces la erosión cesa. A este punto Chepil (1950a) le llamó constante de aspereza de superficie crítica (también llamada relación de barrera de superficie crítica) y es definido por Chepil y Woodruff (1963) como la distancia entre barreras no erodibles dividida por su altura. Sin embargo, esta situación puede alterarse al cambiar la dirección del viento (Wilson y Cooke, 1984).

## 3) Lomos o promontorios (rugosidad del suelo)

El efecto de los lomos de diferentes alturas y diferentes materiales, expuestos a diferentes velocidades de viento, fue estudiado por Armbrust et al. (1964), quienes encontraron que los lomos de 5.1 a 10.2 cm de altura, con una relación altura-espaciamiento de 1:4, se erosionaron menos debido a

que las partículas de suelo son atrapadas entre los lomos y a que disminuyen la velocidad del viento promedio. Los lomos menores de 5.1 cm de altura, no fueron tan efectivos en atrapar las partículas de suelo y reducir la velocidad del viento. En los lomos más altos de 10.2 cm se presentó una mayor erosión al aumentar la velocidad del viento en las crestas de los lomos, ya que éstas aumentan la turbulencia del viento. Finalmente concluyen, que la efectividad de los lomos para controlar la erosión por el viento, varía con su altura, grado de terronosidad y velocidad del viento.

#### 4) Barreras o cinturones de protección de campo contra el viento

Por lo general, se le considera cinturón de protección a una o varias hileras de árboles, a un seto, o ambos, aunque los principios del flujo del aire sobre éstos, pueden aplicarse a las cercas de varios materiales (cañas, ramas, etc.), muros e hileras o fajas de cultivos crecidos que protegen a otros más delicados (FAO, 1960; Chepil y Woodruff, 1963; Wilson y Cooke, 1984).

Hagen (1976) y Skidmore y Hagen (1977) proponen un modelo el cual, mostró la efectividad de las barreras contra el viento para reducir las fuerzas de la erosión eólica y dedujeron que: 1) Las barreras afectaron las fuerzas del viento más que la velocidad; 2) Una barrera convenientemente orientada (perpendicular a la dirección del viento), cuando los vientos predominan de una dirección particular, reducirán las fuerzas de erosión eólica más del 50% a una distancia de 20 veces su altura al sotavento de la barrera; y 3) La disminución es mayor a distancias más cortas de la barrera.

La efectividad de cualquier barrera para reducir estas fuerzas del viento depende de muchos factores, incluyendo la velocidad y dirección del viento, la forma, la anchura, la altura y la porosidad de la barrera (FAO, 1960;

Chepil y Woodruff, 1963).

La protección máxima de una barrera, es cuando su corte transversal es triangular hacia barlovento (Woodruff y Zingg, 1952). Es poca la protección adicional que se obtiene, aumentando la anchura de la barrera más allá de cinco hileras (Chepil y Woodruff, 1963). Hagen y Skidmore (1971) encontraron que la máxima reducción de la velocidad del viento a sotavento se logró con un 40% de porosidad en la barrera.

#### 5) Cambios locales en la topografía

Chepil et al. (1964a) observaron que en terrenos ondulados con pendientes menores de 150 m de longitud, la tasa de movimiento del suelo aumenta progresivamente, con el aumento de la pendiente y conforme se alcanza la cima de la loma. La tasa de erosión para pendientes a barlovento mayores de 150 m, es casi la misma que para los terrenos llanos.

#### 2.4. Ecuación de predicción de la erosión eólica

Chepil (1945); citado por Wilson y Cooke (1984) consideró que una ecuación para predicción de la erosión potencial de un campo agrícola individual sería una herramienta de medición muy útil, que haría posible que se hicieran predicciones de pérdida de suelo, se deseaba también que las variables en la ecuación pudieran manipularse a fin de controlar la erosión al nivel deseado. Es así como Chepil y sus colaboradores trataron de identificar y cuantificar los factores que influyen en la ubicación y las tasas de erosión del suelo por el viento (Wilson y Cooke, 1984), culminando con el desarrollo de una ecuación de la erosión eólica (Chepil y Woodruff, 1963; Woodruff y Siddoway, 1965), como resultado de casi 30 años de investigación.

La primera ecuación de predicción de erosión eólica, expresó la cantidad de pérdida de suelo en un túnel de viento como una función de la terronosi

dad del suelo, la cantidad de residuo superficial y la rugosidad superficial (Chepil y Woodruff, 1954). Esta ecuación fue modificada continuamente, a medida que algún nuevo dato, producto de la investigación, le imprimía mayor exactitud (Chepil y Woodruff, 1959; Chepil, 1959; Chepil, 1960; ARS-USDA, 1961), hasta llegar a ser una compleja ecuación que indica la relación entre la pérdida de suelo potencial de un terreno agrícola y algunas de las 11 variables individuales principales del clima y del terreno (Woodruff y Siddoway, 1965).

#### 2.4.1. Factores o parámetros de la ecuación

Woodruff y Siddoway (1965) encontraron conveniente despreciar, agrupar o convertir a equivalentes a algunas de las 11 variables principales como sigue:

Factores individuales principales:		Factores equivalentes:	
Erodabilidad del suelo	$I$	Erodabilidad del suelo	$I'$
Erodabilidad en colinas	$I_s$		
Estabilidad de la costra superficial	$F_s$	Se desprecia, se considera que la costra es transitoria	
Rugosidad del suelo	$K_r$	Factor rugosidad del suelo	$K'$
Velocidad del viento, Humedad superficial del suelo	$V$ $M$	Factor climático local,	$C'$
Distancia a través del terreno, Distancia protegida	$D_f$ $D_b$	Longitud equivalente del terreno	$L'$
Cantidad de cubierta vegetativa	$R$		
Clase de cubierta vegetativa	$S$	Cantidad equivalente de cubierta vegetativa	$V$
Orientación de cubierta vegetativa	$K_o$		

La ecuación de la erosión eólica puede ser expresada entonces como:

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

La cual nos dice que la pérdida de suelo anual potencial, E, expresada en toneladas por hectárea, es una función de los siguientes factores:

I' = erodabilidad del suelo,

C' = factor climático local,

K' = factor rugosidad del suelo,

L' = longitud equivalente del terreno (distancia desprotegida a través del terreno a lo largo de la dirección prevaeciente de la erosión eólica),

V = cantidad equivalente de cubierta vegetativa

El principio en que se basa esta ecuación, como podrá observarse, consiste en estimar ciertos parámetros y utilizar estos valores para estimar la erosión eólica. Por lo tanto, la exactitud de la ecuación dependerá de que los valores asignados a estos parámetros estén apegados a la realidad (Wilson y Cooke, 1984).

Erodabilidad del suelo, I'

La erodabilidad del suelo I', es la pérdida de suelo potencial de un campo extenso, aislado y sin ninguna protección, con una superficie desnuda y lisa. Este factor o parámetro se basa en las condiciones climáticas de los alrededores de Garden City Kansas, durante el período de 1954-1956. Los otros factores o parámetros de la ecuación alteran el valor de I', al modificar los datos de las condiciones con las cuales se calcula I' (Woodruff y Siddoway, 1965; Wilson y Cooke, 1984). El cálculo de I' se basa en varios estudios, Chepil (1950b) observó que la erodabilidad del suelo en el túnel de viento disminuía, al aumentar el porcentaje de fracciones secas del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro del peso total de la muestra. Este porcentaje se determina por un tamizado en seco estandarizado por Chepil (1962); citado por Chepil y Woodruff (1963). A fin de encontrar la relación que

existe entre la erodabilidad en un túnel de viento y la pérdida real de suelo, Chepil (1960b) llevó a cabo un estudio de campo con 69 terrenos en el área de Garden City, en el periodo de 1954-1956, y relacionó las pérdidas de suelo con la erodabilidad determinada para varias condiciones de campo. Puesto que el porcentaje de fracciones no erodables mayores de 0.84 mm de diámetro está directamente relacionado con la erodabilidad del suelo I, esta última se determina a partir de dicho porcentaje y usando el Cuadro 2.2. (Woodruff y Siddoway, 1965). También se puede hacer mediante los grupos de erodabilidad eólica de suelos, para los cuales se conoce el porcentaje aproximado de fracciones no erodibles, como se muestra en el Cuadro 2.3, estos grupos fueron definidos por el Soil Conservation Service en 1976, en base a la clase textural del suelo predominante en la capa superficial (citado por FAO, 1980 y por Kimberlin et al, 1977), pues como se mencionó anteriormente (punto 2.3.1,b), la textura está estrechamente relacionada con la cantidad de fracciones no erodables.

Si se presenta una colina en el terreno, cuya pendiente a barlovento sea menor de 150 m de longitud, la erodabilidad en colinas  $I_5$  (2.3.2,b.5) es un factor necesario, para hacer un ajuste a la erodabilidad I, la cual aumenta de valor tanto con la pendiente como con la posición en relación a la cima de la pendiente. Como se puede observar en la Figura 2.2.  $I_5$  se expresa en términos de porcentaje de la pérdida de suelo que ocurriría en un terreno plano (Woodruff y Siddoway, 1965).

Factor climático local,  $C'$

Chepil et al. (1962) desarrollaron un factor climático que se basa en el principio de que la tasa de movimiento del suelo varía directamente con el cubo de la velocidad del viento e inversamente con el cuadrado de la humedad

Cuadro 2.2. Erodabilidad del suelo I con diferentes porcentajes de fracciones no erodables determinado por un tamizado en seco estandard (Woodruff y Siddoway, 1965)\*.

Fracciones secas del suelo >0.84 mm (%)	UNIDADES									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Decenas	ton/ha/año									
0	---	696	561	494	438	404	382	359	337	314
10	301	294	287	281	272	263	254	245	238	229
20	220	213	207	202	198	193	186	182	177	171
30	166	162	159	155	150	146	141	139	135	130
40	126	121	117	115	112	108	106	101	97	92
50	85	81	74	70	65	61	56	54	52	49
60	47	45	43	40	38	36	36	34	31	29
70	27	25	22	18	16	13	9	7	7	4
80	4									

\*Para superficies del suelo completamente encostradas, sin importar la textura del suelo, la erodabilidad I, es en promedio cerca de 1/6 de la indicada.

BIBLIOTECA  
ESCUELA DE AGRICULTURA





Cuadro 2.3. Descripción de los grupos de erodabilidad eólica (GEE)

(Lyles, 1975, 1977; Kimberlin *et al.*, 1977).

GEE	Clase textural del suelo predominante en la capa superficial	% de agregados del suelo >0.84 mm	Erodabilidad del suelo "I" ton/ha/año
1	Arena muy fina, arena fina, arena media, o arena gruesa	1	696
		2	561
		3	494
		5	404
		7	359
2	Arena francosa, arena fina francosa	10	301
3	Franco arenoso muy fino, franco arenoso fino o franco arenoso	25	193
4	Arcillas, arcilla limosa, franco arcilloso y franco arcillo limoso no calcáreos con más del 35% de contenido de arcilla	25	193
4L	Franco y franco limoso calcáreos, franco arcillosos y franco arcillo limoso calcáreos con menos del 35% de contenido de arcilla	25	193
4	Franco y franco limoso no calcáreos con menos del 20% de arcilla, franco arcilloso arenoso, arcillo arenoso	40	126
6	Franco y franco limoso no calcáreos con más del 20% de arcilla, franco arcilloso no calcáreo con menos del 35% de arcilla	45	108
7	Limoso, franco arcillo limoso no calcáreo con menos del 35% de contenido de arcilla	50	85
8	Suelos muy mojados o muy pedregosos que no pueden cultivarse, donde la erosión eólica no es un problema	-	-

efectiva del suelo (2.3.2,a y 2.3.1,a). Ya que por lo general no se dispone de la humedad superficial efectiva, se usa el índice de efectividad de precipitación (P-E) de Thornthwaite (1931). Chepil et al. (1962) proponen la siguiente ecuación:

$$C = \frac{100}{2.9} \frac{V^3}{(10(P-E))^2} \quad (2)$$

donde:

C = factor climático anual (expresado como % del de Garden City, Kansas)

V = velocidad media anual del viento en millas/hr (a 9.1 m de alt.), y

10(P-E) = índice de efectividad de precipitación de Thornthwaite (adimensional), que se obtiene por:

$$115 \left( \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{P_i}{T_i - 10} \right)^{10/9} \right) \quad (3)$$

donde:

$P_i$  = La precipitación pluvial mensual (en pulgadas), y

$T_i$  = Temperatura mensual (°F)

El término  $100/2.9$  es utilizado para expresar a C como un porcentaje del valor anual medio de C (2.9) para Garden City, Kansas (Chepil et al., 1962; Wilson y Cooke, 1984).

Woodruff y Armbrust (1968) desarrollaron un factor climático mensual, mientras que Lyles (1983) propone un método de estimación de la distribución de energía del viento durante el año. Estos nos permiten hacer estimaciones más exactas de las fuerzas erosivas del viento, para aquellas épocas del año, en que la erosión eólica representa un mayor peligro. Chepil et al. (1963) desarrollaron un índice climático, basado en la humedad efectiva y en la velocidad del viento, para un período de tres años que finaliza el

31 de mayo y puede ser usado para predecir con un buen grado de certeza, la severidad de las condiciones de erosión eólica durante el año calendario sucesivo.

Factor rugosidad del suelo,  $K'$

Aquí se considera a la rugosidad superficial del suelo que no es causada por terrones o por vegetación, es decir, a la rugosidad natural o artificial de la superficie del suelo en la forma de lomos o pequeñas ondulaciones (punto 2.3.2,b.3), este factor se expresa en términos de lomos estándar del suelo, con una relación altura-espaciamiento de 1:4 (Woodruff y Siddoway, 1965). Para lomos muy espaciados (con una relación mayor de 1:4), su equivalente de rugosidad  $K_r$  es menor que su altura. Por ejemplo, si los lomos tienen 6 cm de altura y la distancia entre ellos, medida a lo largo de la dirección prevaleciente del viento, es de 48 cm, su relación altura-espaciamiento es 1:8, contra la relación 1:4 de los lomos estándar, de modo que su equivalente de rugosidad  $K_r$  es  $4/8$  de 6 cm, o sea 3 cm (Chepil y Woodruff, 1963). La Figura 2.3 presenta una curva para obtener el factor de rugosidad del suelo  $K'$ , a partir de  $K_r$ .

Longitud equivalente del terreno,  $L'$

La distancia a través del terreno, medida a lo largo de la dirección prevaleciente de las fuerzas de erosión eólica, cobra gran importancia por el efecto de avalancha, el cual se atribuye a diversas causas (punto 2.2.2,d). Chepil (1957d) señala que sobre un terreno desprotegido en erosión, la tasa de flujo de suelo es cero en la orilla a barlovento y se incrementa con la distancia hasta el sotavento, si el terreno es lo bastante grande el flujo alcanza un máximo que un viento de una velocidad particular puede sostener.

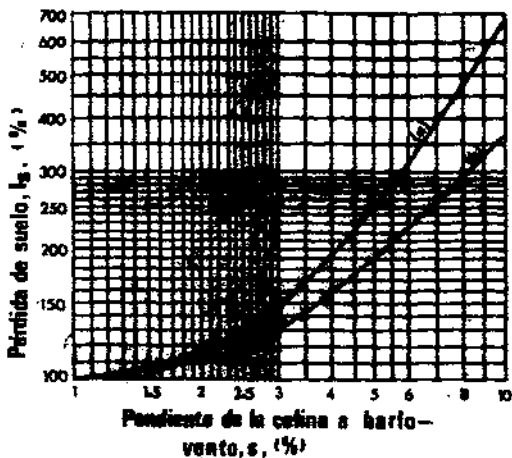


Fig. 2.2. Pérdida de suelo potencial en colinas, expresado como el porcentaje de lo que ocurrió en un suelo plano: (a) en la cima de la colina, (b) en el tercio más cercano a la cima (Chapin *et al.*, 1964; Woodruff y Siddoway, 1965).

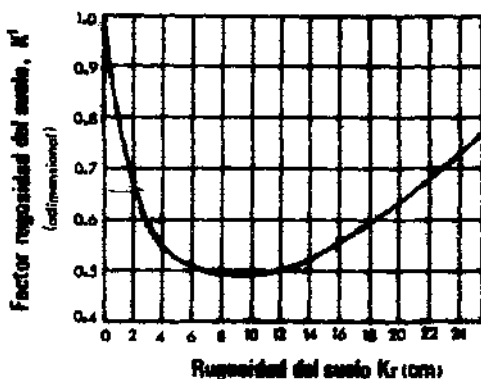


Fig. 2.3. Gráfica para determinar el factor de rugosidad del suelo  $K'$  a partir de la rugosidad del suelo  $K_r$  (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968).

La distancia requerida para que el flujo del suelo alcance este máximo en un suelo dado, es la misma para cualquier viento erosivo y varía única e inversamente con la erodabilidad de una superficie de terreno (Chepil, 1957d, 1959).

La anchura (o longitud) de un terreno o de una faja de terreno por sí sola no determina que tan erodible es el terreno, a menos que se tomen en cuenta la dirección prevaleciente del viento y la presencia o ausencia de barreras contra el viento (puntos 2.3.2,a y 2.3.2,b.4 respectivamente). Pues no importa que tan estrecha pudiera ser la faja de terreno si la dirección del viento es paralela a su longitud, la faja sería tan erodible como un terreno grande de un ancho igual a la longitud de la faja (Chepil y Woodruff, 1963). Chepil et al. (1964b) desarrollaron un método de cálculo de la dirección y velocidad del viento de diferentes direcciones, otro método más detallado (2.3.2,a) fue propuesto por Skidmore y Woodruff (1968). Así, conociendo la dirección prevaleciente del viento y con la anchura del terreno, podemos calcular la distancia a través del terreno a lo largo de la dirección prevaleciente del viento  $D_f$ , mediante el uso de la Figura 2.4 (Woodruff y Siddoway, 1965).

Si está presente alguna barrera sobre el lado a barlovento del terreno, la distancia,  $D_b$ , a lo largo de la dirección prevaleciente de la erosión efectiva que está completamente protegida del impacto del viento (aproximadamente igual a 10 veces la altura de la barrera), se debe restar de la distancia total,  $D_f$ , para determinar la distancia desprotegida a través del terreno a lo largo de la dirección prevaleciente de las fuerzas erosivas del viento (Chepil y Woodruff, 1963; Woodruff y Siddoway, 1965).

Cantidad equivalente de cubierta vegetativa,  $V$

Investigaciones llevadas a cabo por Siddoway et al. (1965) y Woodruff y Siddoway (1965), establecen que la efectividad de las cubiertas vegetativas para proteger al suelo superficial de la erosión por el viento, depende de su cantidad, clase y orientación (punto 2.3.2,b.1). Woodruff y Siddoway (1965) desarrollaron varias gráficas (Figuras 2.5, 2.6 y 2.7) en las que relacionan cantidades de residuos de diferentes clases y orientaciones, con la cantidad equivalente estándar de residuos de cultivo de grano pequeño, que tendría la misma efectividad para proteger al suelo de la acción del viento. El estándar es rastrojo de cultivo de grano pequeño colocado sobre el suelo y extendido con la paja alineada paralelamente con la dirección del viento sobre un suelo plano y en filas con 25 cm de separación a ángulos rectos (perpendiculares) a la dirección del viento. Craig y Turelle, 1964 (citados por Lyles et al. 1983) y Lyles y Allison (1980, 1981) también reportan datos para convertir varios cultivos a su equivalente de cultivo de grano pequeño. Las cantidades de residuo superficial son determinadas muestreando, limpiando, secando y pesando, de acuerdo con el procedimiento estandarizado del ARS (1962, citado por Woodruff y Siddoway, 1965).

#### 2.4.2. Relaciones entre variables

Las relaciones entre los factores de la ecuación son complicadas y aún no ha sido derivada una sola ecuación que exprese a  $E$  como una función de las cinco variables dependientes (Chepil y Woodruff, 1963; Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore, 1979). Así la ecuación es resuelta en los siguientes cinco pasos (Woodruff y Siddoway, 1965).

Paso 1. Determinación de la erodabilidad  $E_1 = I'$

Paso 2. Definir el efecto de la rugosidad,  $K'$ , y encontrar la erodabilidad  $E_2 = I'xK'$

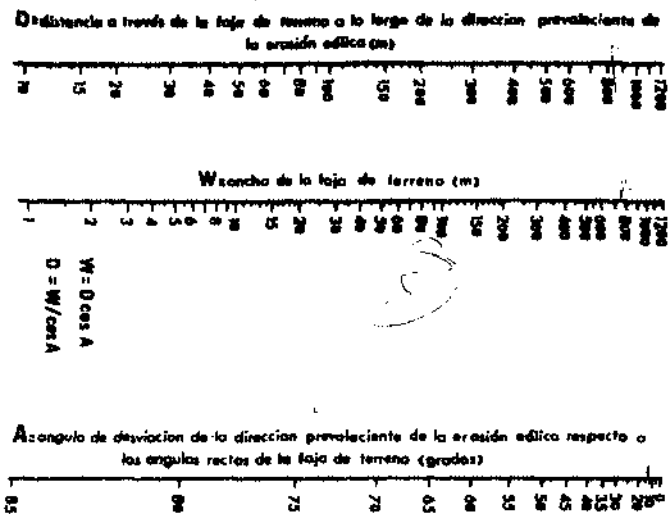


Fig. 2.4. Gráfica de dimensionamiento para determinar la distancia a través de la faja de terreno a lo largo de la dirección preva- lente de la erosión edáfica (Woodruff y Siddoway, 1963).

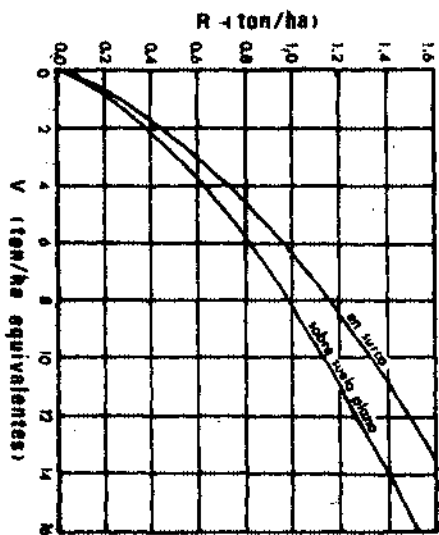


Fig. 2.5. Gráfica para determinar V de R de V de cultivos de grano pe- queño vivos o muertos en estado de vegetación y plantado sobre la superficie del suelo, para cultivos en surcos de 8 cm de profundi- dad (Woodruff y Siddoway, 1963; Siddoway y Woodruff, 1963).

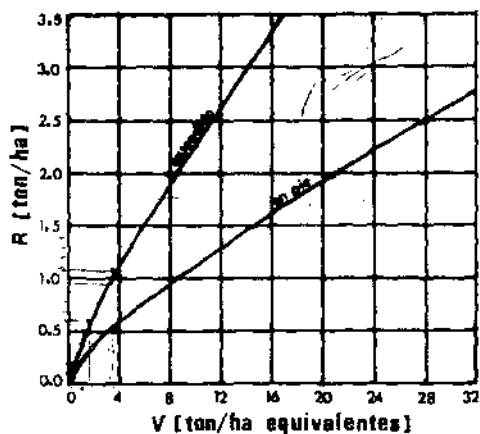


Fig. 2.6. Gráficas para determinar V de R o R de V de rastrojo de cultivos de grano pequeño en pie y extendido con cualquier ancho de hileras mayor de 23 cm de ancho -- Woodruff y Siddoway, 1963; Skidmore y Woodruff, 1968).

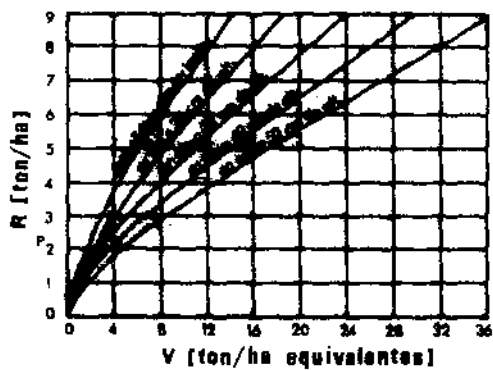


Fig. 2.7. Gráfica para determinar V de R o R de V de rastrojo de trigo en pie y extendido, con un tractor de tolles, felpaje y cantidad de plantas sobre el suelo, promedio (Woodruff y Siddoway, 1963; Skidmore y Woodruff, 1968).



- Paso 3. Cálculo del efecto de la velocidad del viento local y la humedad del suelo superficial,  $C'$ , y obtener la erodabilidad  
 $E_3 = I'xK'xC'$
- Paso 4. Valoración del efecto de la longitud del terreno  $L'$ , y encontrar  $E_4 = I'xK'xC'xf(L')$ . Esta determinación no es una simple multiplicación, porque  $L'$ ,  $I'K'C'$ , e  $I'K'$  están todas interrelacionadas. Este paso de la ecuación se resuelve con la Figura 2.8
- Paso 5. Determinación del efecto de la cubierta vegetativa,  $V$ , y estimar la erosión anual actual para un terreno específico,  
 $E_5 = E = I'xK'xC'xf(L')xf(V)$ . Aquí también las relaciones entre  $E_4$ ,  $V'$  y  $E$  no son simples, por lo que su solución también es gráfica (Fig. 2.9). Podemos ver un ejemplo del cálculo en el apéndice 1.

Debido a que se requieren muchas gráficas y tablas para resolver la ecuación Fisher y Skidmore (1970) y Skidmore et al. (1970) desarrollaron una solución computarizada, que mediante un programa resuelve la ecuación rápida y seguramente, y ha hecho más fácil (por su alta velocidad de cálculo) visualizar el problema a la inversa; es decir, uno puede especificar los límites tolerables de erosión y el programa nos determina las condiciones necesarias para controlar la erosión dentro de esos límites. También se ha construido una regla de cálculo para resolver la ecuación (Skidmore, 1983).

#### 2.4.3. Aplicaciones de la ecuación

La ecuación fue diseñada para servir de doble propósito pues es una herramienta para: 1) Determinar la cantidad de erosión esperada en ton/ha de un terreno particular, y 2) Determinar las condiciones de terreno de  $I'$ ,  $K'$ ,  $L'$  o  $V$  necesario para controlar la erosión a una cantidad tolerable (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore, 1979). La ecuación ha sido ampliamente usada para ambos propósitos en E.U.A. (Skidmore y Woodruff, 1968; Skidmore et al. 1970; Hayes, 1975, citado por Skidmore, 1979), ya que se utiliza tanto en inventarios de erosión eólica como en la planeación y aplicación de medidas para su control.

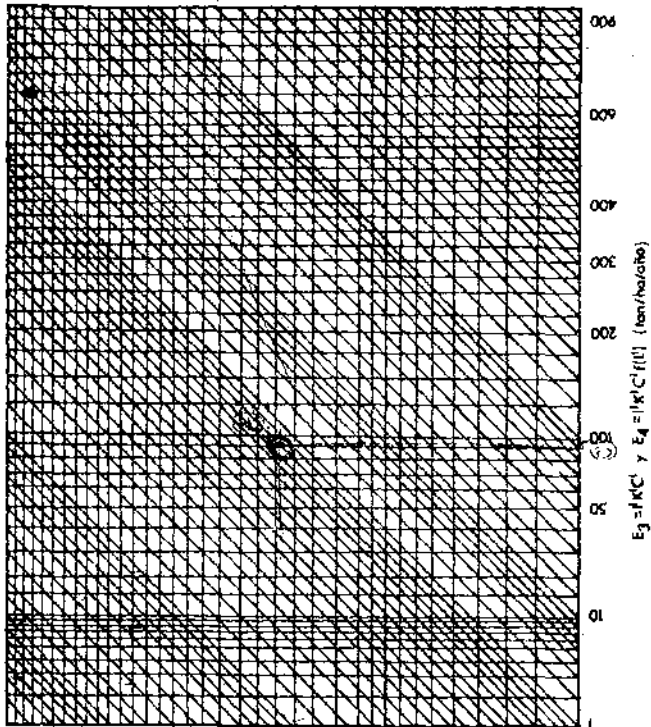
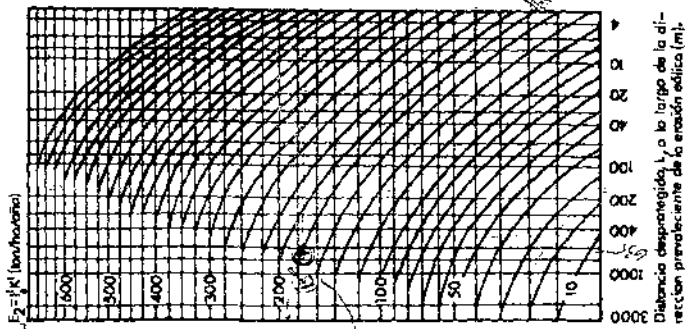


Fig. 2.8. Gráfica para determinar  $E_3 = f(K', C')$ ,  $E_3 = f(K', C')$  y la distancia desprotegida  $L$  a través del terreno (Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968).

