

# SEQUÍA METEOROLÓGICA

María Engracia Hernández Cerda,\* Laura Angélica Torres Tapia\*\* y Gonzalo Valdez Madero\*

## Resumen

Se determinaron las áreas de México vulnerables a la sequía meteorológica en el periodo de 1950-1980, mediante un índice de severidad, en condiciones actuales y según escenarios de cambio climático. Se utilizaron los modelos climáticos de circulación general GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y CCC (*Canadian Climate Center*).

Se muestra la distribución espacial de las áreas afectadas, según seis grados de afectación de la sequía. Además, se ofrecen los porcentajes de superficie del país vulnerables a este fenómeno a nivel nacional y estatal.

## 1. Introducción

El efecto devastador que recurrentemente causan las sequías en diferentes partes del mundo es motivo de alarma y preocupación entre la población y sus gobernantes. Sin embargo, el estado de alerta persiste poco tiempo (Sivakumar, 1992), ya que después, no se toman acciones preventivas para disminuir los efectos de posteriores sequías.

Este fenómeno se presenta tanto en países en desarrollo, entre ellos México, como también en los desarrollados (Hare, 1985), aunque en estos últimos, los efectos no son tan destructivos, gracias a la rapidez con que aplican medidas correctivas, derivadas de programas vigentes.

El análisis de los efectos de la sequía se lleva a cabo a partir de diferentes enfoques: agrícola, hidrológica, meteorológica, biológica, ambiental, urbana o social. Cada enfoque o campo de estudio, proporciona distinta definición y caracterización.

Este estudio analiza la sequía desde el punto de vista meteorológico, y la define como función del déficit de precipitación, expresado en porcentaje respecto a la pluviosidad media anual o estacional de largo periodo y su duración en una determinada región.

México, por su localización geográfica, es sumamente vulnerable a la acción desastrosa de las sequías. Se tiene conocimiento que desde las primeras civilizaciones prehispánicas, se padecía en sus diferentes manifestaciones (Castorena, *et. al.*, 1980).

En los últimos años, la sequía ha adquirido una gran relevancia por los daños que ocasiona, que con frecuencia superan en magnitud a los que producen otros fenómenos hidrometeorológicos, y se torna más amenazador por el calentamiento atmosférico asociado al cambio global, entre cuyas secuelas el aumento en la frecuencia de sequías en determinadas zonas del planeta, es uno de los más serios problemas que enfrentará la humanidad, en especial los países ubicados en las zonas subtropicales, donde los altos niveles de radiación solar y evaporación se combinan con escasas precipitaciones y favorecen la recurrencia de periodos prolongados de sequía en áreas extensas (Salati y Nobre, 1991).

Es por ello que el objetivo general del estudio fue determinar las áreas del país que son vulnerables a la sequía meteorológica, con el propósito particular de evaluar y cartografiar el proceso de sequía de las áreas afectadas actualmente, y las potenciales, según escenarios de cambio climático.

## 2. Metodología

El presente trabajo se dividió en tres etapas: base de datos, escenarios actual y futuros.

### 2.1 Base de datos

---

\* Instituto de Geografía, UNAM.

\*\* Facultad de Ciencias, UNAM.

Se elaboraron una serie de programas que facilitarían cada uno de los pasos seguidos en el procesamiento de los datos utilizados. Éstos se hicieron en FoxPro 2.0.

Se utilizaron datos de precipitación media mensual de 284 estaciones meteorológicas, tomadas de la base de Douglas, adaptada por la línea de escenarios físicos (Magaña, *et al.*, 1997). Se incluyeron cuatro estaciones más, localizadas en la frontera noroeste con Estados Unidos, para obtener información de esa área del país.

Como hubo registros faltantes en diferentes años y meses, se depuraron las bases de datos. Por ejemplo, se eliminaron aquellos años en los cuales faltaban más de cinco datos de precipitación.

El periodo de años de observación de las estaciones es variable, por lo que sólo se consideró el lapso 1950-1980.

El cálculo del índice de severidad para cada año en el periodo estudiado, se realizó con los datos de precipitación, comparados con sus respectivas medias, como se muestra en el siguiente ejemplo:

Índice de Severidad (I.S.):

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AG	SEPT	OCT	NOV	DIC
Y	0.0	10.6	4.7	0.0	5.0	9.6	65.6	152.5	48.2	0.0	0.0	51.4
X	14.7	7.1	4.8	13.9	13.5	108.9	117.3	114.2	95.5	39.2	11.3	17.2

$$I.S. = (SUMY - SUMX) / SUMX \quad (Fórmula 1) \quad SUMY < SUMX$$

Donde: Y = Precipitación mensual registrada  
X = Precipitación mensual normal (periodo 1950-1980)

SUMY = 133.1  
SUMX = 419.1  
I.S. = -0.68

Si SUMY - SUMX es menor de 0.0, hay sequía meteorológica.

