



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ARIDAS**



**ANÁLISIS DEL RIESGO SOCIO-AMBIENTAL MEDIANTE TRES  
INDICADORES DE SEQUÍA BAJO UN ESCENARIO DE CAMBIO  
CLIMÁTICO EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO**

**TESIS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES  
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

**PRESENTA:**

**SANTOS MARTÍNEZ SANTIAGO**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. ARMANDO LOPÉZ SANTOS**



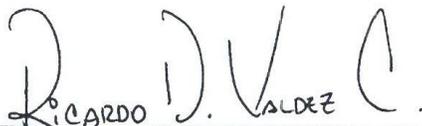
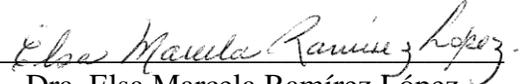
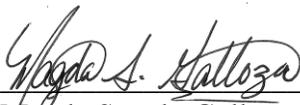
**DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**

**Bermejillo, Durango, México, Junio 2016**



El presente trabajo de tesis titulado **ANÁLISIS DEL RIESGO SOCIO-AMBIENTAL MEDIANTE TRES INDICADORES DE SEQUÍA BAJO UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO**, fue realizado por el C. SANTOS MARTÍNEZ SANTIAGO, bajo la dirección del Dr. Armando López Santos, la codirección del Dr. Ricardo David Valdez Cepeda y la asesoría de la Dra. Elsa Marcela Ramírez López, Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho y la PhD. Magda Sugely Galloza Carrero, ha sido revisada por el comité revisor y obtenido el visto bueno como requisito parcial para obtener el título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

Director	 _____ Dr. Armando López Santos
Codirector	 _____ Dr. Ricardo David Valdez Cepeda
Asesor	 _____ Dra. Elsa Marcela Ramírez López
Asesor	 _____ Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho
Asesor	 _____ PhD. Magda Sugely Galloza Carrero

Bermejillo, Durango, México, Junio 2016

**A MI FAMILIA**

**PARA TI ...**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a mi Alma Mater Universidad Autónoma Chapingo - Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas por todo el apoyo otorgado durante mis estudios de maestría en el periodo 2014 - 2015.

Al Dr. Armando López Santos, por todo su apoyo en mi formación académica, así como por la confianza y amistad que me ha otorgado durante todo este tiempo.

A la Dra. Elsa Marcela Ramírez López por todo el apoyo brindado en la elaboración del presente trabajo, agradeciendo toda su amistad y confianza.

Al Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho por su apoyo y enseñanzas brindadas durante mi la realización de mi tesis de licenciatura y de maestría, agradeciendo toda su amistad y confianza.

A la Dra. Magda Sugely Galloza Carrero por su apoyo en la consolidación del presente trabajo, así como todas las facilidades otorgadas durante mi estancia en el Campo experimental “La Jornada” en la Universidad Estatal de Nuevo México.

Al Dr. Gabriel García Herrera por la revisión de la tesis, a la vez por introducirme al conocimiento de los estudios del clima y ser siempre un gran mentor personal dentro de mi formación en la URUZA.

A mis compañeros, amigos y a todas las personas que en diferentes etapas han pasado a formar parte de mi vida.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

Santos Martínez-Santiago, es Ingeniero en Sistemas Agrícolas egresado de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA - UACH), generación 2008-2013. En este periodo trabajó en proyectos relacionados con el cambio climático y sus efectos en los recursos agua y suelo, mediante el uso de sistemas de información geográfica y sensores remotos. Conjunto a lo anterior realizó estancias de investigación en el Centro de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Durante los años 2014 - 2015, realizó sus estudios de posgrado en el programa de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en la URUZA - UACH. Su tema de tesis denominado: Análisis de riesgo socio-ambiental mediante tres indicadores de sequía bajo un escenario de cambio climático en la Comarca Lagunera, México, permitió realizar estancias de investigación nacionales en la Unidad Académica Hermosillo de la Universidad Estatal de Sonora, y una estancia de investigación internacional en el Campo Experimental “La Jornada” de la Universidad Estatal de Nuevo México, en Estados Unidos de América.

# **Análisis del riesgo socio-ambiental mediante tres indicadores de sequía bajo un escenario de cambio climático en La Comarca Lagunera, México**

## **Socio-environmental risk analysis by three drought indicators under a climate change scenario in the Comarca Lagunera, Mexico**

Martinez-Santiago, Santos<sup>1</sup>, López-Santos, Armando<sup>2</sup>

### **RESUMEN**

El análisis de riesgo socio-ambiental es un enfoque que permite estudiar las causas de posibles peligros y eventos no deseados, relacionados con la variabilidad climática, así como los daños y consecuencias que estos puedan producir sobre las personas, bienes y los ecosistemas en situación vulnerable. El objetivo general del presente estudio fue evaluar el grado de exposición y sensibilidad del sistema socio-ambiental (SA) ante la variabilidad climática global en la Comarca Lagunera. La unidad de estudio comprendió a los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Mapimí, los cuales presentan un gradiente climático de seco a muy seco ( $BS_{1kw}$ ,  $BS_{0kw}$ ,  $BS_{0hw}$ ,  $BWhw$ ). Se seleccionaron tres indicadores para la evaluación SA: erosión eólica laminar (EEL), índice de aridez (IA) y densidad de partículas en el aire (DPA). Se utilizaron técnicas de modelación en sistemas de información geográfica (SIG), para un periodo histórico (1950 - 2010) y un futuro cercano (2015 - 2039), para determinar áreas críticas, obtenidas en base a la EEL y al IA, y núcleos de población humana (NPH) expuesta. La DPA fue analizada, históricamente, en bases a las normas oficiales mexicanas (NOM). Los resultados advierten, en un futuro cercano, para las áreas críticas incrementos en la EEL ( $189.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  a  $196.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y en el IA (árido a hiperárido), además de presentar una DPA que exceden los valores límites permisibles de acuerdo a las NOM, lo cual implica una degradación de la calidad ambiental, con impactos probables sobre NPH que llegarán a ser de 859 585 habitantes.

**Palabras clave:** Modelación, Escenarios climáticos, Desertificación, Zonificación ecológica, Vulnerabilidad, Adaptación.

### **ABSTRACT**

Socio-environmental risk analysis is an approach to study the causes of potential hazards and undesirable events related to climate variability, as well as the damages that these could have on people, property and ecosystems in a vulnerable situation. The overall aim of this study was to evaluate the degree of exposure and sensitivity of the socio-environmental (SE) system to global climate variability at the Comarca Lagunera. The study site comprises the municipalities of Gómez Palacio, Lerdo and Mapimí, which have been characterized for having a dry to very dry climatic gradient ( $BS_{1kw}$ ,  $BS_{0kw}$ ,  $BS_{0hw}$ ,  $BWhw$ ). Three indicators were selected for the SE evaluation: laminar wind erosion (LWE), aridity index (AI) and density of particles in the air (DPA). Geographic information systems (SIG) modeling techniques were used, for a historical period (1950 - 2010) and for a near future (2015 - 2039), to determine critical areas, based on the LWE and AI, and human population centers (HPC) exposed. The DPA was analyzed, historically, based on Mexican official standards (MOS). The results warn, in the near future, for the critical areas increases in the LWE ( $189.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  to  $196.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) and in the AI (arid to hyper-arid), in addition to having DPA values exceeding the permissible limits of the MOS, implying environmental quality degradation, with probable impacts on a HPC that will have 859,585 inhabitants.

**Keywords:** Modeling, Climatic scenario, Desertification, Ecological zonification, Vulnerability, Adaptation.

---

<sup>1</sup> Tesista

<sup>2</sup> Director de tesis

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xiii
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2 OBJETIVO</b> .....	3
<b>3 REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
<b>3.1 Marco conceptual referencial</b> .....	4
<b>3.1.1 Calidad de vida</b> .....	4
<b>3.2 El clima terrestre</b> .....	9
<b>3.2.1 Factores extraterrestres</b> .....	11
<b>3.2.2 Factores endógenos</b> .....	15
<b>3.2.3 El cambio climático</b> .....	22
<b>3.2.4 Modelos climáticos</b> .....	25
<b>3.3 Análisis de riesgo socio-ambiental</b> .....	32
<b>3.3.1 Riesgos socio-ambientales para las zonas áridas de México.</b> .....	36
<b>3.4 Indicadores de sequía</b> .....	49
<b>3.4.1 Erosión Eólica</b> .....	50
<b>3.4.2 Índice de Aridez</b> .....	52
<b>3.4.3 Partículas Suspendidas en el Aire</b> .....	54
<b>4 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	56
<b>4.1 Área de Estudio</b> .....	56
<b>4.2 Datos de entrada y su pre-procesamiento</b> .....	58
<b>4.2.1 Datos de propiedades edáficas y uso de suelo</b> .....	58
<b>4.2.2 Datos de temperatura y precipitación</b> .....	61
<b>4.2.3 Datos de viento y partículas suspendidas en el aire</b> .....	64
<b>4.3 Descripción del enfoque metodológico</b> .....	67
<b>4.3.1 Valores críticos para variables climáticas</b> .....	67
<b>4.3.2 Erosión Eólica Laminar</b> .....	68

4.3.3	Índice de aridez .....	69
4.3.4	Análisis geoestadístico y evaluación del impacto del cambio climático 70	
4.3.5	Determinación de áreas críticas.....	70
4.3.6	Densidad de partículas.....	71
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>74</b>
5.1	Pre-procesamiento.....	74
5.1.1	Edafología y uso de suelo.....	74
5.1.2	Datos meteorológicos .....	80
5.1.3	Análisis de vientos.....	82
5.2	Valores críticos para variables climáticas.....	94
5.2.1	Para Temperatura Media Anual .....	94
5.2.2	Para Precipitación Media Anual.....	98
5.3	Erosión Eólica Laminar .....	101
5.4	Índice de aridez.....	104
5.5	Áreas críticas.....	107
5.5.1	Zonas potenciales .....	109
5.5.2	Zonas prioritarias .....	111
5.6	Densidad de partículas.....	113
5.6.1	PM <sub>10</sub> .....	113
5.6.2	PST .....	122
5.7	Riesgo socio-ambiental en La Comarca Lagunera.....	124
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>131</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>132</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3. 1. Escenarios RCP.....	31
Tabla 3. 2. Relación entre la textura del suelo y la erodabilidad del suelo.....	41
Tabla 3. 3. NOM de diferentes contaminantes atmosféricos .....	48
Tabla 3. 4. Niveles permisibles de material particulado en el aire en México .....	49
Tabla 4. 1. Índices CATEX y CAUSO para calcular EEL. ....	58
Tabla 4. 2. Estaciones meteorológicas de referencia situadas en la unidad de estudio..	62
Tabla 4. 3. Análisis de valores críticos .....	67
Tabla 4. 4. Clasificación del IA de De Martonne. ....	70
Tabla 5. 1. Valores CATEX para el área de estudio .....	74
Tabla 5. 2. Valores CAUSO para el periodo histórico y el futuro cercano del área de estudio. ....	77
Tabla 5. 3. Matriz de probabilidades de transición .....	78
Tabla 5. 4. Promedios de TMA y PMA $\pm$ Error Estándar (EE) por fuente de información. ....	80
Tabla 5. 5. Estación Agua Nueva. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad. ....	82
Tabla 5. 6. Estación Campo Experimental La Laguna. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad. ....	84
Tabla 5. 7. Estación Colonia Emiliano Zapata, Mapimí, Dgo. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.....	85
Tabla 5. 8. Estación El Porvenir, Francisco I. Madero, Coah. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.....	86
Tabla 5. 9. Estación URUZA, Mapimí, Dgo. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad. ....	88
Tabla 5. 10. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 1 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.....	89
Tabla 5. 11. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 2 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.....	90
Tabla 5. 12. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 3 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.....	92
Tabla 5. 13. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 4 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.....	93
Tabla 5. 14. Valores críticos de TMA.....	95
Tabla 5. 15. Valores críticos de PMA.....	98
Tabla 5. 16. Análisis de cambios e impactos en la EEL entre cuatro clases comparables para el periodo histórico y el futuro cercano.....	101
Tabla 5. 17. Análisis de cambios e impactos en el IA entre cinco clases comparables para el periodo histórico y el futuro cercano.....	104
Tabla 5. 18. Análisis de cambios en la población de localidades rurales y urbanas del área la unidad de estudio.....	107

Tabla 5. 19. Análisis de cambios en la superficie de las zonas potenciales y la población  
expuesta..... 109

Tabla 5. 20. Análisis de cambios en la superficie de las zonas potenciales y la población  
expuesta..... 111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1. Representación gráfica del impacto ambiental.....	9
Figura 3. 2. Factores que determinan el clima terrestre.....	11
Figura 3. 3. Ciclos excéntricos: A. Órbita elíptica. B. Órbita circular.....	14
Figura 3. 4. Precesión de los equinoccios.....	14
Figura 3. 5. Ciclos oblicuos.....	15
Figura 3. 6. Balance energético terrestre.....	18
Figura 3. 7. Absorbancia de los principales gases de la atmosfera.....	20
Figura 3. 8. Estimaciones del forzamiento radiativo en 2011, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático.....	24
Figura 3. 9. Modelos utilizados en el CMIP5.....	27
Figura 3. 10. Riesgo en los sistemas socio ambientales.....	34
Figura 3. 11. Las zonas áridas en el mundo.....	37
Figura 3. 12. Zonas áridas en México.....	38
Figura 3. 13. Fases de la erosión eólica.....	51
Figura 4. 1. Localización geográfica del área de estudio.....	57
Figura 4. 2. Estaciones meteorológicas de referencia en la unidad de estudio.....	63
Figura 4. 3. Localización de las estaciones agroclimáticas del INIFAP en el área de estudio.....	65
Figura 4. 4. Localización de las EMA's en la unidad de estudio.....	66
Figura 5. 1. Distribución del índice CATEX en el área de estudio.....	76
Figura 5. 2. Distribución del índice CAUSO en el periodo histórico y en el Futuro Cercano en el área de estudio.....	79
Figura 5. 3. Temperatura media anual y error estándar.....	81
Figura 5. 4. Precipitación media anual y erro estándar.....	81
Figura 5. 5. Rosa de vientos de la estación Agua Nueva Hidalgo, Dgo.....	83
Figura 5. 6. Rosa de vientos de la estación Campo Experimental La Laguna.....	84
Figura 5. 7. Rosa de vientos de la estación Colonia Emiliano Zapata, Mapimí, Dgo. ...	86
Figura 5. 8. Rosa de vientos de la estación El Porvenir, Francisco I. Madero.....	87
Figura 5. 9. Rosa de vientos de la estación URUZA, Mapimí, Dgo.....	88
Figura 5. 10. Rosa de vientos para el trimestre 1 del área de estudio.....	90
Figura 5. 11. Rosa de vientos para el trimestre 2 del área de estudio.....	91
Figura 5. 12. Rosa de vientos para el trimestre 3 del área de estudio.....	93
Figura 5. 13. Rosa de vientos para el trimestre 4 del área de estudio.....	94
Figura 5. 14. Valores de TMA para el Histórico y para el Futuro Cercano en las estaciones de referencia.....	96
Figura 5. 15. Distribución espacial de la TMA.....	97
Figura 5. 16. Valores de PMA para el Histórico (PMA <sub>H</sub> ) y para el Futuro Cercano (PMA <sub>FC</sub> ) en las estaciones de referencia.....	99
Figura 5. 17. Distribución espacial de la PMA.....	100
Figura 5. 18. Distribución espacial de los cambios en la EEL en el periodo Histórico y en Futuro Cercano.....	103

Figura 5. 19. Distribución espacial de los cambios del IA en el periodo histórico y en el futuro cercano.....	106
Figura 5. 20. Distribución espacial de las localidades en el área de estudio.....	108
Figura 5. 21. Distribución espacial de las zonas potenciales en el área de estudio. ....	110
Figura 5. 22. Distribución espacial de las zonas prioritarias en el área de estudio.....	112
Figura 5. 23. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 2 del año 2010.....	113
Figura 5. 24. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 3 del año 2010.....	114
Figura 5. 25. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 4 del año 2010.....	115
Figura 5. 26. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 2 del año 2012.....	116
Figura 5. 27. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 3 del año 2012.....	117
Figura 5. 28. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 4 del año 2012.....	118
Figura 5. 29. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 1 del año 2013.....	119
Figura 5. 30. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 2 del año 2013.....	120
Figura 5. 31. Concentración diaria de PM <sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 1 del año 2014.....	121
Figura 5. 32. Primer muestreo. Valores de concentración de PST (A) y dispersión (B). .....	122
Figura 5. 33. Segundo muestreo. Valores de concentración de PST (A) y dispersión (B). .....	123

## LISTA DE ABREVIATURAS

AR4	Cuarto Informe de Evaluación del IPCC
AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC
CATEX	Calificador por Textura
CAUSO	Calificador por Uso de Suelo
CCA - UNAM	Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México
CMIP5	Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5
EEL	Erosión Eólica Laminar
EMA'S	Estaciones de Monitoreo Ambiental
ESM	Modelos del Sistema Tierra
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IA	Índice de Aridez
IAVIE	Índice de Agresividad del Viento
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MCGAO	Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
OCDE	Organización para la cooperación y el desarrollo Económico
OMS	Organización Mundial de la Salud
PECRE	Periodo de Crecimiento

PIB	Producto Interno Bruto
PM <sub>10</sub>	Partículas con Diámetros Aerodinámicos Menores de 10 µm
PMA	Precipitación Media Anual
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PST	Partículas Suspendidas Totales
RCP	Rutas de Concentración Representativas
SA	Socio - Ambiental
SEMANART	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMCA	Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire del Estado de Durango
TMA	Temperatura Media Anual
UJED	Universidad Juárez del Estado de Durango
UNIATMOS	Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales
URUZA -	Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas - Universidad
UACH	Autónoma Chapingo
USDA -NRCS	Departamento de Agricultura de Estados Unidos - Servicio de Conservación de Recursos Naturales
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos

## 1 INTRODUCCIÓN

Varios estudios han mostrado la importancia de los análisis de riesgo socio-ambiental global derivados de prácticas deficientes en el manejo de los recursos naturales y la variabilidad climática, actual y futura (IPCC, 2007; IPCC, 2012), ya que para principios de 1990 el nivel de degradación por dichas causas alcanzó un total de  $3.6 \times 10^8$  ha (Stavi & Lal, 2014); por ello, se reconoce que el principal reto para los países alrededor del mundo es la evaluación de medidas de adaptación y mitigación (Lim et al., 2005; IPCC, 2012; Geng et al., 2014). Según datos recientes sería necesario el 1% del producto interno bruto (PIB) mundial para mitigar los efectos del cambio climático (Stern, 2007; Nkonya et al., 2011; López-Santos, 2016).

Las regiones de clima seco (árido, semiárido y subhúmedo), que actualmente comprenden el 45% de la superficie terrestre, corresponden en mayor parte a países en vías de desarrollo, donde habitan poco más de 2 mil millones de personas (UNCCD, 2011), Geng et al., (2014) mencionan que actualmente estas zonas se encuentran en expansión territorial, donde el grado de aridez está empeorando, tendencia que ha sido reportada por diversos autores (IPCC, 2007; Zhou et al., 2010; Lal et al., 2012; Al-Kaisi et al., 2013; UNCCD, 2013).

Cavazos et al., (2013) dice que en los nuevos escenarios de cambio climático preparados para el Quinto informe de evaluación del IPCC (2013a) (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>), al menos para las regiones sur de los Estados Unidos de América, México, El Caribe y Centroamérica, se detectaron incrementos importantes de la temperatura. Esto podría traer como consecuencia que los fenómenos hidrometeorológicos extremos se expresen en sequías más intensas y golpes de calor por

temperatura más elevadas, con una tendencias que podrían superar lo descrito previamente por Magaña et al (2012) para las mismas regiones.