22

22

22

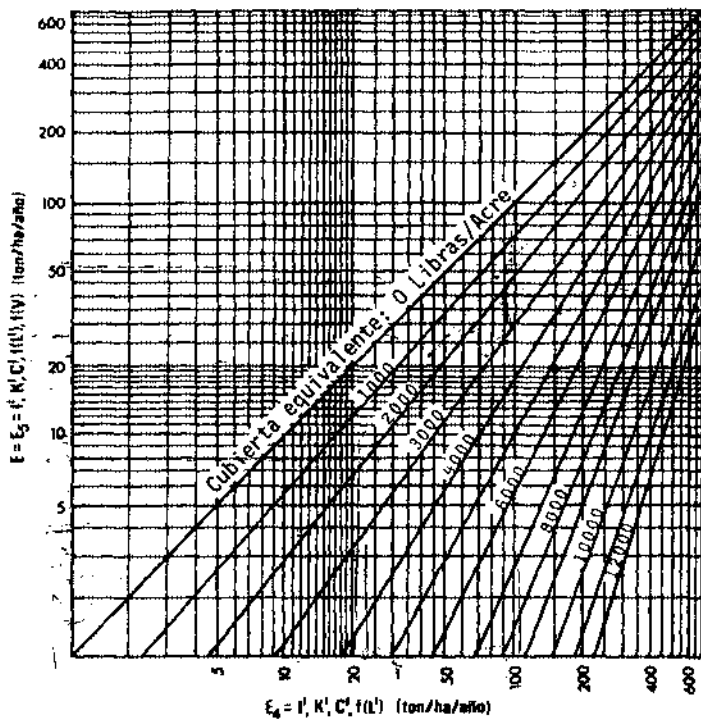


Fig. 2.R. Gráfica para determinar  $E_3 = E_4 = f(I, K, C), f(L), f(N)$  a partir de  $E_4 = f(I, K, C), f(L)$  y el factor de cubierta vegetativa  $V$  [Woodruff y Siddoway, 1965; Skidmore y Woodruff, 1968].

#### 2.4.4. Ecuación de erosión eólica propuesta por la FAO

Tomando en cuenta que la ecuación desarrollada por Woodruff y Siddoway (1965) se aplica a un terreno agrícola particular, la FAO (1980) propuso una ecuación de erosión eólica que se basa en la ecuación anterior, y por tanto, en los mismos principios, la cual se utiliza para áreas extensas, como un intento para evaluar la magnitud global de la degradación de los suelos. También se establecen dos tipos de evaluación: 1) Erosión eólica actual. Es la erosión que actúa en el momento presente, que se expresa como una tasa anual, es decir, como la intensidad del proceso y no como el daño acumulado desde el pasado hasta el presente; 2) Riesgo de erosión eólica (erosión potencial). Es el riesgo de que ocurra erosión bajo las peores condiciones posibles del uso del suelo y vegetación, puesto que el clima, el suelo y la topografía son relativamente estables. Esto se hace con el fin de a) crear una base para comparar áreas de tierras diferentes, y b) crear una base para evaluar los riesgos que se corren tan pronto como la vegetación natural o el uso de la tierra presentes cambien. Los modelos paramétricos empleados pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\text{Erosión eólica actual} = f(C, S, T, V, L) \quad (4)$$

$$\text{Riesgo de erosión eólica} = f(C, S, T) \quad (5)$$

donde:

C = factor de agresividad climática

S = factor suelo

T = factor topográfico

V = factor vegetación natural

L = factor uso de la tierra

Con esta ecuación se manejan los factores de una forma más sencilla, y sus valores están en razón inversa del grado de resistencia que confieren

respecto a la erosión eólica (con excepción del factor C), es decir, que cuanto mayor sea el factor numérico asignado, mayor será la erosión por viento calculado (FAO, 1980).

El procedimiento que se sigue para la determinación de dichos factores conforme a la FAO (1980) se indica más adelante en el capítulo de Materiales y métodos.

## 2.5. Principios del control de la erosión eólica

Dos principios generales de control de erosión por viento son evidentes:

1) Presentar una superficie con partículas suficientemente grandes, de modo que no ocurra la iniciación del movimiento, o 2) Proteger las partículas erosionables, reduciendo la fuerza ejercida sobre ellas (FAO, 1960; Lyles et al. 1983). También a partir del conocimiento de la mecánica del proceso de erosión eólica, se identifican cuatro principios específicos de control (FAO, 1960; Woodruff et al., 1977):

- a) Producir o traer a la superficie del suelo agregados o terrones, los cuales sean lo suficientemente grandes para resistir la fuerza del viento
- b) Volver rugosa la superficie del terreno para reducir la velocidad del viento y atrapar el suelo que es arrastrado
- c) Establecer barreras o fajas que sirvan de trampa a intervalos para reducir la velocidad del viento y el avalanchamiento del suelo
- d) Establecer y mantener vegetación o residuos vegetativos para proteger al suelo

Estos principios de control se aplican en cualquier lugar, pero la utilidad relativa de cada uno depende de las condiciones de clima, suelo y uso del suelo. Aunque la mayoría de los autores coinciden en señalar que el punto d) es la regla cardinal para el control de la erosión eólica.

## 2.5. Erosión permisible

Zachar (1982) menciona que la tasa de renovación del suelo (el manto de suelo originado y desarrollado bajo la influencia de los factores de formación del suelo actuando en forma natural), indica la tasa permisible de remoción del suelo desde el punto de vista de la conservación permanente del mismo. De hecho hay muchos casos en los cuales la tasa de formación del suelo es una meta teórica a ser obtenida aplicando medidas protectoras. El mismo autor indica que esta tasa no necesariamente es una meta a corto plazo; si el suelo ya está seriamente erosionado, puede ser aceptable un valor más bajo que la tasa de formación del suelo; también si al suelo lo forman grandes depósitos de sedimentos fértiles, puede ser tolerada una tasa de erosión más alta sin afectar considerablemente la fertilidad del suelo.

Según Zachar (1982) la tasa de formación de suelo, depende esencialmente del sustrato y sus propiedades. También indica que entre más delgada es la capa de suelo, más rápida es la formación del mismo y viceversa, estabilizándose esta relación a una profundidad de 20 a 30 cm donde son más atenuados los cambios en el microclima. Asimismo el clima y la vegetación también influyen.

Bennett (1955); citado por Zachar (1982), reportó tasas de formación de suelo con un sustrato rocoso, de 0.2 a 1.6 ton/ha/año, bajo condiciones de vegetación y protección del suelo muy favorables. La tasa promedio de renovación del suelo sobre la superficie entera de la tierra es de cerca de 1.2 ton/ha/año (Kukal, 1964; citado por Zachar, 1982). Zachar (1982) menciona ejemplos que muestran que altas tasas de formación de suelo variando de 6.3 a 13.4 ton/ha/año fueron encontradas sobre rocas disturbadas artificialmente, sobre rocas indisturbadas la formación de suelo no excedió de

1.0 ton/ha/año.

La tasa de erosión en la que se involucra la renovación del suelo por un lado, y la conservación de la fertilidad de éste al mismo nivel por el otro, es referida por Smith y Stamey (1964, 1965) como erosión permisible o tolerancia de erosión, y la calculan tomando en cuenta: a) El estado actual de las propiedades esenciales del suelo para su uso como bases de la erosión tolerante, b) Los requerimientos de las propiedades del suelo necesitadas para el futuro, c) Datos sobre la tasa de erosión (o intemperismo) estimada, de cada una de las propiedades del suelo consideradas, con el tiempo, y d) Datos sobre la tasa de renovación (o adición) estimada, de las propiedades del suelo consideradas con el tiempo. Este cálculo implica que entre más erosionado esté el suelo, más baja es la erosión permisible; también entre mayor es la profundidad del suelo y la calidad del sustrato, mayor es la tolerancia a la erosión. La elección de una su Jución particular dentro del rango de erosión de 0 a el límite superior de tolerancia, dependerá del factor económico. También mencionan que en EUA varios autores en diferentes regiones han calculado los niveles de erosión permisible y obtuvieron valores en el rango de 1.2 a 13.8 ton/ha/año.

### 2.7. Clasificación de la erosión del suelo por intensidad de remoción

El criterio más importante para clasificar la severidad de la erosión, en opinión de Zachar (1982), es la tasa a la cual está ocurriendo el daño o la destrucción del manto del suelo. En cuanto a valores cuantitativos, el mismo autor recomienda la clasificación de erosión por intensidad de remoción que se muestra en el Cuadro 2.4.

El Cuadro 2.5 nos muestra una clasificación de la degradación producida al suelo por la erosión eólica, la cual fue presentada por la FAO (1980).

Cuadro 2.4. Clasificación de la erosión por la intensidad de remoción del suelo (Zachar, 1982).

Grado	Intensidad de remoción del suelo mm/año	Ton/ha/año <sup>1/</sup>	Estimación verbal
1	<0.05	<0.65	Erosión insignificante
2	0.05 - 0.5	0.65 - 6.5	Erosión leve
3	0.5 - 1.5	6.5 - 19.5	Erosión moderada
4	1.5 - 5.0	19.5 - 65.0	Erosión severa
5	5.0 - 20.0	65.0 - 260.0	Erosión muy severa
6	>20	>260.0	Erosión catastrófica

<sup>1/</sup> Usando una densidad aparente de 1.3 ton/m<sup>3</sup>, correspondiente a un suelo de textura media.

Cuadro 2.5. Clases de degradación del suelo por erosión eólica (FAO, 1980).

Clases	Pérdida de suelo	
	t/ha/año	mm/año
Ninguna a ligera	<10	<0.6
Moderada	10 - 50	0.6 - 3.3
Alta	50 - 200	3.3 - 13.3
Muy alta	>200	>13.3





### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Descripción del área de estudio

##### 3.1.1. Ubicación

El área en la cual se llevó a cabo la presente evaluación corresponde al área de estudio del Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas del Colegio de Postgraduados de Chapingo (CREZAS-CP), cuyas instalaciones se encuentran ubicadas en Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. Esta área de estudio está limitada por los paralelos 21°45' y 23°30' latitud norte, y por los meridianos 101°00' y 102°40' longitud oeste (Figura 3.1). El número de hectáreas comprendidas por esta zona es de aproximadamente 3'000,000 (Cuadro 3.1), cuya superficie cubre parte de los estados de San Luis Potosí, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco y Guanajuato.

Cuadro 3.1. Superficie por estados del área de estudio (Aguirre *et al.*, 1982).

Estado	Superficie	
	Ha	%
San Luis Potosí	1'551,750	49.5
Zacatecas	1'182,375	37.6
Aguascalientes	267,275	8.5
Jalisco	109,000	3.5
Guanajuato	31,175	0.9
Total	3'141,575	100.0

##### 3.1.2. Clima

De acuerdo con la carta de climas (escala 1:1'000,000) del Atlas Nacional del Medio Físico editado por la SPP (1981) en el área predominan los subtipos de climas: BS<sub>1</sub>kw semiseco templado y BS<sub>0</sub>kw seco templado, en

102° 40'

101° 00'

23° 30'

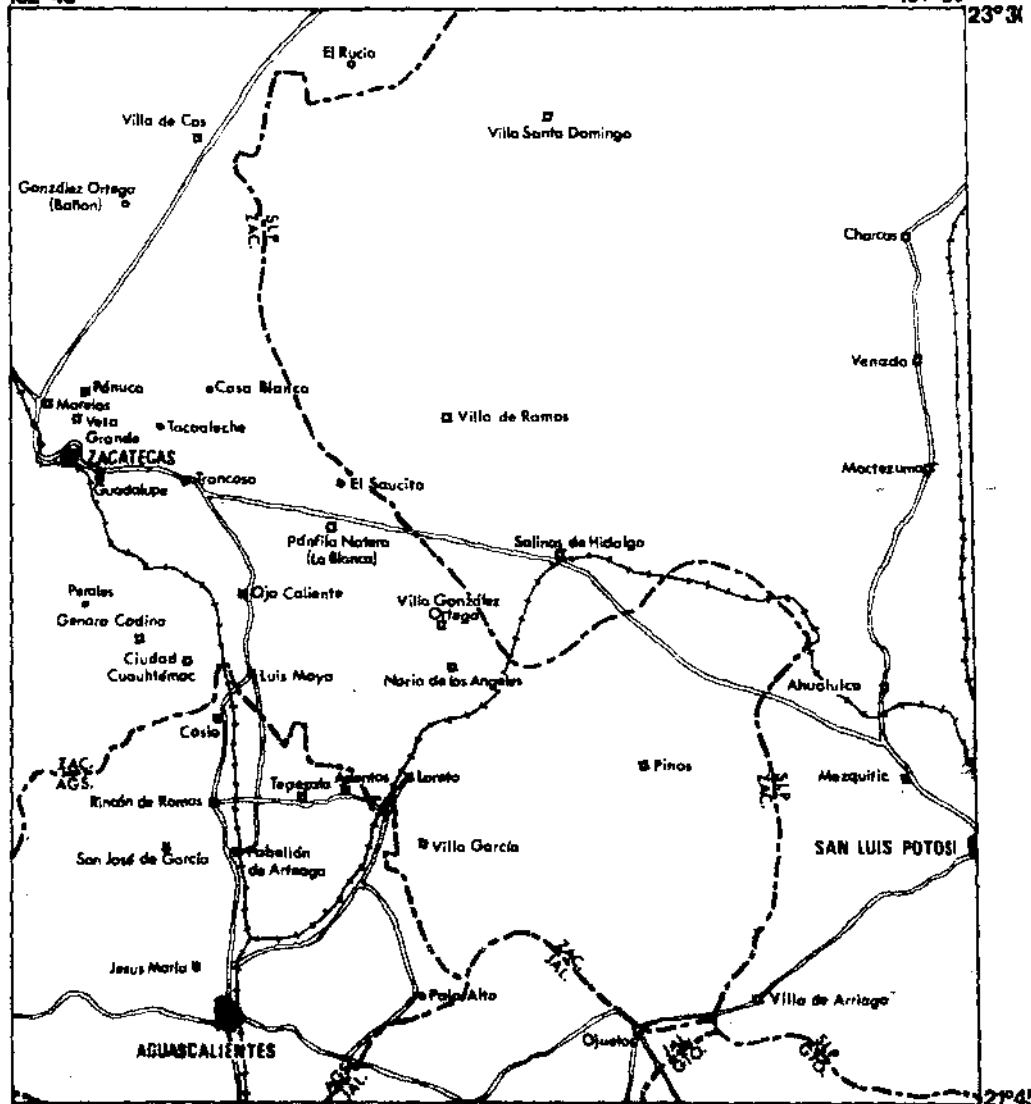


Fig. 3.1. Localización del área de estudio. CREZAS-CP, 1986.

ambos, la mayor parte de las lluvias se presentan en verano y el porcentaje de precipitación invernal va de 5 a 10.2, también son templados con verano caliente, cuya temperatura media anual es entre los 12 y 18°C y la del mes más caliente es sobre los 18°C. En esta misma carta se muestra que la mayor parte del área, con excepción de una parte del oeste, presenta la condición de canícula, es decir, una pequeña temporada menos lluviosa dentro de la estación de lluvias. Según García E. (1973) en casi la totalidad del área, la oscilación anual de las temperaturas medias mensuales es extremosa (entre 7 y 14°C). En algunas regiones de Aguascalientes se presenta un clima BS<sub>1</sub>hw(w)(e) con una temperatura media anual entre los 18 y 22°C y la del mes más frío bajo 18°C.

#### a) Precipitación

En la carta de precipitación total anual, a escala 1:1'000,000, de la SPP (1981) se nota una clara tendencia de la precipitación a ir disminuyendo conforme se avanza hacia el norte. Así, la precipitación total anual que predomina en la parte sur del área de estudio (punto 3.1.1.), es de los 400 a los 500 mm, mientras que en la parte norte de la misma, las precipitaciones que prevalecen van de los 300 a los 400 mm anuales. Aunque en la región suroeste imperan las precipitaciones anuales de 500 a 600 mm, y únicamente en una región muy pequeña al norte del área, ésta disminuye hasta los 165 mm.

#### b) Temperatura

Conforme a la carta de temperaturas medias anuales (escala 1:1'000,000) de la SPP (1981), se puede considerar que en casi la totalidad del área dominan las temperaturas de los 16 a los 18°C, excluyendo a la región de Zaca-tecas, Zac., y su alrededor, donde la temperatura media anual desciende hasta los 13.5°C. Así como una estrecha franja al este del área (la región de

Moctezuma y Venado) donde la temperatura media anual es de 18 a 20°C.

Existe una relación entre la frecuencia de heladas y la altitud. En las partes bajas solamente se presentan unas pocas, alcanzando 50 o más en las partes más altas, sin embargo, esto se ve afectado apreciablemente por factores topográficos. La evaporación anual en el área varía de 2,000 a 3,000 mm (medida directamente en tanques abiertos), esto deriva un cociente aproximado de precipitación/evaporación de 0.1 a 0.2. Por lo general la humedad atmosférica es baja, presentándose promedios anuales de 50% o menos, sin embargo como consecuencia de los bruscos cambios de temperatura, el fenómeno de rocío no es raro y las heladas casi siempre son acompañadas de escarcha (Rzedowski, 1957).

#### c) Vientos

La influencia del sistema general de la circulación de la atmósfera desempeña un papel muy importante tanto en el régimen pluvial como en el térmico. Por lo que el régimen termopluiométrico dependerá directamente de la época en que se presenten estas corrientes, de su frecuencia y de su intensidad (Marroquín et al., 1964; Espinoza, 1966).

Sobre el Altiplano se deja sentir el efecto de los vientos alisios del este, los cuales son de origen marítimo y aunque originalmente son calientes y húmedos, casi siempre aparecen con muy poca humedad en la zona, puesto que la condensación ocurre en Veracruz y las Huastecas. Traspasada la Sierra Madre Oriental, se ven muy disminuidas las precipitaciones hacia el interior de la Altiplanicie; de esta manera, el Altiplano Potosino queda sujeto al efecto de sombra orográfica y su aridez es manifiesta (Marroquín et al., 1964; Espinoza, 1966).

Por otra parte, la corriente de los alisios provenientes del occidente

son secas al entrar a la costa del Pacífico, producen algunas lluvias con forme el relieve lo permite, en la vertiente del oeste de la Sierra Madre Occidental, y cuando estas corrientes alcanzan la Altiplanicie, se vuelven secas, complementando así los efectos secantes de las corrientes de oriente. Esto explica la aridez del centro de Zacatecas y partes occidentales de San Luis Potosí (Velázquez, 1962; Marroquín et al, 1964).

Los vientos de origen Continental provenientes del Norte (seca y fría), constituyen la última aportación atmosférica que dejan llevar sus efectos en la parte norte de San Luis Potosí y Zacatecas (Velázquez, 1962; Marroquín et al, 1964).

Además, la región cuenta como característica propia con vientos locales que se presentan en días calurosos en las llanuras del Noreste de la región, en forma de remolinos de convección que se elevan a grandes alturas (Velázquez, 1962; Rzedowski, 1965).

Espinoza (1966) menciona que los vientos dominantes registrados en las estaciones termo-pluviométricas, reportan en los meses de enero a abril, vientos con una velocidad de 8 m/s, para la región de Zacatecas. En tanto que Rzedowski (1965) señala que en la parte occidental del Altiplano Potosino, soplan fuertes corrientes de aire durante un período de 30 a 60 días que incluye por lo general, el mes de febrero. Son vientos secos que llevan en suspensión gran cantidad de partículas de tierra y presentan ciertos rasgos de las tempestades de arena de tipo desértico.

### 3.1.3. Orografía

El área de estudio forma parte de la Altiplanicie Mexicana y está situada en el extremo sur de su parte septentrional o Altiplano Septentrional (Tamayo, 1949; citado por Rzedowski, 1957). Rzedowski (1957) asevera que aproximada

mente el 65% de las partes áridas de San Luis Potosí y Zacatecas, está ocupada por terrenos planos o con poca pendiente, en forma de valles generalmente alargados en el sentido N-S.

Las serranías más importantes dentro de la zona de estudio son las barrancas de "milpillitas" y "las lecheras" que se localizan en la parte SW del área, entre Zacatecas y Aguascalientes y la sierra de "San Miguelito" que se encuentra al SE del área, al W y S de San Luis Potosí, SLP. (de acuerdo a la carta topográfica escala 1:1'000,000 de la SPP, 1981).

Las serranías en general no llegan a grandes alturas, el sitio más alto se presenta en la barranca "las lecheras" al SW del área, con 3050 msnm (carta Hipsográfica escala 1:1'000,000 de la SPP, 1981). Precisamente esta parte del área (según Rzedowski, 1957) es la más alta en promedio. Las partes más bajas se localizan hacia la parte Este del área, al Norte de la ciudad de San Luis Potosí (carta topográfica e hipsográfica escala 1:1'000,000 de la SPP, 1981) y se puede apreciar en forma general (en las mismas cartas) que la parte Sur del área es más montañosa y a medida que se va hacia el Norte, ésta se vuelve una planicie. La carta hipsográfica escala 1:1'000,000 (SPP, 1981) nos muestra que casi la totalidad del área se encuentra sobre los 2,000 m de altura snm.

#### 3.1.4. Hidrografía

Las condiciones de precipitación deficiente e irregular que prevalecen en las regiones áridas de Zacatecas y San Luis Potosí, de acuerdo a Velázquez (1962) dan como resultado la inexistencia de corrientes de cauce importante que modificaran el relieve. Hidrológicamente se trata de una área fundamentalmente endorréica, con escasez de vías fluviales y carencia de corrientes permanentes, dividida en un gran número de pequeñas cuencas que cuentan con corrientes intermitentes, las cuales depositan sus aguas en lagunas también

efímeras, localizadas en las partes más bajas. Existen también cauces que se van perdiendo a través de "bajfos" dejando infiltrar el volumen de sus aguas y rara vez son tributarios de ríos de mediana importancia (Rzedowski, 1957; Velázquez, 1962).

### 3.1.5. Geología

De acuerdo a la carta geológica (esc. 1:1'000,000) de la SPP (1981), en el área de estudio predominan los suelos formados en el período Cuaternario de la era Cenozoica. Con excepción de las partes SW y SE del área en que prevalecen las rocas ígneas extrusivas ácidas, las cuales se extienden desde Zacatecas hasta el sur del área, esto en el SW, en el SE, se presenta una franja con este material, que va desde Pinos, Zac., hasta San Luis Potosí, SLP, y otra que inicia un poco al sur de Moctezuma, SLP, hasta la parte norte de Guanajuato comprendida en el área. Las partes donde se presentan las rocas ígneas extrusivas ácidas, corresponden a las zonas más montañosas del área de estudio (3.1.3). Le siguen en importancia los conglomerados (rocas sedimentarias) del período Terciario del Cenozoico, las que se localizan en la parte Sur y Este de Aguascalientes, Ags., así como al Norte de San Luis Potosí, SLP, hasta Charcas, SLP.

También se presentan las calizas, lutitas y areniscas (rocas sedimentarias) del Cretácico Inferior (la primera) y Superior (las últimas) de la era Mesozoica, las cuales se encuentran en forma aislada con mayor frecuencia en la parte NE del área.

Rzedowski (1957) y Velázquez (1962) consideran que las rocas sedimentarias predominan en las partes áridas de San Luis Potosí y Zacatecas.

### 3.1.6. Suelos

Ortiz Monasterio (1957); citado por Velázquez (1962), distribuye en orden

de importancia por su extensión, las siguientes categorías de suelos que se presentan en la zona de estudio: Semidesérticos y Desérticos (Sierozem) que abarcan el N de la región, o sea, N y NE de San Luis Potosí y Zacatecas respectivamente; Castaños (Chesnut) al SW de San Luis Potosí y SE de Zacatecas; Suelos negros (Chernozem) al sur de la región y por último aunque en poca extensión Suelos Complejos de Montaña, en las regiones montañosas de ambos estados.

Por otro lado, de acuerdo a las cartas edafológicas (para el área de estudio) de CETENAL (1972b); citadas por Aguirre et al., (1982), las unidades de suelo predominantes, las constituyen los litosoles éutricos con un 54.5%, los xerosoles háplicos con el 11.6% y los fluvisoles cálcicos con 6.5%.

De 55 muestras de suelo de la región árida de San Luis Potosí y Zacatecas, analizadas por Velázquez (1962) se encontró que el pH en la mayoría de los casos (excepto cuatro casos con material de origen ígneo) alcanzan valores de 7 a 8.7, y él lo atañe a que se trata de una zona donde predomina la roca caliza, que por su solubilidad facilita la formación de carbonatos.

### 3.1.7. Vegetación

La vegetación de las partes áridas de San Luis Potosí y Zacatecas, como lo observan Rzedowski (1957) y Velázquez (1962), ha desarrollado adaptaciones morfológicas y fisiológicas a fin de resistir a las condiciones de aridez (de clima y de suelo principalmente). Esta vegetación va cambiando cualitativa y cuantitativamente al variar la intensidad de la aridez climática (Rzedowski, 1957). Así tenemos que en condiciones menos áridas en las partes más altas del SW y SE del área de estudio, se presentan algunos bosques de pino y/o encino (carta de vegetación y uso del suelo esc. 1:1'000,000 de la SPP, 1981).

Rzedowski (1957) y Velázquez (1962) mencionan que el factor edáfico (en



las partes áridas de San Luis Potosí y Zacatecas) es el más importante en la distribución de la vegetación, dejando a la precipitación pluvial en segundo término, teniendo poca influencia la temperatura.

Los principales tipos de vegetación que se presentan dentro de la zona de estudio según la carta de vegetación y uso del suelo esc. 1:1'000,000 de la SPP (1981) están formados por matorral desértico (predominantemente micrófilo) con un 47.2%, las nopaleras con 14.4%, el pastizal natural con el 12.6% y los bosques con 2.4% (los porcentajes son según Aguirre et al, 1982). Como se observa, la vegetación dominante consiste de matorrales, predominando elementos arbustivos bajos, de tipo xerofítico, en su mayoría espinosos, de hoja pequeña, carnosa o ausente que comúnmente dejan entre sí amplios espacios de suelo desnudo y de una composición a primera vista monótona (Rzedowski, 1957; Velázquez, 1962).

En las zonas más áridas con suelos calizos predomina el matorral desértico micrófilo, cuyas principales especies corresponden a los géneros Larrea, flourensia, Opuntia y Prosopis, que ocupan la parte aluvial del terreno, llanuras y valles, formando estratos arbustivos con folíolos reducidos desde 50 cm hasta 3.00 m, en suelos con una capa de "caliche" generalmente a unos cuantos centímetros de profundidad (Velázquez, 1962).

En el matorral crasicaulo existe una abundancia de cactáceas con tallos cilíndricos o aplanados (nopaleras y cardonales), principalmente de los géneros Opuntia y Myrtillocactus. Esta vegetación se encuentra donde prevalece el substrato riolítico, ocupando laderas de cerros y abanicos aluviales, aunque se le puede encontrar en llanuras contiguas de suelos rojos bien drenados (Rzedowski, 1957; Velázquez, 1962).

El matorral desértico rosetófilo se caracteriza por la dominancia de espe

cies en que la disposición de sus hojas, semejan una forma de roseta. Esta se desarrolla en laderas de cerros calizos, margas y areniscas. También ocupa las partes superiores de los abanicos aluviales contiguos a los mismos cerros y en ocasiones desciende a terrenos de poca pendiente, gravosos y con fragmentos de roca. Los géneros más importantes son: Agave, Hechtia y Euphorbia (Rzedowski, 1957).