El valor de SUMY se obtiene de la suma de los datos del renglón "Y" si son menores que su respectiva media mensual normal de la línea "X". En el ejemplo, los valores considerados son 0.0, 4.7, 0.0, 5.0, 9.6, 65.6, 48.2, 0.0 y 0.0.

Para SUMX, los datos que se suman son las medias mensuales del renglón "X" que fueron mayores para aquellos valores sumados de la línea "Y". En el ejemplo los valores sumados son 14.7, 4.8, 13.9, 13.5, 108.9, 117.3, 95.5, 39.2 y 11.3.

Se calcula el índice con la fórmula (1). Por último, se obtiene el promedio de los índices de severidad del periodo estudiado.

El procedimiento descrito se llevó a cabo mediante el programa SEQUIA1.PRG, contenido en la base de datos.

## 2.2 Escenario actual

Con el índice de severidad (IS) obtenido para todas las estaciones, se generó el mapa de escenario base, por medio del trazo de isólinas. Se trabajó con un mapa escala original 1:8,000,000.

El índice de severidad de la sequía meteorológica se clasificó en siete grados: extremadamente severo (mayor de 0.8), muy severo (0.6 a 0.8), severo (0.5 a 0.6), muy fuerte (0.4 a 0.5), fuerte (0.35 a 0.4), leve (0.2 a 0.35) y ausente (<0.2). (Sancho y Cervera, *et al.*, 1980).

## 2.3 Escenarios futuros

Se utilizaron los modelos climáticos de Circulación General GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y CCC (*Canadian Climate Center*), para simular los cambios en el equilibrio climático resultante del incremento de dos veces las concentraciones del CO<sub>2</sub> (Ver capítulo 1).

Los datos de precipitación media mensual se ajustaron a los cambios planteados por los modelos GFDL-R30 y CCC para simular los efectos de un posible incremento de dos veces la concentración de CO<sub>2</sub>. Esto se hizo al multiplicar los registros de precipitación media mensual de enero a diciembre de los treinta años estudiados por los cambios en porcentaje propuestos en condiciones de 2XCO<sub>2</sub>.

De esta forma se obtuvo un archivo con datos de precipitación simulados, que se importaron a la base de datos para calcular el índice de severidad de la sequía meteorológica con el programa SEQUIA2.PRG modificado, que calcula el I.S. considerando la media mensual normal del periodo 1950-1980.

Con los I.S. obtenidos para todas las estaciones modificados, se generaron los mapas de los escenarios futuros, según los modelos CCC y GFDL-R30, mediante el trazo de isolíneas.

Por último, para la digitalización, medición y sobreposición de los mapas resultantes se utilizó el sistema de información geográfica (SIG) ILWIS (The Integrated Land and Water Information System Management) (Palacio, 1993).

### 3. Resultados y discusión

Los resultados de la medición de las áreas con los diferentes grados de severidad en condiciones actuales y, de acuerdo con los modelos CCC y GFDL-R30, se concentran en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Superficie del país afectada por sequía, de acuerdo con los escenarios actual, CCC y GFDL-R30