El avance de las investigaciones en el tema de la sequía aún resulta insuficientes para encontrar los mecanismos adecuados para prevenir y mitigar sus efectos dada su variabilidad espacio-temporal y el impacto diferido en los ecosistemas del mundo (Rivera et al., 2007; Logar et al., 2013; WEF, 2013); una crisis de disponibilidad de agua y los efectos negativos sobre la calidad del aire debido a un aumento drástico de partículas en suspensión se presume potencialmente dañino para la salud de las personas (Razo et al, 2004; Rashki et al., 2013; Anil et al., 2014) y podría afectar el albedo en el nivel de la superficie de la Tierra y la atmósfera (Batjargal et al., 2006; Kim et al., 2012).

## 2 OBJETIVO

### General

Evaluar el grado de exposición y sensibilidad del sistema socio-ambiental (SA) ante la variabilidad climática global para la Comarca Lagunera.

### Específicos:

1. Determinar valores críticos de precipitación y temperatura, espacialmente distribuidos, en cuanto a exposición y sensibilidad socio-ambiental, en dos contextos: histórico y futuro cercano, para el escenario de cambio climático correspondiente a una ruta de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés) 8.5 Wm<sup>-2</sup> de la zona de estudio.
2. Calcular impactos probables de la sequía meteorológica en la calidad ambiental, a partir de tres indicadores: erosión eólica, índice de aridez y densidad de partículas (PM<sub>10</sub> y PST) en el aire.
3. Proponer medidas de prevención y adaptación de los sistemas socio-ambientales a los impactos probables calculados en el presente estudio.

### **3 REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 Marco conceptual referencial**

##### **3.1.1 Calidad de vida**

La calidad de vida, es un término que ha sido ampliamente utilizado por especialistas de diversas disciplinas (economistas, sociólogos, biólogos, profesionistas de la salud, etc.). Cada quien ha enfocado un concepto desde un punto de vista diferente, enfatizando solo alguna de sus dimensiones y descuidando otras (Baldi & García, 2005).

Lucas-Carrasco (2012) describió que la organización mundial de la salud (OMS) inició en 1991 el desarrollo de un instrumento para medir la calidad de vida a nivel internacional. En este proyecto, el concepto de calidad de vida se definió como la percepción del individuo en cuanto a su posición en la vida en el contexto de los sistemas culturales y de valor en las que viven y en relación con sus objetivos, expectativas, normas y preocupaciones.

Es un concepto de amplio alcance, que incorpora de un modo complejo la salud física del individuo, el estado psicológico, el nivel de independencia, las relaciones sociales, las creencias personales, y su relación con el entorno. La definición pone al relieve la idea de que la calidad de vida se refiere a una evaluación subjetiva, incluyendo las dimensiones tanto positivas como negativas, y el que se ha incrustado en un contexto cultural, social y ambiental (Lucas-Carrasco, 2012).

La calidad de vida debe ser la combinación de los elementos naturales del equilibrio ecológico, los satisfactores psicológicos, la situación social y la bondad económica, todas ellas limitadas por los recursos naturales disponibles y su nivel de conservación. Es también un factor dependiente de la población humana, tanto de número como en

densidad. La riqueza per cápita se reduce al incrementar la población y repercute en una baja costeabilidad o aumento en los precios al encontrarse un exceso, dado que los insumos deberán transportarse desde más lejos (Enkerlin et al., 1997)

Orea y Villarino (2013) mencionan que la calidad de vida de un individuo está determinada por la integración de tres componentes: nivel de renta, condiciones de vida y trabajo, y calidad ambiental, con distinto peso según el momento y lugar.

### **3.1.1.1 Nivel de renta**

La renta se define como el ingreso, caudal o aumento de la riqueza de una persona. Se trata de una dimensión económica, más concretamente monetaria, y unidimensional, que se relaciona con la satisfacción de necesidades a través del mercado: la disponibilidad de una determinada renta supone una cierta capacidad de compra de bienes y servicios para cubrir las necesidades de la persona. Sin embargo, quedan fuera de esta contabilidad todos los satisfactores no monetizados, incluyendo aquellos bienes y servicios prestados sin contraprestación económica (trabajo doméstico y voluntario, trueque, ayuda mutua, servicios públicos), así como todos aquellos valores intangibles que también contribuyen a la calidad de vida (amistad, civismo, buena vecindad, paisaje) (RAE, 2014; Romera, 2007).

### **3.1.1.2 Condiciones de vida y trabajo**

Las condiciones de vida y trabajo se asocian a la posibilidad de gozar de aquellos atributos que suelen caracterizar a las sociedades democráticas: garantías de libertad, participación en la sociedad, igualdad de oportunidades, igualdad ante la justicia, acceso a la educación, seguridad ciudadana, seguridad social, reconocimiento social, disponibilidad y acceso a los equipos y servicios públicos, etc. Las condiciones de trabajo

se refieren al ambiente físico (ruido, vibraciones, contaminación, temperatura, iluminación, etc.), y psicológico (consideración, información, participación, capacidad de iniciativa, de progreso, etc.). En la medida en que aumenta el nivel de renta de una sociedad, y siempre con la lógica del modelo socioeconómico establecido, aflora este tipo de reivindicaciones contribuyendo al equilibrio del sistema global (Orea y Villarino, 2013)

### **3.1.1.3 Calidad ambiental**

Antes de abundar acerca de la calidad ambiental es necesario definir y diferenciar los términos medio ambiente y ambiente. Garmendia et al. (2005) definen al medio ambiente como el conjunto de circunstancias físicas, culturales, económicas, sociales, etc., que rodean a las personas, y menciona que la diferencia entre la expresión medio ambiente y ambiente es que esta última se utiliza de forma más general refiriéndose cualquier ser vivo.

Por consiguiente el término medio ambiente se refiere a diversos factores y procesos biológicos, ecológicos, físicos y paisajísticos que, además de tener su propia dinámica natural, se entrelazan con las conductas humanas. Estas interacciones pueden ser de tipo económico, político, social, cultural o con el entorno. Estos implican que para poder tener un claro entendimiento del medio ambiente es necesario estudiar los cambios antropogénicos y su influencia en el medio ambiente hasta su estado actual y sus tendencias futuras. Hoy en día son de gran interés para los líderes del mundo, empresarios, los grupos sociales y para la comunidad internacional (IPCC, 2014b).

La calidad ambiental depende en gran medida de los factores socioeconómicos, y se pueden asociar en la medida que éstos asuman las externalidades generadas por los procesos productivos. Tal asunción implica tanto a los agentes productores como a los

consumidores, a los primeros por sus efectos en los costos y a los segundos porque pueden influir en los productores a través de sus preferencias por lo producido con sensibilidad ambiental, incluso a pagar más por ello. En la medida en que la sociedad disfruta de mayor nivel de renta y de mejores condiciones de vida, más gente está dispuesta a aceptar este razonamiento (Orea y Villarino, 2013).

Garmendia et al. (2005) mencionan que la definición de calidad ambiental se compone de los siguientes factores:

- La Salud ambiental

Se considera un ambiente sano cuando el individuo es capaz de cumplir su función tanto en condiciones normales, como cuando es perturbado por alteraciones externas, manteniendo una cierta capacidad de auto-recuperación (Annalee et al., 2002). Por ejemplo, el que en una ciudad o una zona verde urbana se parezcan más a un ecosistema natural no garantiza una mejor calidad ambiental. Las funciones que tienen que realizar estos espacios son diferentes.

- La salud de las personas

La salud de las personas dependerá de variables como calidad de aire, agua, ruido, o en general todo lo que pueda tener efecto positivo o negativo en sus estatus de comodidad o límites de tolerancia. Es decir, que un lugar tendrá buena calidad ambiental si cubren las necesidades básicas de sus habitantes (EEA, 2012). En los ambientes habitados por mucha gente, como puede ser una fábrica, un hospital o una ciudad, la calidad ambiental tiene que referirse estrictamente a las necesidades de los que van a utilizar el ambiente.

- La integridad de los ecosistemas

La integridad de los ecosistemas tiene que ver con la composición de especies, la diversidad y los ciclos de materia y flujos de energía que se producen. Estos deben mantener una estructura equilibrada, es decir los dos componentes que representan la integridad son la estructura y su funcionamiento, de lo contrario se produce un desequilibrio con efectos diversos.

#### **3.1.1.3.1 Conceptos sobre impacto ambiental y su mitigación**

El impacto ambiental se define como la alteración de la calidad del medio ambiente debido a la actividad humana. Este impacto posee componentes espaciales y temporales, que se pueden describir como cambios en sus parámetros durante un periodo determinado en un área definida (Wathern, 2013; SEMARNAT, 2015).

La alteración se mide por la diferencia entre la evolución en el tiempo que tendría el entorno, o en algunos de los factores que lo constituyen. En la Figura 3.1, donde el impacto queda representado por el espacio tramado (puntos) que separa la evolución “con” y “sin” la acción humana causante. Esta asociación del impacto a la evolución temporal del entorno, la hace a su vez variable con el tiempo.

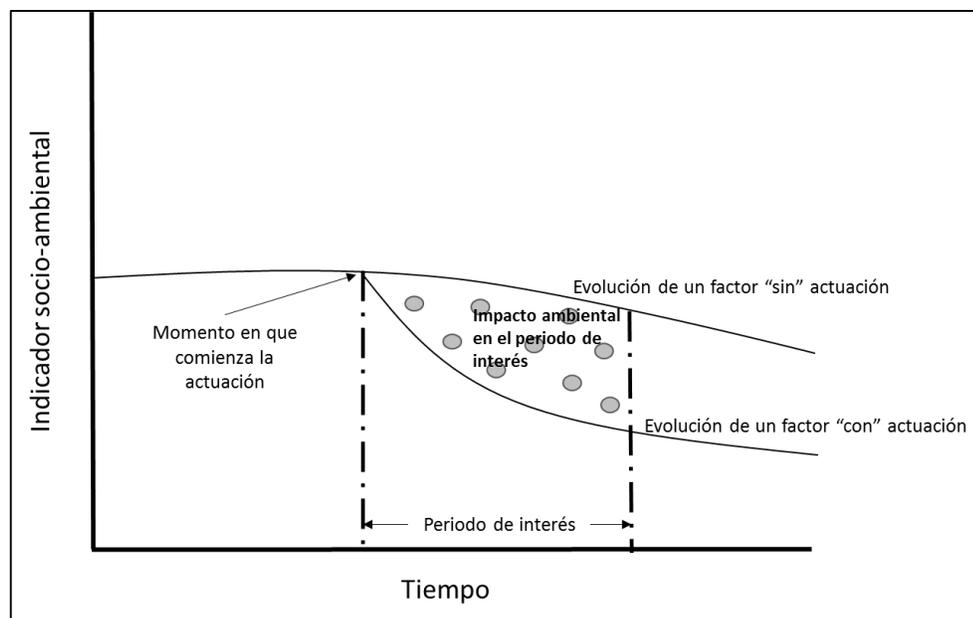


Figura 3. 1. Representación gráfica del impacto ambiental

La reducción de la alteración del medio ambiente, o en otras palabras, la mitigación, se refiere al conjunto de medidas para contrarrestar o minimizar los impactos ambientales negativos que pudieran tener algunas intervenciones antrópicas. La mitigación se refiere también a la reducción de los peligros existentes, exposición o vulnerabilidad, a través del uso de diferentes medidas de prevención para desastres (IPCC, 2012)

### 3.2 El clima terrestre

En el lenguaje común los conceptos "tiempo" y "clima" se definen vagamente. Con frecuencia, la confusión entre estos conceptos no permite distinguir las características, alcances y limitaciones de la información.

El tiempo es el estado fluctuante de la atmósfera que nos rodea, que se caracteriza por la temperatura, el viento, precipitaciones, nubes y otros elementos meteorológicos. El tiempo es el resultado de la evolución y la decadencia de los sistemas meteorológicos, los

cuales tienen una predictibilidad limitada a un periodo de horas, días y hasta de solo una semana (Baede et al., 2001).

El clima se suele definir en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años (IPCC, 2007).

El clima terrestre está determinado por el equilibrio entre la energía entrante y la saliente. Existen diversos factores que pueden influir en este proceso, tanto naturales como antropogénicos (Figura 3.2).

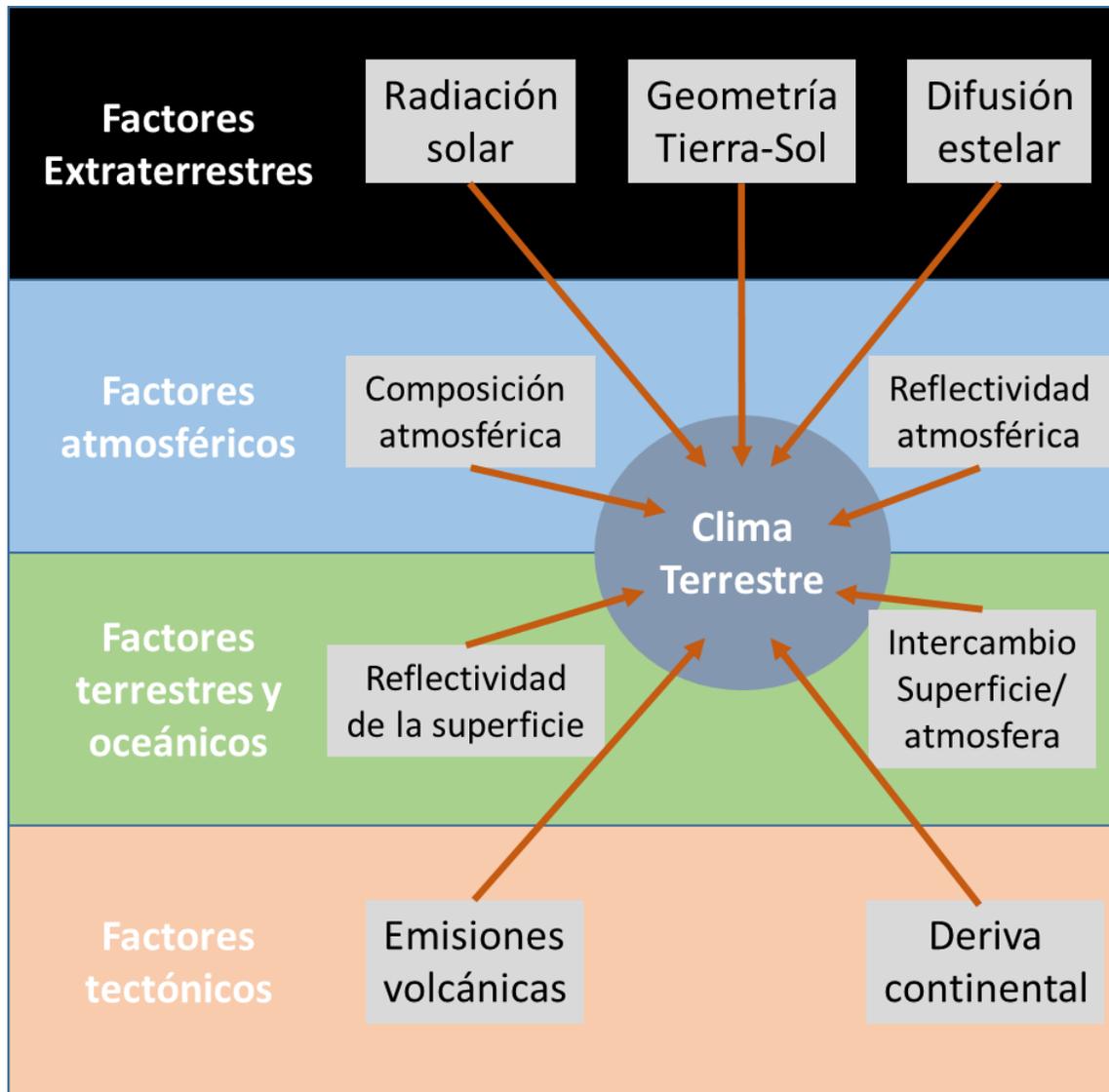


Figura 3. 2. Factores que determinan el clima terrestre (Fuente: Parliament of Australia, 2010).

### 3.2.1 Factores extraterrestres

Los factores extraterrestres tienen lugar en el ambiente que se encuentra entre la tierra y el sol, y son aquellos que afectan la distribución de la radiación, proveniente del sol, que se dirige a la tierra (Mukherjee, 2012).

### 3.2.1.1 Radiación solar

La radiación es un mecanismo de transferencia de energía, que a diferencia de los otros medios de transmisión de energía (convección y conducción) ésta puede presentarse incluso en el vacío. Todos los cuerpos irradian energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas producidas por las vibraciones térmicas de sus moléculas (Serway et al., 2008).

La radiación que llega del sol a la tierra es la fuente principal de energía para la generación de los fenómenos en la atmósfera, en los océanos y, en general, para la vida en la tierra (Gray et al., 2010). La temperatura de la fotosfera del sol es de aproximadamente  $5785^{\circ}\text{K}$ ; por lo que si se considera al sol como un cuerpo negro, este emitirá radiación electromagnética de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann (Ec. 3.1)

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde  $I$  denota la intensidad de la radiación en  $\text{Wm}^{-2}$ ;  $\varepsilon$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) y  $T$  es la temperatura del cuerpo en  $^{\circ}\text{K}$ .

Aguado & Burt (2007) proponen lo siguiente: Considerando una esfera que rodea completamente el sol, cuyo radio es igual a la distancia media entre la Tierra y el Sol, equivalente a  $1.5 \times 10^{11}$  m. A medida que la distancia del sol se incrementa, la intensidad de la radiación disminuye en proporción de la distancia al cuadrado.

Esta relación se conoce como la ley del cuadrado inverso. Dividiendo la emisión total ( $3.865 \times 10^{26}$  W) entre el área de cuatro esferas imaginarias que rodean el sol, se puede determinar la cantidad de energía recibida por una superficie perpendicular a los

rayos entrantes en la distancia media del sol a la tierra (Aguado & Burt, 2007). La radiación entrante es igual a:

$$\frac{3.865 \times 10^{26} W}{4\pi(1.5 \times 10^{11} m)^2} = 1,367 Wm^{-2} \text{ (Ec. 3.2)}$$

El valor  $1,367 Wm^{-2}$  se define como la “constante” solar. Gray et al. (2010) mencionan que la radiación proveniente del sol es variable y que estos cambios afectan en cierto modo al sistema climático terrestre.

### **3.2.1.2 Geometría Tierra-Sol**

La geometría Tierra-Sol es explicada por la teoría de Milankovitch, la cual propone que existen variaciones naturales en la forma de la órbita de la tierra, que influyen en la cantidad de radiación solar que incide en la tierra en diferentes momentos del año. Estas variaciones se dan en forma cíclica y son un factor importante en causar que el clima del planeta se mueva lentamente, durante muchos miles de años, a partir de las edades de hielo (períodos glaciales) a periodos más cálidos (épocas interglaciales) y viceversa (Pelkoswski, 2014).

Pidwirny (2006) describe a los ciclos de Milankovitch como los siguientes:

1. Ciclos excéntricos: Relacionado con la órbita de la tierra alrededor del sol. La órbita cambia gradualmente de ser elíptica (Figura 3.3 A) a ser casi circular (Figura 3.3 B) y luego de vuelta a ser elíptica. Este periodo dura unos 100 000 años.

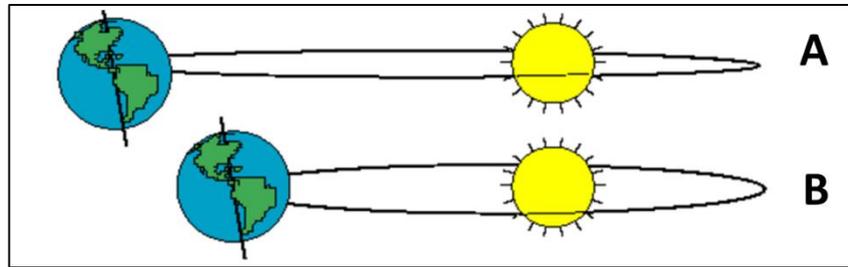


Figura 3. 3. Ciclos excéntricos: A. Órbita elíptica. B. Órbita circular.