El pastizal natural (zacatal) se caracteriza por la dominancia de especies herbáceas graminoides generalmente cespitosas. Principales géneros: Bouteloua, Muhlenbergia, Sporobolus, Hilaria, Lycurus y Heteropogon (Secretaría de Recursos Hídricos, 1971).

### 3.1.8. Características sociales

Las ciudades importantes se encuentran en los límites del área y la parte norte está escasamente habitada, existen municipios cuya densidad de población es menor de dos personas por km<sup>2</sup>, esto hace que las vías de comunicación sean en general deficientes (Rzedowski, 1957).

Velázquez (1962) señala que dentro de las actividades que realiza la población rural del área, se cuenta a la producción de cosechas, la cual cobra importancia en el sur de la región y algunas áreas cercanas a Zacatecas, Zac. Otra de las actividades consiste en la ganadería, de la cual el 33% lo constituye el ganado caprino (Aguirre et al., 1982) tan importante en esta zona que llega a desplazar a la producción de cosechas a un segundo término, sobre todo en las partes más áridas (al norte del área). También la minería es una actividad de cierta importancia en la región (Rzedowski, 1957; Velázquez, 1962).

Estos mismos autores observan que cuando las condiciones en la zona árida no son ventajosas para la producción de cosechas y la ganadería, queda como

último recurso la recolección de plantas silvestres. Por lo que encontramos poblaciones en zonas desérticas cerriles, en cuyo alrededor no encontramos áreas de cultivo y en donde existen plantas de valor económico. También concluyen que la población rural de la zona obtiene sus ingresos en forma alternativa o simultánea, dedicándose a la producción de cosechas, ganadería, minería, recolección de plantas silvestres y trabajos eventuales en otras regiones.

### 3.2. Ecuaciones paramétricas utilizadas

En este trabajo se llevó a cabo la evaluación del riesgo de erosión eólica (erosión eólica potencial), así como de la erosión eólica actual, mediante el uso de dos ecuaciones paramétricas, una de ellas propuesta por la FAO (1980), en una metodología provisional para evaluar la degradación de los suelos (ver punto 2.5), y otra que fue publicada por Woodruff y Siddoway (1965) discutida en el punto 2.4. Las condiciones en que se aplicó cada ecuación se especifican a continuación.

#### 3.2.1. Modelo paramétrico propuesto por la FAO

Con esta ecuación (punto 2.5) se llevó a la práctica la evaluación de la erosión eólica actual y potencial, para el área de estudio comprendida por el CREZAS-CP (punto 3.1.1). Las ecuaciones (4) y (5) expuestas en el punto 2.5, muestran los parámetros que intervienen en cada una de estas evaluaciones y la determinación y obtención de la información necesaria para ello, se señalan en cada factor por separado.

Para estas evaluaciones, la FAO (1980) propone cuatro escalas cartográficas (a los niveles: general "S", regional "M", detallado "L" y muy detallado "D") y de acuerdo al nivel de la evaluación, es la precisión y la cantidad de los datos requeridos. Por esta razón y en vista de los datos disponibles,

se decidió realizar estas evaluaciones al nivel general "5", cuya escala cartográfica es de 1:1'000,000 o más pequeñas (en el presente trabajo, la evaluación se realizó a una escala de 1:1'000,000).

a) Factor de agresividad climática, "C"

Se calculó la agresividad climática únicamente para aquellas localidades que cuentan con datos del viento. Dentro del área de estudio, únicamente tres observatorios meteorológicos cuentan con registros de velocidad y dirección del viento (mediante el uso de anemocinemógrafos), los cuales se encuentran en las orillas de las ciudades de Aguascalientes, Aqs., San Luis Potosí, SLP, y Zacatecas, Zac. También, con la finalidad de poder extrapolar resultados, se calculó la agresividad climática de algunas localidades circundantes a nuestra área de estudio que cuentan con observatorio meteorológico, y por lo tanto, con la información necesaria sobre el viento. Estas localidades fueron: Durango, Dgo., Guadalajara, Jal., Guanajuato, Gto., Monterrey, N.L., Río Verde, SLP, Saltillo, Coah., y Torreón, Coah.

El cálculo de este factor se realizó mediante una forma modificada del índice eólico de Chepil et al. (1962) propuesta por la FAO (1980) para la evaluación a nivel general, como se muestra a continuación:

$$C = \frac{1}{100} \frac{V^3}{P} \left( \frac{PET-P}{PET} \times n \right) \quad (6)$$

donde:

V = velocidad media mensual del viento a 2 m de altura, m/s

P = precipitación pluvial, mm

PET = evapotranspiración potencial de Penman, mm

n = número de días del mes

→ V mensual  
diario

$$\frac{PET-P}{PET} \times n = \text{número de días en que hay erosión por mes}^{1/}$$

En las áreas regadas:

Q = agua proporcionada mediante el riego

$$\text{Si } P+Q = PET, \text{ entonces; } \frac{PET-(P+Q)}{PET} \times n = 0; \text{ luego } C = 0$$

Se utilizó el método de Penman modificado de evapotranspiración (Doorenbos y Pruitt, 1980) sin hacer la corrección por el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), para considerarla como la evapotranspiración potencial. La fórmula de la ecuación utilizada en este método es la siguiente:

$$ET = c(w.Rn + (1-w) \cdot f(v) \cdot (ea-ed))$$

en donde:

ET = evapotranspiración (no ajustada y por lo tanto considerada como potencial), en mm/día.

c = factor de corrección para aquellas condiciones que no sean las representativas, adimensional.

w = factor de ponderación relacionado con la temperatura, adimensional.

Rn = es la radiación neta en equivalente de evaporación, mm/día.

f(v) = es la función relacionada con el viento, adimensional

(ea-ed) = es la diferencia entre la presión saturante del vapor a la temperatura media del aire y la presión real del vapor medio del aire, ambas en milibares.

<sup>1/</sup> Se supone que el número de días en que hay erosión es proporcional a  $\frac{PET-P}{PET}$  veces el número total de días del mes.

Los datos utilizados diariamente se aplican como valor diario medio y se presentan el promedio de esos datos en el período considerado que suele ser un mes o 10 días (en nuestro caso, el cálculo se realizó para cada mes del año).

El registro que se hace de la velocidad del viento es a diferente altura, en cada uno de los observatorios requeridos (en todos los casos fue a una altura mayor de 7 m), por lo que fue necesario corregir las velocidades del viento a una altura de 2 m, como es indispensable para el cálculo de la evapotranspiración potencial y la agresividad climática. Esta corrección se realizó tomando como base los factores de corrección de la velocidad del viento a diferentes alturas, para convertirlas a una altura de 2 m, propuestos en este método de Penman modificado (Doorenbos y Pruitt, 1980). Todas las correcciones que se hicieron para transformar las velocidades del viento a diferentes alturas, se realizaron en base a estos factores de corrección.

Se muestra en el Apéndice 2 un formulario del cálculo.

La FAO (1980) hace una clasificación de las valoraciones del factor de agresividad climática "C", como se muestra en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Clasificación de las valoraciones del factor "C". FAO (1980).

Clasificación	Valor de "C" (adimensional)
Ninguna a ligera	0 - 20
Moderada	20 - 50
Alta	50 - 150
Muy alta	>150

Los datos necesarios para hacer la determinación de C, por medio de las ecuaciones anteriores, son los siguientes:

- velocidad media mensual del viento, corregida a 2 m de altura, m/s.
- precipitación pluvial por mes, mm.
- temperatura máxima y mínima diaria, °C.
- humedad relativa máxima y mínima diaria, %.
- altitud, msnm.
- latitud, en grados y minutos.
- insolación (hr) o nubosidad (en oktas) diaria, y
- relación de vientos diurnos/vientos nocturnos, adimensional.

Para las localidades que se encuentran dentro del área de estudio (Ags., SLP, y Zac.), todos los datos requeridos fueron obtenidos directamente de los registros de datos de sus respectivos observatorios meteorológicos. La información originada de los demás observatorios fue recabada en las oficinas del Servicio Meteorológico Nacional, en la ciudad de México, DF, con excepción de los datos de precipitación que se obtuvieron de García, E. (1973) y de la relación de vientos diurnos/vientos nocturnos, que debido a que su cálculo lleva mucho tiempo y por razones prácticas, se consideró en los cálculos el valor promedio de los valores obtenidos en los observatorios meteorológicos de las ciudades de Ags., SLP, y Zac., para dicha relación.

#### b) Factor suelo, "S"

La determinación de la influencia que tiene el factor suelo sobre las tasas de erosión eólica, se realizó tomando como base la textura del suelo superficial. Puesto que existe una correlación entre la textura del suelo y lo que se denomina "grupos de erodabilidad eólica" (ver cuadro 2.3), estas correlaciones fueron utilizadas por la FAO (1980), para formular las valoraciones expuestas en el Cuadro 3.3, las que se aplican a las evaluaciones a un nivel general "S".

Se consideró que era algo muy rígido determinar cuando un suelo es calcáreo o no calcáreo, por lo que se trató de ser un poco más flexibles, dando

Cuadro 3.3. Valoraciones para el factor suelo "S" adimensional. FAO (1980).

Textura del suelo	1 (Gruesa)	2 (Media)	3 (Fina)
Suelo no calcáreo	3.5	1.25	1.85
Suelo calcáreo	3.5	1.75	1.85
Suelos pedregosos o guijarrosos	1.75	0.62 no calcáreo 0.87 calcáreo	0.92

valoraciones intermedias a aquellas valoraciones para suelos calcáreos y no calcáreos, para cuando el suelo secundario o terciario de la unidad cartográfica de suelos son calcáreos, estos valores fueron de 1.42 y 1.58 respectivamente. Esto se hizo tomando en cuenta que aunque el suelo dominante de la unidad cartográfica de suelos no sea calcáreo, si el suelo secundario o terciario son calcáreos, éstos fungen como focos de dispersión de la cal ( $\text{CaCO}_3$ ), perjudicando también a las áreas adyacentes (ver punto 2.3.1.d).

Se consideró que un suelo es calcáreo cuando la subunidad de la unidad de suelo fue cálcica o calcárica, las cuales se caracterizan por el alto contenido de cal ( $\text{CaCO}_3$ ).

Toda la información referente a textura del suelo, unidades cartográficas de suelos con unidades de suelos calcáreos o no calcáreos, suelos pedregosos o guijarrosos, se obtuvo de la carta edafológica a una escala de 1:1'000,000, contenida en el Atlas Nacional del Medio Físico, editado por la SPP (1981).

#### c) Factor topográfico, "T"

El efecto del factor topográfico (el equivalente de la erodabilidad en colinas "Is" de la otra ecuación paramétrica) sobre las tasas de erosión



eólica, no tiene mucha importancia, a no ser por sus efectos en la velocidad del viento (FAO, 1980), por lo que no se le tomó en cuenta para la ecuación a nivel general "S". Así, se puede suponer que las valoraciones para todas las formas topográficas son igual a 1.

d) Factor vegetación natural, "V"

La determinación del efecto de protección que tiene el factor de vegetación natural sobre la erosión del suelo por el viento, para una evaluación al nivel seleccionado, la FAO (1980) propone el uso de la siguiente serie de valoraciones (Cuadro 3.4) para tipos de vegetación natural muy generales, y para diferentes porcentajes de cubierta vegetal.

Cuadro 3.4. Valoraciones del factor vegetación natural "V" adimensional. FAO (1980).

Tipo de vegetación	Porcentaje de cubierta					
	0-1	1-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Estepa (sin árboles)	1.0	0.7	0.5	0.3	0.15	0.05
Sabanas con árboles	1.0	0.7	0.4	0.25	0.10	0.03
Bosque sabanero	1.0	0.6	0.3	0.2	0.10	0.01
Monte alto	0.9	0.5	0.3	0.15	0.05	0.001

Los diferentes tipos de vegetación y su extensión, se tomaron de la carta de uso del suelo, de la SPP (1981), cuya escala es de 1:1'000,000. Los porcentajes de cubierta de los diferentes tipos de vegetación que existen en el área de estudio, se extrajeron de trabajos auspiciados por el CREZAS-CP, realizados en el área de influencia del mismo (trabajos no publicados).

e) Factor uso del suelo, "L"

Uso del suelo, en este caso se refiere a las diferentes tierras o sistemas de cultivos y la valoración de la influencia que tiene este factor en el movi

miento de las partículas por la acción del viento, también se realizó tomando como base las valoraciones consideradas por la FAO (1980), para una evaluación a nivel general "5", las que se muestran en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Valoraciones del factor uso del suelo "L" (adimensional). FAO (1980).

Sistema de cultivo	Valoración
Cultivos anuales de período vegetativo corto	0.7
Cultivos de áreas tropicales húmedas	0.4
Cultivos de regadío	0.2

Los tipos de agricultura que se practican en el área (aquellos por su extensión son significativas a una escala 1:1'000,000), y el área que abarcan, se obtuvieron de la misma carta utilizada en el factor anterior.

### 3.2.2. Ecuación paramétrica desarrollada por Woodruff y Siddoway

Se hizo uso de esta ecuación (ver punto 2.5), para realizar una evaluación de la erosión eólica actual y potencial, considerando a estas dos evaluaciones como lo hace la FAO, o sea, que para estimar la erosión eólica potencial, únicamente se modificará el factor de erodabilidad del suelo con el factor climático local, el cual la podrá aumentar o disminuir, según que la agresividad climática sea mayor o menor que aquella de Garden City, Kansas, ya que tanto el factor de erodabilidad del suelo como el climático, se consideran relativamente estables (FAO, 1980). Así, los demás factores se consideran en las peores condiciones, como aquellas con que se calculó la erodabilidad, "I" (ver punto 2.4.1.a), es decir, para un terreno extenso, con una superficie lisa y desprovista de vegetación. Para la evaluación de la erosión eólica actual, además de modificar el valor de la erodabilidad

del suelo con el factor climático local, también se modifica al considerar los factores restantes que son la rugosidad superficial del suelo, la longitud del terreno y la vegetación.

La evaluación de la erosión eólica potencial se realizó en el área comprendida entre los paralelos 22°30' y 23°00' Latitud Norte, y los meridianos 101°40' y 102°40' Longitud Oeste. Esta área forma parte del área de estudio del CREZAS-CP y es cubierta por las cartas (a una escala de 1:50,000); F-13-B-58 y 59, F-14-A-51, F-13-B-68 y 69, y F-14-A-61 de CETENAL (1971a), las cuales corresponden a Zacatecas, Zacatón, Villa de Ramos, Guadalupe, Ojo Caliente y Salinas de Hidalgo, respectivamente. Estas cartas se ubican en el límite de los estados de Zacatecas y San Luis Potosí. La erosión eólica actual se estimó para los terrenos cultivados que se encuentran dentro de dicha área.

La ecuación (1) dentro del punto 2.4.1, nos muestra los parámetros involucrados en la estimación de la erosión eólica actual (o en su defecto, la erosión potencial, al considerar únicamente los factores "I" y "C"). La determinación de estos factores se efectuó de la siguiente manera:

a) Erodabilidad del suelo, I'

La erodabilidad del suelo I' (ver punto 2.4.1.a), correspondiente a las unidades de suelo reportadas en las cartas edafológicas (escala 1:50,000) de CETENAL (1971a) para el área ya mencionada (con excepción de dos unidades de suelo que ocupan una superficie muy pequeña), se determinó a partir del porcentaje de agregados secos del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro y con el Cuadro 2.2. Este porcentaje fue obtenido en un trabajo de tesis (por publicarse) anterior al presente trabajo y realizado en esta misma Institución de investigación (CREZAS-CP), por el pasante de Ing. Agr. Héctor Manuel

Tovar soto, y el cual lleva por título: "Erosión eólica, una medición de campo" (como se verá más adelante, dicho trabajo servirá de base para la evaluación de las dos ecuaciones paramétricas utilizadas en este estudio).

El procedimiento seguido por él en esta determinación, consistió en obtener un determinado número de muestras del suelo superficial (a 5 cm de profundidad), de acuerdo a la superficie ocupada por cada unidad de suelo en el área considerada, para después obtener el porcentaje promedio de agregados del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro de las muestras, para las diferentes unidades de suelo.

Ya con estos porcentajes y utilizando el Cuadro 2.2 dentro del punto 2.4.1.a, se pudo determinar la erodabilidad,  $I$ , en toneladas/hectárea, de las diferentes unidades de suelos.

Debido a que la erodabilidad en colinas,  $I_s$  (ver punto 2.4.1.a), se considera para un terreno en particular y por la extensión del área en que se efectuaron estas evaluaciones, se hizo la suposición, con fines prácticos, de que todos los terrenos son planos, de tal forma que  $I$  no es modificada por  $I_s$ , y por lo tanto  $I = I'$ .

b) Factor climático local,  $C'$

En el punto 2.4.1.b, se hace mención de este factor y en el mismo se presentan las ecuaciones (2) y (3) que fueron utilizadas para la determinación de este parámetro. Al igual que el factor de agresividad climática utilizado por la ecuación de la FAO (1980), se calculó el factor climático local,  $C'$ , tanto para Aguascalientes, San Luis Potosí y Zacatecas, que se localizan dentro del área de estudio del CREZAS-CP, como para Durango, Dgo., Guadalajara, Jal., Guanajuato, Gto., Monterrey, NL, Río Verde, SLP, Saltillo y Torreón, Coah., manejando datos de sus respectivos observatorios meteorológicos.

gicos. Esto con la finalidad de poder realizar extrapolaciones de los factores climáticos locales resultantes. Una vez hecho ésto se toman solamente los valores del factor climático del área en que se llevó a cabo esta evaluación.

Los datos requeridos para la determinación de este parámetro mediante el uso de estas ecuaciones son los siguientes:

- velocidad media anual de viento corregida a 9.1 m de altura, millas/hr
- precipitación pluvial mensual, pulgadas
- temperatura media mensual, °F

La obtención de esta información, así como la corrección de la velocidad media anual del viento, de la altura del anemocinemógrafo de cada observatorio meteorológico, a la altura de 9.1 m, como lo exige la ecuación (2), ya se mencionó anteriormente en el punto 3.1.1.

### c) Factor rugosidad del suelo, $K'$

En el área en que se realizó esta evaluación se acostumbra preparar los terrenos con un barbecho y un paso de rastra. Lo que trae como consecuencia que dejan un suelo muy mullido y casi sin lomos o pequeñas ondulaciones que le confieran al terreno cierto grado de aspereza o rugosidad superficial, sino que más bien se forman pequeños cortes en el suelo producidos por los discos de las rastras, los cuales crean bordos muy pequeños con una altura efectiva que va de 1 a 5 cm aproximadamente, dependiendo de varios factores (por ejemplo el tipo de suelo y la humedad). Por tal razón y considerando la escala utilizada en la evaluación, se tomó el promedio de estas alturas (3 cm) como la altura de lomos. Por otra parte, la distancia que existe entre estos pequeños bordos corresponde a la separación de los discos de la rastra que es de 22 cm aproximadamente. Esta sería la distancia efectiva si los

lomos estuvieran ubicados perpendicularmente a la dirección prevaleciente del viento, más, si tomamos en cuenta que las operaciones de labranza se realizan en el sentido del largo del terreno con el fin de facilitarlas, y que los terrenos no tienen alguna orientación específica, los lomos pueden quedar a un ángulo que va de 0 a 90° con respecto a la dirección prevaleciente del viento, independientemente de cuál sea esta dirección, es decir, pueden quedar desde perpendiculares a esta dirección hasta paralelos (en este último caso se consideraría que no existen lomos en el terreno). Por tal motivo se eligió la distancia que hay entre los lomos tomando en cuenta una desviación de 45° con respecto a la dirección prevaleciente del viento.

Es así como con los datos derivados de estas suposiciones ya podemos calcular el equivalente de rugosidad  $K_r$  (ver punto 2.4.1.c), y partiendo de este valor de  $K_r$ , se obtiene el valor del factor de rugosidad del suelo  $K'$ , utilizando para ello la gráfica que se presenta en la Figura 2.3.

Las áreas de cultivo fueron consideradas tomando como base las cartas de uso del suelo de CETENAL (1971b, 1972), a una escala 1:50 000 que cubren el área evaluada con esta ecuación.

#### d) Longitud equivalente del terreno, $L'$

Como ya se hizo notar en el punto 2.4.1.d, la tasa de flujo de suelo se incrementa con la distancia hasta el sotavento y si el terreno es grande, el flujo alcanza un máximo. La distancia requerida para alcanzar este flujo máximo es aproximadamente de 65 m para el suelo más erodible y unos 900 m para el suelo menos erodible (Wilson y Cooke, 1984).

Puesto que el área en que se plasmó esta evaluación es muy extensa, este dato carece de valor práctico, debido a la imposibilidad de conocerlo para cada terreno así como a los problemas de escala cartográfica y de mapeo que

se tendrían. Por lo anterior y considerando los fines prácticos que persi que este estudio, se hizo la suposición de que todos los terrenos son lo su ficientemente grandes para que la tasa de flujo de suelo alcance un máximo.

De acuerdo a las condiciones en que se calculó la erodabilidad,  $I'$ , de los suelos (ver punto 2.4.1.a), específicamente en lo que a extensión del terreno se refiere (en terrenos amplios), este factor no altera el valor de  $I'$  puesto que no modifica dicha condición. Por lo anterior, este factor no afectará en los cálculos de la erosión eólica actual.

e) Cantidad equivalente de cubierta vegetativa,  $V$

Los residuos de cosecha (rastrajos) son muy apreciados en esta zona pues constituyen una de las pocas fuentes de forraje para la alimentación del ganado, esto ocasiona que los productores de la región únicamente dejen rastros de estos residuos sobre la superficie del terreno. Además, esta pequeña cantidad de residuos que podría tener algún efecto protector contra los vientos erosivos, se ve completamente reducida al ser sepultada a través de las operaciones de labranza.

Por tal motivo, este factor que al igual que el anterior, no altera el valor de  $I'$ , puesto que no modifica la condición (una superficie desnuda) con la cual se calculó dicho valor, no afectará en el cálculo de la erosión eólica actual.

### 3.3. Estimación de la erosión eólica actual y potencial mediante el uso de las ecuaciones paramétricas a evaluar

Una vez obtenidas las valoraciones para cada uno de los parámetros que toman parte en cada una de las dos ecuaciones empleadas, se procedió a estimar la erosión eólica actual y potencial para las áreas ya mencionadas anteriormente (ver puntos 3.2.1 y 3.2.2), aplicando dichas ecuaciones como se

muestra a continuación.

a) Aplicación del modelo paramétrico de la FAO

Las ecuaciones propuestas por la FAO (1980) para estimar la erosión eólica actual y el riesgo de erosión eólica (erosión eólica potencial), son las siguientes:

$$\text{Erosión eólica actual} = f(C, S, T, V, L)$$

$$\text{Riesgo de erosión eólica} = f(C, S, T)$$

donde:

C = factor de agresividad climática

S = factor suelo

T = factor topográfico

V = factor vegetación natural

L = factor uso de la tierra

Como ya se mencionó anteriormente en el punto 2.5, la relación entre las variables o parámetros de estas ecuaciones es lineal, de tal forma que el resultado se obtiene mediante la simple multiplicación del valor de los parámetros implicados.

b) Aplicación de la ecuación de la erosión eólica de Woodruff y Siddoway

La otra ecuación utilizada para estimar la erosión eólica actual y potencial desarrollada por Woodruff y Siddoway (1965), es la siguiente:

$$\text{Erosión eólica actual} = f(I', C', K', L', V)$$

donde:

I' = Erodabilidad del suelo,

C' = Factor climático local,

K' = Factor rugosidad del suelo,

L' = Longitud equivalente del terreno,

V = Cantidad equivalente de cubierta vegetativa.



Aunque la erosión estimada con esta ecuación es llamada por Woodruff y Siddoway como la pérdida de suelo anual potencial, se le considera como erosión eólica actual de acuerdo a los conceptos de la FAO (ver punto 2.5). Asimismo, de acuerdo al concepto que tiene de erosión eólica potencial (riesgo de erosión eólica), ésta se calculó como sigue:

$$\text{Erosión eólica potencial} = f(I', C')$$

donde:

$I'$  = Erodabilidad del suelo, y

$C'$  = Factor climático local

Las relaciones entre las variables o parámetros de estas ecuaciones (ver punto 2.4.2) es lineal con excepción de los dos últimos factores ( $L$  y  $V$ ), cuya relación es más complicada. Así tenemos que los tres primeros pasos para resolver la ecuación, son simples multiplicaciones, expresando a  $C'$  como porcentaje relativo y los dos últimos se resuelven mediante el uso de gráficas. Como ya se señaló anteriormente (puntos 3.2.2.4 y 3.2.2.5) los dos últimos factores ( $L$  y  $V$ ) no afectarán en el cálculo de la erosión eólica actual, por consiguiente, la resolución de la ecuación de la erosión eólica, tanto de la actual como de la potencial, consistirá únicamente de multiplicaciones.

#### 3.4. Elaboración de los mapas de la erosión eólica actual y potencial

Se formó un mapa para cada uno de los parámetros de ambas ecuaciones, conteniendo las valoraciones de dichos parámetros para toda el área en que se aplicó cada una de las ecuaciones. Después, el procedimiento consistió en sobreponer (en un aparato de transposición) los mapas con las valoraciones de los primeros dos parámetros, lo cual nos dará como resultado un nuevo mapa con las valoraciones derivadas de la multiplicación de los valores de dichos

parámetros. Este mapa es, de hecho (para ambas ecuaciones), el mapa de la erosión eólica potencial (o riesgo de erosión) ya que el factor topográfico en la ecuación del riesgo de erosión eólica de la FAO, tiene una valoración de 1 para todas las formaciones topográficas (ver punto 3.2.1.3), y por lo tanto, no afecta en el cálculo.

Para obtener el mapa de erosión eólica actual con la ecuación de la FAO, es necesario todavía, transponer el mapa con las valoraciones de vegetación y uso del suelo. En cambio, con la ecuación de Woodruff y Siddoway, únicamente se necesita multiplicar los valores del mapa de la erosión eólica potencial por el factor de rugosidad del suelo (el cual se supone igual para toda el área en que se aplica esta ecuación) y se obtiene así, el mapa de la erosión eólica actual, el cual será igual que el anterior pero con diferentes valores.

Como ya se señaló con anterioridad, el mapa elaborado usando la ecuación de la FAO, se realizó sobre la base de una escala de 1:1'000,000, para lo cual se utilizaron las cartas de dicha escala, del Atlas Nacional del Medio Físico de la SPP (1981). Y para el mapa formado utilizando la otra ecuación, se ejecutó sobre la base de una escala de 1:50 000, sirviéndose para ello de las cartas de esta escala de la CETENAL (1971a, 1971b y 1972). Con la finalidad de incluir este último mapa en el presente trabajo, se redujo después a una escala más práctica (aunque se pierden algunos detalles) de 1:500 000.

### 3.5. Evaluación de las ecuaciones paramétricas utilizadas

Finalmente, ya que se tienen los resultados de las estimaciones de la erosión eólica, se verificará la evaluación de las ecuaciones contempladas, tomando como base el trabajo de tesis ya mencionado (ver punto 3.2.2.1), realizado en esta Institución de investigación (CREZAS-CP) por el Pas. de Ing.

Agrónomo Héctor Manuel Tovar Soto, que lleva por título "Erosión eólica, una medición de campo" (en prensa), en el cual llevó a cabo una medición directa de la erosión eólica durante la época ventosa del año de 1983, utilizando el método de varillas y rondanas. Esta medición la realizó en tres localidades diferentes no muy distantes entre sí, sobre terrenos preparados con arado y rastra de discos, como se acostumbra en la región.

Estas localidades corresponden a Pánfilo Natera (La Blanca), El Saucito y Ojo Caliente, las tres en Zacatecas, para las cuales reporta pérdidas de suelo en ton/ha/época de vientos, de 149.6, 64.7 y 51.7 respectivamente.

La evaluación de las ecuaciones consistió en comparar los resultados de la erosión eólica actual estimada para estas localidades, con ambas ecuaciones y apuntar con cuál de las dos ecuaciones se obtienen resultados más semejantes a los encontrados por medición directa en dichas localidades.



#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Ecuación paramétrica de la FAO

Las valoraciones obtenidas en el área de estudio de cada uno de los parámetros involucrados en esta ecuación se dan a continuación:

##### 4.1.1. Factor de agresividad climática, "C"

Puesto que el cálculo que se hizo del factor de agresividad climática para las localidades circundantes a nuestra área de estudio (ver punto 3.2.1.a) únicamente fue para poder extrapolar los resultados y ver la tendencia de este factor, sólo se presenta la información recabada (y la que se deriva de esta información), de las localidades ubicadas dentro del área de estudio (Aguascalientes, Ags., Zacatecas, Zac., y San Luis Potosí, SLP, que se encuentra en el límite oriental del área).