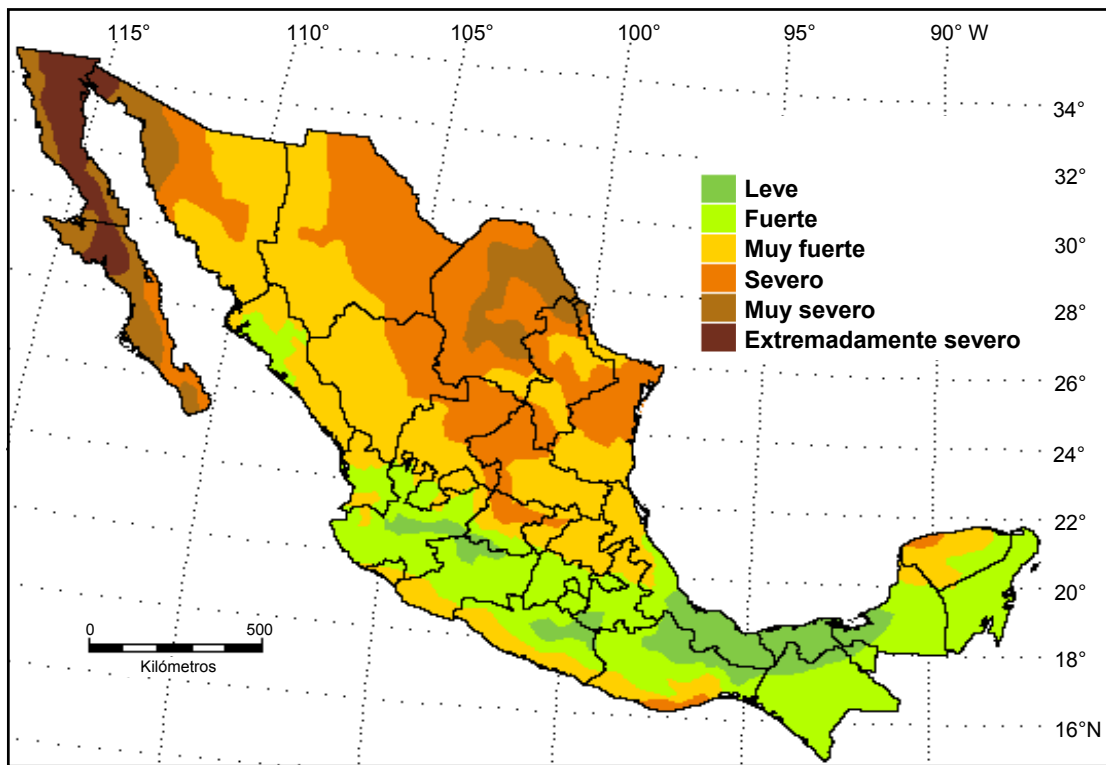
Índice de severidad de la sequía meteorológica	Escenario	Actual	Modelo	CCC	Modelo	GFDL-R30
	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Leve	123 411.8	6.3	8 287.081	0.4	84 857.15	4.4
Fuerte	474 841.7	24.4	212 044.8	10.9	123 631.3	6.4
Muy fuerte	644 707.6	33.2	915 025.6	47.1	743 596.6	38.2
Severa	474 908.5	24.4	582 501.5	30.0	765 511.7	39.4
Muy severa	156 730.4	8.1	151 022.1	7.8	143 572.1	7.4
Extremadamente severa	70 196.42	3.6	75 901.21	3.9	83 611.83	4.3

#### 3.1 Escenario actual

En el mapa correspondiente al escenario actual (Fig. 1), se muestra que el país no tiene zonas que no sean afectadas por la sequía.

Por lo que respecta al índice de severidad designado como leve, se localizan tres áreas, la primera, sobre la llanura tabasqueña comprende parte de los siguientes estados: sur de Veracruz, norte de Oaxaca, la mayor parte de Tabasco y sur de Campeche; la segunda, en el extremo oriente de la cuenca del Balsas; y la tercera, en el Bajío donde abarca parte del estado de Jalisco y noroeste de Michoacán. Ocupan 6.3% de la superficie total del país.

Por otro lado, cinco áreas del país tienen sequía severa: la de mayor extensión se ubica en el noreste de México y abarca el desierto chihuahuense y una prolongación, hacia el sur, que llega al estado de Guanajuato. Otra zona se localiza en el centro norte del estado de Sonora, y una más en la costa oriente de Baja California Sur. Las otras dos áreas, de menor extensión, se localizan: una sobre la costa oaxaqueña y otra en la costa noreste del estado de Yucatán. Todas ellas abarcan 24.4% de la superficie del país.



**Figura 1.** Índice de severidad de la sequía meteorológica. Escenario actual.

Las áreas con severidad fuerte que también comprenden 24.4% del territorio nacional, se ubican en la mitad sur del país, y en una pequeña porción del norte del estado de Sinaloa.