2. Precesión de los equinoccios: Es el cambio en la dirección del eje de rotación de la tierra, debido a su propio movimiento retrógrado. Este fenómeno se conoce como precesión de los equinoccios y tiene un ciclo aproximado de 26,000 años. Los cambios en la precesión modifican la fecha del perihelio (momento en que la tierra se encuentra más cerca del sol) y en el afelio (momento en que la tierra se encuentra más alejada del sol) lo que aumenta la intensidad de las estaciones en un hemisferio y las disminuye en el otro (Figura 3.4).

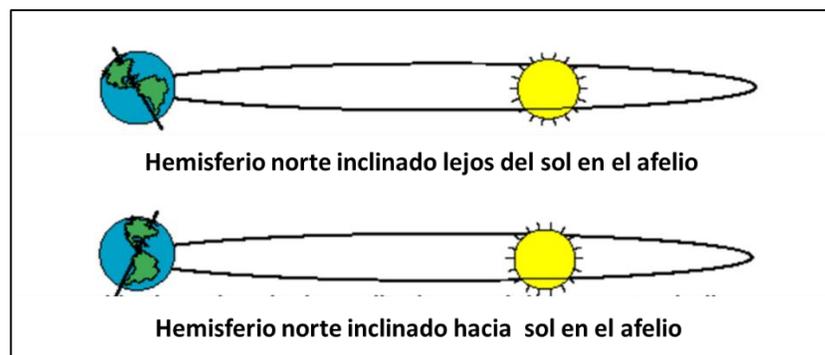


Figura 3. 4. Precesión de los equinoccios.

3. Ciclos oblicuos. Se refiere a la inclinación de la tierra respecto a la de su órbita plana con el sol. Este ciclo tiene una periodicidad de 41,000 años. El eje de la tierra tiene una inclinación de  $23.5^\circ$ , pero este fluctúa entre los 22 y 24.5. Al

aumentar la inclinación del eje terrestre, los inviernos se hacen más fríos y los veranos más cálidos.

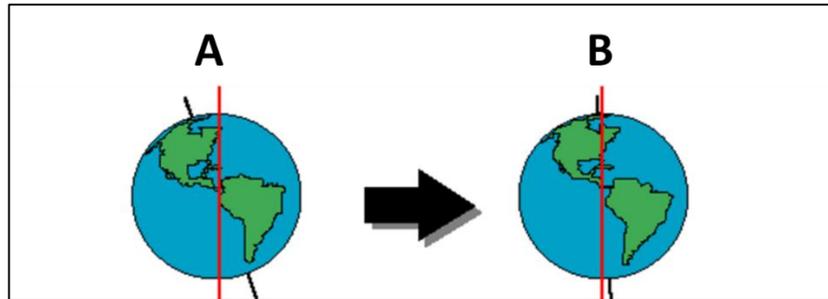


Figura 3. 5. Ciclos oblicuos. A. Inclinación normal ( $23.5^{\circ}$ ). B. Inclinación anormal ( $22^{\circ}$  a  $24.5^{\circ}$ ).

### 3.2.1.3 Difusión estelar

La difusión estelar se refiere a la dispersión de la radiación fuera de la atmósfera terrestre, debido al polvo interestelar, compuesto de gases y partículas de polvo (Savage et al., 1979).

El polvo interestelar contiene hidrógeno en forma de  $H_2$ , y minerales pesados desconocidos. Debido a su opacidad, el polvo interestelar, puede modificar la cantidad de radiación en su camino a la tierra, lo cual tiene influencia sobre el sistema climático terrestre (Ogurtsov & Raspopov, 2011).

### 3.2.2 Factores endógenos

Los factores endógenos que regulan el clima terrestre son los atmosféricos, terrestres, oceánicos y tectónicos. Estos controlan la radiación incidente a la tierra, para generar un balance energético, el cual determina el clima (Baede et al., 2001).

### 3.2.2.1 Balance energético terrestre

El balance energético es la diferencia entre los valores totales de energía entrante y saliente del sistema climático. Si el balance es positivo, se produce un calentamiento; si es negativo, sobreviene un enfriamiento. Promediado a nivel mundial y durante largos períodos de tiempo, este balance ha de ser igual a cero. Como el sistema climático obtiene virtualmente toda su energía del Sol, un balance nulo implica que a nivel mundial la cantidad de radiación solar entrante debe ser, en promedio, igual a la suma de la radiación solar reflejada saliente más la radiación infrarroja térmica saliente emitida por el sistema climático. Toda alteración del balance de radiación mundial, ya sea antropógeno o natural, se denomina forzamiento radiativo (IPCC, 2007).

Kiehl & Trenberth (1997) establecen que la “constante” solar es de  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ , y debido a que la radiación solar incidente es igual a un cuarto de la “constante”, se tienen  $342 \text{ Wm}^{-2}$  en la superficie terrestre, los cuales fluyen en el balance energético terrestre.

Sin embargo, Trenberth et al. (2009) actualizaron las estimaciones en la radiación solar incidente, con observaciones más recientes y mejoras metodológicas, determinando que para el periodo 2000 - 2004 se tenía de  $341 \text{ Wm}^{-2}$ . Estos autores describen el balance energético terrestre (Figura 3.6) de la siguiente manera:

Cada metro cuadrado de la superficie esférica de la Tierra fuera de la atmósfera recibe un promedio de 341 Watts de radiación solar. De los cuales se reflejan inmediatamente de vuelta al espacio por las nubes, la atmósfera y la superficie terrestre alrededor de  $102 \text{ Wm}^{-2}$ . De los restantes  $239 \text{ Wm}^{-2}$  una parte es absorbida por la atmósfera, pero la mayoría es recibida por la tierra ( $161 \text{ Wm}^{-2}$ ), calentando la superficie terrestre tanto la tierra como el océano.

La Tierra, emite radiación infrarroja, la cual es atrapada en su mayor parte en la atmósfera y reenviada de nuevo a la tierra. Este proceso se llama Efecto Invernadero y garantiza las temperaturas del planeta. El efecto Invernadero de la atmósfera hace retornar nuevamente a la Tierra  $333 \text{ Wm}^{-2}$ .

Por lo tanto la absorción energética de la tierra es de  $161 \text{ Wm}^{-2}$  procedentes de la energía solar y del efecto invernadero de la atmósfera recibe  $333 \text{ Wm}^{-2}$ , lo cual da un total de  $494 \text{ Wm}^{-2}$ .

Por otra parte la superficie de la tierra emite (o pierde) un total de  $493 \text{ Wm}^{-2}$ , los cuales se desglosan en  $17 \text{ Wm}^{-2}$  de calor sensible,  $80 \text{ Wm}^{-2}$  de calor latente de la evaporación del agua y  $396 \text{ Wm}^{-2}$  de energía infrarroja, lo cual supone una absorción neta de calor de  $0.9 \text{ Wm}^{-2}$ , que en el tiempo actual está provocando el calentamiento de la Tierra.

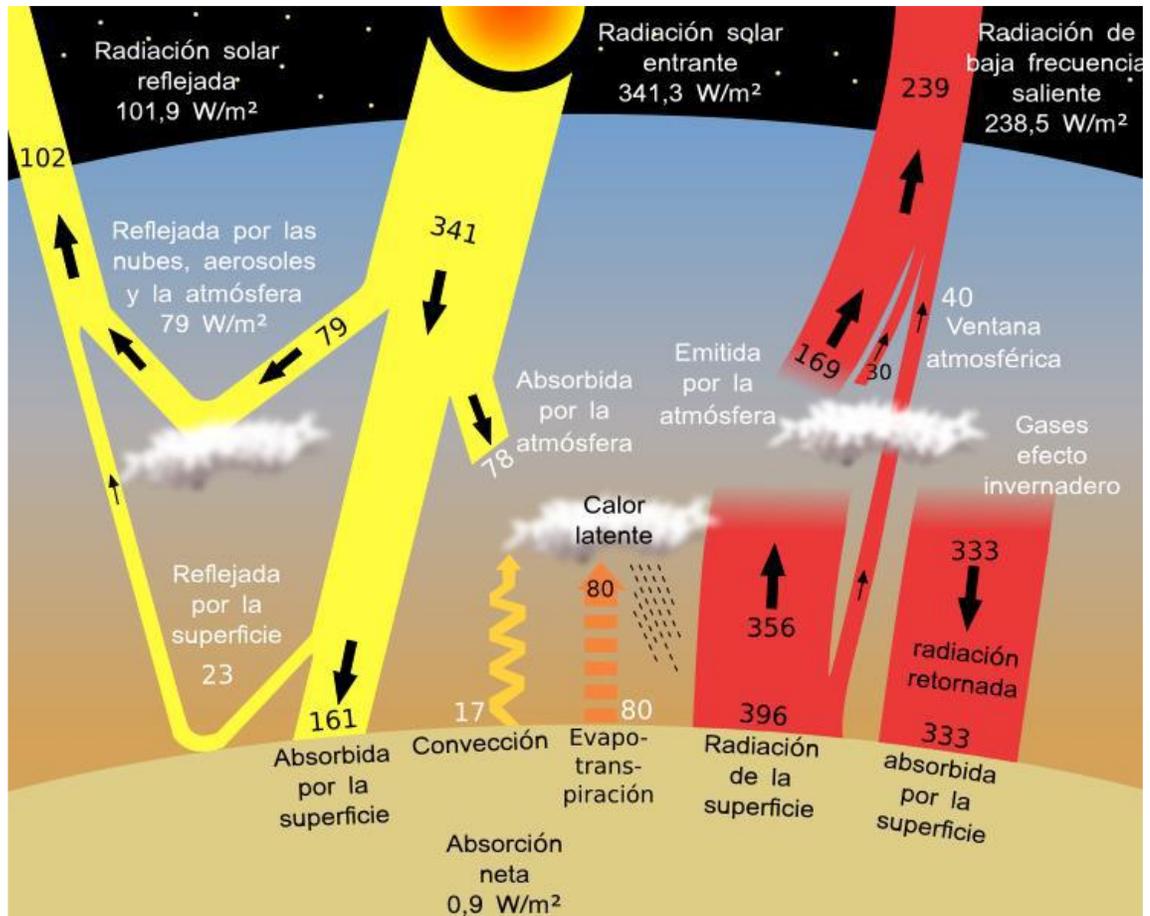


Figura 3. 6. Balance energético terrestre (Traducido de: Trenberth et al., 2009).

### 3.2.2.2 Atenuación de la radiación por la atmósfera terrestre.

La atmósfera, es la parte más inestable y cambiante del sistema climático. Compuesta principalmente de nitrógeno ( $N_2$ , 78.1%), oxígeno ( $O_2$ , el 20.9%), y argón (Ar, 0.93%). Estos gases tienen interacción limitada con la radiación solar. Sin embargo, hay una serie de gases traza, que absorben y emiten radiación infrarroja y son llamados gases de efecto invernadero (GEI), con volumen total de menos del 0.1 %, juegan un papel esencial en el balance de energía de la Tierra (Baede et al., 2001). El vapor de agua ( $H_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ), el metano ( $CH_4$ ) y el Ozono ( $O_3$ ) son los GEI primarios de la atmósfera terrestre (IPCC, 2007).

El efecto de la atenuación de una parte de la radiación solar, se debe a tres características fundamentales: Reflejo, absorción y dispersión.

1. Reflejo: Pidwirny (2006) menciona que el reflejo atmosférico es un proceso en el que la luz solar se redirige  $180^\circ$  después de golpear a una partícula en la atmósfera. Esta redirección causa el 100% de pérdida. La mayor parte de la reflexión en nuestra atmósfera se produce en las nubes cuando la luz es interceptada por partículas de agua líquida y congelada. La reflectividad de una nube puede variar de 40 a 90%.
2. La absorción atmosférica: Se define como un proceso en donde la radiación solar es retenida por una sustancia y es convertida en energía calórica. Los gases en la atmósfera no son igual de efectivos absorbiendo la luz del sol y las diferentes longitudes de onda de radiación igualmente absorbidas (Figura 3.7) (Aguado & Burt, 2007).

Por ejemplo:

- La radiación ultravioleta es absorbida en su totalidad por el ozono en la estratosfera.
- La radiación visible pasa a través de la atmósfera con solo una mínima cantidad de absorción. Si este tipo de radiación fuera absorbida, el cielo sería completamente negro.
- La radiación infrarroja cercana, que representa cerca del 50% de la radiación emitida por el sol, es absorbida principalmente por el vapor de agua y el dióxido de carbono.

Aunque el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros GEI son eficientes absorbiendo la mayoría de las longitudes de onda de la radiación de onda larga, una porción del espectro de onda larga puede pasar a través de la atmósfera sin obstáculos. Esta porción se encuentra entre los 8 y 10  $\mu\text{m}$  y es llamada ventana atmosférica, la cual no debe ser considerada como un lugar en la atmósfera o ausencia de gases. Ésta sólo representa un cierto rango de longitud de onda de especial importancia en el balance de radiación.

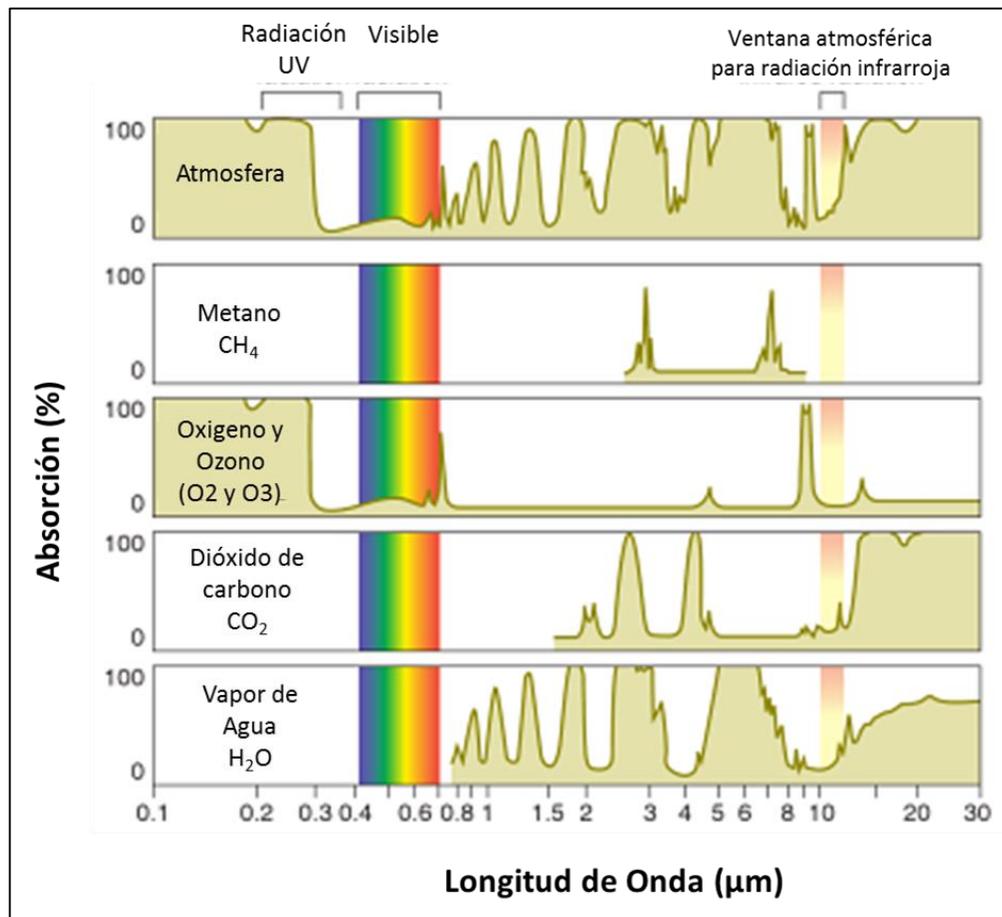


Figura 3. 7. Absorbancia de los principales gases de la atmósfera (Traducción de Ackerman y Knox, 2011).

3. Dispersión atmosférica: El fenómeno de la dispersión de la radiación solar, producido por las partículas y constituyentes de un medio (tal como la atmósfera y el océano), se debe a que parte de la radiación incidente es ‘desviada’ de su dirección inicial; de tal manera, que mientras mayor es la energía mayor será la dispersión (Aguado & Burt, 2007). Existen dos formas de dispersión: La dispersión Rayleigh y la dispersión Mie.

- La dispersión Rayleigh: Es realizada por moléculas de gas individuales en la atmósfera (principalmente de  $N_2$  y  $O_2$ ) y es efectiva para la luz visible especialmente aquellos colores con longitudes de onda corta. Esto significa que la luz azul es más dispersada por las moléculas de aire en comparación con la luz roja de onda larga. Por su eficacia en la dispersión de longitudes de onda corta, se generan tres fenómenos interesantes: el cielo azul en días de cielo despejado, el tinte azul de la atmósfera cuando se ve desde el espacio, y el rojo del amanecer y atardecer (Cabrera-Silva, 2005).
- La dispersión Mie: Las partículas de aerosoles son considerablemente más grandes que las moléculas de aire y dispersan la luz en un proceso llamando dispersión Mie, la cual tiene una mínima tendencia a dispersar la radiación de longitud de onda más corta, en comparación con la dispersión de Rayleigh. Por tanto, en días brumosos o contaminados (con alta concentración de aerosoles) el cielo se torna de color gris ya que toda gama de la parte visible del espectro se dispersa de manera efectiva a la superficie. Este tipo de dispersión causa que los amaneceres o atardeceres sean más rojos de lo común, lo cual también puede

incrementar el color del fuego de los incendios forestales (Aguado & Burt, 2007).

### **3.2.2.3 Cambio en el uso del suelo**

El uso del suelo se refiere al conjunto de disposiciones, actividades y aportes en relación con cierto tipo de cubierta terrestre (es decir, un conjunto de acciones humanas). Designa también los fines sociales y económicos que guían la gestión de la tierra (por ejemplo, pastoreo, extracción de madera, o conservación) (IPCC, 2013a).

El cambio de uso de la tierra es un cambio del uso o gestión de la tierra por los seres humanos, que puede inducir un cambio de la cubierta terrestre. Los cambios de la cubierta terrestre y de uso de la tierra pueden influir en el albedo superficial, en la evapotranspiración, en las fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, o en otras propiedades del sistema climático, por lo que pueden ejercer un forzamiento radiativo y/o otros impactos sobre el clima, a nivel local o mundial (Baede et al., 2001).

Modelar la ocupación del uso de suelo contribuye a comprender y prever su evolución futura. Existen diversos métodos para crear mapas potenciales de transición, los más comunes utilizan el modelo de cadenas de Markov y se basan en los valores de probabilidad de transición (Olmedo et al., 2015)

### **3.2.3 El cambio climático**

El IPCC (2014a) define que el cambio climático es un cambio en el estado del clima que puede ser identificado (por ejemplo, usando pruebas estadísticas) por los cambios en la media o en la variabilidad de sus propiedades y que persisten por un periodo prolongado, típicamente décadas o años. Puede deberse a procesos naturales internos o

fuerzas externas, tales como las modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y los cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de suelo.

Benestad y Schmidt (2009) mencionan que Scafetta y West (2007, 2008) concluyen en que el forzamiento solar puede haber contribuido con hasta un 50% o un 69% al aumento de la temperatura global observada. Por otra parte, el reporte del IPCC (2013a) evaluó que el cambio en el forzamiento radiativo solar durante 1978 a 2011 fue de + 0.05  $\text{Wm}^{-2}$  con una variación de 0 a 0.10  $\text{Wm}^{-2}$ .

Como ha sido expuesto la variabilidad solar en el cambio climático ha recibido una especial atención, ya que entre las causas naturales que afectan el clima, el forzamiento solar es el más controvertido (Scafetta & West, 2006). Estimaciones confiables son necesarias para limitar la incertidumbre en la importancia de la actividad humana como una posible explicación del cambio climático (Gray et al., 2010).

### **3.2.3.1 Calentamiento global**

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC, 2013a).

Los gases de efecto invernadero son los principales causantes del calentamiento global (Baede et al., 2001), y actualmente, la principal contribución al forzamiento

radiativo (Figura 3.8) total proviene del aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera que se viene produciendo desde 1750 (IPCC, 2013a).