En el Cuadro 4.1, se da a conocer la localización geográfica de cada una de las localidades a las que se les determinó el factor de agresividad climática.

En el Cuadro I del Apéndice se muestran los datos climáticos recabados, necesarios para calcular la evapotranspiración potencial de las tres localidades. En este cuadro podemos observar que las temperaturas en Aguascalientes y San Luis Potosí es prácticamente la misma, mientras que en Zacatecas es muy baja y los meses más calurosos en las tres localidades corresponden a mayo y junio. También se hace notar que la humedad relativa en general es baja y es muy semejante en las tres localidades, presentándose en los meses de febrero a junio los valores más bajos del año. En cuanto a velocidad del viento, se nota una clara diferencia entre las tres localidades, siendo la localidad de Zacatecas donde se presentan los vientos más intensos, mientras que en el área de Aguascalientes, éstos son muy bajos. Los meses de febrero,

Cuadro 4.1. Localización geográfica de las localidades en que se determinó el factor de agresividad climática "C". CREZAS-CP. 1985.

Localidad	Latitud N	Longitud W	Altitud msnm	"C"
Aguascalientes, Ags.*	21°53'	102°08'	1 979	7.6
Durango, Dgo.	24°01'	104°40'	1 889	59.5
Guadalajara, Jal.	20°41'	103°20'	1 520	3.4
Guanajuato, Gto.	21°01'	101°15'	2 037	12.5
Monterrey, NL.	25°40'	100°18'	538	5.1
Río Verde, SLP.	21°56'	100°00'	991	11.1
Saltillo, Coah.	25°25'	101°00'	1 589	50.7
San Luis Potosí, SLP.*	22°09'	100°58'	1 877	68.1
Torreón, Coah.	25°33'	103°26'	1 137	9.6
Zacatecas, Zac.*	22°47'	102°34'	2 612	230.4

\* Localidades que se ubican dentro del área de influencia del CREZAS-CP.

marzo y abril son los más ventosos para San Luis Potosí y Zacatecas, en tanto que en Aguascalientes, los vientos más intensos ocurren en el mes de septiembre. En el mismo cuadro se aprecia que las horas diarias de fuerte insolación son mayores en el área de Aguascalientes y menores en Zacatecas, siendo los meses de febrero a junio, los meses del año con mayor insolación en las tres localidades. Por último, se advierte que la relación de vientos diurnos/vientos nocturnos presenta valores más altos para la localidad de Aguascalientes a diferencia de Zacatecas que presenta los valores más bajos y donde los vientos nocturnos llegan a ser más intensos que los vientos diurnos en gran parte del año.

La evapotranspiración potencial calculada así como los datos de precipitación pluvial y la velocidad media del viento (ahora en m/s), indispensables para la determinación del factor de agresividad climática, se dan a conocer

en el Cuadro 4.2. Se observa en este cuadro una evapotranspiración potencial alta en las tres localidades, la cual es un poco mayor en la región de San Luis Potosí y en las tres localidades los mayores valores se presentan en los meses de marzo a junio. También se aprecia una precipitación pluvial muy deficiente en toda la zona, siendo el área de San Luis Potosí la más afectada, en todos los casos los meses con una precipitación pluvial muy escasa corresponden a los primeros meses del año y en especial el mes de marzo. Las velocidades del viento son las mismas que se muestran en el Cuadro 1 del Apéndice, únicamente cambias las unidades y su comportamiento ya se indicó anteriormente.

El Cuadro 4.3, presenta los valores del factor de agresividad climática para los tres lugares en que se calculó y en el cual se puede observar una diferencia muy marcada entre los valores que alcanza este factor en cada una de las localidades. Así, tenemos que conforme a la clasificación de las valoraciones de este factor "C" sugerida por la FAO (1980), los valores que se muestran para Aguascalientes, Ags., San Luis Potosí, SLP y Zacatecas, Zac., corresponden a una agresividad climática clasificada como ninguna a ligera, alta y muy alta, respectivamente (ver punto 3.2.1.a). También se distingue que un alto porcentaje de esta agresividad del clima ocurre en los meses de febrero, marzo y abril en toda la zona estudiada, aunque por la región de Aguascalientes, Ags., en el mes de septiembre alcanza su mayor intensidad.

Finalmente, con la extrapolación de estos resultados (junto con los obtenidos para las localidades circundantes al área de estudio), se formó el mapa que se muestra en la Figura 4.1, en el cual se dejan ver las líneas que unen los puntos con igual valor de agresividad climática. Estas líneas curvas nos permiten ver que la agresividad del clima es mucho menor en la parte sur del área, y que esta agresividad se va incrementando de sur a norte y de este a

Cuadro 4.2. Datos climáticos de tres localidades del área de estudio, necesarios para la determinación del factor de agresividad climática "C". CREZAS-CP. 1985.

LOCALIDAD	AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm)<sup>1/</sup></b>														
Aguascalientes, Ags.	-	100	131	177	189	201	182	176	174	168	140	106	92	1,835
San Luis Potosí, SLP.	-	98	131	205	220	229	199	179	180	135	139	109	91	1,916
Zacatecas, Zac.	-	100	132	192	196	189	174	126	135	114	130	121	103	1,713
<b>PRECIPITACION PLUVIAL (mm)</b>														
Aguascalientes, Ags.	34	15.6	7.5	4.8	13.5	15.2	83.7	103.4	118.2	94.8	39.5	10.5	12.4	519.1
San Luis Potosí, SLP.	7	24.3	10.3	4.5	22.6	44.8	27.8	60.9	49.0	44.9	27.9	5.3	33.2	355.5
Zacatecas, Zac.	49	12.5	6.6	4.8	6.7	16.7	78.7	96.2	99.1	85.0	37.3	15.4	9.9	469.0
<b>VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO (m/s)<sup>2/</sup></b>														
Aguascalientes, Ags.	3	1.3	1.5	1.5	1.2	1.4	1.0	1.3	1.3	2.2	1.1	1.2	1.5	1.4
San Luis Potosí, SLP.	6	2.7	2.9	3.6	3.5	3.1	2.9	2.8	2.8	2.1	2.1	2.1	1.9	2.8
Zacatecas, Zac.	5	4.6	4.9	5.8	5.0	3.8	3.3	3.5	3.2	3.3	3.5	4.0	4.3	4.1

<sup>1/</sup> El número de años de los datos con que se calculó fue variable dentro de una misma localidad.

<sup>2/</sup> A una altura de 2 m.

Cuadro 4.3. Factor de agresividad climática "C" (adimensional) para tres localidades del área de estudio. CREZAS-CP. 1985.

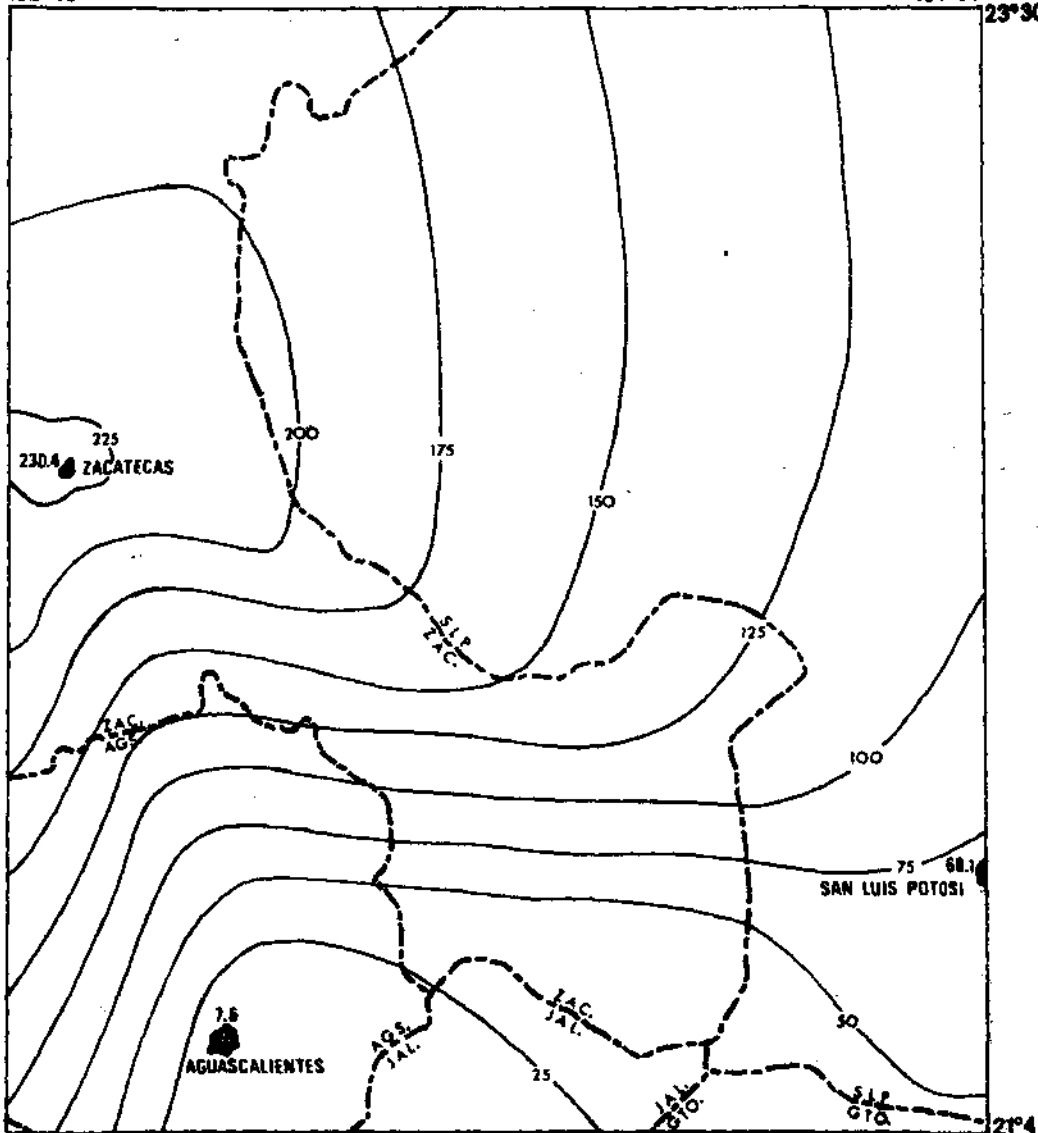
LOCALIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
Aguascalientes, Ags.	0.6 (7.5)	0.9 (12.0)	0.9 (12.0)	0.5 (7.0)	0.8 (11.2)	0.3 (3.7)	0.3 (3.5)	0.2 (2.9)	1.4 (18.0)	0.3 (4.4)	0.4 (6.4)	0.8 (10.9)	7.6 (100.0)
San Luis Potosí, SLP.	4.7 (6.9)	6.3 (9.2)	14.0 (20.6)	11.4 (16.7)	7.5 (11.0)	6.2 (9.1)	4.5 (6.7)	5.0 (7.4)	1.9 (2.8)	2.2 (3.3)	2.8 (4.1)	1.4 (2.1)	68.1 (100.0)
Zacatecas, Zac.	25.7 (11.2)	31.2 (13.5)	58.4 (25.3)	37.0 (16.1)	15.6 (6.8)	6.2 (2.7)	3.2 (1.4)	2.7 (1.2)	2.8 (1.2)	9.5 (4.1)	16.2 (7.0)	21.7 (9.4)	230.4 (100.0)

\*Los valores entre paréntesis expresan el porcentaje del valor anual.

102°40'

101°00'

23°30'



Kilometros



Fig. 4.1. Factor agresividad climática "C" (adimensional) para el área de estudio. CREZAS-CP. 1985.



oeste, de tal forma que en la región de Zacatecas, Zac., encontramos el valor más alto para este factor.

#### 4.1.2. Factor suelo, "S"

Las valoraciones obtenidas para este factor en el área de estudio se dan a conocer en el mapa de la Figura 4.2. Del cual se desprende que estas valoraciones caen dentro del rango de valores más bajos para este factor (ver punto 3.2.1.b), que corresponde a los suelos de textura media, misma que domina completamente (a la escala de 1:1'000,000) en el área de estudio. También se aprecia que los valores más bajos del factor suelo, dentro del área estudiada, se localizan en la parte sur y suroeste de la misma, que corresponden a las unidades cartográficas de suelos en que ninguno de los suelos dominantes es calcáreo y éstos pueden ser pedregosos y no pedregosos (0.62 y 1.25 respectivamente). Por otro lado, en el resto del área predominan las unidades cartográficas de suelos, donde alguno de los suelos dominantes es calcáreo, las cuales toman los valores de 1.75, 1.58 y 1.42, según que el suelo calcáreo sea el dominante, el secundario o el tercero en importancia, respectivamente. Las unidades cartográficas de suelos que se presentan en el área en mayor proporción corresponden a aquellas unidades en que ninguno de los suelos dominantes es calcáreo y no pedregosos (1.25) que domina en la parte sur y oeste de la misma, y a las unidades en que el tercer suelo en importancia es calcáreo (1.42) que cubren una buena porción de la parte centro y norte del área.

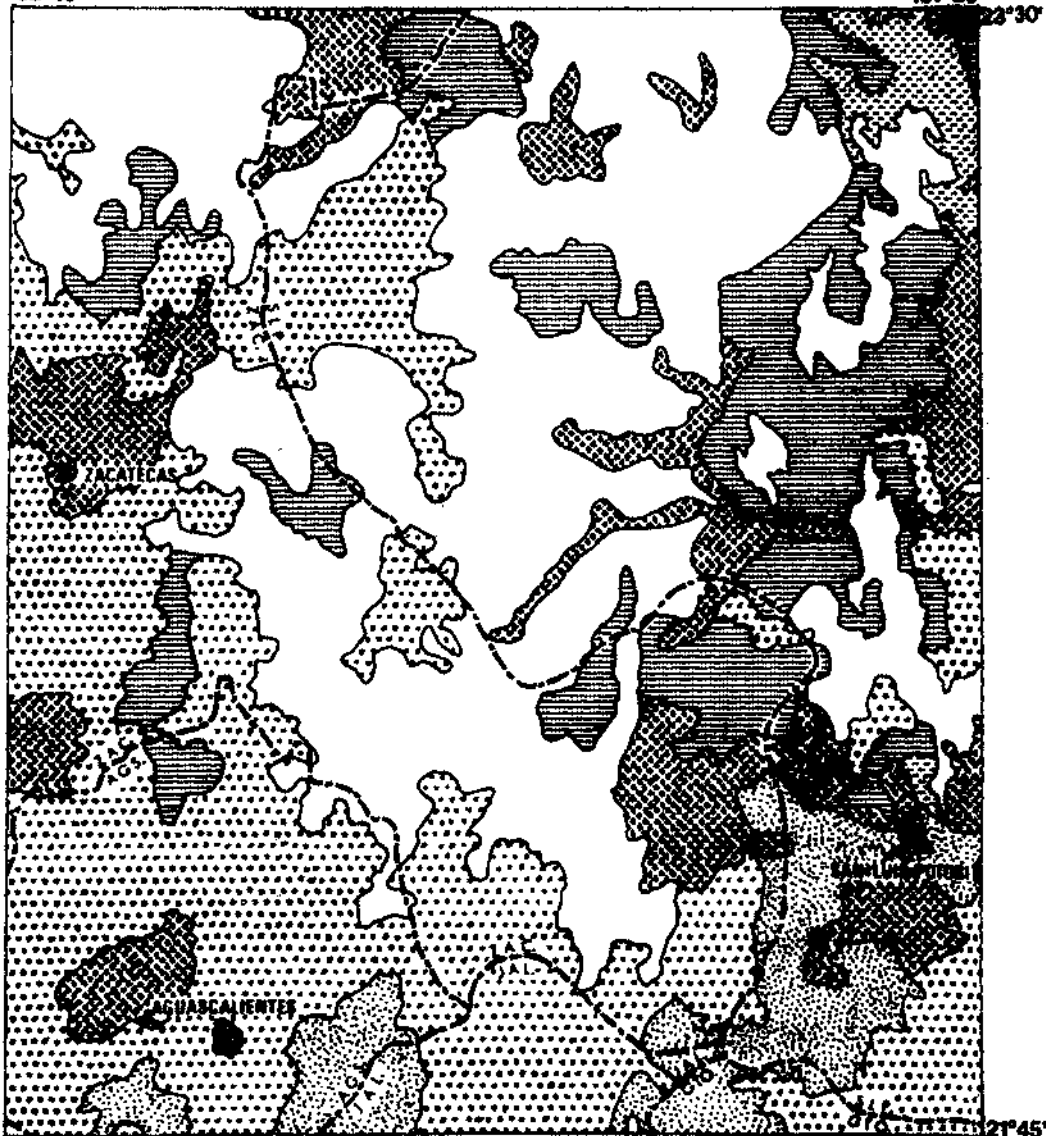
#### 4.1.3. Factor topográfico, "T"

Como ya se explicó anteriormente en el punto 3.2.1.c, la importancia del efecto de este factor sobre las tasas de movimiento de suelo, es mínima a esta escala. Así, se supone una valoración igual a 1 para todas las

102°40'

107°00'

22°30'



21°45'

VALORACIONES (adimensional)

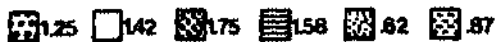


Fig. 4.2. Factor suelo "S" para el área de estudio. CREZAS-CP. 1985.

formas topográficas dentro del área de estudio.

#### 4.1.4. Factores de vegetación natural, "V" y de uso del suelo, "L"

Las valoraciones para estos dos factores ("V" y "L") en el área de estudio se exponen en el mapa correspondiente a la Figura 4.3. A juzgar por la carta de uso del suelo (escala 1:1'000,000) del Atlas Nacional del Medio Físico, de la SPP (1981), en el área de estudio se hacen presentes 15 tipos diferentes de vegetación natural, las cuales se presentan en el Cuadro 4.4, junto con el porcentaje de cubierta. Con objeto de poder darles una valoración a estos tipos de vegetación con su respectivo porcentaje de cubierta, se necesitó considerarlos dentro de uno de los cuatro grupos de comunidades vegetales sugeridos por la FAO (1980) que se muestran en el Cuadro 3.4. Así, a cada uno de los 15 tipos de vegetación se le asignó un grupo equivalente (Cuadro 4.4) y ya con esto, su valoración.

En esta misma carta de uso del suelo (SPP, 1981) aparecen dos tipos de agricultura; de temporal y de humedad, así como otro uso del suelo no contemplado por la FAO (1980), que corresponde a los embalses de agua que aunque en forma muy ocasional y muy reducida, se llegan a presentar en el área de estudio. A la agricultura de temporal se le consideró dentro de lo que la FAO tiene como cultivos anuales de período vegetativo corto, con una valoración de 0.7 (Cuadro 4.4). Por otro lado a la agricultura de humedad se le considera dentro de lo que la FAO llama cultivos de regadío, con una valoración de 0.2 y se les considera así en razón de que en la agricultura de humedad se incluyen terrenos de zonas inundables que en períodos de secas se siembran, o bien terrenos que después de la temporada de lluvias, guardan suficiente humedad para desarrollar cultivos que corresponden a los de invierno y se les conoce también como tierras de juco. Los embalses de agua que aunque no son considerados en la evaluación a esta escala por la

23°30'



VALORACIONES (altitudinal)



Fig. 43. Factores de vegetación natural, N, y uso del suelo, L, para el área de estudio. CREZAR-CR 1988.

Cuadro 4.4. Valoraciones asignadas a los tipos de vegetación que se presentan en el área de estudio. CREZAS-CP. 1985.

COMUNIDAD VEGETAL	VEGETACION EQUIVALENTE	% DE CUBIERTA	VALORACION*
Matorral desértico micrófilo	1	1-20	0.70
Matorral crasicauale	2	40-60	0.25
Pastizal natural	1	40-60	0.30
Chaparral	3	40-60	0.20
Matorral subtropical	3	60-80	0.10
Mezquita	2	40-60	0.25
Matorral desértico rosetófilo	2	20-40	0.40
Matorral con izotes	3	40-60	0.20
Bosque de encino-pino	3	60-80	0.10
Bosque de pino-encino	3	60-80	0.10
Bosque de encino	3	60-80	0.10
Bosque de pino	3	60-80	0.10
Bosque de tascate	3	60-80	0.10
Vegetación halófila	1	1-20	0.70
Pastizal inducido	1	20-40	0.50

\* Adimensional

- 1 Estepa (sin árboles)
- 2 Sabana con árboles
- 3 Bosque sabanero

FAO, es lógico suponer que se les debe asignar una valoración de cero, puesto que como ya se señaló anteriormente (ver punto 2.5), las valoraciones están en razón inversa del grado de resistencia que confieren, respecto a la erosión eólica.

Como ya se indicó, las valoraciones para el factor uso del suelo, "L", van desde los más pequeños hasta el mayor, casi lo mismo se puede decir de las valoraciones del factor vegetación natural, "V", aunque en este último factor aparece un mayor número de tipos de vegetación con una valoración muy

baja (Cuadro 4.4). Sin embargo, en la Figura 4.3, se aprecia que la superficie ocupada por estos tipos de vegetación, dentro del área de estudio, es mínima y se confina a los límites sureste y suroeste del área. En cambio, el tipo de vegetación matorral desértico micrófilo, junto con el uso del suelo con agricultura de temporal, los cuales tienen una valoración de 0.7, ocupan un porcentaje considerable de la superficie total del área de estudio. Así tenemos que las áreas valoradas con 0.7 de la parte norte (con excepción de las que rodean la localidad de Zacatecas, Zac.), donde las condiciones desérticas son más intensas, se deben al matorral desértico micrófilo. Las otras áreas del sur y algunas pocas del norte, especialmente por la región de Zacatecas, Zac., valoradas con 0.7, son las ocupadas por la agricultura de temporal, puesto que en estas regiones las condiciones agrícolas son mucho más favorables para la producción de cosechas, comparándolas con las del norte del área estudiada.

El matorral crasicaule con una valoración de 0.25, generalmente se encuentra bordeando al matorral desértico micrófilo. Más hacia el sur y comúnmente entreverado con el matorral crasicaule, se presenta el pastizal natural el cual tiene una valoración de 0.30, aunque también se le encuentra abarcando una superficie considerable al noroeste del área de estudio.

Como ya se había señalado anteriormente en el punto 3.1.7, y como se hace notar en la Figura 4.3, el matorral desértico micrófilo, el matorral crasicaule y el pastizal natural, son los tipos de vegetación que predominan en el área estudiada. En el Cuadro 4.5, se muestran los tipos de vegetación en un orden aproximado, de mayor a menor importancia (en cuanto a la superficie ocupada).

Por último, se observa en forma especial (Figura 4.3), que las valoraciones para el área de estudio con estos dos factores ("V" y "L"), son menores

hacia el sur, especialmente hacia el suroeste y sureste del área y mayores en la parte norte, con excepción del límite noroeste, donde aparecen varios tipos de vegetación con una valoración más baja, así como una parte del área al norte de Zacatecas, Zac., ocupada por matorral crasicuale.

#### 4.2. Ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway

El área en que se aplicó esta ecuación para evaluar la erosión eólica actual y potencial así como la escala y la cartografía utilizada para determinar los factores que intervinieron, ya se denotaron en el punto 3.2.2. En seguida se dan a conocer las valoraciones obtenidas en dicha área, de los parámetros implicados en esta ecuación,

##### 4.2.1. Erodabilidad del suelo, I'

Como ya se mencionó en el punto 3.2.2.a, el porcentaje de agregados del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro, indispensable para la determinación del factor de erodabilidad del suelo, I, se obtuvo de un trabajo de tesis sobre el tema de erosión eólica, auspiciado por el CREZAS-CP.

En el Cuadro 4.5, se pueden observar los porcentajes de fracciones del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro, así como el número de muestras con que se calculó el mismo. En este mismo cuadro se dejan ver las valoraciones del factor de erodabilidad del suelo, I, para cada una de las unidades de suelo a las cuales se les determinó el porcentaje de agregados mayores de 0.84 mm de diámetro, en el trabajo ya mencionado. Como se puede apreciar en este cuadro, las valoraciones varían de 202 a 275 ton/ha/año, encontrándose en un término medio con respecto a las valoraciones para este factor. Las unidades de suelo se exponen siguiendo un orden de importancia (de acuerdo a su extensión) de mayor a menor, y según se aprecia en el cuadro las unidades de suelo que dominan corresponden al litosol, xerosol y cambi sol.

Cuadro 4.5. Agregados del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro para algunas unidades de suelo del área evaluada y su erodabilidad "I". CREZAS-CP. 1985.

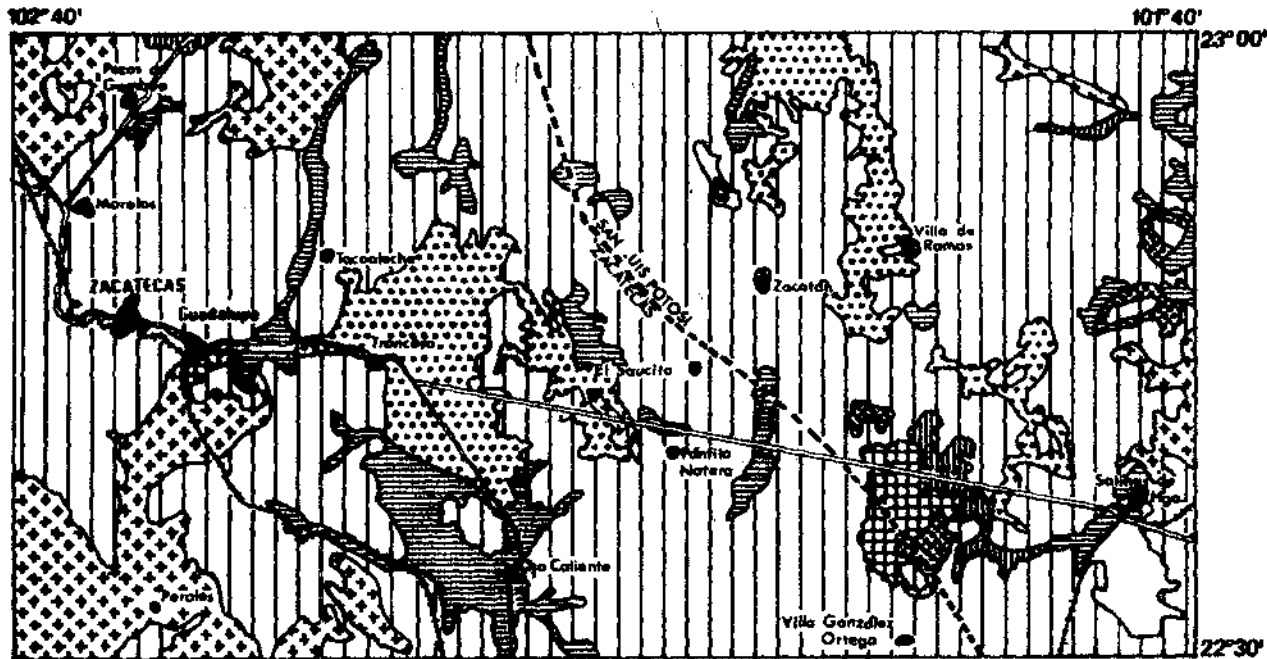
Unidad de suelo	No. muestras	Agregados >0.84 mm (%)	"I" (Ton/ha/año)
Litosol	8	15.46	259
Xerosol	14	15.49	259
Cambisol	8	20.88	214
Castañosem	7	20.51	216
Fluvisol	5	18.35	235
Solonetz	2	13.72	275
Yermosol	1	14.16	271
Regosol	2	22.94	202

Conforme a la suposición referida en el punto 3.2.2.a, la erodabilidad del suelo, I, no se verá modificada por la erodabilidad en colinas,  $I_s$ , y en consecuencia  $I=I'$ .

En el mapa de la Figura 4.4, se presentan estas valoraciones del factor de erodabilidad del suelo, I', para las unidades de suelo que aparecen dentro del área evaluada. Las dos pequeñas áreas que no muestran ninguna valoración, son aquellas unidades de suelo (Phaeosem y solonchak) a las que no se les determinó el porcentaje de agregados mayores de 0.84 mm de diámetro.