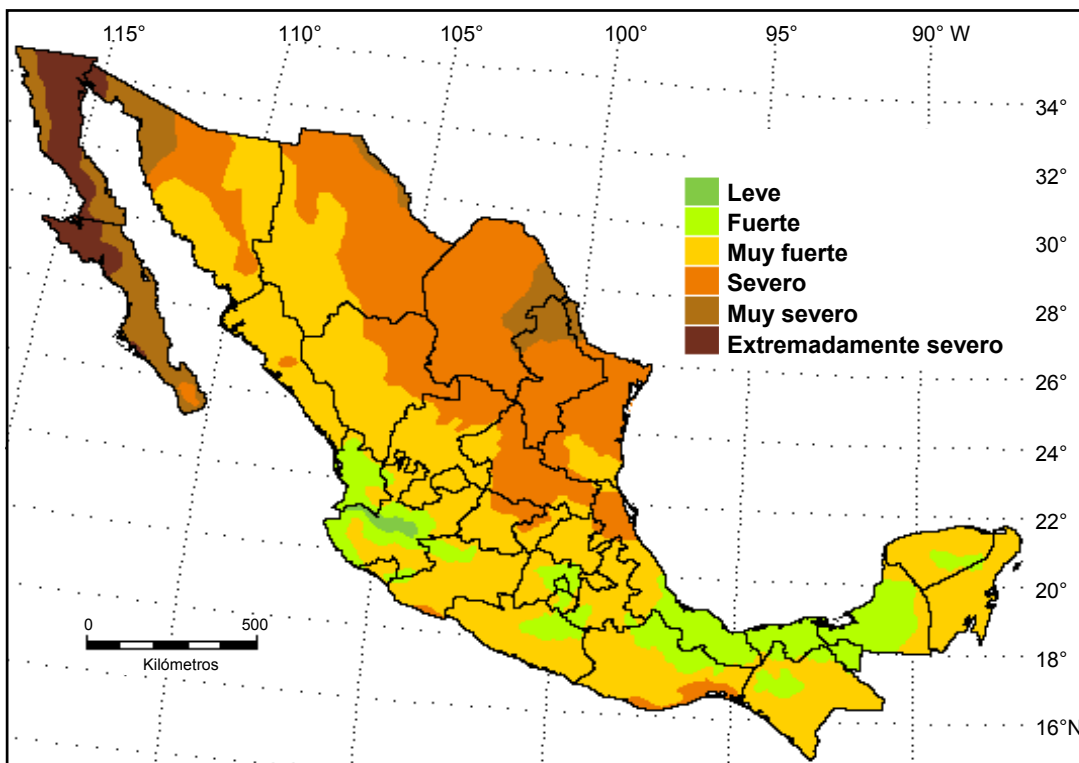
El área más grande, con 33.2%, es aquella afectada por sequía meteorológica muy fuerte, se localiza principalmente en la parte centro del país, y se prolonga hacia el norte, a todo lo largo de la sierra Madre Occidental. También se manifiesta en las costas de los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, así como de los estados de Campeche y Yucatán.

La sequía es extremadamente severa únicamente en la península de Baja California y noroeste del estado de Sonora, abarca 3.6% de la superficie del país.

De la comparación de los escenarios futuros con el actual se plantea lo siguiente:

### 3.1 Modelo CCC

De acuerdo con este modelo se presentarían tres cambios en la distribución espacial de la sequía meteorológica (Fig. 2) con respecto al escenario actual:



**Figura 2.** Índice de severidad de la sequía meteorológica. Modelo CCC.

Primero: desaparecerían dos, y la restante, localizada en el estado de Jalisco, se reduce en extensión a 0.4% de la superficie nacional.

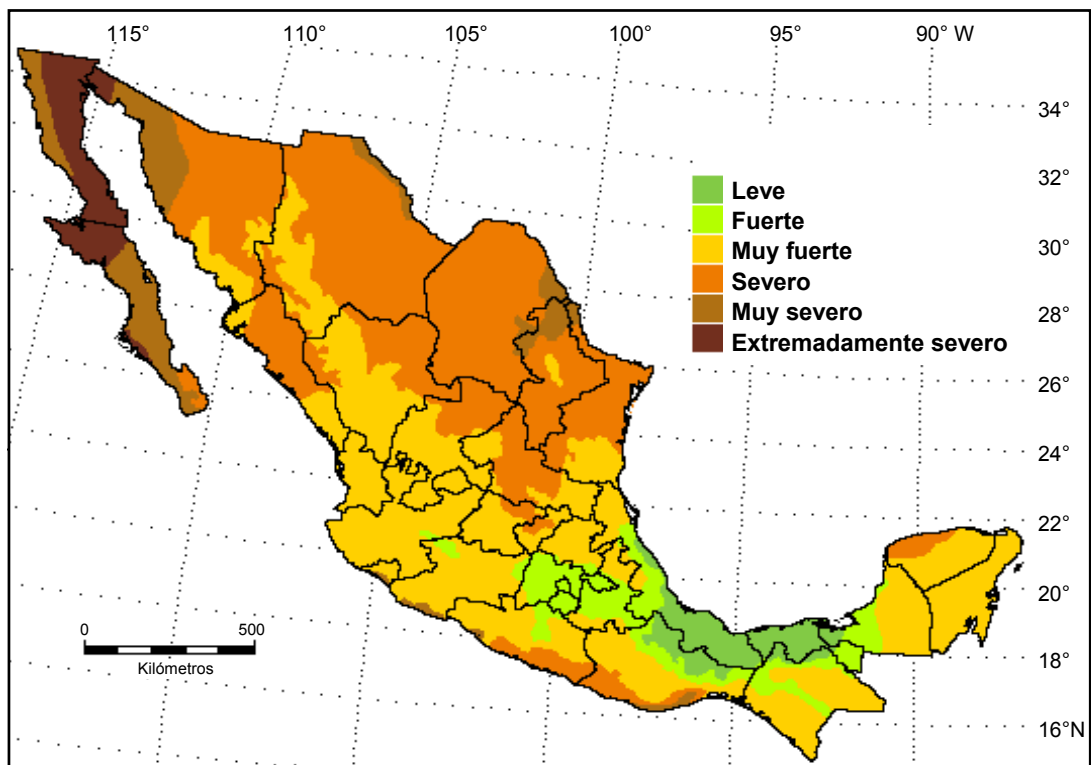
Segundo: el área con sequía muy fuerte aumenta 13.9%, ya que aproximadamente la mayor superficie con sequía fuerte incrementa su intensidad. Abarca casi en su totalidad el oeste, centro y sur del país.