Es importante mencionar que el calentamiento global y el efecto invernadero no son conceptos sinónimos, si no que el calentamiento global es generado por el efecto invernadero.

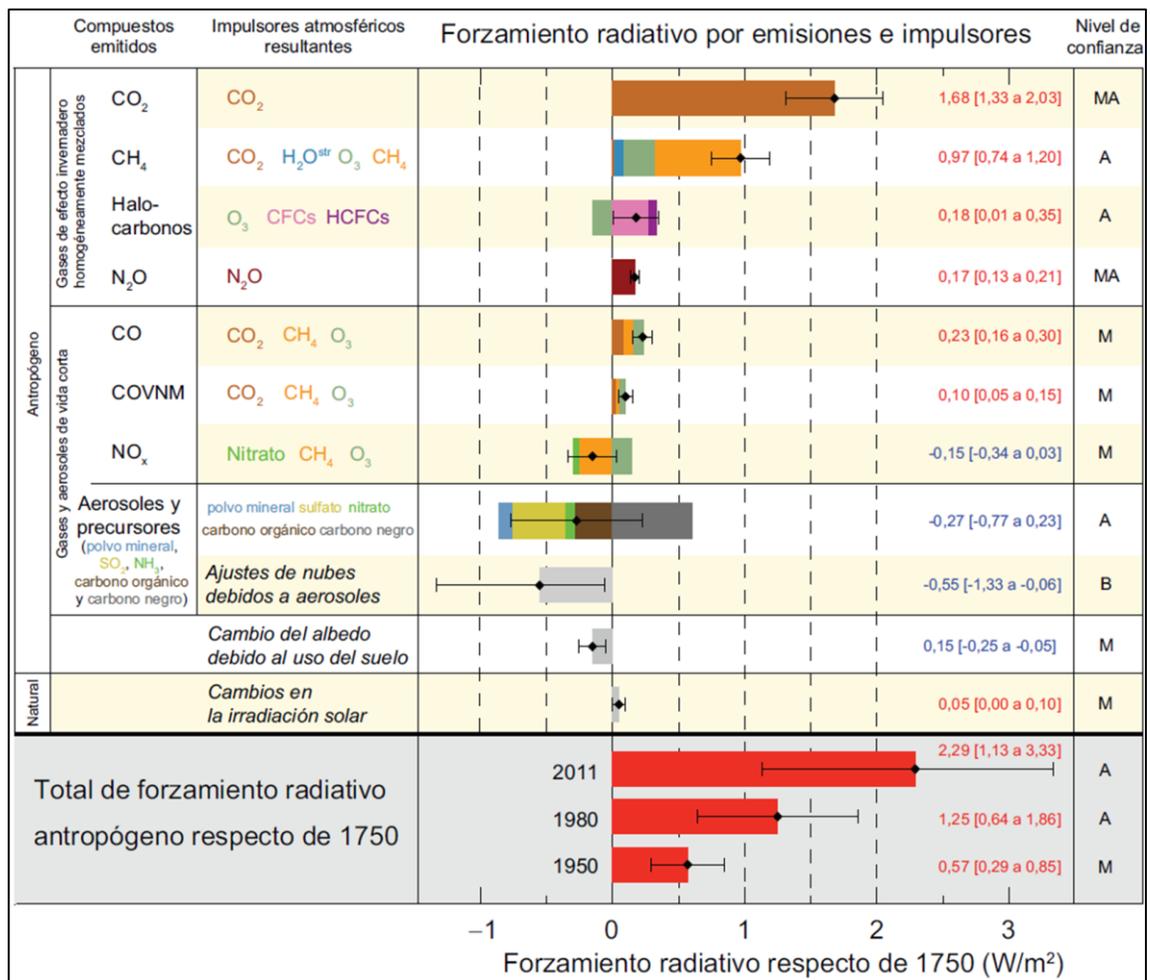


Figura 3. 8. Estimaciones del forzamiento radiativo en 2011, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático. Niveles de confianza, MA: muy alto, A: alto, M: medio, B: bajo, MB: muy bajo. (IPCC, 2013a).

### **3.2.3.2 Efecto invernadero**

Los GEI (ver sección 3.2.2.2) absorben la radiación infrarroja, emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes, excepto en una parte transparente del espectro llamada "ventana atmosférica" (Figura 3.7). En adición los GEI emiten radiación infrarroja en todas las direcciones incluyendo hacia la superficie de la Tierra. Así, los GEI atrapan el calor dentro de la atmósfera (Baede et al., 2001).

Un aumento de la concentración de GEI da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y, por consiguiente a una mayor absorción y emisión de este tipo de radiación generando así un mayor calentamiento.

Actualmente el forzamiento radiativo provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero en el 2011 con relación a 1750 es de  $3.00 \text{ Wm}^{-2}$  ( $2.22$  a  $3.78 \text{ Wm}^{-2}$ ). La principal contribución al forzamiento radiativo total proviene del aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera que se viene produciendo desde 1750 (Figura 3.8) (IPCC, 2013a).

### **3.2.4 Modelos climáticos**

Los modelos climáticos son las principales herramientas disponibles para investigar la respuesta del sistema climático a diversos forzamientos. Estos modelos se han utilizado para hacer predicciones climáticas a escalas de tiempo estacionales o decadales, y para proyectar el clima futuro en los próximos años (Flato et al., 2013). Un modelo es la representación numérica del sistema climático basado en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroalimentación, tomando en cuenta algunas de sus propiedades conocidas (IPCC, 2013a).

Los modelos utilizados en investigación climática varían desde modelos simples de balance de energía hasta modelos complejos del sistema tierra (ESM, por sus siglas en inglés). La elección del modelo depende de la pregunta científica a investigar. Preguntas como por ejemplo, simular el clima histórico, estudios de sensibilidad y procesos para la atribución y comprensión física, realizar proyecciones futuras sobre el cambio climático en los próximos años, y la reducción de la escala de dichas proyecciones para proporcionar más detalles a escala regional o local (IPCC, 2013a).

Los modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) fueron los modelos climáticos estándar en el cuarto reporte del IPCC (2007). Su función principal es comprender la dinámica de los componentes físicos del sistema climático (atmósfera, océanos, superficie y hielo marino), y para hacer proyecciones basadas en el forzamiento futuro de los GEI y los aerosoles.

Los ESM representan el estado actual del arte en cuanto a modelos, expandiendo los MCGAO para incluir la representación de diversos ciclos biogeoquímicos tales como los implicados en el ciclo del carbono, el ciclo del azufre u ozono. Estos modelos proporcionan las herramientas más completas disponibles para simular las respuestas pasadas y futuras del sistema climático al forzamiento externo, en el que evaluaciones biogeoquímicas juegan un papel importante (Flato, 2011).

Las principales características de los MCGAO y ESM es que participan en el Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). El CMIP5 comenzó en 1995 bajo los auspicios del grupo de trabajo de modelación acoplada (WGCM, por sus siglas en inglés) el cual a su vez depende del comité del Programa Mundial de investigaciones climáticas (CMIP5, 2013).

CMIP5 (2013) presenta un contexto de múltiples modelos (Figura 3.9) para: 1) La evaluación de mecanismos responsables de las diferencias poco comprendidas asociadas con el ciclo del carbono y las nubes, 2) Examinar la “predictibilidad” del clima y explorar la habilidad de los modelos para predecir el clima en una escala temporal de décadas o más y 3) determinar por qué los modelos forzados de manera similar producen una variedad de respuestas.

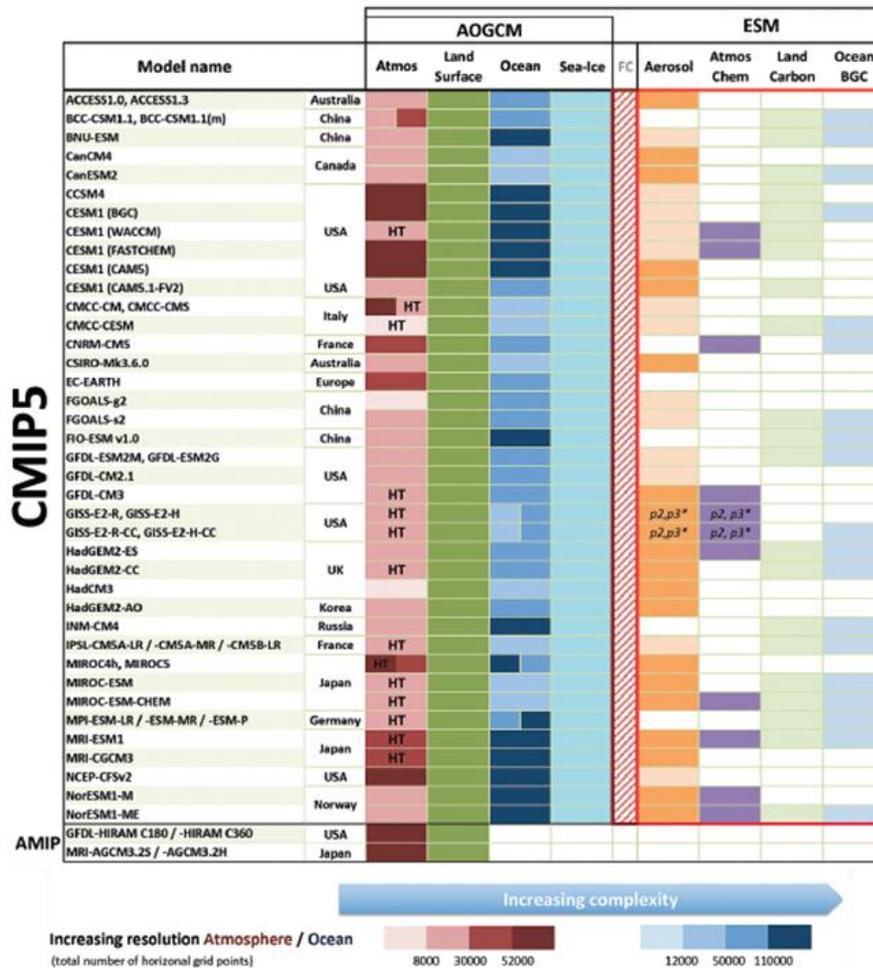


Figura 3. 9. Modelos utilizados en el CMIP5 (Flato et al., 2013).

El experimento CMIP5 (2013) considera los siguientes forzantes como datos de entrada a la modelación: 1) datos de forzamiento solar, 2) concentraciones de GEI, 3)

datos de emisiones de CO<sub>2</sub>, 4) datos de emisiones para otros químicos, 5) Datos de uso de suelo, 6) datos de ozono, 7) datos de temperatura de superficie del mar y hielo marino, 8) datos del “Cloud Feedback Model Intercomparison Project”.

#### **3.2.4.1 Desarrollo de modelos climáticos**

Los modelos climáticos se fundamentan en base a las leyes de la naturaleza (por ejemplo: energía, masa, conservación del momento). Flato et al. (2013) mencionan que el desarrollo de modelos climáticos implica varios pasos principales:

1. Expresando las leyes físicas del sistema en términos matemáticos. Esto requiere un trabajo teórico y observacional en la obtención y la simplificación de expresiones matemáticas que describen mejor el sistema.
2. La implementación de estas expresiones matemáticas en una computadora. Para ello es necesario el desarrollo de métodos numéricos que permiten la solución de las expresiones matemáticas discretas, generalmente implementados en alguna forma de rejilla como la cuadrícula de latitud, longitud y altura de los modelos atmosféricos u oceánicos.
3. La creación o implementación de modelos conceptuales (usualmente referidos como parametrizaciones) para aquellos procesos que no pueden ser representados explícitamente debido a su complejidad (por ejemplo, los procesos biogeoquímicos en la vegetación); o debido a las limitaciones de las ecuaciones discretas del modelo (por ejemplo los procesos de las nubes y turbulencia) para representar apropiadamente las escalas temporales o espaciales de dichos procesos. El desarrollo de parametrizaciones se ha hecho muy complejo y con frecuencia se consigue mediante el desarrollo de modelos

conceptuales del proceso de interés en aislamiento utilizando observaciones y modelos de procesos compresivos.

Los modelos requieren importantes recursos de supercomputación. Las limitaciones en los recursos conducen a restricciones adicionales. El IPCC (2013b) menciona que incluso cuando se utilizan los ordenadores más potentes, deben de priorizarse tres áreas:

1. Las implementaciones numéricas permiten seleccionar el tamaño de la rejilla y los pasos de tiempo, usualmente esto se refiere a la resolución del modelo. Una mayor resolución del modelo generalmente conduce a modelos matemáticos más precisos (aunque no necesariamente simulaciones más fiables), en adición a mayores costos computacionales.
2. El sistema climático contiene muchos procesos, la importancia relativa de los cuales varía conforme al tiempo (por ejemplo, el ciclo del carbono). Por tanto se deben incluir o excluir ciertos procesos o componentes del modelo, reconociendo que un aumento en la complejidad generalmente conduce a un aumento en los costos computacionales.
3. Debido a las incertidumbres en la formulación y en el estado inicial, cualquier simulación representa solo una de las posibles rutas que el sistema climático podría seguir. Para permitir algún tipo de evaluación de estas incertidumbres, es necesario llevar a cabo una serie de simulaciones ya sea con varios modelos o mediante el uso de un ensamble de simulaciones con un solo modelo. Ambas opciones aumentan el costo computacional.

### 3.2.4.2 Escenarios de cambio climático

Un escenario climático es una representación plausible, y a menudo simplificada del clima futuro, basado en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas que se han construido para el uso explícito en la investigación de las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico. A menudo este escenario sirve como entrada para impactar modelos. Un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (Nakicenovic & Swart, 2000).

Una proyección del clima es la respuesta simulada del sistema climático a un escenario de futura emisión o concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles. Las proyecciones climáticas se distinguen de las predicciones climáticas por su dependencia en la emisión, concentración o forzamiento radiativo del escenario utilizado, el cual a su vez se basa en suposiciones con respecto a, por ejemplo, los desarrollos futuros económicos y tecnológicos que pueden llegar a suceder o no (IPCC, 2013a).

En el quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC (2013a), se propone un nuevo conjunto de escenarios, las Rutas de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que fueron utilizados para las nuevas simulaciones llevadas a cabo en el marco del proyecto CMIP5. Estos escenarios se dividen en cuatro grupos (Tabla 3.1): RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, que se refieren a la radiación global de energía expresada en  $Wm^{-2}$  (Moss et al. 2010).

Tabla 3. 1. Escenarios RCP

Nombre	Forzamiento Radiativo	Concentración (ppm)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	> 8.5 Wm <sup>-2</sup> en 2100	> 1,370 CO <sub>2</sub>	Aumentando	MESSAGE (Austria)
RCP 6.0	6Wm <sup>-2</sup> estable después de 2100	850 CO <sub>2</sub> estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM (Japón)
RCP 4.5	4.5Wm <sup>-2</sup> estable después de 2100	650 CO <sub>2</sub> estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM (EU)
RCP 2.6	Pico en 3 Wm <sup>-2</sup> antes del 2100 y disminuye después	Pico en 490 CO <sub>2</sub> antes del 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE (Países bajos)

En el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional” se realizó un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) cuyos resultados fueron utilizados en el 5° Reporte de Evaluación del IPCC (Cavazos et al., 2013).

A partir del reporte anterior, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA-UNAM) a través de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>), estructuró los nuevos escenarios de cambio climático para México utilizando 3 modelos de circulación general, propuestos en el CMIP5. En adición, en base a, los 15 MCG del estudio de Cavazos et al. (2013) se generó el ensamble REA (Reliability Ensemble Averaging) utilizando la metodología de Giorgi y Mearns (2001).

La actualización de los escenarios de cambio climático tiene un papel muy importante para la realización de nuevos estudios de cambio climático, ya que se basa en la generación o actualización de los escenarios de cambio climático individuales, que serán un insumo esencial para los estudios de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, los cuales están marcados en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (<http://pnd.gob.mx/>) y en la Estrategia Nacional de Cambio Climático (<http://iecc.inecc.gob.mx/>).

### **3.3 Análisis de riesgo socio-ambiental**

El marco de políticas de adaptación del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) precisan fomentar el desarrollo sustentable ante los riesgos climáticos actuales y futuros (Lim et al., 2005).

El desarrollo sustentable es definido por la comisión Brundtland (WCED, 1987) como la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades. Esta definición conlleva un desarrollo con objetivos socioculturales, económicos y ecológicos.

Musters et al., (1998) mencionaban que en los asuntos del desarrollo global era difícil llegar a un consenso entre las naciones, y es por ellos que principalmente la implementación de planes sobre el desarrollo sustentable se han llevado a cabo a escalas locales, regionales o a nivel estado-nación.

Pero actualmente se han llevado a cabo diversos foros internacionales en los cuales el desarrollo sustentable se ha convertido en uno de los desafíos clave de la agenda global.

Por ejemplo, el Foro Económico Mundial (WEF, 2015) en su reporte de 2014 - 2015, propone la creación de la sociedad de inversión para el desarrollo sustentable (SDIP, por sus siglas en inglés) la cual pretende crear infraestructura sustentable para los mercados emergentes de los países en desarrollo.

Para que la implementación de los planes del desarrollo sustentable sean eficaces, éstos deben ser adecuados con la dirección de los habitantes involucrados en la unidad. Aclarando que por dirección se entiende a cualquier acción deliberada que se basa en la información y que se lleva a cabo para influir en el curso del desarrollo.

Una forma de integración del medio físico-biótico, social y económico, son los denominados sistemas socio-ambientales, los cuales son sistemas abiertos, con numerosas relaciones con otros sistemas, y en sus habitantes debe existir un consenso acerca de sus objetivos y medidas adoptadas para alcanzar un desarrollo sustentable (Musters et al., 1998).

Las medidas tomadas para favorecer el desarrollo deben ser impactadas lo menos posible por procesos incontrolables dentro y fuera del sistema, además estas medidas no deben causar procesos incontrolables en otros sistemas, frustrando así el curso de su desarrollo.

Estos procesos incontrolables forman parte del riesgo, el cual es la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos o tendencias multiplicados por los impactos si ocurren estos eventos o tendencias. El riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y peligros (Figura 3.10) (IPCC, 2014b).

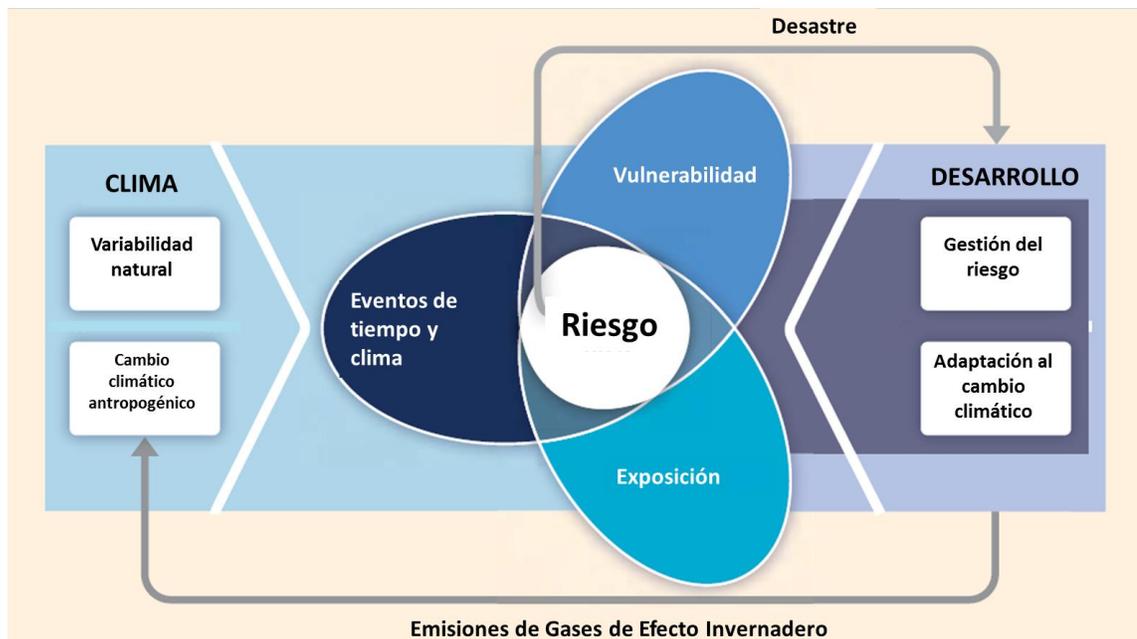


Figura 3. 10. Riesgo en los sistemas socio ambientales (IPCC, 2012).