Se observa (en la Figura 4.4) que en el área evaluada existe un predominio muy notorio de la valoración de 259 ton/ha/año que corresponde a las unidades de suelo litosol y xerosol, debido a que (como ya se mencionó antes) estas unidades de suelo son las que se encuentran en el área con una mayor frecuencia. Los valores más altos del factor de erodabilidad del suelo, I',





EROSIBILIDAD (ton/ha/año)



Fig. 4.4. Factor erosibilidad del suelo,  $k$ , de parte del Altiplano Potosino-Zacatecano. CREZAS-CP. 1985.

se localizan en la parte media del área comprendida entre Salinas de Hidalgo, SLP y Pánfilo Natera (La Blanca), Zac. (al norte de Villa González Ortega, Zac.), y corresponden a las unidades de suelo solonetz y yermosol, cuyos valores de  $I'$  son de 275 y 271 ton/ha/año respectivamente. Por otra parte, las valoraciones más bajas de  $I'$  (202 ton/ha/año) que corresponden a la unidad de suelos regosol, se presentan en dos áreas aisladas muy pequeñas situadas en el límite este del área evaluada y otras dos pequeñas áreas ubicadas en los límites de las áreas más erodibles, una al norte y la otra al sur. Estas áreas, probablemente son las que ocupan un menor porcentaje en relación a la superficie total del área en que se llevó a cabo esta evaluación.

#### 4.2.2. Factor climático local, $C'$

El cálculo de las valoraciones para este factor  $C'$  se practicó en las mismas localidades empleadas en el factor de agresividad climática de la ecuación anterior. Y por las razones ya expuestas en el punto 4.1.1, únicamente se presenta la información que fue necesitada para determinar primero, el índice de efectividad de la precipitación de Thornthwaite y luego el factor climático local,  $C'$ , de las tres localidades que se ubican en el Altiplano Potosino-Zacatecano (Aguascalientes, Ags., Zacatecas, Zac., y San Luis Potosí, SLP).

Como ya se indicó, a fin de determinar el factor  $C'$ , es necesario obtener primero el índice de efectividad de la precipitación de Thornthwaite, el cual se calculó a partir de los datos de precipitación pluvial y temperatura media que aparecen en el Cuadro 2 del Apéndice. Estos datos son los mismos que se utilizaron para determinar el factor de agresividad climática como lo propone la FAO, y que fueron presentados en los Cuadros 1 (del Apén

dice) y 4.2, la única diferencia la constituyen las unidades consideradas ( $^{\circ}\text{C}$  y mm en uno y  $^{\circ}\text{F}$  y pulgadas en otro) y cuyo comportamiento ya fue descrito también en el punto 4.1.1.

Los resultados obtenidos del índice de efectividad de la precipitación, así como la velocidad media del viento, datos indispensables para calcular el factor climático local,  $C'$ , se hacen ver en el Cuadro 3 del Apéndice. Se puede advertir en este cuadro que el índice de efectividad de la precipitación más bajo (20.2 adimensional) pertenece a la localidad de San Luis Potosí, SLP, y el más alto se manifiesta en la localidad de Zacatecas, Zac., con 33.5 (adimensional). En Aguascalientes, Ags., el índice de precipitación efectiva es casi el mismo que para Zacatecas, Zac. (30.0 adimensional).

Las velocidades medias del viento que se encuentran en este mismo cuadro (4.3), son las mismas que aparecen en el Cuadro 1 (ambos del Apéndice), la disparidad que se presenta entre éstas, son la altura y las unidades consideradas en (m/s y a 2 m de altura en uno, y en millas/hr, y a 9.1 m de altura en el otro). En el punto 4.1.1, se hace una descripción de esta información.

Los valores resultantes del factor climático local,  $C'$ , para las tres localidades consideradas, se muestran en el Cuadro 4.6, en el cual se puede apreciar que las condiciones de agresividad del clima son del 50% o menores, con respecto a las condiciones que existieron en Garden City, Kansas, en el período de 1954-1956 (ver punto 2.4.1.b). En las regiones de Zacatecas, Zac., y San Luis Potosí, SLP, los valores anuales de este factor  $C'$ , son de aproximadamente 50% (49.6 y 39.5% respectivamente), en cambio, es muy evidente que en la región de Aguascalientes la agresividad del clima para producir el movimiento de las partículas del suelo es muy débil (2.4%). Sin embargo, también se observa que a pesar de que los valores anuales de

este factor para las localidades de Zacatecas, Zac., y San Luis Potosí, SLP, son de 49.6 y 39.5%, los valores del factor climático para el mes de marzo llegan a alcanzar hasta 139.0 y 90.6% para Zacatecas, Zac., y San Luis Potosí, SLP, respectivamente. Si se observa más detenidamente este cuadro, podemos reparar en que los porcentajes más altos de agresividad del clima en las tres localidades ocurren en los primeros cinco meses del año (de enero a mayo), siendo el mes de marzo (como ya se señaló antes) el que presenta la mayor valoración con excepción de la región de Aguascalientes, Ags., donde el mayor porcentaje le corresponde al mes de septiembre.

Con estos porcentajes del factor climático  $C'$ , para estas tres localidades, junto con los de aquellas localidades que se ubican fuera del área de estudio del CREZAS-CP (Cuadro 4.7), se preparó el mapa que nos permite ver la Figura 4.5. En esta figura se muestra la forma en que se distribuyen los valores del factor climático local en el área de estudio, y se nota claramente que el porcentaje es muy bajo en la parte sur de esta área y va incrementándose en tanto que nos desplazamos hacia la parte norte de la misma, donde alcanza un porcentaje superior al 50%. En esta misma figura se enmarca el área que es ocupada por las 6 cartas de CETENAL (1971a) cuya escala es de 1:50,000 área en que se aplicó la presente ecuación (ver punto 3.2.2), para estimar la erosión eólica actual y potencial. Como se puede apreciar en la figura, el área limitada por este recuadro se ve dividida en dos, por la curva que une los puntos con un 40% de agresividad climática, de tal manera que a la área de la parte sur de la curva le corresponde un valor de 35% y a la que se encuentra en la parte norte, el valor que le corresponde es de 45% (las curvas se trazaron con un 10% de incremento)

Cuadro 4.6. Factor climático local, C', (porcentaje del de Garden City, Kansas) para tres localidades del Altiplano Potosino-Zacatecano. CREZAS-CP. 1985.

Localidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Aguascalientes, Ags.	2.0	3.1	2.8	1.7	2.7	0.9	1.9	2.0	9.5	1.4	1.6	2.8	2.4
San Luis Potosí, SLP.	40.1	47.4	90.6	82.4	58.9	47.4	43.6	43.6	19.0	17.7	19.2	14.4	39.5
Zacatecas, Zac.	68.2	83.4	139.0	91.1	39.5	27.0	31.0	23.4	27.0	31.0	44.4	55.8	49.6

Cuadro 4.7. Factor climático local, C', (porcentaje del de Garden City, Kansas) para las localidades utilizadas que se ubican fuera del área de estudio del CREZAS-CP. 1985.

Localidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Durango, Dgo.	18.8	31.6	52.4	45.8	31.6	15.4	10.0	5.4	8.9	11.3	11.3	14.0	18.8
Guadalajara, Jal.	0.4	0.9	0.7	0.9	0.3	0.5	0.7	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
Guanajuato, Gto.	2.6	2.9	3.2	2.9	2.3	2.0	2.3	2.3	2.0	1.8	2.3	2.6	2.3
Monterrey, NL.	1.7	1.7	2.4	2.8	1.7	1.7	1.7	1.4	0.7	0.7	1.4	1.7	1.7
Río Verde, SLP.	2.0	7.4	9.4	7.4	11.9	5.6	2.0	4.1	1.3	1.0	2.5	1.7	4.1
Saltillo, Coah.	43.3	68.6	80.8	62.4	43.3	57.2	62.4	62.4	47.6	28.1	38.7	28.1	52.3
Torreón, Coah.	14.3	12.0	17.0	23.5	23.5	17.0	17.0	17.0	19.8	12.0	10.0	17.0	17.0

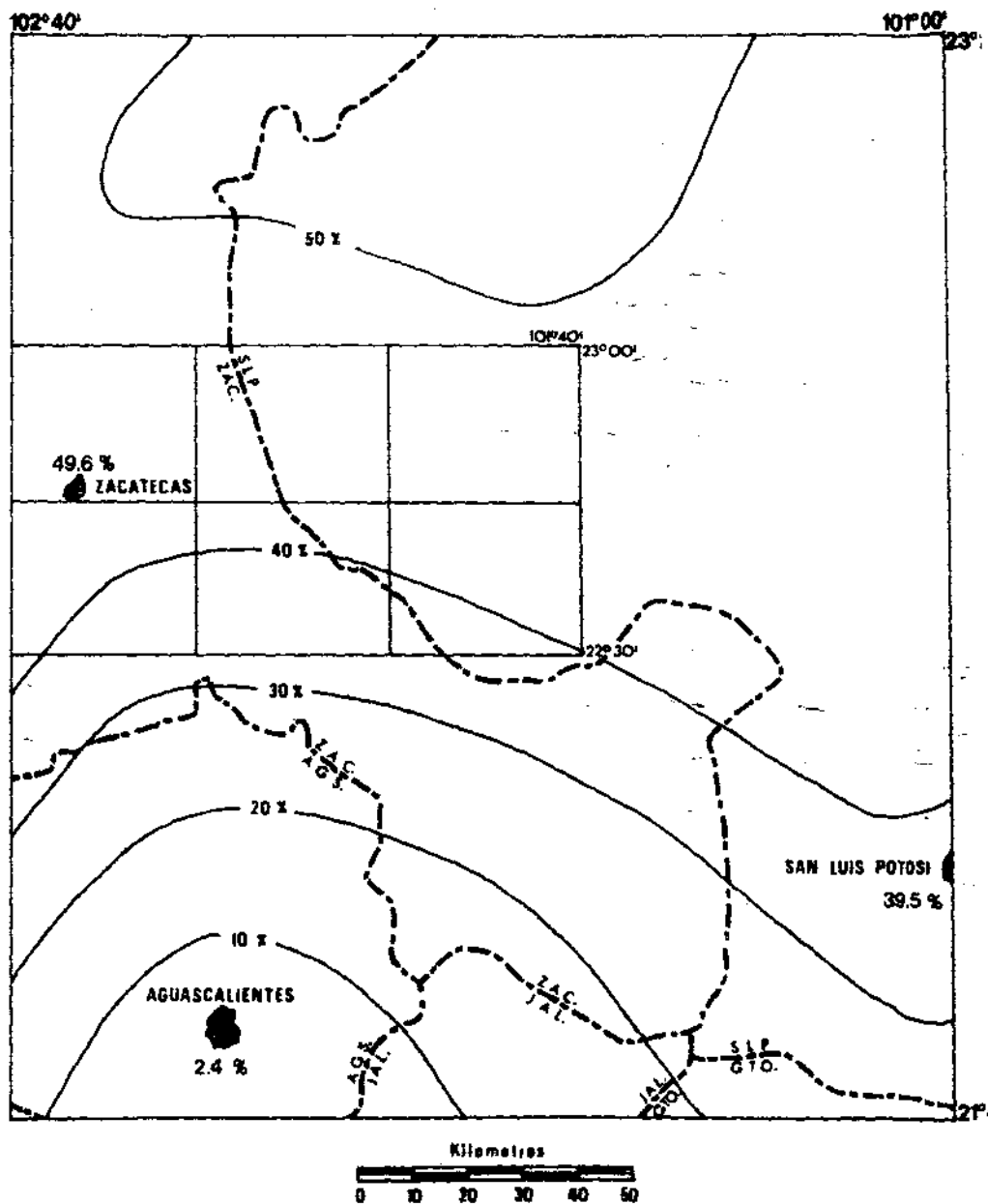


Fig. 4.5. Factor climático local,  $C'$  (porcentaje del de Garden City, Kansas), para el área de estudio. CREZAS - CP. 1985.

#### 4.2.3. Factor rugosidad del suelo, $K'$

Por las razones ya expuestas en el punto 3.2.2.c, se consideró que la preparación a que se ven sometidos los terrenos cultivados de la zona en que se empleó esta ecuación de la erosión eólica, dejan sobre el terreno lomos con 3 cm de altura y una distancia igual a la que existe entre lomos con 22 cm de separación, tomando en cuenta una desviación de  $45^\circ$  con respecto a la dirección prevaleciente del viento (independientemente de cuál sea esta dirección).

La distancia que existe entre los lomos con 3 cm de altura, considerando las condiciones ya mencionadas, es de 31 cm. Esto nos da una relación de altura:espaciamento de lomos igual a 3:31, lo que corresponde a una relación de 1:10.3. Partiendo de esta relación (1:10.3) y con la relación de altura:espaciamento que se asignó a los lomos estándar del suelo que es de 1:4, se calculó el equivalente de rugosidad superficial del suelo,  $K_r$ , siguiendo el procedimiento expuesto en el punto 2.4.1.c. Dicho equivalente tiene un valor de 1.2 cm.

Lo anterior significa que los lomos con una relación altura:espaciamento de 3:31 ó 1:10.3, que presentan sobre la superficie los terrenos preparados del área estudiada, tendrían la misma efectividad para controlar la erosión eólica, que los lomos con una altura de 1.2 cm y con una separación de 5.6 cm, cuya relación altura-espaciamento sería de 1:4.

Este equivalente de rugosidad del suelo,  $K_r$ , fue utilizado posteriormente para determinar el factor de rugosidad del suelo,  $K'$ , con la ayuda de la gráfica que se muestra en la Figura 2.3. Así, mediante la utilización de esta gráfica, se encontró que para un valor de equivalente de rugosidad del suelo,  $K_r$ , igual a 1.4 cm, le corresponde un valor de factor de rugosidad del suelo,

$K'$ , de aproximadamente 0.75 (adimensional), que como se aprecia en la misma gráfica es el valor medio de las valoraciones para este factor, las cuales van de 0.5 a 1.0 (adimensional).

#### 4.2.4. Longitud equivalente del terreno, $L'$ y cantidad equivalente de cubierta vegetativa, $V$

De acuerdo a la suposición establecida en el punto 3.2.2.d, de que los terrenos son amplios, y a la resolución fundamentada en el punto 3.2.2.e, de que la cantidad de residuos de cosecha sobre la superficie del terreno es nula, estos dos factores ( $L'$  y  $V$ ) no disminuyen la tasa de movimiento del suelo producido por el viento, por las razones ya expuestas en los mismos puntos.

Lo anterior tiene como consecuencia que estos dos factores, los cuales están involucrados en la ecuación (1) para estimar la erosión eólica actual, no sean tomados en cuenta en el cálculo de la misma, no tanto porque no hayan sido considerados (al menos en el caso de la cantidad equivalente de cubierta vegetativa,  $V$ ), sino por el hecho de que numéricamente no afectan en su cálculo.

### 4.3. Erosión eólica actual y potencial estimada de las áreas estudiadas y mapas respectivos

Los resultados obtenidos de la erosión eólica actual y potencial estimada, aplicando cada una de las ecuaciones utilizadas, se muestran en seguida para cada ecuación (o área estudiada).

#### 4.3.1. Mapas de la erosión eólica actual y potencial estimadas con la ecuación de la FAO.

##### 4.3.1.1. Mapa del riesgo de erosión eólica (erosión eólica potencial)

En la evaluación del riesgo de erosión al nivel general "S" con la metodo



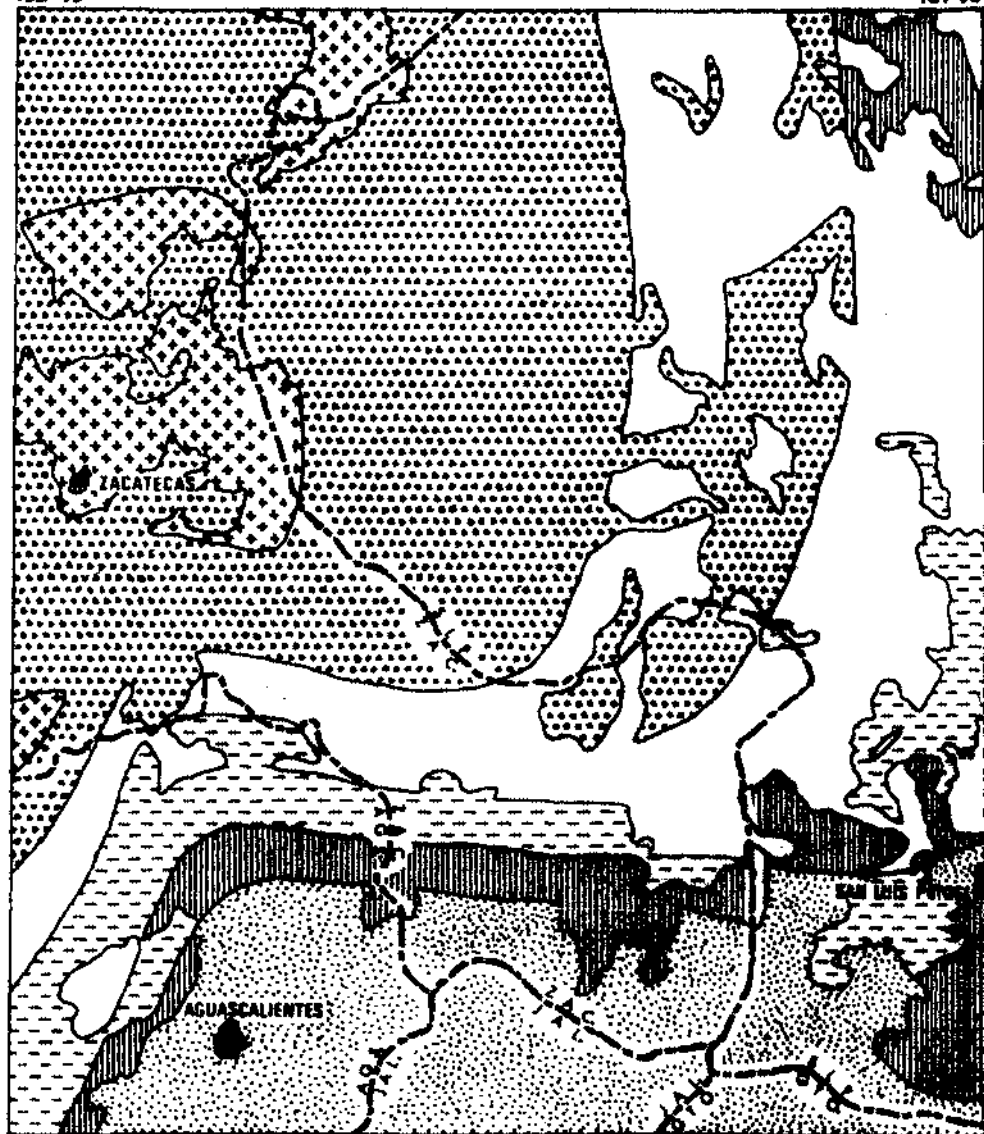
logía propuesta por la FAO, únicamente intervinieron dos parámetros (punto 3.4) que son el factor de agresividad climática, "C", y el factor suelo "S". El mapa se preparó siguiendo el procedimiento expuesto en el punto 3.4, y está representado en la Figura 4.6. Se aprecia en esta figura que la tasa de erosión eólica potencial estimada más alta que puede suceder dentro del área de estudio y que corresponde a la clase de 300 o más ton/ha/año, se presenta en los alrededores de Zacatecas, Zac., otras dos áreas más al norte y una más pequeña hacia el sur. La más baja (0-50 ton/ha/año) se localiza en una área mayor a la anterior, situada entre Aguascalientes, Ags., y San Luis Potosí, SLP., extendiéndose hasta el límite sur del área. En general, se nota una clara tendencia a incrementarse los valores del riesgo de erosión estimada, del sur hacia el norte primero, y luego en la parte norte del área, de este a oeste.

#### 4.3.1.2. Mapa de la erosión eólica actual

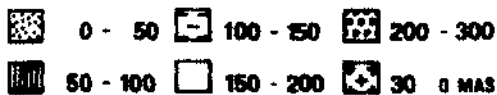
Al mapa del riesgo de erosión eólica se le transpuso el de vegetación natural y uso del suelo para obtener el mapa de la erosión eólica actual (punto 3.4), mapa que se deja ver en la Figura 4.7. En vista de que se presentaron una gran cantidad de áreas muy pequeñas con tasas de erosión eólica muy semejantes, se decidió agruparlas en siete clases como se muestra en la figura. En este mapa, las tasas de erosión eólica muestran la misma tendencia que en el mapa de riesgo de erosión eólica (Figura 4.6), pero ahora con los valores más bajos que van de 0 a 200 o más ton/ha/año. Así, los valores más bajos de erosión eólica actual (0-10 ton/ha/año) ocurren en la parte sur del área, por la región sureste del estado de Aguascalientes principalmente, y la porción del estado de Jalisco que colinda con Aguascalientes, así como algunas áreas al sur del estado de San Luis Potosí, y en

102°40'

101°00'



CLASES (ton/ha/año)



Kilómetros

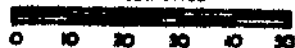


Fig. 4.6. Riesgo de erosión edáfica en el área de estudio (método de la FAO). CREZAG-CP, 1990.



**CLASES** (ton/ha/año)

 0 - 10	 25 - 50	 100 - 150	 200 O MAS
 10 - 25	 50 - 100	 150 - 200	



Fig. 4.7. Erosión edáfica actual estimada para el área de estudio con la ecuación de la FAD. CREZAS-CP.1985.

los límites de éste con el estado de Guanajuato. Por otro lado, las tasas de erosión eólica actual más elevadas (200 o más ton/ha/año) las encontramos en la parte noroeste del área, al norte de Zacatecas, Zac., en las regiones de Tacualeche, Zac., entre Troncoso y Pánfilo Natera, Zac., entre Zacatecas, Pánuco y Casa Blanca, Zac., entre Morelos, Zac. y límite oeste del área, en la región de Bañón, Zac., y otra área un poco más grande en la región de El Rucio, Zac., (entre los límites de los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, en el límite norte del área).

En la parte de los estados de Jalisco y Guanajuato, al sur del área, en casi la totalidad del estado de Aguascalientes (con excepción de la parte norte que colinda con el estado de Zacatecas) y la parte más al sur de San Luis Potosí, imperan las tasas de erosión eólica actual de 0 a 25 ton/ha/año, y en general, las tasas de 0-50 ton/ha/año predominan en la parte sur del área de estudio. En cambio en la parte norte prevalecen las tasas de 50 a 200 o más ton/ha/año, y en especial de la clase de 150 a 200 ton/ha/año, que cubre una extensa área la cual se extiende desde Salinas de Hidalgo, SLP, hasta los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, extendiéndose hasta la parte norte de Zacatecas, por la región de Villa de Cos, Zac.

En el punto 2.7 se menciona que en EUA se han calculado niveles de erosión permisible para diferentes regiones, mediante el método propuesto por Smith y Stamey (1964, 1965) el cual involucra la renovación del suelo y la conservación de la fertilidad a un mismo nivel, estos valores van de 1.2 a 14.8 ton/ha/año. Tomando en cuenta lo anterior, casi la totalidad del área se encuentra muy por encima de estos valores, aún cuando se considere el nivel más alto (12.8 ton/ha/año) de estos niveles de erosión permisible o tolerancia de erosión, pues como se nota en la Figura 4.7, solamente la clase de 0-10 ton/ha/año estaría por debajo de dicho nivel.

Conforme al Cuadro 2.4, que aparece en el punto 2.8, la clasificación de la erosión eólica en el área de estudio, por la intensidad de remoción del suelo (clasificación sugerida por Zachar, 1982), comprende desde el grado 1 hasta el grado 5 (desde una erosión insignificante hasta una muy severa), si suponemos una densidad aparente de  $1.3 \text{ ton/m}^3$ , para suelos de textura media, que es la que domina en el área (de acuerdo a la carta edafológica escala 1:1'000,000 de la SPP, 1981). Por otra parte, según las clases de degradación del suelo por efecto de la erosión eólica recomendada por la FAO (1980) y que se presenta en el mismo punto, las tasas de erosión eólica estimadas para el área, comprenden desde ninguna a ligera hasta muy alta.

#### 4.3.2. Mapas de la erosión eólica actual y potencial estimadas con la ecuación de Woodruff y Siddoway

##### 4.3.2.1. Mapa de la erosión eólica potencial

Los factores que fueron tomados en cuenta para estimar la erosión eólica potencial, fueron el factor de erodabilidad del suelo,  $I'$ , y el factor climático local,  $C'$ , como se indica en el punto 3.3.b, y la preparación del mapa (Figura 4.8) se realizó de acuerdo al procedimiento que se explica en el punto 3.4. Este mapa nos permite ver que la erosión eólica potencial más baja ( $75 \text{ ton/ha/año}$ ) que pudiera presentarse en el área evaluada, se presenta en la parte suroeste de la misma, en la región de Perales, Zac. En tanto que la erosión eólica potencial estimada más elevada ( $122 \text{ ton/ha/año}$ ) se le encuentra entre Salinas de Hidalgo, SLP, y Pánfilo Natera (La Blanca), Zac., en una área un poco al norte de Villa González Ortega, Zac., dentro del estado de San Luis Potosí, así como en una pequeña área al norte de Pozo de Gamboa, Zac., y otra al sur de Guadalupe, Zac.

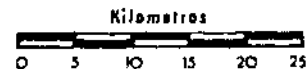
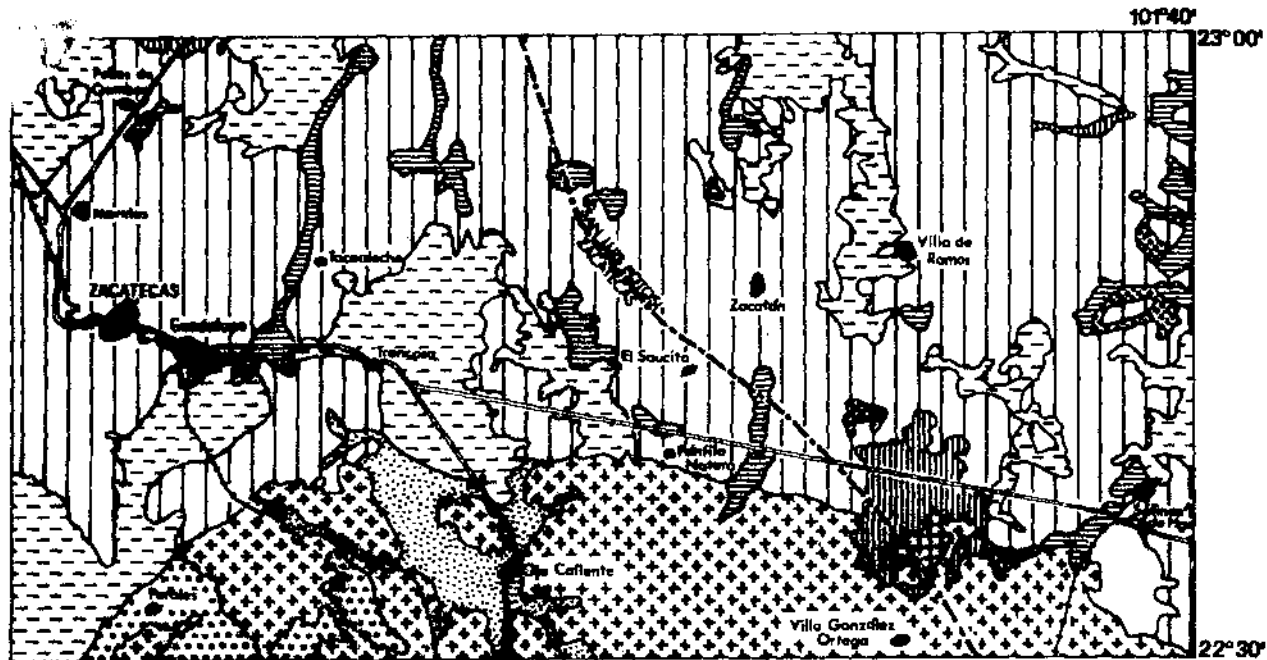


Fig. 4.B. Erosión edáfica potencial de parte del Atlixano-Potosino-Zacatecano, estimada con la ecuación de Woodruff y Biddaway (1965). CREZAS-CP, 1985.