Tercero: la superficie de la zona identificada con un I.S. severo en el escenario actual, aumentaría en 5.6% de acuerdo con el modelo CCC.

El área identificada en el escenario actual con I.S. extremadamente severo casi no presentaría modificaciones, ya que de acuerdo con el modelo CCC comprendería 3.9% de la superficie nacional, lo que representa un aumento de 0.3% de la superficie con respecto al escenario actual (Cuadro 1).

### 3.2 Modelo GFDL-R30

Por lo que respecta a este modelo (fig. 3), los cambios son muy contrastantes, ya que se mantiene el área con sequía leve localizada en la costa del Golfo de México, incluso se extiende hasta el paralelo 21° latitud norte, pero desaparecen las situadas en la cuenca del Balsas y en los estados de Jalisco y Michoacán.



**Figura 3.** Índice de severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30.

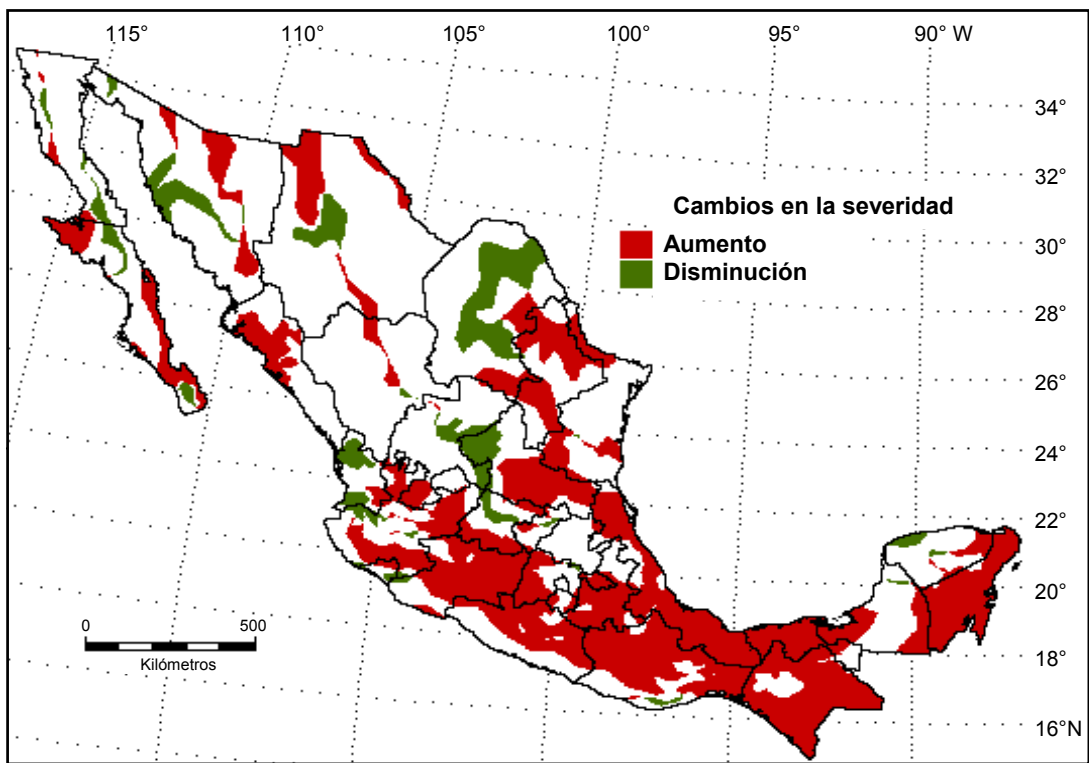
La zona con I.S. severo se extendería a casi todo el norte del país, y se prolongaría hacia la costa del Pacífico hasta el paralelo 24° latitud norte, así como en las costas de los estados de Guerrero, Oaxaca y noroeste de Yucatán, abarca 39.4% de la superficie nacional (Cuadro 1).