Los eventos de tiempo y clima hacen referencia a los eventos extremos, y se definen como la aparición de un valor variable en el tiempo o clima por arriba o por debajo de un valor umbral en los extremos superiores o inferiores del rango de los valores observados de la variable.

Vulnerabilidad es el grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2007).

La exposición se refiere a la presencia de la gente, los medios de vida, servicios y recursos ambientales, infraestructura o bienes económicos, sociales, culturales y en lugares donde pudieran verse afectados negativamente.

Los desastres son la materialización del riesgo, donde es importante mencionar que no existen los “desastres naturales” (Magaña, 2006). Éstos causan alteraciones graves al funcionamiento normal de los sistemas socio-ambientales debido a eventos físicos peligrosos que interactúan con las condiciones sociales vulnerables y que conlleva alteraciones a efectos adversos para sus habitantes y sus bienes, creando efectos económicos y ambientales que requieren una respuesta inmediata a satisfacer las necesidades de comodidad y que pueden requerir apoyo externo para su recuperación (IPCC, 2014b).

La gestión de riesgo es un enfoque estructurado para manejar la incertidumbre relativa a una amenaza climática, a través de una secuencia de actividades humanas que incluyen el análisis del riesgo, estrategias de desarrollo para manejarlo y mitigación del riesgo utilizando recursos gerenciales (Lim et al., 2005).

Dentro de este contexto, el análisis de riesgo socio-ambiental es un enfoque que permite estudiar las causas de posibles amenazas o peligros y eventos no deseados, relacionados con la variabilidad climática, así como los daños y consecuencias que éstos puedan producir sobre las personas, bienes y los ecosistemas en situación vulnerable (López-Santos & Martínez-Santiago, 2015).

La capacidad de adaptación son las iniciativas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas socio-ambientales ante los efectos reales o esperados de un cambio climático.

### **3.3.1 Riesgos socio-ambientales para las zonas áridas de México.**

Los desastres provocados por fenómenos naturales han aumentado a nivel mundial como resultados principalmente de la vulnerabilidad (IPCC, 2012) y solo en parte por los cambios en las características del peligro mismo (Magaña, 2013). En este entendido se puede afirmar que las acciones humanas pueden reducir la vulnerabilidad aun cuando la exposición al peligro aumenta.

El desafío actual en México, es lograr cambiar la gestión del riesgo de remediación o emergencista (reactiva) a preventiva (proactiva), reduciendo la corrección de problemas sobre la marcha para consolidar la aplicación de alternativas de acción. Para ello, es necesaria una adecuada evaluación de ventajas, y desventajas de las acciones mediante escenarios de impacto (Magaña, 2010).

Por tanto, los estudios de análisis de los riesgos socio-ambientales son un elemento indispensable para evaluar la vulnerabilidad de los sectores económicos, ecológicos y sociales ante el cambio climático actual y futuro, siendo cuantificada mediante valores, es decir, pasar de lo cualitativo a lo cuantitativo (Magaña, 2006).

Las regiones de clima seco (árido, semiárido y subhúmedo), que actualmente cubren el 45% de la superficie terrestre (Figura 3.11) y que corresponde a la mayor parte de los países en vías de desarrollo, donde se asientan poco más de 2 mil millones de personas (UNCCD, 2011). Geng et al., (2014) mencionan que actualmente estas zonas se encuentran en expansión territorial, donde el grado de aridez está empeorando, tendencia que ha sido reportada por diversos autores (IPCC, 2007; Zhou et al., 2010; Lal et al., 2012; Al-Kaisi et al., 2012; UNCCD, 2013).

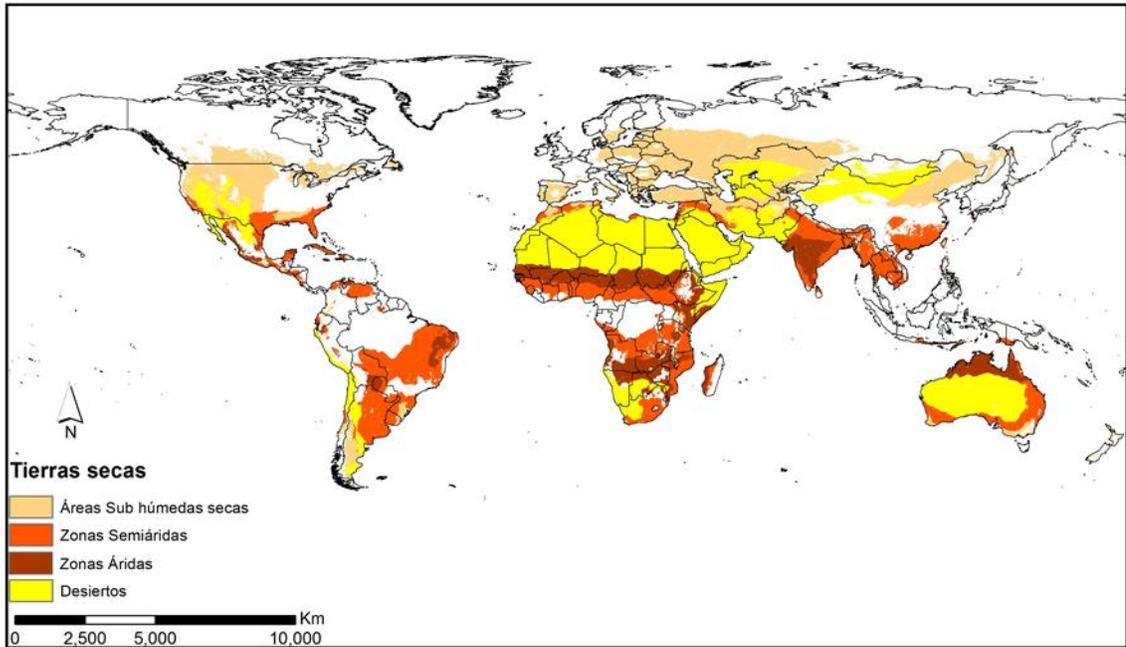


Figura 3. 11. Las zonas áridas en el mundo (UNCCD, 2011).

México es un país altamente vulnerable a las condiciones extremas de tiempo y clima (Landa et al., 2008), además de poseer en más de la mitad de su territorio zonas áridas y semiáridas (Figura 3.12), las cuales se encuentran principalmente en el norte del país y son habitadas por el 30 % de la población (33.6 millones de personas).

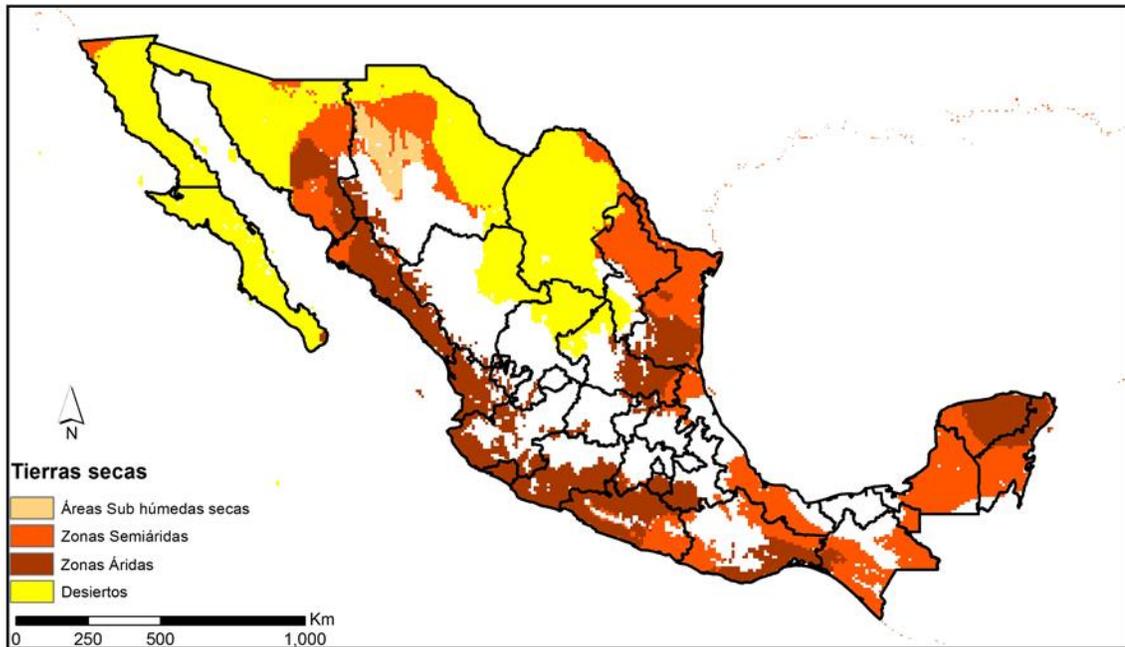


Figura 3. 12. Zonas áridas en México (SEMARNAT, 2013).

La importancia de los riesgos climáticos para los habitantes de las zonas áridas incrementará debido a que los diferentes tipos de eventos climáticos extremos pueden llegar a ser más frecuentes, más generalizados y/o más intensos en la mayoría de las regiones en el mundo (IPCC, 2012).

Las zonas áridas son las que resultarían, probablemente, más afectadas por efectos de cambio climático, principalmente por la degradación de los recursos hídricos producto de la disminución de la precipitación y aumento de la evaporación, generando condiciones de sequía (IPCC, 2007).

Las sequías son descritas como uno de los peligros más dañinos en términos económicos, afectando a más personas que cualquier otro tipo de peligro (Keyantash & Dracup, 2002), principalmente por la pérdida en la calidad y cantidad de la producción de alimentos, y por el inadecuado pastoreo (alimentación) del ganado. Por ejemplo, en

México y Latino América se siembran 6.7 millones de hectáreas de frijol, de las cuales el 60% se cultiva en regiones de aridas, donde los períodos de sequía inesperadas resultan en pérdidas que pueden llegar a la reducción de rendimiento de hasta un 80% (Rosales et al., 2013).

Al momento de hacer frente a los desastres, las condiciones socioeconómicas, como la pobreza son un factor determinante. Cohen et al. (2013) mencionan que las zonas áridas de México se ven seriamente afectadas por el cambio climático generando pérdidas económicas en las zonas rurales. Esto afecta principalmente a los medios de vida y la supervivencia de numerosas familias campesinas que dependen de la agricultura de secano, creando como consecuencia que las personas busquen emigrar en busca de mejores condiciones de vida.

### **3.3.1.1 Relación entre sequía y erosión eólica**

Comúnmente se pueden identificar tres tipos de sequía: Meteorológica, agrícola e hidrológica (Dai, 2010). Las dos últimas son generadas por la sequía meteorológica, que es un periodo de meses a años con precipitación por debajo del promedio. La sequía agrícola se produce cuando la sequedad del suelo reduce las cosechas y los pastos, y la sequía hidrológica es aquella donde los niveles de agua de embalses, ríos y acuíferos están inferiores a su nivel medio.

Los impactos de la sequía aumentan lentamente, se extiende en grandes áreas geográficas con límites difusos y pueden persistir durante años después de su término, lo cual hace difícil la remediación y cuantificación del impacto (Middleton & Sternberg, 2013).

Uno de los impactos de la sequía es la erosión eólica, la cual se manifiesta principalmente por las tormentas de polvo que causan contaminación en el aire, agua, disminución de la visibilidad, interrupción al sistema eléctrico, (Goudie & Middleton, 2006) y son asociadas principalmente a las zonas áridas, debido al déficit hídrico en sus suelos y la poca cobertura vegetal que en ellas existe (Middleton & Sternberg, 2013).

Singh et al. (2012) reportaron que en la región conocida como la meseta de Columbia al noroeste de Estados Unidos de América, la erosión eólica de las tierras agrícolas ha generado impactos negativos en la calidad del aire principalmente por la emisión de sedimentos durante vientos fuertes, los cuales fuerzan el cierre de carreteras debido a la nula visibilidad y suspensión de partículas menores a 10  $\mu\text{m}$ , contaminante que afecta seriamente la salud humana.

La erosión eólica es un proceso complejo donde interactúan diversos factores físicos que pueden ser agrupados en las siguientes categorías: Tiempo y clima (vientos fuertes y bajas precipitaciones), estado del suelo (textura y humedad del suelo) y rugosidad de la superficie (agregados del suelo no erosionables, microtopografía y cubierta vegetal). Durante un evento de erosión, pequeñas partículas de suelo ricas en materia orgánica y nutrientes tienden a ser suspendidas y dispersadas lejos de la superficie por la turbulencia atmosférica y transportadas a distancias de miles de kilómetros degradando el suelo (Shao & Leslie, 1997).

La textura es una de las principales propiedades del suelo que afectan su susceptibilidad de presentar erosión eólica, en otras palabras que determinan la erodabilidad del suelo. La humedad del suelo es un factor importante, ya que puede tener un efecto sobre la erodabilidad del suelo, así como en el transporte de sedimentos por el

viento (Zobeck & Van Pelt, 2014). El Departamento de Agricultura de Estados Unidos mediante el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA - NRCS) clasificó la erodabilidad del suelo de acuerdo a su textura y contenido de carbonato de calcio como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Relación entre la textura del suelo y la erodabilidad del suelo (Zobeck & Van Pelt, 2014)

Textura de suelo	Textura de suelo predominante en la capa superficial	Grupo de erodabilidad	Índice de erodabilidad del suelo <i>t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup></i>
			694
Gruesa	Arena muy fina, arena fina, arena, o arena gruesa	1	560
			493
			403
			358
Gruesa	areno arcilloso muy fina, areno arcilloso fino, areno arcilloso, arena arcilloso grueso o materiales sápricos del suelo	2	300
Gruesa	Franco arenoso muy fino, franco arenoso fino, franco arenoso, franco arenoso grueso	3	193
Fina	Arcilla, arcillo limoso, franco arcilloso no calcáreo, o arcillo limoso con arcilla más del 35%	4	193
Mediana	Calcáreo limoso y franco limoso o calcáreo franco arcilloso y franco arcillosos	4L	193
Mediana	No calcáreo limoso y franco limoso con menos de 20% de arcilla o franco arcillo arenoso, arcillo arenoso, materiales orgánicos de suelos húmicos	5	125
Mediana	No calcáreo limoso y franco limoso con más del 20% de arcilla o franco arcilloso no calcáreo con menos del 35% de arcilla	6	108
Mediana	Limoso, arcillo limoso no calcáreo con arcilla en menos del 35%, y material fibroso de suelos orgánicos	7	85

-	Suelos no susceptibles a la erosión eólica debido a fragmentos superficiales gruesos o humedad	8	-
---	--	---	---

Merrill et al. (1999) mencionaron que las bajas precipitaciones tienen un efecto sobre la erodabilidad del suelo. Actualmente el IPCC (2013a) menciona que de manera general se espera una disminución en la precipitación lo cual hace más susceptible a los suelos a eventos del viento.

### 3.3.1.1.1 Los suelos de zonas áridas

Los suelos de zonas áridas, cubren aproximadamente un tercio de la superficie de la tierra (Figura 3.13). Se caracterizan por un estrés hídrico frecuente, un bajo contenido de materia orgánica y un bajo nivel nutritivo (Verheye, 2006).

Sus propiedades, tales como la textura y la capacidad de retención del agua, determinan la proporción de agua de lluvia disponible para el crecimiento de las plantas. El bajo contenido de materia orgánica, la baja germinación y la alta mortalidad de plántulas son las principales causas de la productividad extremadamente baja en estos suelos (FAO, 2007).

El INEGI (2011) en la Guía de Interpretación de Cartografía Edafología Serie II, indica que los suelos característicos de las zonas áridas de México son los siguientes:

1. Arenosol (AR). Del latín arena, arena. Suelos con más del 85% de arena. Incluyen arenas recién depositadas en dunas o playas y también de arenas residuales formadas por meteorización de sedimentos o rocas ricas en cuarzo. No tienen buenas propiedades de almacenamiento de agua y nutrientes, pero ofrecen facilidad de labranza y enraizamiento. Los Arenosoles más

susceptibles a la degradación por cambio de uso son los de clima húmedo. La superficie más importante de Arenosoles se encuentra en los desiertos de Sonora, Baja California y Baja California Sur. En la zona seca son usados para pastizales y cultivos de arado si se irrigan. En regiones templadas para cultivos de arado y pastizales; se requiere riego suplementario (por aspersión) durante el periodo seco. En los trópicos perhúmedos están químicamente agotados y son altamente sensibles a la erosión.

2. Calcisol (CL). Del latín calcarius, calcáreo. Suelos con más del 15% de carbonato de calcio en por lo menos una capa de 15 cm de espesor, pueden presentar una capa cementada (petrocálcico). Muchos cultivos en Calcisoles tienen éxito si son fertilizados con nitrógeno, fósforo, hierro y zinc. Es uno de los grupos de suelo más extendidos en México. Están situados principalmente en zonas áridas de origen sedimentario (calizas, lutitas-areniscas y conglomerados) en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. Estos pueden ser altamente productivos bajo una amplia variedad de cultivos si son irrigados, drenados (para prevenir la salinización) y fertilizados.
3. Kastañozem (KS). Del latín castanea, castaño y del ruso zemlja, tierra. Suelos de clima árido o semiárido, con una capa superficial gruesa de color pardo oscuro y rica en carbono orgánico, fértiles en magnesio, potasio y carbonatos en el subsuelo. Requieren fertilizantes fosfatados y un buen programa de riego que evite riesgos de salinización. Son susceptibles a la erosión hídrica y eólica especialmente si son terrenos agrícolas en descanso o tierras de sobrepastoreo. Los Kastañozems se encuentran situados principalmente en el Bolsón de

Mapimí, las llanuras de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas. Tanto el clima como el uso principal de este suelo son similares al del Chernozem, aunque con una mayor proporción de matorrales desérticos de tipo micrófilo, tamaulipeco y rosetófilo.

4. Chernozem (CH). Del ruso cher, negro, y zemlja, tierra. Suelos de clima árido o semiárido, con una capa superficial gruesa, negra o muy oscura y rica en carbono orgánico, fértiles en magnesio, potasio y carbonatos en el subsuelo. La mayor extensión de Chernozems se encuentra en tres regiones: las sierras y llanuras de Durango, las llanuras de San Luis Potosí y Zacatecas y la Llanura Costera Tamaulipeca. La mayor parte de los Chernozems se encuentran en clima semicálido seco o semiseco y se emplean en la agricultura de riego o temporal, en el cultivo de pastizales. También puede encontrarse bajo pastizal natural o inducido y matorral espinoso tamaulipeco.
5. Glipsisol (GY). Del latín gypsum, yeso. Suelos con más del 5% de yeso (sulfato de calcio) en por lo menos una capa de 15 cm de espesor. Se encuentran en las zonas más secas de los climas áridos. Los Gipsisoles situados en depósitos aluviales y coluviales jóvenes son mejor aprovechados para la agricultura porque su contenido de yeso es relativamente menor. Grandes áreas de estos suelos que se usan para pastizales son de bajo volumen. El agua de riego y el drenaje combinado son prácticas regularmente favorables. Por lo contrario, el riego provoca corrosión, formación de cuevas y subsidencia irregular de la superficie de la tierra. Estos suelos son representativos únicamente en el Bolsón de Mapimí y en llanuras desérticas

en Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí. El campo de dunas de yeso más famoso en México se ubica en Cuatro Ciénegas, Coahuila.