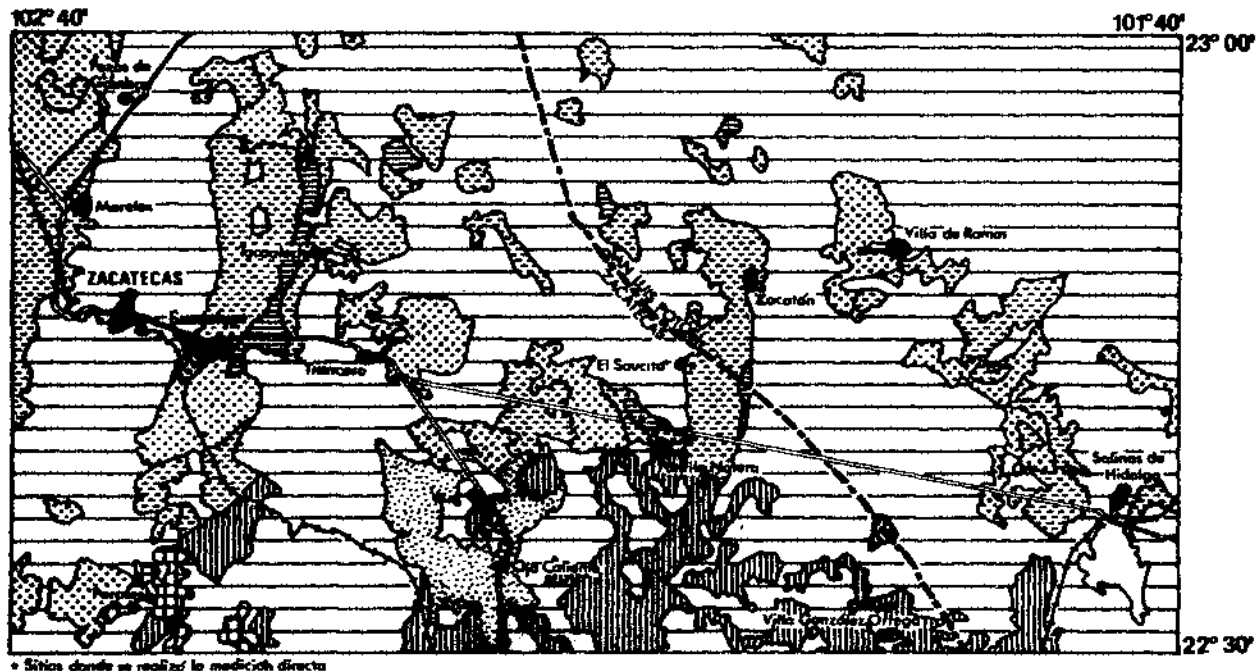
La tasa de erosión eólica potencial estimada que se presenta con mayor frecuencia es de 118 ton/ha/año, sobre todo en la parte norte y media del área, mientras que en la parte sur de la misma, tiene una mayor ocurrencia la erosión eólica potencial estimada de 92 ton/ha/año. Otra tasa que aparece con cierta frecuencia es la de 96 ton/ha/año, y ésta se encuentra más bien distribuida por toda el área (no presenta una tendencia clara).

#### 4.3.2.2. Mapa de la erosión eólica actual

Como se dió a conocer anteriormente en el punto 4.2.3, el factor de rugosidad del suelo,  $K'$ , que es el mismo para todos los terrenos cultivados dentro del área evaluada, resultó con un valor de 0.75 (adimensional) y como ya se explicó también en el punto 3.4, las tasas de erosión eólica potencial se multiplican por este valor para obtener el mapa de la erosión eólica actual estimada, el cual es presentado en la Figura 4.9, en el que aparecen únicamente los terrenos cultivados.

Por lo tanto, la tasa más elevada de erosión eólica actual estimada (91 ton/ha/año) se encuentra en los terrenos cultivados de las áreas con la tasa más elevada de erosión eólica potencial estimada. Estos son una pequeña área ubicada en el centro del triángulo formado por Pánfilo Natera (La Blanca), Zac., Salinas de Hidalgo, SLP, y Villa González Ortega, Zac. (en el límite de estos dos estados), y otra área también pequeña localizada al sur de Guadalupe, Zac.

La menor tasa de erosión eólica actual (56 ton/ha/año) ocurre en la parte suroeste del área, por la región de Perales, Zac., y la superficie que cubren también es muy reducida. La tasa de erosión eólica actual estimada más frecuente en el área, es la tasa de 88 ton/ha/año, aunque la tasa de 72 ton/ha/año se presenta casi con la misma frecuencia. Estas dos últimas muestran la tendencia de aparecer en la parte norte del área, mientras que



EROSION EOLICA ACTUAL (ton/ha/año)

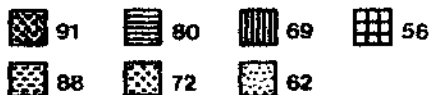


Fig. 4.9. Erosión eólica actual de parte del Altiplano Potosino-Zacatecano estimada con la ecuación de Woodruff y Sidde-way (1965). CREZAS-CP, 1985.



en la parte sur predomina la tasa de 69 ton/ha/año.

En este mismo mapa de la erosión eólica actual estimada (Figura 4.9), se puede apreciar que la zona del área con menos superficie cultivada corresponde a la parte noreste del área. Solamente hacia el sur y al oeste de Villa de Ramos, SLP, y al norte de Palma Pegada, SLP, se dejan ver algunas áreas cultivadas (en conformidad con las cartas de uso del suelo de CETENAL, 1971a y 1972, escala 1:50,000).

Las tasas de erosión eólica actual estimadas sobrepasan con mucho los niveles calculados de erosión permisible para diferentes regiones de los EUA, mediante el método propuesto por Smith y Stamey (1964, 1965), los cuales se encuentran en el rango de 1.2 a 14.8 ton/ha/año (ver punto 2.7).

La clasificación de las tasas de erosión eólica actual estimada de las áreas cultivadas, considerando la intensidad de remoción del suelo, caen dentro de los grados 4 y 5 (erosión severa y muy severa), como se observa en el Cuadro 2.4 (clasificación propuesta por Zachar, 1982). Esto es suponiendo una densidad aparente de  $1.3 \text{ ton/m}^3$  como se menciona en el punto 4.3.1.2.

Según las clases de degradación del suelo ocasionada por la erosión eólica, sugerida por la FAO, 1980 (Cuadro 2.5), a las tasas de erosión eólica actual estimadas para las superficies cultivadas en el área evaluada, les corresponde una clase de degradación del suelo "alta" (para pérdidas de suelo de 50-200 ton/ha/año).

#### 4.4. Evaluación de las ecuaciones paramétricas

En el Cuadro 4.8 se muestran las tasas de erosión actual y potencial estimada, de tres localidades de Zacatecas, mediante la aplicación de las dos ecuaciones paramétricas empleadas en el estudio, así como la erosión eólica actual obtenida con una medición directa en el campo, en que se basa

Cuadro 4.8. Tasas de erosión eólica actual y potencial estimadas mediante ecuaciones paramétricas y erosión eólica actual obtenida con medición directa de tres localidades de Zacatecas. CREZAS-CP. 1985.

LOCALIDAD	1		2		MEDICION DIRECTA
	EEP	EEA	EEP	EEA	EEA
	ton/ha/año				*
Pánfilo Natera (La Blanca), Zac.	296	>200	107	80	149.6
El Saucito, Zac.	296	150-200	118	88	64.7
Ojo Caliente, Zac.	266	150-200	92	69	51.7

1 Ecuación paramétrica propuesta por la FAO (1980)

2 Ecuación paramétrica publicada por Woodruff y Siddoway (1965)

EEP Erosión eólica potencial

EEA Erosión eólica actual

\* ton/ha/época de vientos

la evaluación de las ecuaciones empleadas (ver punto 3.6).

En el mismo cuadro se observa que las tasas de erosión eólica, estimadas con la ecuación propuesta por la FAO, están muy por encima de las tasas de erosión eólica actual obtenidas con medición directa, correspondientes a las tres localidades. Los valores de las tasas de erosión eólica actual que más se asemejan, corresponden a Pánfilo Natera (La Blanca), Zac., teniendo un valor de 200 o más ton/ha/año con la ecuación y de 149.6 ton/ha/época de vientos, con la medición directa.

En cambio, las tasas de erosión eólica actual, estimadas con la ecuación publicada por Siddoway y Woodruff (1965), son más parecidas a las obtenidas mediante una medición directa, con excepción de la localidad de Pánfilo Natera (La Blanca), Zac., donde dicha tasa resultó considerablemente menor con esta ecuación, comparándola con la obtenida con la medición directa (80 ton/ha/año con la ecuación y 149.6 ton/ha/época de vientos con la medición directa). En tanto que en las otras dos localidades (El Saucito y Ojo Caliente, Zac.), la tasa estimada fue un poco mayor que la medida.

Sin embargo, las tasas de erosión eólica actual estimada con esta última ecuación, en superficies de extensión considerable, se obtuvieron haciendo la suposición de que son áreas cuyos terrenos no presentan colinas (terrenos planos), y su longitud es lo suficientemente grande para que el flujo de suelo alcance su máximo. Razón por la cual, a fin de que la evaluación de esta ecuación resulte más precisa, se deberá corregir la tasa estimada para aquellos terrenos donde se realizó la medición directa y cuyas condiciones de  $I_s$  (erodabilidad en colinas) y  $L'$  (longitud del terreno a lo largo de la dirección prevaleciente de la erosión eólica) sean diferentes a las supuestas.

El Cuadro 4.9, nos muestra que únicamente el terreno de la localidad de Pánfilo Natera (La Blanca), Zac., presenta una colina con una pendiente del 3% a barlovento menor de 150 m de longitud, los valores de  $I_s$  de 130 y 150% fueron obtenidos utilizando la gráfica de la Figura 2.2 y corresponden a la erodabilidad del tercio superior de la pendiente y a la erodabilidad en la cima de la pendiente, respectivamente. Los otros dos terrenos no presentan ninguna colina, por lo que solamente en dicha localidad fue modificado el valor de  $I$ , resultando un valor diferente de  $I'$ .

En el mismo cuadro se muestra la longitud de cada terreno a lo largo de la dirección prevaleciente de la erosión eólica. Mediante el uso de la Figura

Cuadro 4.9. Tasas estimadas de erosión eólica actual corregidas por  $I_s$  y  $L'$  de tres localidades de Zacatecas. CREZAS-CP. 1985.

LOCALIDAD	I ton/ha/año	s %	$I_s$ %	$I'$ ton/ha/año	$K'$ adimensional	$C'$ % rel.	$L'$ m	EEA ton/ha/año
Pánfilo Natera, Zac. <sup>1/</sup>	235	3	130	305	0.75	0.45	1,065	103
<sup>2/</sup>	235	3	150	352	0.75	0.45	1,065	119
El Saucito, Zac.	259	-	-	259	0.75	0.45	305	73
Ojo Caliente, Zac.	259	-	-	259	0.75	0.35	349	57

EEA = Erosión eólica actual

<sup>1/</sup> En el tercio superior de la pendiente

<sup>2/</sup> En la cima de la pendiente

2.4, podemos encontrar que los terrenos de las localidades de El Saucito y Ojo Caliente, Zac., no fueron lo suficientemente largos para que el flujo del suelo alcanzara su máximo, por lo que la  $E_3$  estimada se vio reducida en  $E_4$ , mientras que en el terreno de Pánfilo Natera, Zac., si lo fue, por lo que  $E_4$  fue igual que  $E_3$ .

Puesto que no se deja ningún residuo de cosecha sobre la superficie de los terrenos, el factor  $V$  no modifica el valor de  $E_4$ , y por lo tanto este valor ( $E_4$ ) constituye la tasa de erosión eólica actual, que es la que aparece en el Cuadro 4.9. Como se puede observar, las tasas estimadas así obtenidas, resultan mucho más semejantes a las obtenidas por medición directa en los tres casos, que las tasas estimadas sin modificar.

Además si consideramos también que la tasa de erosión eólica medida directamente en el campo fue únicamente para la época de vientos, la cual comprendió los meses de marzo, abril y mayo, sin incluir el mes de febrero, podemos esperar tasas de erosión eólica actual en ton/ha/año un poco mayores, estas tasas en los casos del Saucito y Ojo Caliente, Zac., se aproximarían bastante a las tasas estimadas con la ecuación y corregidas por  $I_s$  y  $L'$  que se presentan en el Cuadro 4.9, en tanto que acentuaría un poco más la diferencia en el caso de Pánfilo Natera, Zac.

Lo anterior tomando en consideración que, como ya se mencionó antes, la agresividad del clima es mucho más intensa en estos meses, al mismo tiempo que las condiciones de aspereza superficial y cubierta vegetativa en esta época del año, ofrecen menos resistencia a la acción erosiva del viento. Por lo tanto podemos suponer que es en esta época del año cuando ocurre casi la totalidad de la erosión eólica del año. La agresividad del clima para el resto del año es mucho menos intensa y las condiciones de rugosidad y cubierta vegetativa oponen mayor resistencia al proceso de erosión eólica, así, las ta

sas de movimiento de suelo, si es que éste se produce, probablemente no son muy significativas.

Así, en términos generales, podemos afirmar que la ecuación propuesta por Woodruff y Siddoway (1965), resultó mejor al estimar la erosión eólica actual que la ~~ecuación paramétrica~~ propuesta por la FAO (1980).

## 5. DISCUSION

### 5.1. Factores de agresividad climática "C", suelo "S", vegetación natural "V" y uso del suelo "L", de la ecuación paramétrica propuesta por la FAO

#### a) Factor de agresividad climática, "C"

La valoración del factor de agresividad climática que se obtiene mediante la ecuación (6) propuesta por la FAO (1980) para una evaluación a escala general "S", parece ser determinada principalmente por la velocidad media del viento. Puesto que analizando el Cuadro 4.2, en el que se muestran los datos climáticos necesarios para el cálculo de este factor, se puede observar que las valoraciones para este factor (Cuadro 4.3) están más o menos en la misma proporción que la velocidad media del viento para las tres localidades consideradas.

Así tenemos que el valor más alto del factor de agresividad climática que es de 230.4 (adimensional) le corresponde a la localidad de Zacatecas, la cual presenta el mayor valor de velocidad media del viento (4.1 m/s), mientras que la localidad de Aguascalientes, que aparece con la velocidad media del viento más baja (1.4 m/s) obtuvo el menor valor para este factor (7.6 adimensional).

Esto, no obstante que la precipitación media anual es mayor en la localidad de Zacatecas que en la de San Luis Potosí, la cual afecta en forma inversa en el cálculo, es decir, que entre mayor sea la cantidad de precipitación, menor será la agresividad del clima, y por lo tanto, menor será la tasa de erosión (ver punto 2.3.1.a). Además de que la evapotranspiración potencial es un poco mayor en la localidad de San Luis Potosí que en la de Zacatecas, lo cual disminuye aún más la precipitación efectiva de la

primer localidad que ya de por sí es muy deficiente.

Sin embargo, el hecho de que la precipitación pluvial en la localidad de Zacatecas que es casi nula en los primeros meses del año (Cuadro 4.2), período en que la fuerza erosiva de los vientos es mucho más intensa (fenómeno que es más acentuado aún en dicha localidad) como se observa en el mismo cuadro, constituye otra causa de que el factor de agresividad climática en la localidad de Zacatecas sea considerablemente mayor que en la localidad de San Luis Potosí.

La razón de que un porcentaje muy alto de la agresividad del clima (31.0, 46.5 y 54.9% para las localidades de Aguascalientes, San Luis Potosí y Zacatecas, respectivamente) se presente en los primeros meses del año (febrero, marzo y abril) como se observa en el Cuadro 4.3, se debe principalmente a que la velocidad media del viento durante estos meses son las más elevadas de todo el año, como se puede apreciar en el Cuadro 4.2 (con excepción de la localidad de Aguascalientes, donde ésta es mayor en el mes de septiembre y en el cual ocurre el mayor porcentaje de agresividad del clima), pues como ya se indicó en los puntos 2.3.2.a y 2.4.1.b, la influencia erosiva del viento se incrementa proporcionalmente con la velocidad del viento al cubo. Skidmore (1965) señala que doblar la velocidad del viento causa un incremento de ocho veces la erosión potencial, puesto que teóricamente, un viento de 18 m/s con una hora de duración es equivalente a un viento de 9 m/s con ocho horas de duración.

Asociado a lo anterior, tenemos que la precipitación pluvial que se presenta en las tres localidades durante estos tres meses son las más bajas del año, al mismo tiempo que como ya se mencionó antes, la evapotranspiración potencial es más elevada en estos meses, lo que hace que se presenten condiciones de sequía.



Por lo tanto en las tres localidades sucede que cuando los suelos se encuentran en un estado casi completamente seco, es más elevada la magnitud de las fuerzas erosivas del viento, lo que trae como consecuencia que los valores más altos para el factor de agresividad climática se manifiesten durante esta época del año, y entonces podemos suponer que un alto porcentaje de la erosión eólica que ocurre durante el año se presenta en estos tres meses, pues según lo afirman Chepil et al. (1962) el factor climático de la erosión eólica constituye un índice de la severidad de la erosión eólica.

b) Factor suelo, "S"

El hecho de que las valoraciones para este factor del suelo "S", asignadas a el área de estudio, como se muestra en el mapa de la Figura 4.2, sean los más bajos para dicho factor (ver Cuadro 3.3) se debe a que en toda el área de estudio la textura que prevalece es la textura media (ver punto 4.1.2), la cual contiene la cantidad suficiente de limo y arcilla que unen los granos de arena y que no causan el agrietamiento y la consecuente granulación de los agregados secos que es capaz de producir (ver punto 2.3.1.b). Por lo tanto, al producir la textura de estos suelos una buena cantidad de agregados con suficiente estabilidad contra la abrasión, le confieren a los mismos una baja erodabilidad (o susceptibilidad a ser erosionados), según se indica en los puntos 2.3.1 y 2.4.1.a.

Las diferencias entre las valoraciones asignadas al área de estudio, como ya se advirtió antes, no se deben a la textura del suelo sino a que alguna de las tres unidades de suelo dominantes en la unidad cartográfica de suelos es calcáreo, o a que la unidad cartográfica de suelos es pedregosa o gravosa.

Como se hace mención en el punto 2.3.1.d, las grandes cantidades de calcio contenido en los suelos (usualmente en la forma de  $\text{CaCO}_3$ ) debilitan los lazos

de unión que mantienen juntos a los agregados estables en agua para formar terrones, causando el ablandamiento y granulación de los terrones.

Así tenemos que las áreas que aparecen en el mapa de la Figura 4.2, con la valoración más elevada para este factor dentro del área de estudio (1.75 adimensional) corresponde a las unidades cartográficas de suelos, en la cual la unidad de suelo dominante es calcáreo. Los valores menores de erodabilidad de 1.58 y 1.42 (adimensional) que nos indican una menor susceptibilidad de los suelos a ser erosionados, pertenecen a las unidades cartográficas de suelos cuyo suelo secundario (para el primero) o el suelo tercero en importancia (para el segundo) son calcáreos. La valoración de 1.25 (adimensional) le atañe a las unidades cartográficas de suelos, en que ninguno de los suelos dominantes es calcáreo y significa que es menos erodible que los anteriores.

Las unidades cartográficas de suelos menos susceptibles de ser erosionadas son las que presentan una valoración de 0.87 y 0.62 (adimensional), las cuales corresponden a suelos calcáreos y no calcáreos respectivamente, con la particularidad de que son pedregosos o gravosos.

La razón de que sean menos susceptibles a erosionarse se debe a que los fragmentos de roca o la grava (material edáfico no erosionable) constituyen una cubierta directa que protegen a las partículas del suelo que son erosionables, al mismo tiempo que actúan como trampas de las partículas en movimiento (Chepil y Woodruff, 1963; Wilson y Cooke, 1984). De este modo, al atrapar las partículas del suelo en movimiento especialmente por saltación, estos fragmentos de rocas o gravas impiden el progreso de la erosión en la dirección en que sopla el viento, pues al ser atrapadas, éstas ya no pueden poner en movimiento a otras partículas, es decir, obstaculizan el proceso de "avalanchamiento" (ver punto 2.2.3).

Otra razón por la cual los fragmentos de roca o la grava reducen las tasas de erosión, se debe al hecho de que éstos elevan el nivel de la superficie aerodinámica media y por lo tanto la altura por encima de la superficie aerodinámica media en la cual la velocidad es cero también se eleva, es decir, a que disminuyen la velocidad o la fuerza erosiva del viento sobre la superficie del suelo (ver punto 2.2.1.1).

c) Factores de vegetación natural "V" y uso del suelo "L"

La vegetación natural tiene un efecto protector sobre la superficie del suelo, al disminuir la velocidad del viento sobre la superficie y absorber gran parte de la energía ejercida por el mismo. También entorpece el efecto de "avalancha" de las partículas del suelo al servir de trampa del material del suelo en movimiento (ver punto 2.3.1.b.1).

Las características más importantes de la cubierta vegetal, desde el punto de vista de la aspereza superficial que proporciona, lo constituyen la altura y la densidad de la misma.

Por tal motivo la valoración de 0.7 (adimensional) que es la más elevada para el factor de vegetación natural, corresponde a los tipos de vegetación formados por el matorral desértico micrófilo (ver punto 3.1.7) en el cual predomina el género *Larrea*, y por la vegetación halófila. Esta valoración nos indica que estos tipos de vegetación tienen el menor efecto protector en comparación con los demás tipos de vegetación presentes en el área de estudio, pues como ya se mencionó en varias ocasiones, las valoraciones son asignadas en razón inversa al grado de resistencia que confieren, respecto a la erosión eólica, y como se puede apreciar en el Cuadro 4.4, estos dos tipos de vegetación son de escasa altura (estepa) y con un porcentaje de cubierta vegetal muy bajo (1-20%).

En cambio, los tipos de vegetación correspondientes a los bosques de pino y/o encino, bosques de tascate y el matorral subtropical, los cuales están constituidos por elementos arbóreos de talla considerable y con un buen porcentaje de cubierta vegetal (60-80%), aparecen con una valoración para este factor "V" de 0.10 (adimensional) el cual es el menor valor que se presenta en el área de estudio (para dicho factor).

Los demás tipos de vegetación presentes en el área de estudio muestran valores intermedios a los anteriores, por la razón de que son comunidades vegetales cuyos individuos son de menor altura que los últimos y con un porcentaje de cubierta vegetal que varía de un 20 a un 60% (Cuadro 4.4).

Las variaciones en la intensidad de la aridez climática provoca un cambio cualitativo y cuantitativo de la vegetación natural, siendo el factor edáfico el que más influye en su distribución (ver punto 3.1.7). A esto se debe que en una área muy extensa de la parte norte del área de estudio donde se encuentran enclavadas las zonas más áridas con suelos calizos, predomine el matorral desértico micrófilo que comúnmente deja espacios muy amplios de suelo desnudo (con una cubierta vegetal de 0-20%). Más hacia el sur se presenta el matorral crasicaule bordeando al matorral desértico micrófilo, este tipo de vegetación tiene una mayor altura y porcentaje de cubierta vegetal (40-60%) que el anterior. Así, hasta que en las partes donde la aridez es menos intensa, como son las barrancas de "milpillitas" y "las lecheras" al suroeste del área (entre Zacatecas y Aguascalientes) y la barranca de "San Miguelito" al sureste de la misma, se encuentran los bosques de pino y/o encino que son los tipos de vegetación con mayor altura y con la cubierta vegetal más densa (60-80%).

En cuanto al factor uso del suelo, la valoración de 0.7 (adimensional) que se muestra en una superficie considerable de la parte sur del área de

estudio, y por la región de Zacatecas, Zac. (regiones donde es menor la intensidad de la aridez climática), corresponde a la agricultura de temporal y es la más alta para este factor, lo que significa que opone poca resistencia al proceso de erosión. Esto se debe a que los terrenos que forman parte de las áreas con dicha valoración, la mayor parte del año (especialmente en los meses en que la agresividad climática es más intensa) se encuentran desprovistos de vegetación al ser enterrados los escasos residuos de cosecha que se dejan sobre la superficie de los mismos, mediante las operaciones de labranza para preparar el terreno, al mismo tiempo que dejan un suelo mullido y casi sin ninguna rugosidad superficial (ver puntos 3.2.2.c y e).

Las áreas con agricultura de humedad que aparecen por la región de Aguas calientes, muestran una valoración para el factor "L" de 0.2 (adimensional), lo cual indica que ofrece una mayor resistencia a la erosión eólica que el anterior uso del suelo y esto se debe a que son áreas constituidas por terrenos que en gran parte del año, están muy mojados, lo cual impide la iniciación del movimiento de las partículas por la acción del viento (ver punto 2.3.1.a), y también a las mejores condiciones de las plantas cultivadas en estos terrenos por la mayor disponibilidad de humedad, lo que hace que estas plantas ejerzan un mejor efecto protector contra la fuerza erosiva de los vientos (ver punto 2.3.1.b.1), sobre todo en los primeros meses del año, ya que son cultivos de invierno.

Las escasas y muy reducidas áreas con una valoración de 0.0 (adimensional) corresponden a los embalses de agua y la razón de esta valoración se debe a que constantemente almacenan agua.

## 5.2. Tasas estimadas de erosión eólica actual y potencial con la ecuación paramétrica de la FAO

Los mapas de riesgo de erosión eólica y la erosión eólica actual que se presentan en las Figuras 4.6 y 4.7, nos muestran que las tasas de erosión eólica tanto potencial como actual que ocurren en el área de influencia del CREZAS-CP, siguen la misma tendencia que exhibe el factor de agresividad climática "C" (ver punto 4.1.1), es decir, las tasas de erosión eólica más bajas se presentan en la parte sur del área, tasas que se incrementan a medida que se avanza hacia el norte y en la parte norte de la misma, las tasas se incrementan de este a oeste.

Por lo tanto, se puede considerar que la agresividad del clima constituye a nivel general, el factor determinante en la ubicación de la intensidad de las tasas de erosión eólica dentro del área de estudio. Este hecho es más marcado por la gran variación que se tiene en este factor (7.6 a 230.4 adimensional), como se aprecia en la Figura 4.1.

El factor suelo "S", también contribuye en parte, con esta forma de distribución de las tasas de erosión eólica potencial estimada, pues como se menciona en el punto 4.1.2, las unidades cartográficas de suelos con las valoraciones más elevadas, es decir, las que son más susceptibles de ser erosionadas por el viento se les localiza en la parte norte del área y las menos susceptibles en el sur de la misma, aunque esto no es muy estricto. Sin embargo la influencia de este factor no es tan determinante como aquella del factor de agresividad climática "C", en la tendencia mostrada por las tasas de erosión eólica potencial antes mencionada. Esto se puede notar por el hecho de que aunque existen unidades cartográficas de suelos con la valoración más alta (dentro del área de estudio) para este factor, cercas de Aguascalientes, Ags., y de San Luis Potosí, si bien es cierto que poseen tasas más altas de

erosión, éstas son más bajas en relación con las que se presentan en la parte norte del área, aún con unidades cartográficas de suelos con valores más bajas.

Por otra parte, los factores de vegetación natural "V" y uso del suelo "L", que intervienen en la estimación de la erosión eólica actual, acentúan aún más el comportamiento señalado de las tasas de erosión, como se podrá notar en la Figura 4.7. Se hace mención en el punto 4.1.4, que en forma un tanto general, se observa que las valoraciones para estos dos factores dentro del área de estudio, son más bajas en la parte sur del área y más elevadas en la parte norte. Pero, al igual que el factor suelo "S", la influencia de estos dos factores no es tan determinante en la distribución de las tasas de erosión eólica actual estimada, como la que tiene el factor de agresividad climática "C", puesto que, no obstante que existen áreas de extensión considerable con la máxima valoración para estos dos factores dentro del área de estudio, en la parte sur de la misma las tasas de erosión que se presentan en dichas áreas, caen dentro de las más bajas de toda el área de estudio.

Así pues, en forma general, se puede afirmar que esta distribución de las tasas estimadas de erosión eólica actual, se debe a que la agresividad del clima "C" en primer lugar, y a que las condiciones de suelo "S" y vegetación natural "V" o uso del suelo "L", son más conducentes al proceso de erosión eólica en la parte norte del área de estudio, y a medida que nos desplazamos hacia el sur, éstas se vuelven menos propicias para que se presente dicho fenómeno.