También aumentarían en 5.0% las áreas con I.S. muy fuerte, debido a la disminución de las áreas afectadas con sequía fuerte. La zona con sequía extremadamente severa se incrementaría ligeramente a 4.3%.

En los cuadros 2 y 3 se presentan los resultados de la sobreposición de los mapas correspondientes a los modelos CCC y GFDL-R30 con el escenario actual. En ellos se indican en forma numérica los cambios, tanto positivos como negativos, que sufren las áreas definidas en el escenario actual ante un cambio climático según los dos modelos utilizados.

Los mapas resultantes de esta comparación (Figs. 4 y 5) muestran las áreas donde aumentaría y disminuiría la severidad de la sequía meteorológica.

De la sobreposición de los mapas escenario actual/CCC (Fig. 4), los cambios más importantes se ocurrirían en las zonas con índices de severidad leve y fuerte; en la primera, 85.4% de su superficie pasaría a la categoría de fuerte y de esta última, 78.7% de su área aumentaría a muy fuerte (cuadro 2).



**Figura 4.** Áreas de cambio en la severidad de la sequía meteorológica. Modelo CCC.

**Cuadro 2.** Cambios en la superficie del área (expresada en %) de los diferentes grados de severidad de la sequía, resultantes de la sobreposición del mapa actual y el mapa del modelo CCC.

CCC (%)	Leve	Fuerte	Muy fuerte	Severa	Muy severa	Extrem. severa
Escenario actual (%)						
Leve	4.57	85.4	10.1	----	----	----
Fuerte	0.4	20.4	78.7	0.4	----	0.1
Muy fuerte	0.14	1.4	72.7	24.8	0.8	0.1
Severo	----	0.04	12.87	78.9	8.1	----
Muy severo	----	----	----	29.2	60.9	9.8
Extremadamente severo	----	----	----	0.6	15.1	84.3

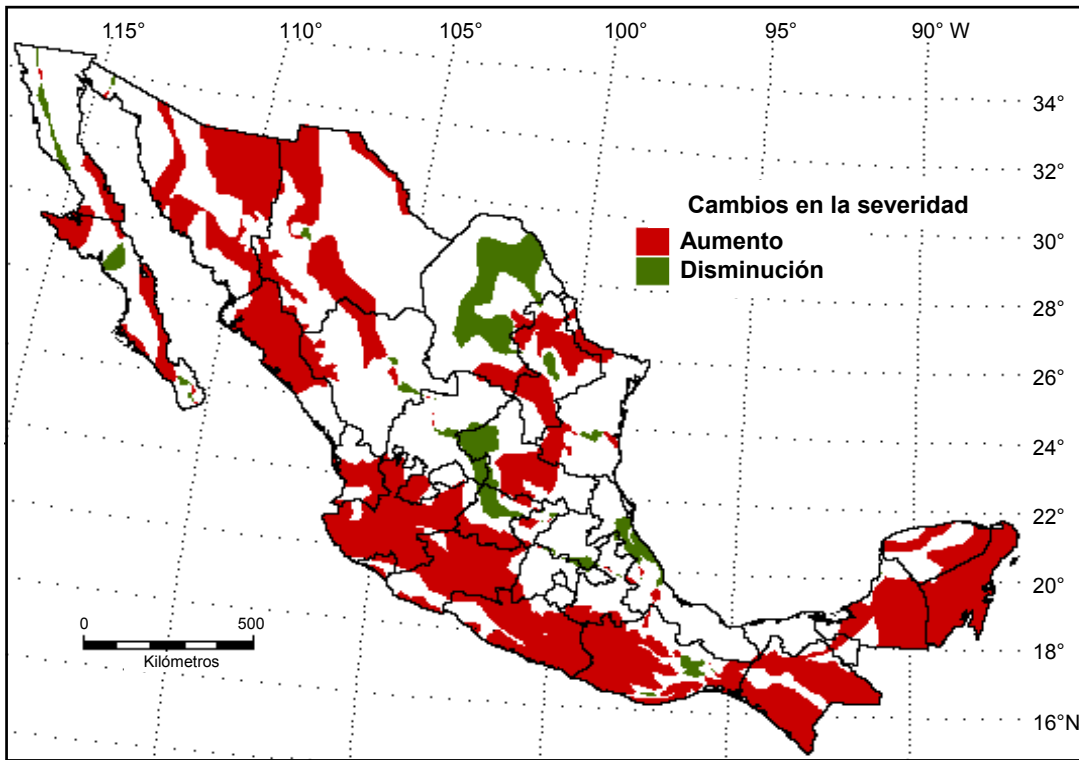
En general, se puede decir que las áreas que resultarían más afectadas por el aumento en la severidad de la sequía meteorológica se localizarían principalmente en el centro y sur del país, así como en la mitad oriental de la península de Yucatán. Todas ellas abarcarían un total de 36.4%.