6. Leptosol (LP). Del griego leptos, delgado. Del griego Lithos, piedra. Incluyen los antiguos Litosoles y otros suelos con menos de 25 cm de espesor o con más de 80% de su volumen ocupado por piedras o gravas. Son muy susceptibles a la erosión. Se localizan generalmente en las zonas montañosas con más de 40% de pendiente como la Giganta, del Burro, la Paila, San Carlos, del Pinacate y la Sierra Lacandona. También son abundantes en la Mixteca Alta oaxaqueña, el Carso Huasteco, al pie de la Sierra Madre Occidental y en todos los sistemas de cañones. Un caso particular son los extensos afloramientos calizos encontrados en la Península de Yucatán. Los tipos de vegetación más relacionados con los afloramientos rocosos son el matorral desértico rosetófilo, la selva baja caducifolia y el bosque de encina. El uso principal de este suelo es para agostadero.
7. Phaeozem (PH). Del griego phaios, oscuro, y del ruso zemlja, tierra. Suelos de clima semiseco y subhúmedo, tipos BS<sub>1</sub>, (A)C y Aw<sub>0</sub> de color superficial pardo a negro, fértiles en magnesio y potasio aunque con muy pocos o ningún carbonato en el subsuelo. El relieve donde se desarrollan estos suelos es generalmente plano o ligeramente ondulado. En México constituyen los suelos más importantes para la agricultura de temporal. Por ejemplo, en los Altos de Jalisco, las llanuras de Querétaro, Hidalgo y norte de Guanajuato, en la Gran Meseta Chihuahuense, al pie de la Sierra Madre Occidental y en numerosos valles del sur y sureste de México.

8. Regosol (RG). Del griego rhegos, manta. Suelos con propiedades físicas o químicas insuficientes para colocarlos en otro grupo de suelos. Son pedregosos, de color claro en general y se parecen bastante a la roca que les ha dado origen cuando no son profundos. Son comunes en las regiones montañosas o áridas de México asociados frecuentemente con Leptosoles. Constituyen el grupo de suelo más extenso y variado del país.
9. Solonetz (SN). Del ruso sol, sal y etz, expresado fuertemente. Suelos fuertemente alcalinos, que presentan en el subsuelo capas endurecidas con estructura columnar o prismática y alto contenido de arcilla unido a niveles de sodio o magnesio intercambiable muy elevados para la mayoría de los cultivos agrícolas. Están relacionados con climas de verano seco, caluroso y con antiguos depósitos costeros con alta concentración de sodio. En México existen registros de Solonetz profundos asistidos por riego que tienen éxito agrícola. Para ello ha sido necesario mejorar la estructura y porosidad a través de la aplicación de residuos orgánicos y riego con agua rica en calcio. Suelos representativos de las llanuras y médanos del norte de Chihuahua y de la Laguna de Mayrán en Coahuila, donde el clima seco y la vegetación de tipo halófilo o áreas sin vegetación son dominantes.

### **3.3.1.2 El factor viento y su contribución en la producción de sólidos suspendidos en el aire**

El viento es un agente de erosión capaz de arrancar, levantar y transportar partículas de suelo, ya que la fuerza cohesiva de los materiales que lo integran es excedida por la fuerza del viento (Skidmore, 1986). Los eventos de vientos fuertes pueden alterar la

fertilidad física y química de los suelos, debido al transporte de partículas de diverso tamaño que pueden ser de minerales, materiales orgánicos, fertilizantes, semillas y humedad entre otros, afectando el rendimiento de cultivos (Buschiazzo et al., 2009; Middleton & Sternberg, 2013).

Las partículas en la atmósfera tienen implicaciones en la salud humana debido a su composición física, química y biológica. La inhalación del polvo puede causar enfermedades respiratorias como la silicosis -enfermedad del aparato respiratorio que se produce por haber aspirado polvo de sílice en gran cantidad-, y agravar otras como el asma, bronquitis y enfisema pulmonar (Wong, 2014). La inhalación es solo una ruta para entrar al sistema de un organismo, la contaminación del agua potable es otra, que además afecta seriamente las reservas de agua de las zonas áridas.

Comúnmente las altas concentraciones de polvo atmosférico en las regiones de clima seco (árido y semiárido) exceden los niveles permisibles para mantener la salud (Goudie & Middleton, 2006). México ha tratado de regular la concentración de partículas suspendidas en el aire mediante la aplicación nacional de normas que rigen la concentración de partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  y partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ .

### **3.3.1.3 Normatividad sobre la calidad del aire en México**

La normatividad sobre la calidad del aire en México recae sobre el gobierno federal, el cual es responsable de establecer los estándares de protección a la salud pública y vigilar su cumplimiento. Las normas oficiales mexicanas (NOM) son las que describen los límites permisibles para los contaminantes del aire (INECC, 2009).

Los contaminantes atmosféricos regulados (Tabla 3.3) son los siguientes: bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM<sub>10</sub>), Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y plomo (Pb):

Tabla 3. 3. NOM de diferentes contaminantes atmosféricos

<b>Contaminante</b>	<b>Norma</b>	<b>Nombre</b>
Ozono	NOM-020-SSA1-1993 (DOF, 2014a)	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O <sub>3</sub> ). Valores normados para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población, para quedar como Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire
Monóxido de carbono	NOM-021-SSA1-1993 (DOF, 1994a)	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población
Bióxido de azufre	NOM-022-SSA1-1993 (DOF, 2010)	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población
Bióxido de nitrógeno	NOM-023-SSA1-1993 (DOF, 1994b)	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población
PST	NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005)	Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales (PST)
PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014b)	Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
Pb	NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1994c)	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el ambiente como medida de protección a la salud de la población

De los contaminantes atmosféricos regulados, el material particulado (PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) ha sido ampliamente documentado (Paden, 2001 Griffin & Kellogg, 2004, Goudie, 2014) como el promotor del deterioro de la salud humana, generando enfermedades como las ya mencionadas (Capítulo 3.3.1.3) (HEI, 2000, Brook et al., 2010). En México, los niveles permisibles para el material particulado en el aire son los siguientes:

Tabla 3. 4. Niveles permisibles de material particulado en el aire en México

<b>Tipo Partícula</b>	<b>Nivel permisible por la NOM</b>
PST	210 µg/m <sup>3</sup> promedio de 24 horas.
PM10	75 µg/m <sup>3</sup> promedio de 24 horas. 40 µg/m <sup>3</sup> promedio anual.
PM2.5	45 µg/m <sup>3</sup> promedio de 24 horas. 12 µg/m <sup>3</sup> promedio anual

Fuente: DOF, 2005; DOF 2014.

### 3.4 Indicadores de sequía

Los indicadores sirven para ordenar y sistematizar información para la planificación, evaluación y toma de decisiones. Estos indicadores permiten constituir sistemas de información que dan cuenta de las características cuantitativas de un ámbito institucional, económico, geográfico, cultural, educativo, etcétera. Se construyen a partir de datos de censos de contextos regionales, nacionales o supranacionales. Los indicadores son por ello, datos cuantitativos producto de los procedimientos establecidos por el investigador, quien genera resultados que todos pueden observar de la misma manera (Magaña, 2013)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2003) propone los siguientes criterios característicos de un indicador:

- Proporcionar una imagen representativa de las condiciones ambientales, las presiones sobre el medio ambiente o las respuestas de la sociedad (Presión – Estado – Respuesta).
- Ser simple, fácil de interpretar y capaz de mostrar las tendencias en el tiempo.
- Ser sensible a los cambios en el medio ambiente y las actividades humanas relacionadas.
- Proporcionar una base para las comparaciones internacionales.
- Ser de alcance nacional o aplicable a las cuestiones ambientales regionales de importancia nacional.
- Tener un valor umbral o de referencia para compararlo.

México tiene características geográficas que lo colocan como uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático, principalmente por tener tierras áridas en un 65.2% de su territorio (SEMARNAT, 2013). A esto se suma la crisis por la disponibilidad de agua (sequía) que puede generar aumentos en la aridez y erosión eólica del suelo (IPCC, 2014a). Estos puede generar un aumento drástico de partículas en suspensión y por consiguiente efectos negativos sobre la calidad del aire (Goudie, 2014).

Se han documentado diversos indicadores para evaluar los efectos de la sequía en el ambiente los cuales se describen a continuación:

### **3.4.1 Erosión Eólica**

La erosión eólica se produce cuando la tensión de corte ejercida en la superficie del suelo por el viento excede la capacidad de los materiales de la superficie para resistir el desprendimiento y transporte (Skidmore, 1986).

Las etapas de este proceso son: el arrastre de las partículas, el transporte y la deposición (Figura 3.2). El mismo es afectado por diversos factores entre los que se incluyen las condiciones atmosféricas (e. g. viento, precipitación y temperatura), propiedades del suelo (e. g. textura, composición y agregación), características de la superficie (e. g. topografía, humedad, vegetación) y las prácticas del uso del suelo (e. g. agrícola, pastizal).

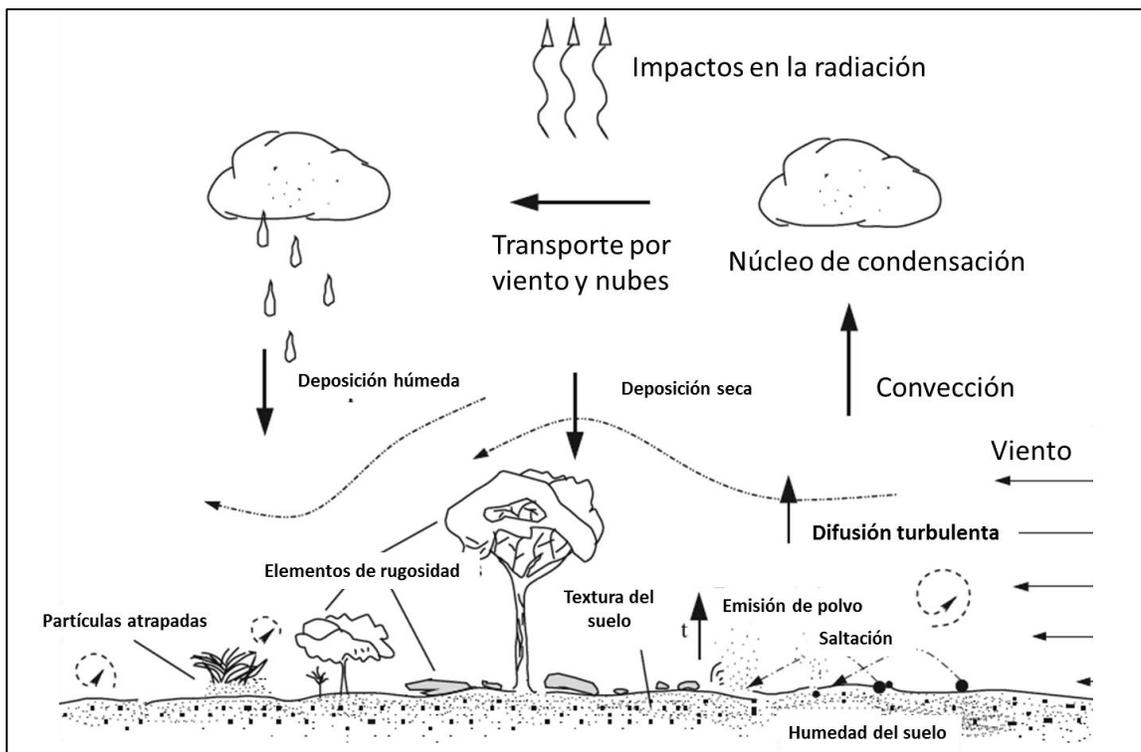


Figura 3. 13. Fases de la erosión eólica (Shao, 2008).

México realizó una actualización de la superficie nacional con degradación de suelo a través del trabajo realizado por la SEMARNAT (2013) en el que se evaluó la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica. Para obtener la erosión hídrica se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo “U S L E” (Wischmeier y Smith, 1978)

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \text{ (Ec. 3.3)}$$

Donde el promedio anual de pérdida de suelo (A), expresado en  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ , es función de los factores de erosividad de la lluvia (R), el factor de erosionabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente (L), el grado de la pendiente (S), el factor de cobertura vegetal (C), y las prácticas mecánicas de control de erosión (P).

Para determinar la erosión eólica utilizaron el modelo propuesto por Woodruff y Siddoway (1965):

$$E = C \cdot S \cdot T \cdot V \cdot L \text{ (Ec. 3.4)}$$

Donde, E es la erosión actual expresado como  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$  en función de los factores de agresividad climática (C), factor edáfico (S), factor topográfico (T), factor de vegetación natural (V) y factor uso del suelo (L).

Para los estudios de ordenamiento ecológico del territorio en México, la Secretaria de Desarrollo Social y el Instituto Nacional de Ecología (SEDESOL-INE, 1998) propusieron una metodología para evaluar la pérdida de suelo por acción del viento basada en la disponibilidad de humedad ambiental como consecuencia de precipitaciones mayores de 10 mm.

### **3.4.2 Índice de Aridez**

Penck (1910) fue el primero en definir una región árida como un lugar donde la evaporación anual excede a la precipitación. La aridez, a diferencia de cualquier otro parámetro climático que puede ser monitoreado directamente, es un resultado de la interacción entre varios factores climáticos, en el que la precipitación y la temperatura juegan un papel crítico conjuntamente (Walton 1969).

El índice de aridez (IA), es un parámetro adimensional que representa una medida de la disponibilidad de agua en un ecosistema o en una región (Beran & Rodier, 1985). En principio, cuanto menor sea el valor del IA, el clima se vuelve más seco y viceversa (Quan et al., 2013).

El IA de Lang (1915), fue denominado inicialmente como un índice de pluviosidad y se obtiene mediante lo siguiente:

$$IA = \frac{P}{T} \quad (Ec. 3.4)$$

Donde, P es la precipitación media anual expresada en mm, T es la temperatura media anual en °C.

El índice de aridez de Emberger (1930), considera la temperatura máxima y mínima promedio, así también como la precipitación total anual (Ecuación 3.5).

$$IA = \frac{P}{\left(\frac{M + m}{2}\right) \cdot (M - m)} \quad (Ec. 3.5)$$

Donde, P es la precipitación media anual, M es la temperatura media de las máximas del mes más cálido, m es la temperatura media de las mínimas del mes más frío

El IA de De Martonne (1926) se generó a fin de determinar el grado de aridez tomando en cuenta que para las latitudes altas la temperatura es un factor determinante y para latitudes bajas es la precipitación (De Martonne, 1927). Este índice de aridez ha sido utilizado ampliamente como indicador del déficit hídrico y de desertificación (Mercado-Mancera et al., 2010; Rahimi et al., 2013; Hrnjak et al., 2014).

### **3.4.3 Partículas Suspendidas en el Aire**

En ecosistemas semiáridos, la emisión de partículas a la atmósfera está relacionada en gran medida con las condiciones climáticas secas y ventosas (Wilhite & Glantz, 1985; Buschiazzo, 2009; Jacob & Winner, 2009). El proceso de erosión eólica ha sido documentado como el precursor en el aumento de la densidad de partículas, alterando negativamente la calidad del aire (Buschiazzo & Aimar, 2003).

Las tormentas de polvo o de arena son un ejemplo del proceso erosivo por el factor viento, donde se afecta directamente la productividad del suelo. El proceso desprende la capa más fértil y químicamente activa, que puede contener metales pesados, pesticidas y una amplia variedad de microorganismos –incluidos hongos, bacterias y virus- capaces de causar enfermedades en un rango de organismos, como árboles, cultivos, animales, así como a personas (Griffin & Kellogg, 2004; Middleton & Sternberg, 2013; Rashki et al., 2013).

En las regiones áridas y semiáridas de México, las tormentas de polvo son un fenómeno común (Jáuregui, 1989; López-Santos & Martínez-Santiago, 2015), en donde las agencias de noticias documentan los daños que éstas generan en las zonas urbanas en el servicio eléctrico, abastecimiento de agua, circulación vehicular, etc. (El Universal, 2013; Excélsior, 2014; El Siglo de Torreón, 2015).

El método para medir la concentración de partículas suspendidas en el aire se encuentra descrito en la NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993), y consiste en el muestreo de una determinada cantidad de aire, por medio de la succión de éste a través de un filtro, durante un periodo de 24 horas. El filtro se pesa en laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de su uso, para determinar la

ganancia neta de peso. La concentración se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen del aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Área de Estudio

El área de estudio tiene una extensión territorial de 10714.575 km<sup>2</sup>, comprende los municipios de Gómez Palacio, Lerdo y Mapimí (Latitud Norte: 25.17° a 26.84°; Longitud Oeste: 103.32° a 104.61°) localizados en el estado de Durango y son parte de la Comarca Lagunera (Figura 4.1). De acuerdo con la clasificación de Köppen (1936), adaptada a México por García (1973), la región presenta un gradiente climático de seco a muy seco (BS<sub>1kw</sub>, seco; BS<sub>0hw</sub>, seco; BS<sub>0kw</sub>, seco; BWhw, muy seco;).

La temperatura media anual (TMA) de la región es de 20.3°C. La TMA varía de 11.4 a 29.1, siendo junio el mes más cálido con una temperatura de 34.9°C y enero el mes más frío con 3.4°C. La precipitación media anual (PMA) es de 257.2 mm con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal menor del 10%. El mes con más lluvia es agosto con 53.6 mm y el mes más seco es febrero con 3.4mm (CONANP, 2006).

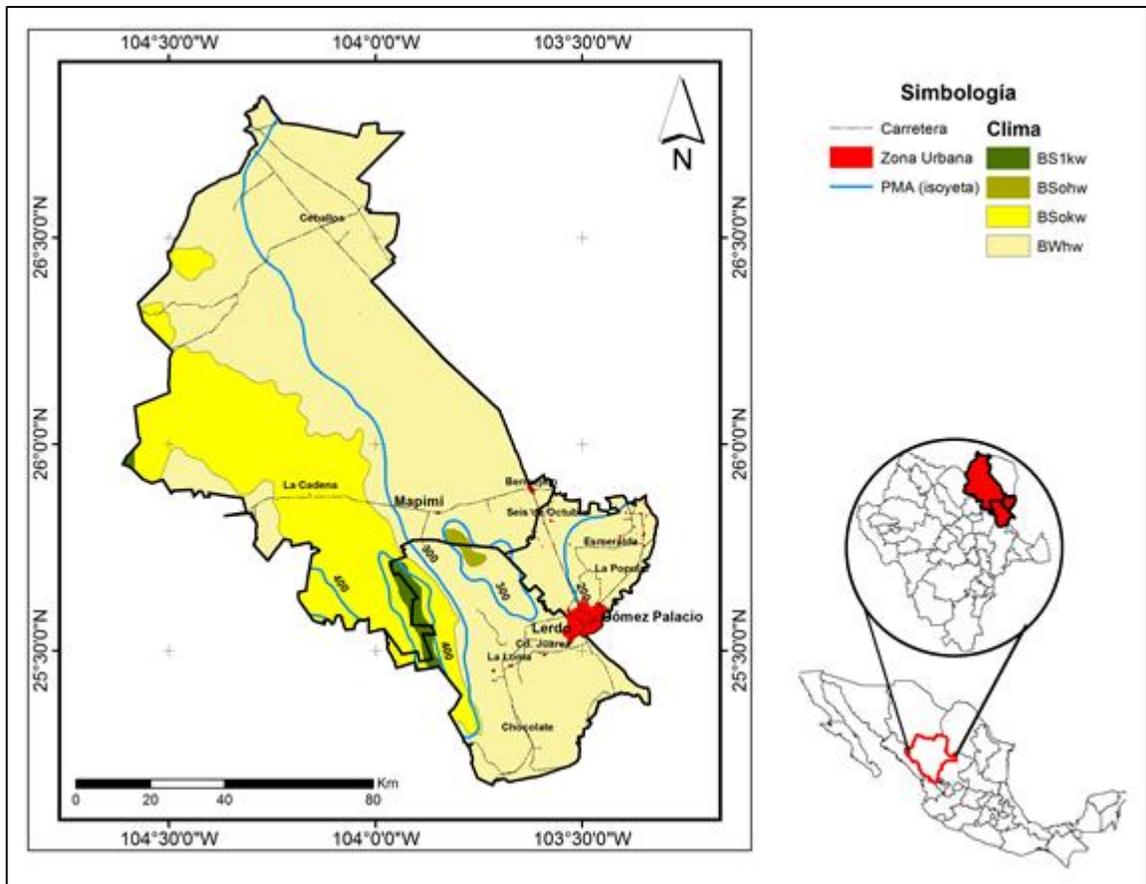


Figura 4. 1. Localización geográfica del área de estudio.