Por ejemplo, las áreas con la tasa más elevada (200 o más ton/ha/año) de erosión eólica actual que se localizan al noroeste del área de estudio, son áreas donde la agresividad del clima va de 175 a 230.4 (adimensional), donde los suelos son más susceptibles a la fuerza erosiva de los vientos (con una

valoración de 1.75 adimensional) es decir, donde el suelo dominante de la unidad cartográfica de suelos es calcáreo y donde la vegetación natural (matorral desértico micrófilo) es de poca altura y tiene un porcentaje de cubierta muy bajo (1-20%), dejando espacios muy amplios de suelo desnudo, o donde el uso del suelo es agricultura de temporal y por lo tanto los suelos están desprovistos de vegetación, especialmente cuando la agresividad del clima es más intensa, estos dos últimos con la valoración más alta para estos dos factores ("V" y "L") dentro del área de estudio.

### 5.3. Erodabilidad del suelo, I', factor climático local, C' y factor de rugosidad del suelo, K', de la ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway

#### a) Erodabilidad del suelo, I'

Las diferencias en la valoración para la erodabilidad del suelo, I' o la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados por el viento para el área de estudio, como lo muestra el mapa de la Figura 4.4, se debe al porcentaje de fracciones erodables y no erodables contenido por los suelos (ver punto 2.3.1). Las fracciones secas del suelo que no son erodables por el viento son aquellas mayores de 0.84 mm de diámetro, por lo que la erodabilidad del suelo disminuye al aumentar el porcentaje de estas partículas (ver punto 2.4.1.a), y los principales factores que afectan el estado y la estabilidad mecánica de estas unidades estructurales los constituyen la humedad, la textura, la materia orgánica y el carbonato de calcio (ver punto 2.3.1).

Por lo tanto, las unidades de suelo más susceptibles de ser erosionadas por la acción del viento, son aquellas que cuentan con el porcentaje más bajo de agregados secos del suelo mayores de 0.84 mm de diámetro, que según se



aprecia en el Cuadro 4.5, corresponde a la unidad del suelo Solonetz con una erodabilidad del suelo de 275 ton/ha/año, y un porcentaje de agregados mayores de 0.84 mm de diámetro de 13.72%. En tanto que la unidad de suelo menos susceptible corresponde al Regosol con una erodabilidad del suelo de 202 ton/ha/año y un porcentaje de estas fracciones de 22.94%, el cual constituye el porcentaje más alto de dichas unidades estructurales.

La erodabilidad del suelo de las unidades de suelo restantes se encuentran entre los valores de erodabilidad antes mencionados, puesto que su porcentaje de agregados mayores de 0.84 mm de diámetro están también entre los porcentajes ya mencionados (Cuadro 4.5).

Dichos valores de erodabilidad del suelo en ton/ha/año corresponden a la cantidad de suelo que se perdería en caso de que existieran las condiciones de que se hace mención en el punto 2.4.1.a. Según se explica en el punto 3.2.2.a, se hizo la suposición de que los terrenos son planos, por lo que de no ser así, es decir, si los terrenos presentan pendientes con menos de 150 m de largo, esta erodabilidad del suelo se ve incrementada, y este incremento está en función de los grados de inclinación de dicha pendiente (ver puntos 2.3.2.b.5 y 2.4.1.a).

#### b) Factor climático local, C'

En el Cuadro 3 del Apéndice aparecen los índices de efectividad de la precipitación (o precipitación efectiva), el cual es mayor (33.5 adimensional) para la localidad de Zacatecas, Zac., y menor (20.2 adimensional) para San Luis Potosí, SLP. Esto significa que la humedad efectiva del suelo opodrá mayor resistencia al movimiento del suelo por la acción del viento, pues como se indica en los puntos 2.3.1.a y 2.4.1.b, la tasa de movimiento del suelo es inversamente proporcional que el cuadrado de la humedad efectiva del suelo

superficial, por lo tanto, entre mayor sea el valor de la humedad efectiva, menor será el valor del factor climático.

La razón de que esta humedad efectiva sea mayor en la localidad de Zacatecas, Zac., y menor en la de San Luis Potosí, SLP, se debe a que (como se observa en el Cuadro 2 del Apéndice), aparte de que la precipitación pluvial es mucho más deficiente en la localidad de San Luis Potosí, SLP, la temperatura es la mayor de las tres localidades, lo que ocasiona que exista una tasa mayor de evaporación en dicha localidad, y por lo tanto los suelos serán más secos, facilitando así, el movimiento del suelo provocado por el viento.

A pesar de que la humedad efectiva es mayor en la localidad de Zacatecas, Zac., el factor climático local  $C'$ , en dicha localidad es el más elevado (49.6%) de las tres localidades (Cuadro 4.6). El motivo es que la velocidad media del viento (11.7 millas/hr) en Zacatecas, Zac., es muy alta, y como ya se explicó en el punto 5.1.a, el valor de la velocidad media del viento tiene mayor relevancia en la determinación del valor del factor climático local  $C'$ , que la humedad efectiva.

A esto se debe que los valores de este factor (cuadro 4.6), obtenidos con la ecuación (2), al igual que los obtenidos con la ecuación (6), que se muestran en el cuadro 4.2, sigan la misma tendencia que la velocidad media del viento. Así pues, como ya se señaló, el mayor valor para el factor climático local corresponde a la localidad de Zacatecas, Zac., que tiene la velocidad media del viento más elevada, en tanto que la localidad de Aguascalientes, Ags., con la menor velocidad media del viento (3.9 millas/hr) tiene un valor mucho muy bajo (2.4%) para este factor. Sin embargo, las diferencias entre estos valores no son tan marcadas en este caso como en el anterior, sobre todo entre las localidades de San Luis Potosí, SLP. y Zacatecas, Zac. Esto será

discutido más adelante.

Las razones por las que los valores del factor climático  $C'$ , son más altos durante los primeros meses del año (Cuadro 4.6), son las mismas que se mencionan en el punto 5.1.a, respecto al porcentaje muy alto de la agresividad del clima en los meses de febrero, marzo y abril.

En el mapa de la Figura 4.5, se muestra la tendencia del factor climático  $C'$  dentro de la área de estudio del CREZAS-CP, la cual es un poco diferente a la obtenida con el factor de agresividad climática (Figura 4.1), empleado por la ecuación propuesta por la FAO, sobre todo en la parte norte del área. Esta diferencia se debe básicamente a que el factor de agresividad climática de la primer ecuación fue mayor en la localidad de Zacatecas, Zac., incluyendo a las localidades empleadas para poder extrapolar resultados, circundantes a dicha área (Cuadro 4.1), mientras que el factor climático local empleado por la ecuación de Woodruff y Siddoway fue mayor para la localidad de Saltillo, Coah. (Cuadro 4.7). Estas diferencias son discutidas más adelante.

Según este mapa (Figura 4.5), la mayor parte del norte del área en que se aplicó esta ecuación (el recuadro), se encuentra entre las curvas 40 y 50%, por lo que se le asignó un valor de 45%, y una parte menor al sur de dicha área recibe el valor de 35% (puesto que se ubica entre las curvas de 30 y 40%).

#### c) Factor de rugosidad del suelo, $K'$

La valoración de 0.75 (adimensional) para el factor de rugosidad del suelo  $K'$  (ver punto 4.2.3), correspondiente a un equivalente de rugosidad del suelo  $K_r$  de 1.2 cm, y que se obtiene de la Figura 2.3, se encuentra en el rango medio de las valoraciones para este factor, que van de 0.5 a 1.0, y se

dan en razón inversa a la resistencia que oponen al proceso de erosión eólica.

Por consiguiente, esta valoración de 0.75 (adimensional) se debe a que los lomos del terreno considerados (ver punto 3.2.2.c), con una relación de altura-espaciamiento de 3:31, corresponden a un equivalente de rugosidad del suelo  $K_r$  con lomos de 1.2 cm de altura (con una relación de altura-espaciamiento de 1:4), los cuales son medianamente efectivos para resistir a la fuerza erosiva de los vientos. Puesto que como se menciona en el punto 2.3.1.b y como se puede observar en la Figura 2.3, los lomos de 5.1 a 10.2 cm de altura con una relación de altura-espaciamiento de 1:4, son los más efectivos para controlar la erosión del suelo por la acción del viento, y por lo tanto tienen un valor aproximado para este factor  $K'$  de aproximadamente 0.5 (adimensional), este valor se va incrementando para los lomos menores de 5.1 cm de altura con dicha relación de altura-espaciamiento (entre los que cae la altura de los lomos equivalentes a la rugosidad mostrada por los terrenos cultivados del área estudiada), por la razón que ya se mencionó antes, son menos efectivos para controlar la erosión eólica, hasta que en una superficie que carece de lomos (completamente plana) este valor es de 1.0 (adimensional), puesto que no ofrecen ninguna resistencia para controlar a ésta.

#### 5.4. Tasas estimadas de erosión eólica actual y potencial mediante la ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway

La mayor tasa estimada de erosión eólica potencial (122 ton/ha/año), cuya ubicación dentro del área evaluada se deja ver en la Figura 4.8, se debe a que se localiza en la parte del área que posee el valor mayor del factor climático local (45%), y sobre las unidades de suelo yermoso1 y solonetz, que son más suscep

tibles de ser erosionados por el viento, cuya erodabilidad es de 271 y 275 ton/ha/año, respectivamente (como se aprecia en la Figura 4.4).

A la inversa, la menor tasa estimada de erosión eólica potencial (75 ton/ha/año) se presenta en pequeñas áreas de la región suroeste del área evaluada donde el valor del factor climático es menor (35%), y la susceptibilidad de la unidad de suelo correspondiente (que en este caso es castañosem) es de las más bajas (la más baja en la parte del área evaluada con un valor del factor climático de 35%) cuya erodabilidad es de 216 ton/ha/año (Figura 4.4).

Aunque en este caso las tasas de erosión potencial no muestran una tendencia tan clara de aumentar conforme se avanza hacia el norte, si se puede apreciar (Figura 4.8) que las tasas que se presentan en el sur del área estudiada, en forma general, son un poco menores que las que ocurren en la zona centro y norte de la misma, y también se debe a las diferencias en la intensidad de la agresividad del clima (Figura 4.5). La razón de que esta tendencia no sea tan clara como en la otra ecuación (ver punto 5.2), se debe a que el área evaluada es más reducida, la variación en la intensidad de la agresividad del clima es mucho menor (Figuras 4.1 y 4.5), y la erodabilidad no mostró una tendencia a ser mayor en la parte norte del área (todo comparado con la ecuación anterior).

Como el factor de rugosidad del suelo  $K'$ , fue el mismo para todos los terrenos cultivados del área evaluada con esta ecuación de Woodruff y Siddoway, la distribución de la intensidad de las tasas estimadas de erosión eólica actual que ocurren en las partes cultivadas dentro de dicha área (Figura 4.9), presentan el mismo comportamiento mostrado por las tasas estimadas de erosión eólica potencial (Figura 4.8), con excepción que las primeras son 25% menores que las últimas (puesto que el valor del factor de rugosidad del suelo  $K'$  fue

de 0.75 adimensional). Es decir, que por consiguiente, las mayores tasas estimadas de erosión eólica actual se presentan donde las tasas estimadas de erosión eólica potencial fueron mayores, y viceversa.

El hecho que se menciona en el punto 4.3.2.2, de la tendencia a desaparecer de la superficies cultivadas conforme se avanza hacia el noreste del área (Figura 4.9), se debe a que la aridez climática se vuelve más intensa hacia esa parte del área, como lo demuestra la presencia en esa zona del matorral desértico micrófilo (mencionado en el punto 4.1.4), el cual predomina en las zonas más áridas sobre suelos calizos, como se señala en el punto 3.1.7.

#### 5.5. Significancia de las tasas estimadas de erosión eólica actual y potencial

La erosión eólica potencial o riesgo de erosión eólica nos permite comparar el riesgo de que ocurra erosión en áreas de tierras diferentes, es decir, que nos permite conocer el peligro que existe de que los suelos sean erosionados bajo las mismas condiciones (las peores posibles) de uso del suelo y vegetación natural (ver punto 2.5), en diferentes lugares y sobre diferentes tipos de suelo. A la vez que sirve como base para evaluar los riesgos que se corren al eliminar la vegetación natural presente o al modificar el uso de la tierra.

Así pues, en las Figuras 4.6 y 4.8, podemos apreciar este riesgo de que ocurra erosión de acuerdo a cada ecuación. Si las comparamos (Figuras 4.6 y 4.8) con las Figuras 4.7 y 4.9, podremos notar el efecto de protección proporcionado por los diferentes tipos de vegetación y usos del suelo.

También, a partir de estas figuras, estamos advertidos de que por ejemplo, si eliminamos el matorral crasicauale que se presenta al norte de Pánfilo Natera (La Blanca), Zac., con un porcentaje de cubierta vegetal de 40 a 60%

(Cuadro 4.5) y una valoración para el factor de vegetación natural de 0.25 adimensional (Figura 4.3), donde se presenta una tasa estimada de erosión eólica actual de 50-100 ton/ha/año, de acuerdo con la ecuación paramétrica de la FAO (Figura 4.7), ocurriría una erosión de aproximadamente 296 ton/ha/año. Tasa que equivale a la de erosión eólica potencial o riesgo de erosión eólica (Figura 4.6), puesto que las condiciones serían las mismas que aquellas con las cuales se calculó a esta última.

Por otra parte, estas tasas estimadas de erosión eólica actual tan elevadas para la casi totalidad del área de estudio (puntos 4.3.1.2 y 4.3.2.2) con ambas ecuaciones, traen como consecuencia una reducción considerable en la productividad de los suelos, a la vez que estos se vuelven cada vez más erodables. Esto se debe a que la fuerza erosiva del viento tiende a remover las partículas más finas de limo y arcilla del suelo, que como es bien conocido, es el mejor suelo superficial desde el punto de vista de su fertilidad, dejando atrás a las arenas y las gravas. Esto origina que la superficie del suelo se vuelva progresivamente más arenosa y por lo mismo más erodable y menos productiva (punto 2.2.4). De este material edáfico, el polvo fino que es el más fértil al ser transportado a grandes distancias en suspensión por el viento, constituye una pérdida para el área afectada, mientras que el suelo movido en saltación, usualmente permanece dentro de la misma al ser obstruido y depositarse en las cercas, setos, zanjas y caminos (punto 2.2.2.c).

Las tasas de erosión eólica actual que se muestran en los mapas elaborados deben ser tomadas como un promedio de la pérdida de suelo para el área en que se presentan, puesto que la valoración de los parámetros constituye el promedio para una área determinada. Además, las tasas estimadas con la ecuación paramétrica de Woodruff y Siddoway, como se indicó en el punto 5.3.a, es mayor

en aquellos terrenos cultivados que incluyan alguna pendiente a barlovento que no exceda los 150 m de longitud, y por otro lado, pueden ser menores cuando éstos no son lo suficientemente largos para que el flujo del suelo pueda alcanzar un máximo, como se supuso en el punto 3.2.2.d. Por estas razones, estas tasas no deben ser tomadas como algo estricto, sino como un valor aproximado a la tasa real.

### 5.6. Análisis de las ecuaciones paramétricas evaluadas

La gran diferencia que presentan para un mismo lugar las tasas de erosión eólica estimadas con cada una de las ecuaciones, solamente se puede explicar por la exactitud con que determinan estas ecuaciones a cada uno de los factores que intervienen en el proceso de la erosión eólica, y el hecho de haber tenido mejores resultados con la ecuación de Woodruff y Siddoway, hace suponer que la estimación de los parámetros es más exacta con esta ecuación.

El factor climático es el que muestra una mayor discrepancia, y como se menciona en los puntos 5.2 y 5.4, este factor desempeña un papel muy importante en la estimación de las tasas de erosión, y por consiguiente, se tiene una diferencia muy marcada en las tasas de erosión para un mismo lugar.

Esta discrepancia parece ser debida a que la humedad efectiva tiene una mayor influencia en la ecuación (2), utilizada por Woodruff y Siddoway, que en la ecuación (6) propuesta por la FAO. Pues como se observa en el Cuadro 3 del Apéndice, la condición de sequía más intensa en la localidad de San Luis Potosí, SLP (inferida a través del índice de efectividad de precipitación), hace que el factor climático para esta localidad sea casi el mismo que para Zacatecas, Zac. (Cuadro 4.6), no obstante que la velocidad del viento en esta última es mucho mayor que en la primera. A diferencia del factor de agresividad climática empleado por la FAO, cuyo valor para Zacatecas es , en forma muy considerable, mucho más elevado (Cuadro 4.3).



Esto trae como consecuencia otro hecho que hace suponer que el factor climático usado por Woodruff y Siddoway es más exacto, ya que el factor de agresividad climática obtenido con la ecuación (6) propuesta por la FAO, tiene su punto máximo en la localidad de Zacatecas, Zac., y tiende a disminuir en todas direcciones, incluyendo hacia el norte (Figura 4.1), en tanto que el factor climático calculado con la ecuación (2) usada por Woodruff y Siddoway, tiende a incrementarse hacia el norte. Esto último es más lógico puesto que la aridez climática es más intensa conforme se avanza hacia el norte del área de estudio (hacia el desierto de Chihuahua), y según lo afirman la gran mayoría de los autores, es en estos lugares (regiones áridas y semiáridas) donde las condiciones del clima (y por lo tanto del suelo y vegetación) son más conducentes al proceso de erosión eólica.

En lo que se refiere al factor suelo, también existen diferencias ya que las valoraciones para el factor suelo "S" obtenidas de acuerdo a la FAO, son las más bajas dentro del rango de valores para este factor (punto 4.1.2), mientras que las determinadas para la erodabilidad del suelo I', empleado por Woodruff y Siddoway, caen dentro de los valores medios para este factor (punto 4.2.1). Sin embargo, en este caso, no existe duda de que el procedimiento empleado con esta última que consiste en determinar el porcentaje de agregados secos mayores de 0.84 mm de diámetro, es el más exacto, pues como se hace mención en el punto 2.4.1.a, la erodabilidad de los suelos depende directamente de dicho porcentaje. En tanto que el procedimiento usado por la FAO se basa en la correlación que existe entre este porcentaje y la textura del suelo (ver punto 3.2.1.b), lo cual ya implica cierta probabilidad de error.

Si consideramos a los residuos de cosecha y la rugosidad del suelo empleados por Woodruff y Siddoway, como un equivalente del uso del suelo propuesto por la FAO, veremos que la valoración resultó casi la misma. Puesto que los residuos de cosecha no afectaron (ver punto 3.2.2.e) y el factor de rugosidad del suelo fue de 0.75 adimensional (punto 4.2.3), en tanto que la valoración para el uso del suelo con cultivos anuales fue de 0.70 adimensional (punto 4.1.1).

Otro aspecto que debe tomarse en consideración para explicar estas diferencias en los resultados obtenidos con cada una de las ecuaciones empleadas, se refiere a que la ecuación de la FAO, como se mencionó desde un principio en el punto 3.2.1, se empleó para una evaluación a nivel general "S" con una escala de 1:1'000,000, mientras que la escala usada con la otra ecuación fue de 1:50,000. Por lo tanto, es de suponer que entre más detallado sea el nivel de la evaluación, más precisos serán los resultados obtenidos.

Otra circunstancia que podría afectar la evaluación de las ecuaciones, radica en la intensidad de los vientos durante el año (1983) en que se llevó a cabo la medición directa de la erosión eólica en los terrenos de cultivo, en relación al promedio para los años de que se tiene registro en cada observatorio meteorológico. Sin embargo, la velocidad media del viento en este año fue muy similar al promedio de todos los años en las localidades del área de estudio. En Aguascalientes, Aqs., y San Luis Potosí, SLP, la velocidad media anual para ese año fue un poco menor que el promedio, y en Zacatecas, Zac., fue ligeramente mayor. De tal manera que por la localización de los terrenos en que se realizó la medición directa, la intensidad de los vientos pudo haber sido muy ligeramente superior a la normal (por su mayor cercanía con Zacatecas, Zac.), sin embargo, esto no se puede afirmar

a ciencia cierta, además de que no sería muy significativo.

Para poder afirmar lo anterior con seguridad, se necesitan más anemómetros o anemógrafos, no tan solo en esta localidad sino en toda el área de estudio, pues los tres que existen son muy pocos para toda el área, de tal manera que las extrapolaciones pueden resultar en determinadas circunstancias, un tanto engañosas. Este es un aspecto que puede ser mejorado en futuras evaluaciones, además de que el número de años con registro del viento de los anemocinemógrafos que ya existen, será mayor, lo cual brindará una mayor confiabilidad.

Otro aspecto que podría aportar cierto error, consiste en que el anemocinemógrafo del observatorio meteorológico de Zacatecas, Zac., se encuentra ubicado en el cerro de "la bufa", y las velocidades de viento registradas pueden diferir un tanto con las que se registrarían en las partes planas.

En resumen, se puede decir que todo parece indicar que la ecuación de Woodruff y Siddoway es más precisa al estimar la erosión eólica, sin embargo, sería recomendable en una evaluación futura tomar como base un número mayor de terrenos en los cuales se lleve a cabo una medición directa de la erosión eólica, y al aplicar las ecuaciones se consideren las condiciones específicas de cada terreno. En vista de que, al tomar en cuenta las características generales de una área determinada, las condiciones de los terrenos pueden variar considerablemente, aún dentro de la misma área.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Bajo las condiciones y suposiciones en que se llevó a cabo la presente evaluación, y con base a los resultados y a su discusión, se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. En general, la ecuación paramétrica para la medición de la erosión eólica publicada por Woodruff y Siddoway (1965) fue mejor en estimar a ésta.
2. Las tasas de erosión eólica actual obtenidas con la ecuación de Woodruff y Siddoway, para el área en que se aplicó, están muy por encima de las tasas de erosión permisible. Y de acuerdo con la ecuación de la FAO (1980), sucede lo mismo en el resto del área de estudio del CREZAS-CP (con excepción de una pequeña porción en el límite sur de dicha área), siendo más intenso en la parte noroeste (al norte de Zacatecas, Zac.).
3. No obstante que la erodabilidad de los suelos del área no es muy alta aún, se corre un gran riesgo de que, como consecuencia de las tasas elevadas de erosión eólica éstos progresivamente se vuelvan altamente erodables al tornarse arenosos.
4. El intenso laboreo a que se ven sometidas las superficies cultivadas del área evaluada con la ecuación de Woodruff y Siddoway, hace que las tasas de erosión eólica actual sea muy cercana al riesgo de erosión (erosión eólica potencial) que podría ocurrir en dichos lugares.
5. La agresividad del clima, determinada mediante la ecuación empleada por Woodruff y Siddoway, es demasiado débil en la región de Aguascalientes, Ags. (en el límite sur del área de estudio del CREZAS-CP), y ésta se va incrementando hasta que en la parte norte se presenta la agresividad climática más intensa dentro del área.

6. Casi la totalidad del suelo que se pierde por erosión eólica durante el año, ocurre en los primeros cinco meses del año (de enero a mayo).
7. Por sus características de altura y porcentaje de cubierta (densidad), el tipo de vegetación que predomina en el norte del área de estudio del CREZAS-CP, es la menos efectiva en dificultar el proceso de erosión eólica. Por otra parte, se carece de estudios específicos sobre la efectividad de la vegetación de tipo desértico que existe dentro del área para evitar la erosión eólica.
8. El número de muestras en que se basa la determinación de la erodabilidad de las unidades de suelo que aparecen en el área evaluada con la ecuación de Woodruff y Siddoway, son muy limitadas, por lo que viene a ser un aspecto muy importante susceptible a ser perfeccionado en trabajos futuros.
9. Es necesaria una infraestructura más eficiente de anemómetros que registren la velocidad del viento durante el año, pues el número de éstos dentro del área de estudio del CREZAS-CP, es muy deficiente, así como el número de años con registro.
10. Con el fin de tener una completa seguridad sobre la precisión de las ecuaciones, se sugiere tomar como base un mayor número de terrenos con una medición directa de la erosión eólica, donde se apliquen las ecuaciones con las condiciones específicas para cada terreno.
11. Es muy importante el efecto protector de la vegetación natural contra la acción erosiva del viento en la superficie del suelo, por lo que resulta extremadamente riesgoso su eliminación, ya sea por el sobrepastoreo, la tala o el desmonte para la apertura de tierras al cultivo.
12. Se recomienda, como medidas para controlar la erosión eólica en los terrenos cultivados del área de estudio, las siguientes prácticas agrícolas:

- a) La instalación de barreras rompevientos perpendiculares a la dirección prevaleciente del viento con alguna planta nativa, como bien pudiera ser el nopal (*Opuntia spp*), que además de proporcionar protección contra el viento, pueda ser aprovechada como un producto de recolección, no es la solución total al problema de erosión eólica en terrenos grandes (por su escasa altura), sino una de varias medidas de conservación del suelo, que en conjunto lo resuelvan. Sin embargo, barreras de nopal intercaladas con fajas angostas de otro cultivo es suficiente para solucionar dicho problema.
- b) Reducir la longitud de los terrenos usando por ejemplo fajas de vegetación natural perpendiculares a la dirección prevaleciente del viento, con objeto de que el flujo del suelo no alcance un máximo.
- c) Es muy recomendable mantener la máxima cantidad de residuos de cosecha sobre la superficie del suelo, en aquellas regiones donde es factible hacerlo, a fin de que lo proteja en la época que representa un mayor peligro de erosión eólica, ya que esta medida de conservación es considerada en general como la más importante.
- d) Otra práctica de conservación del suelo muy importante, consiste en dejar en los terrenos una superficie (perfil superficial) más áspera o rugosa al producir lomos y terrones mediante las operaciones de labranza que entorpezcan el proceso de erosión eólica.

## 7. RESUMEN

El suelo es un recurso natural sumamente importante que sirve como medio de producción para la gran mayoría de la población rural del área de estudio del CREZAS-CP, siendo cada vez mayor la conciencia del progresivo deterioro de este recurso. Se conoce también, mediante métodos o criterios visuales sencillos que identifican el proceso de erosión eólica y por su medición directa en una región de Zacatecas, que la degradación de los suelos por efecto de la erosión eólica es un problema muy extendido en la misma, aunque su distribución y el área total afectada se desconocen o su estimación es de naturaleza cualitativa. Lo anterior condujo a la realización de una evaluación de la erosión eólica actual y potencial en dicha área.

Para llevar a cabo esta evaluación se utilizaron dos ecuaciones paramétricas para estimar la erosión eólica, una de ellas propuesta por Woodruff y Siddoway (1965) y la otra por la FAO (1980). La precisión de su estimación se evaluó tomando como base la medición directa que se realizó en tres terrenos cultivados de una región de Zacatecas.

La estimación de la erosión eólica a partir de dichas ecuaciones, se basó en la recopilación de los datos existentes y en la interpretación de los factores ambientales que influyen en la amplitud y la intensidad de las tasas de erosión eólica de los suelos, tales como el clima, la vegetación, las características edáficas, la topografía y el tipo de aprovechamiento de la tierra. Los resultados de esta evaluación se compilaron en forma de mapas de la erosión eólica actual y potencial de los suelos.

Las tasas de erosión eólica actual y potencial estimadas (en ton/ha/año), obtenidas con cada una de las ecuaciones empleadas para una misma área, mos

traron una diferencia muy grande. Sin embargo, al comparar las tasas estimadas con las ecuaciones, con las tasas de la medición directa, de los terrenos cultivados tomados como base, se encontró que la ecuación de Woodruff y Siddoway resultó mejor en su estimación. La ecuación propuesta por la FAO se empleó para una evaluación a nivel general "S" con una escala de 1:1'000,000, mientras que la evaluación con la ecuación de Woodruff y Siddoway, se realizó en base a una escala de 1:50,000, lo cual pudo haber influido en este resultado. Se sugiere que la diferencia tan marcada en cuanto a la magnitud de la agresividad del clima, obtenida con cada ecuación, causa la discrepancia mostrada por las tasas estimadas con las ecuaciones.

Por otra parte, las tasas estimadas con ambas ecuaciones (sobre todo con la ecuación propuesta por la FAO, que se aplicó en toda el área de estudio del CREZAS-CP), indican una tendencia de las tasas de erosión a ser mayores donde la aridez climática es más intensa (al norte del área de estudio). Estas tasas están muy por encima de las tasas de erosión permisible o tolerante, presentándose solo algunas áreas al sur, dentro de los límites de erosión permisible.