Por lo que respecta a la disminución de la sequía, el dato más relevante de estos resultados corresponde al área designada con un índice muy severo, donde 29.2% de su superficie disminuye a severo (cuadro 2); estas áreas se localizan en el norte del país en los estados de Baja California, Sonora y Coahuila. El total de áreas que presentarían una disminución en severidad de la sequía representa 6.7% de la superficie nacional.

De la sobreposición de los mapas escenario actual/GFDL-R30 (Fig. 5), es interesante hacer notar que el aumento en la severidad de la sequía meteorológica ocurriría en general, en todo el país y sería mayor que con el modelo CCC, pues, 39.4% de la superficie nacional sufriría incremento en la severidad de la sequía.

El cambio más grande, en cuanto a la superficie modificada, sería la designada como fuerte, que pasaría a muy fuerte en 73.3% de su superficie; en esta última, 44.3% de su área cambiaría a severa (cuadro 3).

Otra variación en la severidad de la sequía meteorológica se presentaría en las áreas designadas con un índice leve que se incrementaría a muy fuerte en 22.8% de su extensión, este cambio es significativo, porque pasaría de leve a muy fuerte. Las modificaciones se localizan en la zona de El Bajío, en el estado de Jalisco y Michoacán, y en el extremo oriente de la cuenca del Balsas en los límites de Guerrero y Puebla.



**Figura 5.** Áreas de cambio en la severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30.

GFDL-R30 (%)	Leve	Fuerte	Muy fuerte	Severa	Muy severa	Extrem. severa
Escenario actual (%)						
Leve	60.0	17.1	22.8	----	----	----
Fuerte	2.1	20.0	73.3	4.6	0.01	----
Muy fuerte	0.06	1.3	53.1	44.3	1.2	----
Severo	----	----	5.1	87.3	7.6	----
Muy severo	----	----	0.3	28.6	58.7	12.4
Extremadamente severo	----	----	----	----	9.4	90.6

**Cuadro 3.** Cambios en la superficie del área (expresada en %) de los diferentes grados de severidad de la sequía, resultantes de la sobreposición del mapa actual y el mapa del modelo GFDL-R30.

En cuanto a la disminución de la sequía, el área total del país donde ocurriría este cambio es de 4.5%. La modificación más grande se presentaría en el área designada como muy severa, que baja a severa en 28.6% de su superficie (cuadro 3), y se localiza principalmente en el centro y norte de Coahuila. En los límites estatales de San Luis Potosí, Zacatecas y Guanajuato se ubica otra zona, de considerable extensión, donde la disminución del índice de sequía cambiaría de severo a muy fuerte en 5.1% de su área.

En el cuadro 4 se muestran las áreas vulnerables a la sequía meteorológica por estados, según los dos modelos climáticos utilizados. Con respecto a estos resultados, lo más significativo que se puede mencionar con el modelo CCC, es que el estado de Quintana Roo sería el más vulnerable ante un posible cambio climático, ya que 98.47% de su superficie se vería afectada con un aumento en la severidad de la sequía. Le siguen en orden de importancia, con más de 75% de su área: Tlaxcala (96.69%), Veracruz (91.05%), Michoacán (89.66%), Chiapas (83.13%) y Tabasco (80.56%).

Con el modelo GFDL-R30, los estados del país que resultan vulnerables en más de 75% de su territorio son: Quintana Roo (99.67%), Michoacán (90.04%), Jalisco (87.30%), Guerrero (84.70%), Colima (83.57%) y Campeche (75.22%).

Con base en los resultados obtenidos a partir de estos modelos, el posible cambio climático puede favorecer algunas regiones del país, y en otras aumentar el grado de severidad de la sequía meteorológica. Por ello, se hace necesario relacionar estos resultados con los que se obtuvieron en el Estudio de País en las áreas de agricultura, hidrología, desertificación y bosques, entre otros. Con esta última línea, sería interesante establecer si hay alguna relación con las áreas deforestadas del país, en las condiciones actuales y ante un posible cambio climático, con un incremento en la severidad de la sequía (Salati y Nobre, 1991; Meher-Homji, 1991).