Debido a sus características de aridez, la unidad de estudio contiene ecosistemas representativos de la subprovincia geográfica denominada Bolsón de Mapimí que pertenece al Desierto Chihuahuense. Los principales tipos de vegetación son: Matorral desértico micrófilo (dominado principalmente por *Prosopis glandulosa*, *Larrea tridentata*), matorral desértico roseto filo (dominado principalmente por *Agave asperrima*, *Agave lechuguilla*, *Opuntia rastrera*) y pastizales (dominado principalmente por *Chloris virgata*, *Bouteloua barbata*), en donde habitan especies faunísticas importantes como la tortuga del desierto (*Gopherus flavomarginatus*), la zorra del desierto (*Vulpes macrotis*) y el águila real (*Aquila chrysaetos*) (INE, 2007).

## 4.2 Datos de entrada y su pre-procesamiento

Conforme a los objetivos 1 y 2 del presente estudio, los datos utilizados fueron integrados mediante el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.1® (ESRI, Redlands, CA, USA). Los datos utilizados provienen de fuentes diversas, y se agrupan en las siguientes categorías: 1) datos de propiedades edáficas y uso de suelo, 2) datos temperatura y precipitación, y 3) datos de viento y partículas suspendidas en el aire (PM<sub>10</sub> y PST).

### 4.2.1 Datos de propiedades edáficas y uso de suelo

Las propiedades edáficas y de uso de suelo del área de estudio se relacionaron con los índices CATEX y CAUSO. Ambos índices están relacionados con valores de erodabilidad o susceptibilidad a la erosión de la superficie terrestre, a través de valores de textura y fase física (pedregosa o gravosa), y los diferentes usos del suelo (Tabla 4.1).

Tabla 4. 1. Índices CATEX y CAUSO para calcular EEL.

CATEX	Textura y fase	CAUSO	Uso de suelo
3.5	1	0.70	Agricultura de temporal
1.25	2	0.20	Agricultura de riego
1.85	3	0.15	Monte o matorral
1.75	1 y FPG	0.30	Pastizal
0.62	2 y FPG	NA	ZU, CA
0.92	3 y FPG	--	--
NA	ZU, CA	--	--

Textura: 1) Gruesa, 2) Media, 3) Fina, FPG = Fase Pedregosa y/o Gravosa; NA = No Aplica; ZU = Zonas Urbanas; CA = Cuerpos de Agua.

Fuente: SEDESOL-INE, 1998.

Para el índice CATEX, se utilizó la información las clases texturales y las fases físicas proveniente de los datos vectoriales de edafología serie II (INEGI, 2007a).

Para el índice CAUSO, los conjuntos vectoriales de uso de suelo se obtuvieron para un periodo histórico y para un futuro cercano. Para el histórico, se generaron a partir de los conjuntos vectoriales de uso de suelo y vegetación Serie III y de la Serie V generadas por el INEGI, las cuales para el área de estudio fueron corroboradas mediante procesos de clasificación supervisada de usos de suelo utilizando imágenes de satélite (LandSat).

La serie III proviene de imágenes Landsat ETM de los años 2000 y 2002, y respaldada con trabajos de campo de 2002, 2003 y 2004 (INEGI, 2000). En tanto que la serie V se generó durante el periodo 2011 - 2012 (INEGI, 2014).

La determinación de los usos de suelo para las imágenes de satélite se realizó a partir de una clasificación supervisada realizada por el método de máxima verosimilitud (maximum likelihood), utilizando un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) mediante el software ENVI (Research Systems, Inc., Boulder, CO, USA) sobre la cobertura Path/Row 30/42 LandSat, adquiridas a través del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) disponible en <http://glovis.usgs.gov/>. Las imágenes utilizadas fueron las escenas del mes de marzo del 2000 y 2015, que cubren a los tres municipios del área de estudio. El criterio de la selección del mes se basó en que es la época de inicio de primavera.

Para el periodo futuro cercano se realizó una proyección de los usos de suelo para el año 2030, tomando como base las series las series III y V de uso de suelo y vegetación, el procedimiento de proyección se llevó a cabo mediante el software IDRISI® 17.0 Selva (Worcester, MA, USA) a través de los módulos Markov y CA\_Markov.

El módulo Markov de IDRISI analiza dos imágenes con información cuantitativa y cualitativa de usos de suelo de diferentes fechas y produce una matriz de transición (probabilidad), una matriz de áreas de transición (archivos digitales) y un conjunto de imágenes de probabilidad condicional (archivos raster). El Módulo CA\_Markov utiliza un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos conocido como “cellular autómeta”, el cual evalúa el entorno inmediato de una celda (pixel) e incrementa los valores de aptitud de una clase si alrededor existen otras celdas con el mismo tipo de uso del suelo, además este módulo determina la distribución espacial probable de las transiciones del análisis de cambios de Markov (Eastman, 2012).

El modelo Markov no sólo explica la cuantificación de la conversión de estados entre los tipos de uso de suelo, sino que también muestra la tasa de cambio entre los diferentes usos de suelo (Sang et al., 2011). Con base en la fórmula de probabilidad condicional de Bayes, la predicción de los cambios en el uso del suelo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S(t+1) = p_{ij} \times S(t) \text{ (Ec. 4.1)}$$

Donde  $S(t), S(t+1)$  son el estatus del sistema en el tiempo  $t$  o en el tiempo  $t+1$ ;  $P_{ij}$  es la matriz de probabilidad de transición en un estado, que se calcula de la siguiente manera:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \text{ (Ec4.2)}$$

$$(0 \leq P_{ij} < 1 \text{ y } \sum_j^n P_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, \dots, n)) \text{ (Ec.4.3)}$$

En el proceso de modelación de cambios de uso de suelo se genera la matriz de transición, la cual permite estimar las superficies para los diferentes usos de suelo, así como su posible distribución espacial en el año 2039 si las tendencias lineales del periodo 2000 – 2015 prosiguieran.

Los datos de uso de suelo del año 2015 determinaron los valores del índice CAUSO para el periodo histórico ( $CAUSO_H$ ) y la proyección de uso de suelo determinó los valores del índice CAUSO para un futuro cercano ( $CAUSO_{FC}$ ).

#### **4.2.2 Datos de temperatura y precipitación**

Los datos de temperatura y precipitación fueron obtenidos en formato GeoTIFF (capas raster) en coberturas nacionales para las variables precipitación y temperatura en promedios mensuales del portal de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, para dos periodos de tiempo, histórico (1950 - 2000) y para un futuro cercano (2015 - 2039).

Para temperatura y precipitación históricas se emplearon los propuestos por Hijmans et al. (2005), quienes consideran el efecto topográfico de acuerdo a los datos de elevación de la *Shuttle Radar Topography Mission* (NASA, 2015), re-trabajados por Fernández et al. (2015) a una resolución espacial de 926 m x 926 m.

Mediante una análisis de varianza y prueba de Tukey realizado en el software estadístico SAS 9.3® (Cary, NC, USA), los valores históricos de UNIATMOS (periodo

1950 - 2000) fueron comparados con datos obtenidos del extractor rápido de información climatológica (ERIC III<sup>®</sup>) versión 3.2 (IMTA, 2013) para el periodo 1981-2010, con fin de determinar si las diferencias existentes entre las dos fuentes de información presentan diferencias significativas. Para ésto se seleccionaron seis estaciones meteorológicas de referencia (Figura 4.2) y se obtuvieron los valores correspondientes de precipitación media anual (PMA) y Temperatura media anual (TMA) tanto de UNIATMOS como de ERIC III (Tabla 4.2).

Tabla 4. 2. Estaciones meteorológicas de referencia situadas en la unidad de estudio.

Id	Nombre	Longitud	Latitud	UNIATMOS		ERIC III	
				PMA	TMA	PMA	TMA
		<i>W</i>	<i>N</i>	<i>mm</i>	<i>°C</i>	<i>mm</i>	<i>°C</i>
10005	Ceballos, Mapimí, Dgo.	-104.134	26.529	291	19.4417	262	20.1
10140	La cadena, Mapimí, Dgo.	-104.163	25.879	307	20.0333	293.2	20.4
10045	Mapimí, Dgo.	-103.847	25.832	280	20.4417	305.5	19.4
10108	Ciudad Lerdo, Dgo	-103.522	25.546	248	21.075	257.8	21.2
10169	CBTA 101, Gómez Palacio, Dgo.	-103.574	25.814	225	21	194	19.5
10170	CBTA 047 Lerdo, Dgo.	-103.654	25.506	248	21.075	257	21.2

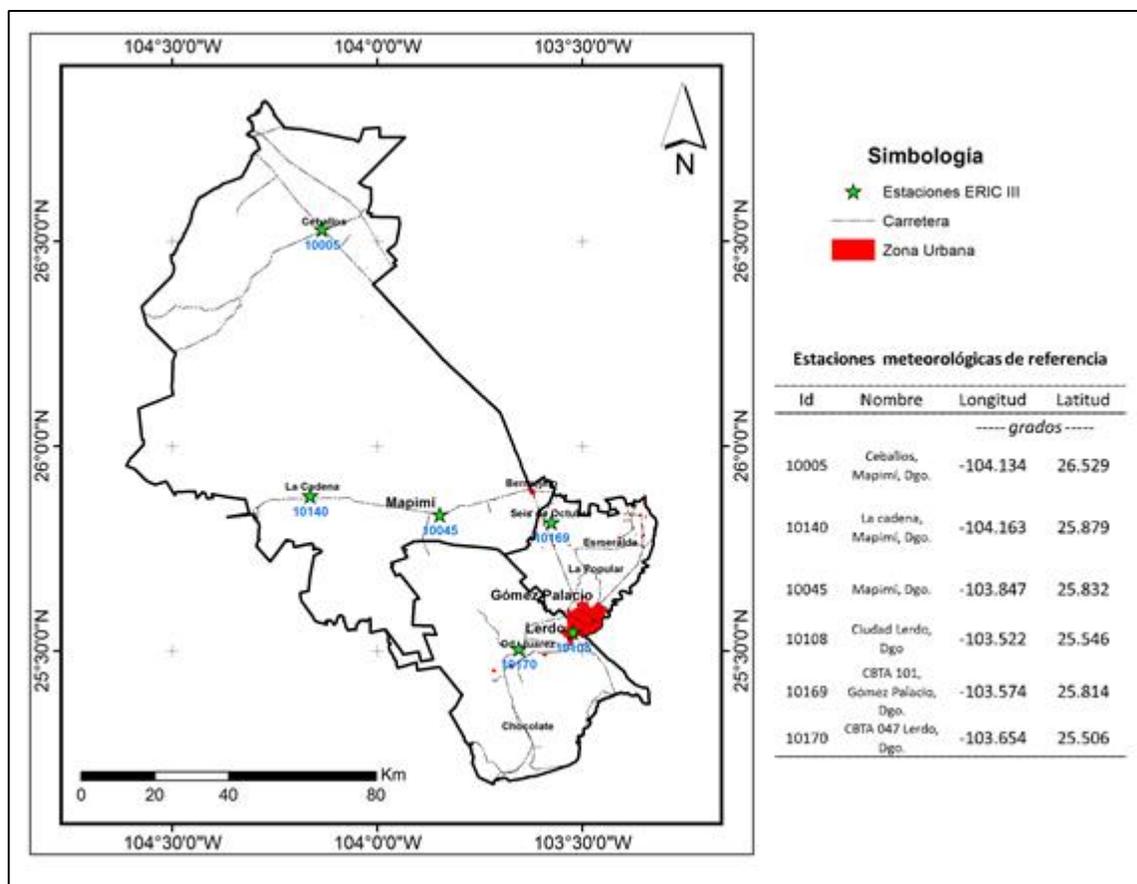


Figura 4. 2. Estaciones meteorológicas de referencia en la unidad de estudio.

Las estaciones meteorológicas de referencia fueron utilizadas para extraer información geográficamente explícita en el periodo histórico y en el periodo futuro cercano a fin de poder contrastar dicha información.

Para un futuro cercano (2015 - 2039) se utilizaron los datos del escenario de cambio climático RCP 8.5 (IPCC, 2014b), obtenidos del ensamble REA, desarrollado acorde a la metodología de Giorgi & Mearns (2001), y que para el territorio mexicano incorporó 15 MCG, en orden de dar mayor peso a los MCG que tuvieran mejor desempeño comparativo con las variables observadas en un punto de malla dado (Cavazos et al. 2013).

A través de geo-procesos digitales en ArcGIS 10.1 se realizó la extracción de la información para el área de estudio, a la cual se le denominó -reducción de escala geográfica- debido a la obtención de información regional a partir de las coberturas nacionales. Los promedios anuales de precipitación y temperatura se calcularon mediante el módulo álgebra de mapas, tanto para el periodo histórico (PMA<sub>H</sub> y TMA<sub>H</sub>) como para el periodo futuro cercano (PMA<sub>FC</sub> y TMA<sub>FC</sub>), en base a los promedios mensuales regionales generados en la reducción de escala geográfica.

#### **4.2.3 Datos de viento y partículas suspendidas en el aire**

Los de datos de dirección y velocidad del viento de la unidad de estudio fueron obtenidos de 5 estaciones (Figura 4.3) de la Red Nacional de Estaciones agroclimáticas del INIFAP para el periodo 2006 - 2015.

Los datos de cada estación se analizaron de forma anual mediante el software OringinPro 2015 (Northampton, MA, USA), donde se determinaron los porcentajes de frecuencias para 8 posibles direcciones de procedencia: Norte (0°), Noreste (45°), Este (90), Sureste (135°), Sur (180°), Suroeste (225°), Oeste (270°), Noroeste (315°), distribuidas en 5 clases de velocidad de viento en ms<sup>-1</sup>: 0-5 (Muy baja), 5-10 (Ligera), 10-15 (Moderada), 15-20 (Alta), >20 (Muy alta). Dichos porcentajes de frecuencias fueron graficados en una rosa de vientos, la cual indicaba la procedencia de los vientos.

También se realizó un análisis trimestral de vientos del área de estudio, para lo cual se utilizaron los datos de todas las estaciones, para los siguientes trimestres: 1) Enero, febrero, Marzo; 2) Abril, mayo, junio; 3) Julio, agosto, septiembre; 4) Octubre, noviembre, diciembre.

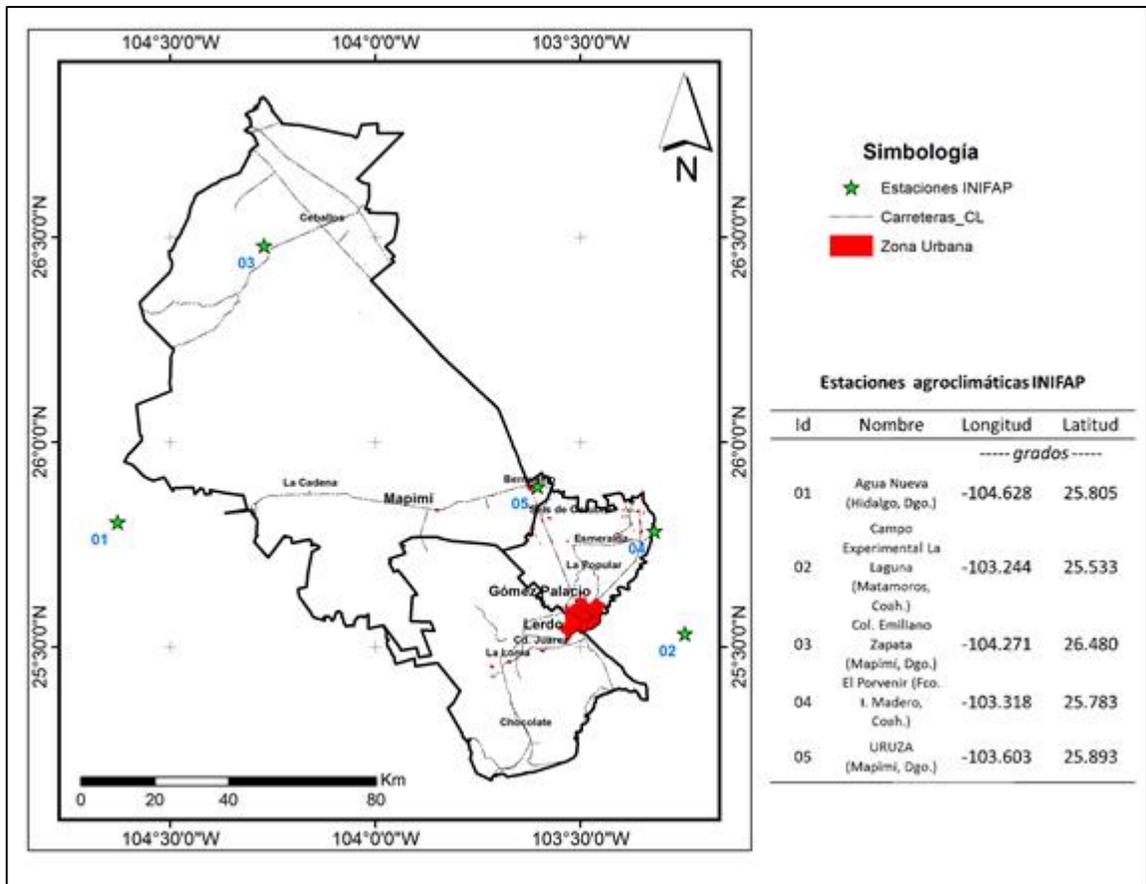


Figura 4. 3. Localización de las estaciones agroclimáticas del INIFAP en el área de estudio.

Para la concentración de partículas suspendidas en el aire se utilizó la información proveniente de dos estaciones de monitoreo ambiental (EMAS, Figura 4.4). La primera ubicada en el núcleo de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), en el municipio de Gómez Palacio que registró la concentración de partículas suspendidas en el aire menores a  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) en el periodo de abril de 2010 a marzo de 2014. La segunda se ubicó en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH) en las cercanías de la localidad de Bermejillo del municipio de Mapimí, Durango, en la cual se realizaron muestreos de partículas suspendidas totales (PST) en el periodo de febrero a julio de 2015.