También se deduce que un porcentaje muy elevado del suelo que se pierde en el transcurso del año como consecuencia de la fuerza erosiva de los vientos, ocurre dentro de los primeros cinco meses del año (de enero a mayo).



## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Aguirre R., J.R., E. García M., y B. Figueroa S. 1982. Los sistemas agrícolas del Altiplano Potosino-Zacatecano. Documento de Trabajo del CREZAS-CP No. 5. Salinas de Hgo., SLP. México. 26 p.
2. Ambrust, D.V., W.S. Chepil, y F.H. Siddoway. 1964. Effects of ridges on erosion of soil by wind. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28(4):557-560 pp.
3. ARS-USDA. 1961. A universal equation for measuring wind erosion. ARS Special Rpt. 22-69, 20 p.
4. Beltrán, E. 1964. Las zonas áridas de México, su presente y futuro. En E. Beltrán (Ed.), Las zonas áridas del centro y noreste de México y el aprovechamiento de sus recursos. Inst. Mex. de Rec. Nat. Ren. México. 153-169 pp.
5. CETENAL. 1971a. Cartas edafológicas F-13-B-58, F-13-B-59, F-14-A-51, F-13-B-68, F-13-B-69 y F-14-A-61. Escala 1:50,000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Secretaría de la Presidencia. México, D.F.
6. \_\_\_\_\_. 1971b. Cartas de uso del suelo F-13-B-58, F-13-B-59, F-14-A-51, F-13-B-69 y F-14-A-61. Escala 1:50,000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Secretaría de la Presidencia. México, D.F.
7. \_\_\_\_\_. 1972. Carta de uso del suelo F-13-B-68. Escala 1:50,000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Secretaría de la Presidencia. México, D.F.
8. Colegio de Postgraduados. 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 599 p.
9. Chepil, W.S. 1944. Utilization of crop residues for wind erosion control. Sci. Agric. 24:307-319 pp.
10. \_\_\_\_\_. 1946. Dynamics of wind erosion: V. Cumulative intensity of soil drifting across eroding fields. Soil Sci. 61(3):257-262 pp.
11. \_\_\_\_\_. 1950a. Properties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness. Soil Sci. 69:149-162 pp.
12. \_\_\_\_\_. 1950b. Properties of soil which influence wind erosion: II. Dry aggregate structure as an index of erodibility. Soil Sci. 69:149-162 pp.
13. \_\_\_\_\_. 1953. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: I. Soil texture. Soil Sci. 75(6):473-483 pp.

14. \_\_\_\_\_, 1954. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: III. Calcium carbonate and decomposed organic matter. *Soil Sci.* 77(6):473-480 pp.
15. \_\_\_\_\_, 1955a. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. Sand, silt, and clay. *Soil Sci.* 80(2):155-162 pp.
16. \_\_\_\_\_, 1955b. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: V. Organic matter at various stages of decomposition. *Soil Sci.* 80(5):413-421 pp.
17. \_\_\_\_\_, 1956. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20(2):288-292 pp.
18. \_\_\_\_\_, 1957a. Sedimentary characteristics of dust storms: I. Sorting of wind-eroded soil material. *Amer. Jour. Sci.* 255:12-22 pp.
19. \_\_\_\_\_, 1957b. Sedimentary characteristics of dust storms: III. Composition of suspended dust. *Amer. Jour. Sci.* 255:206-213 pp.
20. \_\_\_\_\_, 1957c. Erosion of soil by wind. 1957. Yearbook of Agriculture (USDA): 308-314 pp.
21. \_\_\_\_\_, 1957d. Width of field strips to control wind erosion. *Kans. Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.* 92. 16 p.
22. \_\_\_\_\_, 1958. Soil conditions that influence wind erosion. USDA Tech. Bul. No. 1185. 40 p.
23. \_\_\_\_\_, 1959. Wind erodibility of farm fields. *Jour. Soil and Water Conserv.* 14(5):214-219 pp.
24. \_\_\_\_\_, 1960a. The cycle of wind erosion. *Proc. Seventh Intern. Congress of Soil Sci.* 1:225-231 pp.
25. \_\_\_\_\_, 1960b. Conversion of relative field erodibility to annual soil loss by wind. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 24(?):143-145 pp.
26. \_\_\_\_\_, 1961. The use of spheres to measure lift and drag on wind-eroded soil grains. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25(5):343-345 pp.
27. \_\_\_\_\_, F.H. Siddoway, y D.V. Armbrust. 1962. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Jour. Soil and Water Conserv.* 17(4):162-165 pp.
28. \_\_\_\_\_, F.H. Siddoway, y D.V. Armbrust. 1963. Climatic index of wind erosion conditions in the Great Plains. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27(4):449-452 pp.

29. \_\_\_\_\_, F.H. Siddoway, y D.V. Armbrust. 1964a. Wind erodibility of Knolly Terrain. *Jour. Soil and Water Conserv.* 19(5):179-181 pp.
30. \_\_\_\_\_, F.H. Siddoway, y D.V. Armbrust. 1964b. In the Great Plains prevailing wind erosion direction. *Jour. Soil and Water Conserv.* 19(2):67-70 pp.
31. \_\_\_\_\_, y N.P. Woodruff. 1954. Estimations of wind erodibility of field surfaces. *Jour. Soil and Water Conserv.* 9(6):257-265 pp.
32. \_\_\_\_\_, y N.P. Woodruff. 1959. Estimations of wind erodibility of farm fields. ARS, USDA, Prod. Res. Rpt. No. 25. 21 p.
33. \_\_\_\_\_, y N.P. Woodruff. 1963. The physics of wind erosion and its control. *Adv. in Agron.* 15:211-302 pp.
34. Daniel, H.A. 1936. The physical changes in soils of the Southern High Plains due to cropping and wind erosion and the relation between the sand+silt/clay ratios in these soils. *Jour. Amer. Soc. Agron.* 28(7):570-580 pp.
35. Doorenbos, J., y W.O. Pruitt. 1980. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y drenaje 24. Segunda Impresión. Roma. 194 p.
36. Englehorn, C.L., A.W. Zingg, y N.P. Woodruff. 1952. The effects of plant residue cover and clod structure on soil losses by wind. *Soil Sci. Proc.* 16(1):29-33 pp.
37. Espinoza, J.M. 1966. Estudio genético de los suelos rojos del estado de Zacatecas. Tesis de MC. Colegio de Postgraduados, ENA, Chapingo, México. 93 p.
38. FAO. 1960. Soil erosion by wind and measures for its control on agricultural lands. FAO. Agricultural Development Paper No. 71. Rome, Italy. 88 p.
39. \_\_\_\_\_. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO y PNUMA. Roma, Italia. 86 p.
40. Fisher, P.S., y E.L. Skidmore. 1970. WEROS: A fortran IV program to solve the wind erosion equation. USDA, ARS 41-174. 13 p.
41. García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México. 246 p.
42. Hagen, L.J. 1976. Windbreak design for optimum wind erosion control. In *Proc. of the Symposium "Shelterbelts on the Great Plains"*, Great Plains Agr. Council Pub. No. 78:31-36 pp.

43. \_\_\_\_\_, y E.L. Skidmore. 1971. Turbulent velocity fluctuations and vertical flow as affected by windbreak porosity. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engin.* 14(4):634-637 pp.
44. Hudson, N. 1971. Conservación del suelo. Cap. 14. La erosión eólica y su control. Ed. REVERTÉ, S.A. México. 265-280 pp.
45. Kimberlin, L.W., A.L. Hidlebaugh, y A.R. Grunewald. 1977. The potential wind erosion problem in the United States. *Trans. ASAE*, 20:873-879 pp.
46. Lyles, L. 1975. Possible effects of wind erosion on soil productivity. *Jour. Soil and Water Conserv.* 30(6):279-283 pp.
47. \_\_\_\_\_. 1977. Wind erosion: processes and effect on soil productivity. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engin.* 20(5):880-884 pp.
48. \_\_\_\_\_. 1983. Erosive wind energy distributions and climatic factors for the west. *J. Soil and Water Conserv.* 38(2):106-109 pp.
49. \_\_\_\_\_, y B.E. Allison. 1980. Range grasses and their small grain equivalents for wind erosion control. *Jour. Range Mgmt.* 33(2):143-146 pp.
50. \_\_\_\_\_, y B.E. Allison. 1981. Equivalent wind-erosion protection from selected crop residues. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engin.* 24(2):405-408 pp.
51. \_\_\_\_\_, L.J. Hagen, y E.L. Skidmore. 1983. Soil Conservation: Principles of erosion by wind. ARS-USDA. Dryland Agriculture-Agr. Monograph No. 23: 177-188 pp.
52. Marroquin, S.J., L. Borja, C. Velázquez, y J.A. de la Cruz. 1964. Estudio ecológico dasonómico de las zonas áridas del norte de México. *Pub. Esp. 2.* INIF. SAG, México. 166 p.
53. Rzedowski, J. 1957. Vegetación de las partes áridas de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat., México.* 18(1-4):49-101 pp.
54. \_\_\_\_\_. 1965. Vegetación del estado de San Luis Potosí. *Acta Científica Potosina.* 5 (1-2). San Luis Potosí, SLP. México. 291 p.
55. Shu-Tung Chu. 1985. A graphical aid for the wind erosion equation. *Jour. Soil and Water Conserv.* 40(4):336 pp.
56. Siddoway, F.H., W.S. Chepil, y D.V. Armbrust. 1965. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engin.* 8(3):327-331 pp.
57. Skidmore, E.L. 1965. Assessing wind erosion forces: Directions and relative magnitudes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29(5):587-590 pp.

58. \_\_\_\_\_. 1977. Criteria for assessing wind erosion. In *FAO Soils Bul.* 34, *Assessing Soil Degradation*. 52-62 pp.
59. \_\_\_\_\_. 1979. Wind erosion. In *Encyclopedia of Earth Science Series*, Rhoades W. Fairbridge and Charles W. Finkl, Jr. (eds.), Vol. XII, *Soil Science-Part I*:608-615 pp.
60. \_\_\_\_\_. 1982. Soil loss tolerance. In B.L. Schmidt (ed.), *Determinants of Soil Loss Tolerance*, ASA Special Pub. No. 45:87-93 pp.
61. \_\_\_\_\_. 1983. Wind erosion calculator: revision of residue table. *Jour. Soil and Water Conserv.* 38(2):110-112 pp.
62. \_\_\_\_\_, y L.J. Hagen. 1977. Reducing wind erosion with barriers. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engin.* 20(5):911-915 pp.
63. \_\_\_\_\_, N.L. Nossaman, y N.P. Woodruff. 1966. Wind erosion as influenced by row spacing, row direction, and grain sorghum population. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30(4):505-509 pp.
64. \_\_\_\_\_, y N.P. Woodruff. 1968. Wind erosion forces in the United States and Their use in predicting soil loss. USDA, ARS, *Agriculture Handbook No. 346*. 42 p.
65. \_\_\_\_\_, P.S. Fisher, y N.P. Woodruff. 1964. Wind erosion equation: Computer solution and application. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34(5): 931-935 pp.
66. Smith, R.M., y W.L. Stamey. 1964. How to establish erosion tolerances. *Jour. Soil and Water Conserv.* 19(3):110-111 pp.
67. \_\_\_\_\_, y W.L. Stamey. 1965. Determining the range of tolerable erosion. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29(5):587-590 pp.
68. SPP. 1981. Cartas: Topográfica, hipsométrica, de climas, de temperaturas medias anuales, de precipitación total anual, geológica, edafológica y de uso del suelo, escala 1:1'000,000, del Atlas Nacional del Medio Físico. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, DF. 224 p.
69. SRH. 1971. Mapa de tipos de vegetación de la República Mexicana. Escala 1:2'000,000. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México.
70. Stallings, J.H. 1951. *Mechanics of wind erosion*. USDA. ARS-IP-108. 12 p.
71. Thornthwaite, C.W. 1931. Climates of North America according to a new classification. *Geog. Rev.* 21:633-655 pp.

72. Velázquez, C., R. 1962. Aspectos ecológicos (de la región árida de Zac. y SLP). En C. Velázquez R. Aspectos ecológicos de Opuntia streptacantha y O. leucotricha en la región árida de Zacatecas y San Luis Potosí. Tesis Profesional. SAG. Chapinoo, México. 10-63 pp.
73. Wilson, S.J. y R.U. Cooke. 1984. Erosión eólica. En R.J. Kirkby y R.P.C. Morgan (eds.). Erosión de suelos. Ed. LIMUSA. México. 267-302 pp.
74. Woodruff, N.P. 1966. Wind erosion mechanics and control. Proc. First Pan American Congress of Soil Conservation, Sao Paulo, Brazil. 253-262 pp.
75. \_\_\_\_\_, y A.W. Zingg. 1952. Wind-tunnel studies of fundamental problems related to windbreaks. USDA, SCS-TP-112. 25 p.
76. \_\_\_\_\_, y D.V. Ambrust. 1968. A monthly climatic factor for the wind erosion equation. Jour. Soil and Water Conserv. 23(3):103-104 pp.
77. \_\_\_\_\_, y F.H. Siddoway. 1965. A wind erosion equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29(5):602-608 pp.
78. \_\_\_\_\_, L. Lyles, F.H. Siddoway, y D.W. Fryrear. 1977. How to control wind erosion. USDA-ARS. Agr. Inf. Bul. No. 354. 22 p.
79. Zachar, D. 1982. Soil erosion. Developments in Soil Science 10. Elsevier/North-Holland, Inc., New York. 547 p.
80. Zingg, A.W. 1953. Wind-tunnel studies of the movement of sedimentary material. Proc. of the Fifth Hydraulics Conference, Bul. 34. State University of Iowa Studies in Engineering. 111-135 pp.
81. \_\_\_\_\_. 1954. The wind erosion problem in the Great Plains. Trans. Amer. Geophys. Union 35(2):252-258 pp.
82. \_\_\_\_\_, N.P. Woodruff y C.L. Englehorn. 1952. Effect of wind-row orientation on erodibility of land in sorghum stubble. Agron. Jour. 44(5):227-230 pp.
83. \_\_\_\_\_, y W.S. Chepil. 1950. Aerodynamics of wind erosion. Agr. Engin. 31(6):279-282, 284 pp.

### 1. Ejemplo del cálculo de la erosión eólica

Supongamos un terreno largo con un ancho orientado de N a S de 800 m, con 10° de desviación de la dirección prevaleciente de la erosión eólica del S hacia el W, el terreno es en su mayor parte plano pero existe una colina significativa con una pendiente a barlovento de 3% en promedio y el factor climático es de 50%. El terreno tiene 600 kg/ha de rastrojo de trigo extendido. El tamizado en seco indicó que un 25% de las fracciones del suelo fueron mayores de 0.84 mm de diámetro. Existe una barrera de 18 m de altura en el lado sur del terreno. El terreno presenta lomos de 5 cm de altura espaciados a 50 cm a lo largo de la dirección prevaleciente de la erosión eólica.

#### PAÑOS PARA DETERMINAR E

1. Determinar  $E_1 = I'$ . Use el Cuadro 2.2:  $I = 193$  ton/ha/año. Use la Fig. 2.2, para determinar  $I_{S,1S} = 150\%$  para la cima de la colina, 130% para la pendiente a barlovento. Como rango de seguridad use 150%; por lo tanto,  $E_1 = I \times I_S = 193 \times 1.5 = 289.5$  ton/ha/año.

2. Determine  $E_2 = I'K'$

a) Determine  $K_r$ :

$$K_r = \frac{\text{relación de espaciamiento estándar (1:4)}}{\text{relación medida en campo (1:X)}} \times \text{altura de lomos} = \frac{1:4}{1:10} (5) = 2 \text{ cm}$$

b) Determine  $K'$ . Use la Figura 2.3, para determinar  $K'$ .

$$K' = 0.67 \text{ (adimensional)}$$

$$E_2 = I'K' = 289.5 \times 0.67 = 194 \text{ ton/ha/año.}$$

3. Determine  $E_3 = I'K'C'$ ,  $C' = 50\%$

$$E_3 = 289.5 \times 0.67 \times 0.50 = 97 \text{ ton/ha/año}$$

800m → p' la ...  
por ...

4. Determine  $E_4 = I', K', C', f(L')$

a) Determine la distancia  $D_f$  con la Fig. 2.4.

$$D_f = 815 \text{ m} \quad (\text{sin considerar el rompimiento})$$

b) Determine  $L$ , restándole  $D_b$ .  $D_b$  equivale a 10 veces la altura de la barrera o  $10 \times 18 = 180 \text{ m}$

$$L' = D_f - D_b = 815 - 180 = \underline{635 \text{ m}}$$

c) Use la Fig. 2.8, para obtener  $E_4 = I', K', C', f(L')$ . Entre con el valor de  $E_2 = 194$  en el eje vertical y con el valor de  $E_3 = 97$  en el eje horizontal (gráfica derecha). La intersección es A. Entre con el valor de  $E_2 = 194$  en el eje vertical siguiendo la curva "extrapolada" y el valor de la distancia desprotegida  $L' = 635 \text{ m}$  en el eje horizontal (gráfica izquierda). La intersección es B. Corra una línea horizontal de B hacia la gráfica derecha, y otra línea de A inclinada a  $45^\circ$  paralela a las otras líneas inclinadas. El punto donde se intersectan estas líneas es C. Baje verticalmente de C hacia el eje horizontal, el valor intersectado es el valor de  $E_4 = I', K', C', f(L') = 91 \text{ ton/ha/año}$ .

5. Determine  $E_5 = E = I', K', C', f(L'), f(V)$

a) Determine  $V$  con la Fig. 2.6.  $V = 1,800 \text{ kg/ha equivalentes}$

b) Use la Figura 2.9, para determinar  $E_5 = E$ . Inicie con  $E_4 = 91$  en el eje horizontal de la Fig. 2.9. Mueva verticalmente hacia arriba hasta la intersección con  $V = 1,800 \text{ kg/ha} = 1,606 \text{ lb/acre}$

(1 lb/acre = 1.121 kg/ha), mueva entonces horizontalmente hacia la izquierda hasta el eje vertical E.  $E = 52 \text{ ton/ha/año}$ .



Ejemplo del uso de la ecuación a la inversa para determinar el ancho del terreno necesario para controlar la erosión eólica.

Supongamos las mismas condiciones del ejemplo anterior, excepto que se decidió que sería posible mantener 900 kg/ha de rastrojo de trigo extendido, y se planeó usar una combinación de esta cubierta vegetativa con fajas de terreno para controlar la erosión.

$$I' = 289.5 \text{ kg/ha/año}$$

$$K' = 0.67 \text{ adimensional}$$

$$C' = 50\%$$

$$X' = 900 \text{ kg/ha de rastrojo de trigo extendido}$$

$E$  = Pérdida de suelo permisible = 11 ton/ha/año (5 tons/acre/año). Lo que constituye una pérdida tolerable depende de varios factores. 5 tons/acre/año es un valor más o menos juicioso basado en el conocimiento actual de los efectos erosivos.

#### PASOS PARA DETERMINAR $L'$

1. Determine  $E_2 = 289.5 \times 0.67 = 194 \text{ ton/ha/año}$
2. Determine  $E_3 = 289.5 \times 0.67 \times 0.50 = 97 \text{ ton/ha/año}$
3. Determine  $V$  con la Fig. 2.6.  $V = 3,000 \text{ kg/ha equivalentes}$
4. Determine  $E_4$  con la Fig. 2.9, para una  $E$  tolerable de 11 ton/ha/año. Inicie con  $E = 11$  en el eje vertical y mueva horizontalmente hacia la derecha hasta la intersección con la línea "extrapolada" de  $V = 2,680 \text{ lb/acre (3,000 kg/ha)}$ , mueva entonces verticalmente hacia abajo hasta el eje horizontal  $E_4$  y lea  $E_4 = 43 \text{ ton/ha/año}$ .
5. Determine  $L'$  con la Fig. 2.8. Entre el valor de  $E_2 = 194$  en el eje vertical y con el valor de  $E_3 = 97$  en el eje horizontal (gráfica derecha). La intersección es  $A$ . Corra una línea de  $A$  inclinada a  $45^\circ$  para

lela a las otras líneas inclinadas, y otra línea de  $E_4 = 43$  desde el eje horizontal (gráfica derecha). El punto donde se intersectan estas dos líneas es C. Trace una línea horizontal de C a la gráfica izquierda y donde se intersecta con la curva "extrapolada" de  $E_2 = 194$  es el punto B. Baje verticalmente de B hacia el eje horizontal, el valor intersectado es el valor de  $L' = 50$  m.

La ecuación de la erosión eólica puede ser usada para considerar otras posibles condiciones o combinación de condiciones que podrían ser usadas para un control más efectivo de la erosión. El ejemplo anterior solo sirve para ilustrar una posible aplicación.

2. FORMULARIO DE CALCULO DEL METODO PENMAN

$EI = c [W.Rn + (1 - W)f(u) (ea - ed)]$				
DATOS	País:	Lugar:	Latitud:	Altitud:
	Período:		Longitud:	
$t_{media} = \frac{1}{2}   t_{max} + t_{min}  $ $RH_{media} = \frac{1}{2}   RH_{max} + RH_{min}  $	$ea$ mbar (7) <sup>3</sup> RH % datos $ed$ mbar cálc.		$(ea - ed)$ mbar cálc. $f(u)$ (9) $(1 - W)$ (10)	
$v_2 = km/d$ $t = ^\circ C$ $alt = m$	$Ra$ m/día (12) $n$ h/día datos $N$ h/día (13) $n N$ cálc.		$(1 - W) f(u) (ea - ed)$ m/día cálc.	
$K = 0.25$	$Rns$ m/día (14)		$f(t)$ (15) $f(ed)$ (16) $f(n N)$ (17)	
$t = ^\circ C$ $ed = mbar$ $n N =$	$Rnl = f(t), f(ed), f(n N)$ m/día cálc.	$Rn = Rns - Rnl$ cálc.	$W$ (11)	
$t = ^\circ C$ $alt = m$	$c$ (17a)	$W, Rn$ cálc.	$W, Rn$ cálc.	
$t_{max}$ máx diurnos/noct.	$c$	$EI = c [W.Rn + (1 - W)f(u)(ea - ed)]$ m/día	$c$ (17a)	

1.  $t_{media}$  = temp. máx. + temp. mín. / 2

2.  $RH_{media}$  = Hum. rel. máx. + Hum. rel. mín. / 2

3. Las cifras entre paréntesis remiten al cuadro de referencia en Doorenbos y Pruitt (1980).

Cuadro 1. Datos climáticos recabados y utilizados para calcular la evapotranspiración potencial de tres localidades del área de estudio. CREZAS-CP. 1985.

LOCALIDAD	AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>TEMPERATURA MEDIA (°C)<sup>1/</sup></b>														
Aguascalientes, Ags.	6	12.5	14.0	17.0	19.4	21.2	22.3	20.4	20.0	19.2	17.9	14.7	13.3	17.7
San Luis Potosí, SLP.	6	12.5	14.1	17.7	19.8	21.2	20.9	19.7	19.8	18.6	17.5	14.8	13.6	17.5
Zacatecas, Zac.	5	9.6	10.5	13.0	15.8	16.9	17.6	14.3	15.0	14.2	14.2	12.6	10.2	13.6
<b>HUMEDAD RELATIVA MEDIA (%)<sup>2/</sup></b>														
Aguascalientes, Ags.	6	55.9	49.6	39.2	38.0	42.7	49.7	62.1	63.3	62.5	57.8	55.8	59.7	53.0
San Luis Potosí, SLP.	6	61.0	55.0	45.0	47.0	55.0	61.0	67.0	66.0	69.0	63.0	59.0	64.0	59.3
Zacatecas, Zac.	5	59.4	46.5	38.7	39.6	47.5	55.9	73.1	68.0	72.1	62.9	52.2	59.0	56.2
<b>VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO (km/día)<sup>3/</sup></b>														
Aguascalientes, Ags.	3	112	130	126	107	124	87	111	112	190	99	105	126	119
San Luis Potosí, SLP.	6	236	250	310	301	269	250	243	243	184	180	185	168	235
Zacatecas, Zac. <sup>4/</sup>	5	395	422	500	435	329	289	303	276	289	303	342	369	354
<b>INSOLACION (hr/día)</b>														
Aguascalientes, Ags.	6	7.8	9.0	10.0	9.7	9.3	9.2	7.4	7.8	7.0	8.4	9.0	7.4	8.5
San Luis Potosí, SLP.	8	6.7	7.8	8.3	8.7	8.2	9.2	7.6	7.6	6.1	7.2	7.5	6.4	7.6
Zacatecas, Zac. <sup>5/</sup>	5	6.2	7.9	8.5	7.8	7.1	6.9	4.3	5.2	4.9	7.1	8.0	7.2	6.8
<b>RELACION DE VIENTOS: DIURNOS/NOCTURNOS (ADIMENSIONAL)</b>														
Aguascalientes, Ags.	3	2.7	5.9	3.4	3.4	2.4	2.1	3.1	2.8	3.5	3.1	1.7	2.5	3.0
San Luis Potosí, SLP.	7	1.7	2.5	1.7	2.0	1.6	1.4	1.6	1.7	2.0	2.0	1.8	1.7	1.8
Zacatecas, Zac.	3	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9

<sup>1/</sup> Determinada a partir de  $t_{\text{máx}} + t_{\text{mín}}/2$ .

<sup>2/</sup> Determinada a partir de  $\text{hum. rel. máx.} + \text{hum. rel. mín.}/2$ .

<sup>3/</sup> A 2 m de altura.

<sup>4/</sup> Los datos de 1980, 1981 y 1982, fueron estimados utilizando la escala "Beaufort"

<sup>5/</sup> Dato determinado a partir de la nubosidad (FAO,1977).

Cuadro 2. Datos climáticos de tres localidades, usados en la determinación del índice de efectividad de la precipitación de Thornthwaite. CREZAS-CP. 1985.

Localidad	AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
PRECIPITACION PLUVIAL (pulgadas)*														
Aguascalientes, Ags.	34	0.61	0.29	0.19	0.53	0.60	3.29	4.07	4.65	3.73	1.55	0.42	0.49	20.4
San Luis Potosí, SLP.	7	0.96	0.41	0.18	0.89	1.76	1.09	2.40	1.93	1.77	1.10	0.21	1.31	14.0
Zacatecas, Zac.	49	0.49	0.26	0.19	0.26	0.66	3.10	3.79	3.90	3.35	1.47	0.61	0.39	18.5
TEMPERATURA MEDIA (°F)														
Aguascalientes, Ags.	6	55.1	58.0	64.5	68.7	71.8	72.9	68.8	67.8	67.0	64.8	59.0	56.2	64.6
San Luis Potosí, SLP.	6	56.1	58.2	66.4	69.9	71.8	71.4	67.7	67.5	66.2	64.6	59.9	56.6	64.7
Zacatecas, Zac.	5	48.0	50.3	54.8	59.6	61.8	63.2	57.3	58.4	57.0	57.1	54.2	50.0	56.5

\*Si es menor de 0.50, se usa 0.50 (Lyles, 1983).

Cuadro 3. Índice de efectividad de la precipitación y velocidad media del viento de tres localidades para el cálculo del factor climático local, C'. CREZAS-CP. 1985.

Localidad	AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
INDICE DE EFECTIVIDAD DE PRECIPITACION (adimensional) <sup>1/</sup>														
Aguascalientes, Ags.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.0
San Luis Potosí, SLP.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.2
Zacatecas, Zac.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33.5
VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO (millas/hr) <sup>2/</sup>														
Aguascalientes, Ags.	3	3.7	4.3	4.2	3.5	4.1	2.9	3.6	3.7	6.3	3.3	3.5	4.2	3.9
San Luis Potosí, SLP.	6	7.8	8.3	10.2	9.9	8.9	8.3	8.0	8.0	6.1	6.0	6.1	5.5	7.8
Zacatecas, Zac.	5	13.1	13.9	16.5	14.4	10.9	9.6	10.0	9.1	9.6	10.0	11.3	12.2	11.7

<sup>1/</sup> El número de años de los datos con que se calculó fue variable dentro de una misma localidad. El índice de efectividad de precipitación no es confiable para periodos cortos (Woodruff y Ambrust, 1968).

<sup>2/</sup> A 9.1 m de altura.