Se hizo un ejercicio muy general que consistió en relacionar la información obtenida en este trabajo, en las condiciones actuales, con los datos de la línea vulnerabilidad a la desertificación por estados, y se obtuvo que Baja California, estado con mayor superficie (98.85%) afectada con alto grado de vulnerabilidad a la desertificación, presenta un pequeño aumento en la severidad de la sequía, en promedio 7.7% de su superficie, con los dos modelos. El grado que muestra en las condiciones actuales es el más alto (extremadamente severo), de acuerdo con la escala empleada en este trabajo.

**Cuadro 4.** Área porcentual afectada por la sequía meteorológica, aplicando los modelos GFDL-R30 y CCC

Estados	Disminución de severidad (%)		Aumento de severidad (%)	
	CCC	GFDL R30	CCC	GFDL R30
Aguascalientes	-	-	32.86	32.86
Baja California	8.61	5.69	5.16	10.24
Baja California Sur	9.66	4.96	34.32	29.69
Campeche	1.79	14.33	39.85	60.90
Chihuahua	5.85	0.11	11.85	29.62
Chiapas	-	2.18	83.13	71.18
Coahuila	26.69	28.76	10.31	7.76
Colima	13.53	0.97	42.03	83.57
Distrito Federal	-	-	-	-
Durango	0.74	-	6.88	20.49
Guerrero	-	3.93	58.94	80.76
Guanajuato	17.28	14.52	33.22	32.05
Hidalgo	-	5.2	2.91	-
Jalisco	4.20	3.01	63.99	85.25
México	1.42	9.35	53.49	8.99
Michoacán	-	2.45	89.66	87.59
Morelos	-	1.54	53.33	0.51
Nayarit	20.45	-	30.59	69.92
Nuevo León	0.04	5.02	51.68	47.51
Oaxaca	1.20	11.44	69.08	58.28

Puebla	-	-	69.26	21.85
Querétaro	8.47	3.81	8.05	6.36
Quintana Roo	-	-	98.47	99.67
Sinaloa	1.24	-	35.83	67.02
San Luis Potosí	15.99	13.45	49.78	33.24
Sonora	8.87	0.33	16.03	43.69
Tabasco	-	4.99	80.56	-
Tamaulipas	-	0.20	28.79	21.35
Tlaxcala	-	1.32	96.69	-
Veracruz	-	10.87	91.05	2.09
Yucatán	9.51	-	16.45	47.96
Zacatecas	17.9	7.90	7.83	9.99

Otros casos interesantes son los estados de Jalisco y Michoacán, los cuales una vulnerabilidad alta a la desertificación en las condiciones actuales tienen en más de 70% de su superficie, y un aumento a la sequía meteorológica ante un posible cambio climático.

Por último, el estado de Quintana Roo, con casi 100% de su superficie vulnerable a la sequía, según los dos modelos de cambio utilizados, muestra en 99.18% de su territorio un grado moderado de vulnerabilidad a la desertificación en condiciones actuales.

Existe una estrecha relación entre la desertificación y la sequía, que se complica al incluir aspectos poblacionales, si se considera a la desertificación como el resultado de la combinación de la sequía meteorológica y el inadecuado manejo del suelo.

#### 4. Conclusiones

En las condiciones actuales en el país no existen áreas que no sean afectadas por la sequía meteorológica.

Según el modelo GFDL-R30, es mayor la superficie del país en la cual aumenta el grado de severidad de la sequía, sin embargo con el modelo CCC, el cambio es más drástico.

#### Referencias bibliográficas

- Castorena, G., M. E. Sánchez, M. E. Florescano, R. G. Padilla, y U. L. Rodríguez, Análisis histórico de las sequías en México, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980, 137 pp.
- Hare, K. F., Sequía, variación climática y desertificación, Ginebra, Suiza, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, 1985, No.653, 35 pp.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico", en *Climate Research*, Vol. 9, Nos. 1 y 2, 1997, pp.107-114.
- Meher-Homji, V. M., "Probable impact of deforestation on hydrological processes", en *Climatic Change*, Vol. 19, 1991, pp. 163-173.
- Palacio, J. L. y L. Luna, Sistemas de Información Geográfica. Introducción al manejo del Integrated Land and Water Management Information System (ILWIS). Versión 1.3, México, Instituto de Geografía, UNAM, 1993, 65 págs.
- Salati, E. y A. C. Nobre, "Possible climatic impacts of tropical deforestation", en *Climatic Change*, Vol. 19, 1991, pp. 177-196.
- Sancho y Cervera, J., Zavala, Z. F., V. M. Sánchez, y V. V. Martínez, Monitoreo de sequías y heladas, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Dirección de inventarios de agua y suelo, Proyecto IA 800/, 1980, pp. 14-16.
- Sivakumar, K. V. M., "Climate change and implications for agriculture in Niger", en *Climatic Change*, Vol. 20, 1992, pp. 297-312.