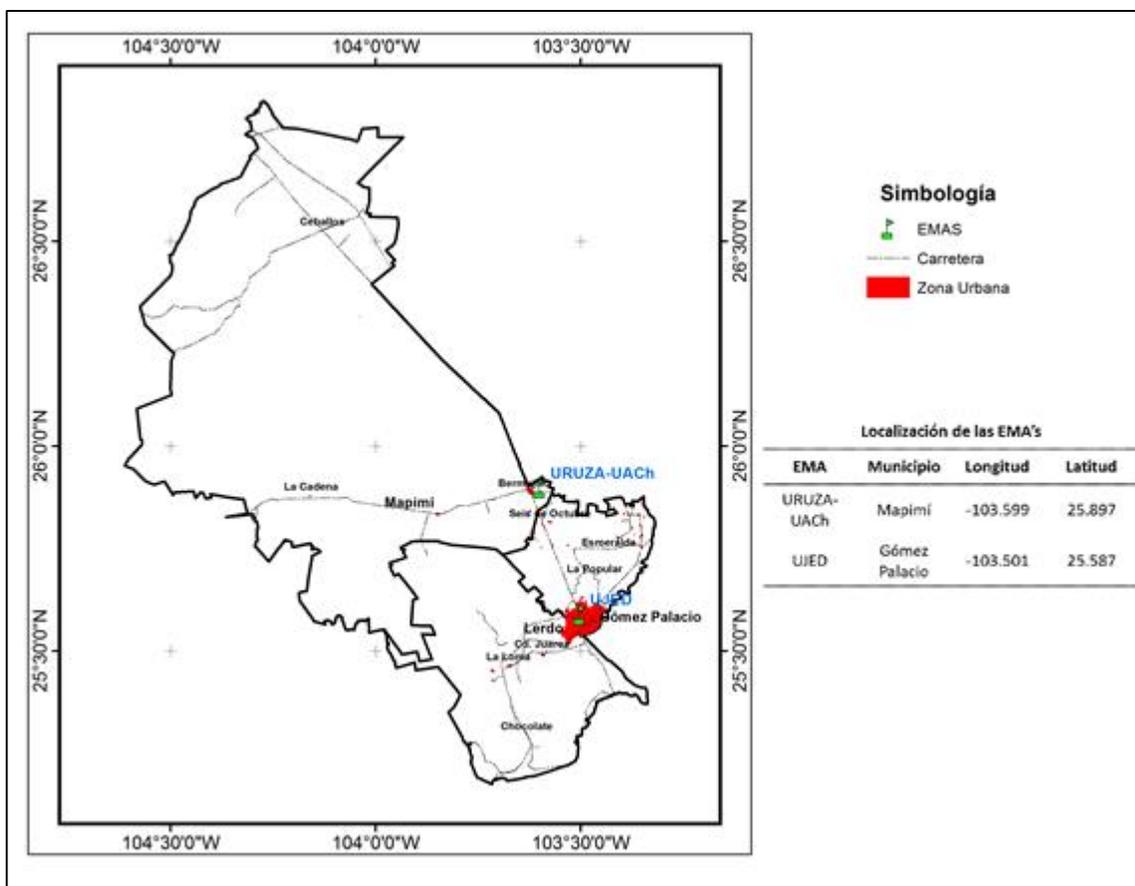


Figura 4. 4. Localización de las EMA's en la unidad de estudio.

La estación de Gómez Palacio se encuentra en un entorno urbano y es parte del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire del Estado de Durango (SIMCA, <http://calidadaire.durango.gob.mx/>). Cuenta con equipo de marca ThermoScientific (Modelo FH62C14) que registra automáticamente con extensión temporal de una hora la concentración de  $PM_{10}$  ( $\mu g m^{-3}$ ), además se mide también la dirección (en grados decimales, gd) y velocidad del viento ( $ms^{-1}$ ), presión barométrica en milibares (mbar), temperatura ( $^{\circ}C$ ), humedad relativa (%), radiación solar ( $W m^{-2}$ ), ozono ( $O_3$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y monóxido de carbono (CO).

La estación ubicada en URUZA-UACH. Cuenta con equipo para muestrear de forma diaria la concentración de PST de la marca Airmetrics (Modelo: Minivol TAS –Tactical

Air Sampler-) a través del filtrado de aire (flujo constante) mediante filtros de cuarzo (Whatman grado QMA 47mm). La extensión temporal de la toma muestras se realizó en dos periodos: **1)** desde el 22/02/2015 hasta el 23/05/2015 y **2)** desde el 16/06/2015 hasta el 05/07/2015. Además se tiene una estación meteorológica (La Crosse Mod: C86234) que registra variables climáticas como presión atmosférica en hectopascales (hPa), temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad ( $\text{ms}^{-1}$ ) y dirección (gd) del viento y precipitación (mm).

### 4.3 Descripción del enfoque metodológico

Los métodos para el análisis de riesgo socio-ambiental, tomaron en cuenta el impacto del cambio climático, por lo anterior se tuvieron dos periodos de trabajo, histórico y futuro cercano. Las partículas suspendidas en el aire fueron analizadas solo de manera histórica para tener una referencia de los efectos negativos en la calidad del aire producidos por el déficit de humedad.

#### 4.3.1 Valores críticos para variables climáticas

La determinación de valores críticos (máximos y mínimos) del área de estudio se realizó para las variables de temperatura y precipitación media anual, para el periodo histórico y futuro cercano, como se representa en la Tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Análisis de valores críticos

Rango	Variable		Impacto
	Histórica	Futuro cercano	
Máximo			IR (%)
Mínimo			
Promedio			

Donde Rango se refiere al límite de la variable entre su valor mínimo y máximo. El promedio se obtiene entre los valores máximos y mínimos de cada variable.

El impacto se refiere al cambio total entre los valores del futuro cercano y el valor histórico, la importancia relativa (IR) indica el porcentaje de cambio en base al valor histórico y se calcula mediante la técnica utilizada por López-Santos et al. (2013):

$$IR = \frac{\text{Cambio} * 100}{\text{Hist}} \quad (\text{Ec.4.4})$$

#### **4.3.2 Erosión Eólica Laminar**

La erosión eólica laminar (EEL) se obtuvo mediante la metodología propuesta por la SEDESOL - INE (1998), la cual fue desarrollada para México, y al mismo tiempo ha sido propuesta como una herramienta para la evaluación del impacto ambiental por Vidal de los Santos y Franco-López (2009). Misma que ha sido empleada para estudios locales por López-Santos et al. (2013) y López-Santos y Martínez-Santiago (2015).

La EEL representa la pérdida de suelo en  $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , por acción del viento, de acuerdo a cuatro tasas de pérdida de suelo: 1) ligera (E1), <12; 2) Moderada (E2), 12 - 50; 3) alta (E3), 50 - 100; 4) muy alta (E4), >100. Y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$EEL = IAVIE * CATEX * CAUSO \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde, CATEX es un índice relacionado con las propiedades del suelo, CAUSO es un índice relacionado con los diferentes usos de suelo y de vegetación. IAVIE es el índice de agresividad del viento, y es obtenido por la ecuación 4.6.

$$IAVIE = 160.8252 - 0.7660 * (PECRE) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde, PECRE es el periodo de crecimiento que se define como el número de días al año con disponibilidad de agua y temperatura favorable para el desarrollo de un cultivo

(Ortiz-Solorio, 1987) y éste es dependiente de la precipitación media anual (PMA) y se obtiene mediante la ecuación 4.7.

$$PECRE = 0.2408 * (PMA) - 0.0000372 * (PMA)^2 - 33.1019 \text{ (Ec. 4.7)}$$

### 4.3.3 Índice de aridez

Para determinar el grado de aridez se utilizó el índice de De Martonne (1926), el cual utiliza sólo los valores climáticos promedio de temperatura y precipitación y que además es un indicador de la sequía y desertificación (Mercado-Mancera et al., 2010). Se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{PMA}{TMA + 10} \text{ (Ec. 4.8)}$$

Donde, IA es el índice de aridez, PMA es la precipitación media anual en mm, TMA es la temperatura media anual en °C y 10 es una constante para evitar valores negativos del índice.

El IA de De Martonne comúnmente se representa mediante 6 clases de aridez: 1) Desiertos (Hiperárido), 0 - 5; 2) Semidesierto (Árido), 5 - 10; 3) Semiárido de tipo Mediterráneo, 10 - 20; 4) Subhúmedo, 20 - 30; 5) Húmedo, 30 -60; 6) Per Húmedo, >60. Pero existen clasificaciones alternas (Rahimi et al., 2013; Khalili, 1992) para ajustar los valores del IA a la región de estudio, manteniendo el principio que a menor valor del IA mayor aridez y viceversa. Por ello para el presente estudio se utilizó la siguiente clasificación:

Tabla 4. 4. Clasificación del IA de De Martonne.

Valor del IA	Clase
6.352 - 7.025	A1
7.025 - 7.7	A2
7.8 - 8.8	A3
8.8 - 10.7	A4
> 10.7	A5

#### 4.3.4 Análisis geostadístico y evaluación del impacto del cambio climático

Mediante procesos digitales, en ArcGis 10.1, de conversión de vector (shp) a raster (rst), se obtuvieron los índices CATEX, CAUSO<sub>H</sub> y CAUSO<sub>FC</sub>, los cuales se interpolaron a una amplitud de celda similar a las capas raster de los datos meteorológicos (926 m x 926 m) descargados de UNIATMOS. El IA y EEL se modelaron para el periodo histórico (IA<sub>H</sub> y EEL<sub>H</sub>) y para el periodo futuro cercano (IA<sub>FC</sub> y EEL<sub>FC</sub>) a través de la herramienta *calculadora ráster*. Posteriormente IA y EEL, fueron sometidos a un proceso de reclasificación para determinar clases comparables y generar un análisis en términos de superficie entre ambos periodos de tiempo, además de su determinación geográficamente explícita.

#### 4.3.5 Determinación de áreas críticas

Las áreas críticas se obtuvieron mediante la integración de los indicadores erosión (clases: E1, E2, E3, E4) y aridez (Clases: A1, A2, A3, A4), que en este caso representan los peligros derivados de variables bioclimáticas. Se definieron dos tipos de áreas críticas: 1) zonas prioritarias y 2) zonas potenciales. Las cuales fueron generadas para el periodo histórico y para el periodo futuro cercano, mediante las siguientes expresiones:

$$\text{ZonasPotenciales} = (E1 + E2) + (A4) \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$\text{ZonasPrioritarias} = (E3 + E4) + (A1 + A2 + A3) \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Las zonas potenciales son aquellas donde se tendrá una susceptibilidad moderada y que son potenciales a degradarse ya que en ellas concurren las zonas de EEL ligera y moderada en un ambiente semiárido (aridez 8.8 - 10.7). Las Zonas prioritarias son aquellas altamente susceptibles a degradarse y en donde los planes de manejo de riesgo son una prioridad, ya que en ellas coinciden las clases altas de EEL y de aridez.

Dado que los indicadores se encontraban geográficamente explícitos, la integración se realizó mediante procesos digitales en el software ArcGis 10.1, los cuales consistieron en trasponer las diferentes clases de cada indicador, como se indicó en ecuaciones 4.9 y 4.10, y obtener el área coincidente entre ellas.

La determinación de la población expuesta en las áreas críticas se realizó mediante los datos de población de localidades rurales y urbanas del área de estudio, históricamente se utilizaron los datos del censo de población y vivienda de 2010 (INEGI, 2015) de las 226 localidades (Gómez Palacio: 126; Lerdo: 57; Mapimí: 47) y para el periodo futuro cercano se realizó una proyección de la población para el año 2030 utilizando los datos de los censos de INEGI de 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010.

#### **4.3.6 Densidad de partículas**

##### **4.3.6.1 Análisis de datos de PM<sub>10</sub>.**

El análisis de los datos de concentraciones de PM<sub>10</sub> se realizó en base a la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014b), la cual especifica que para efecto de la protección a la salud de la población más susceptible se establecen los siguientes valores de concentración máxima de PM<sub>10</sub>:

- 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  promedio de 24 horas

- $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  promedio anual

Es importante mencionar que los valores límites permisibles por la NOM-025-SSA1-2014 son actualizaciones, ya que anterior a esto el valor límite permisible era de  $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  promedio de 24 horas y de  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  promedio anual.

La concentración promedio se debe reportar de manera trimestral y anual en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Los trimestres definidos son: 1) Enero, Febrero, Marzo; 2) Abril, Mayo, Junio; 3) Julio, Agosto, Septiembre; 4) Octubre, Noviembre, Diciembre. El promedio trimestral se calcula aplicando la siguiente formula:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} x_{i,t} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde,  $\bar{x}_t$  es el promedio para el trimestre  $t$ ;  $n_i$  es el número de datos para el trimestre  $t$ ;  $x_{i,t}$  es el valor de la concentración correspondiente al día  $i$  dentro de trimestre  $t$ .

El promedio anual se calcula mediante la siguiente formula:

$$\bar{X}_a = \frac{1}{n_a} \sum_{a=1}^{n_a} x_a \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde,  $\bar{X}_a$  es el promedio anual;  $n_a$  es el número trimestre validos al año;  $x_a$  es el valor de la concentración correspondiente al trimestre  $a$ .

#### 4.3.6.2 Análisis de datos de PST

La norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005) establece los siguientes valores de concentración máxima para PST:

- $210 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  promedio de 24 horas

La determinación de la concentración de las PST en el aire se realizó en base al método descrito en la norma oficial mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 2003), que indica de manera general que los muestreos deben de tener una duración de 24 horas tomando como referencia la media noche, se debe registrar el peso del filtro antes ( $P_i$ ) y después del muestreo ( $P_f$ ) en gramos, así como la tasa de flujo del aire ( $Q$ ) muestreado en  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Antes de obtener la concentración de PST (Ec. 4.8) se calcula el volumen de aire muestreado (Ec. 4.7) como se muestran a continuación:

$$V = \frac{(Q * 60_{\text{min}}) * 24_{\text{hrs}}}{1000} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde  $V$  es el volumen muestreado en  $\text{m}^3$ ,  $Q$  es la tasa de flujo en  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

$$PST = \frac{(P_f - P_i) * 10^6}{V} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Donde  $PST$  es la concentración de partículas suspendidas totales en el volumen muestreado en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $P_f$  es el peso del filtro al final del muestreo,  $P_i$  es el peso del filtro antes del muestreo y  $V$  es el volumen de aire muestreado en  $\text{m}^3$ .

## 5 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos desde el pre-procesamiento de los datos, así como los análisis de cambios en los valores tanto de las variables climáticas como en los indicadores de sequía definidos.

### 5.1 Pre-procesamiento

#### 5.1.1 Edafología y uso de suelo

##### 5.1.1.1 Índice CATEX

El índice CATEX califica la susceptibilidad a la erosión edáfica con base en la identificación de los grupos texturales y fase física, para ello se obtuvieron a partir del conjunto vectorial edafológico serie II (INEGI, 2007a), como se muestran en la Tabla 5.1, cuya distribución espacial se indica en la Figura 5.1.

Tabla 5. 1. Valores CATEX para el área de estudio

CATEX	Textura y Fase	Superficie --- km <sup>2</sup> ---	IR --- % ---
3.5	1	115.690	1.08
1.85	3	1,973.465	18.42
1.75	1 y FPG	49.830	0.47
1.25	2	4,288.320	40.02
0.92	3 Y FPG	4.180	0.04
0.62	2 Y FPG	4,218.600	39.37
NA	ZU, CA	64.490	0.60
Total	----	10,714.575	100.00

Textura y fase: 1 = Gruesa; 2 = Media; 3 = Fina; FPG = Fase pedregosa y/o gravosa. ZU = Zonas Urbanas. CA = Cuerpos de Agua. IR (Importancia Relativa) = (Superficie \* 100) / Área Total. Área Total = 10 714.575 Km<sup>2</sup>.

El área de estudio es cubierta mayormente por 3 clases de CATEX (97.81 % de su extensión), las cuales indican una susceptibilidad moderada (CATEX: 1.85, 1.25, 0.62) a

erosionarse por su clase textural, y que equivalen a una superficie de 10,480.385 Km<sup>2</sup> de un total de 10,714.575 Km<sup>2</sup>.

Las zonas más críticas del área de estudio se encuentran, una en la parte Sureste y Norte del municipio de Lerdo con un valor CATEX igual a 3.5, el cual se extiende en una superficie equivalente al 1.08 % del territorio y corresponden a una clase textural gruesa. La segunda zona se encuentra dispersa principalmente por el Norte del área de estudio en el municipio de Mapimí y partes del municipio de Gómez Palacio con valor CATEX igual a 1.85, misma que se extiende en el 18.42 % del territorio y corresponde a clase textural gruesa.

El 40% del territorio está cubierto por un índice CATEX igual a 1.25, que se extiende por la parte Este del territorio desde el Norte al Sur y corresponde a la clase textural media.

La clase textural media conjuntamente con la FPG ocupa el 39.7 % del territorio con un valor de CATEX de 0.62 y se ubican en la parte Oeste del territorio.

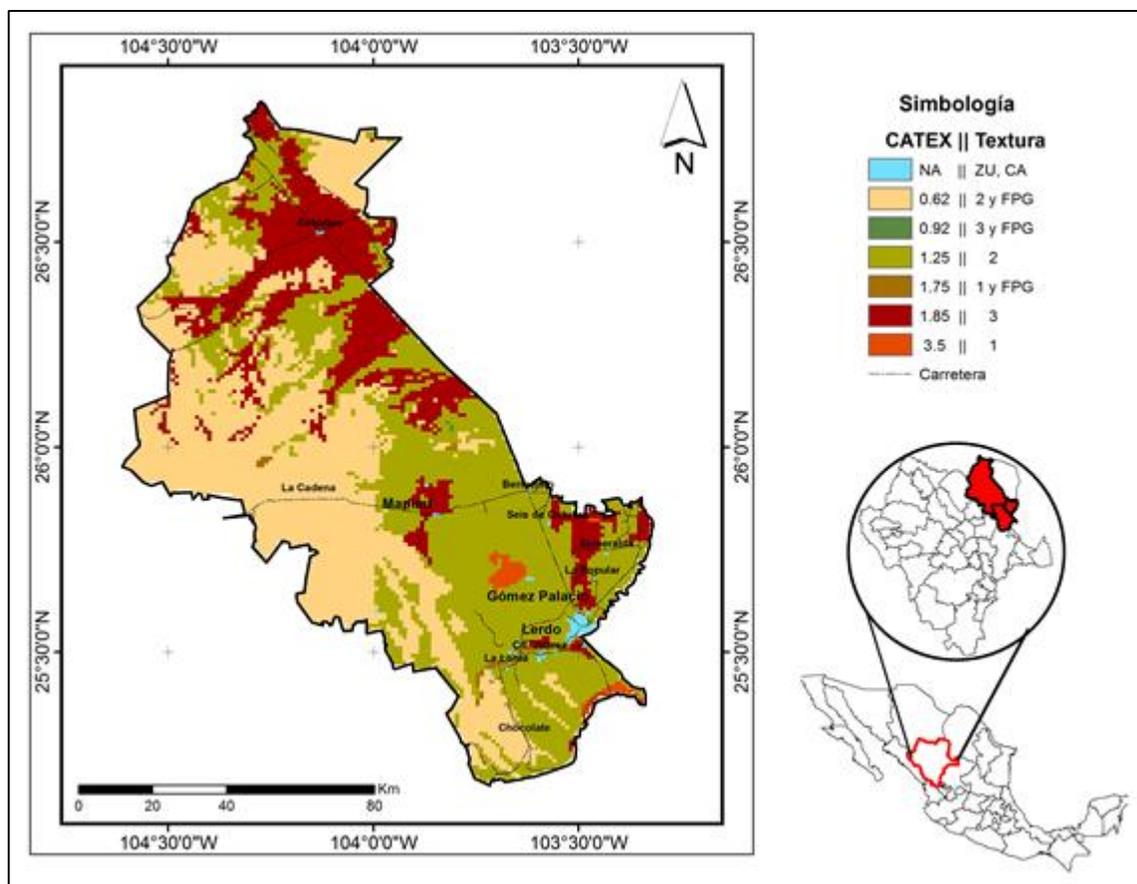


Figura 5. 1. Distribución del índice CATEX en el área de estudio

### 5.1.1.2 Índice CAUSO

Las clases de suelo fueron sometidas a un análisis visual, obteniendo una concordancia entre las clases de uso de suelo determinadas mediante la clasificación de las imágenes de satélite y de las clases de las series de uso de suelo y vegetación generadas por el INEGI.

El índice CAUSO (Tabla 5.2) que califica la susceptibilidad a la erosión en base a los usos del suelo del área de estudio, se obtuvo para el periodo histórico (CAUSO<sub>H</sub>) y para el periodo futuro cercano (CAUSO<sub>FC</sub>), para lo cual a partir de la matriz de transición

(Tabla 5.3) se calculan cuáles serán las superficies de cada clase, así como su posible distribución en un futuro cercano (Figura 5.2).

Tabla 5. 2. Valores CAUSO para el periodo histórico y el futuro cercano del área de estudio.

	CAUSO	Uso de suelo	Superficie -- km <sup>2</sup> --	IR -- % --	CS -- km <sup>2</sup> --	CRC -- % --
Histórico	0	ZU, CA	104.096	1		
	0.15	Matorral	7,868.488	73.4		
	0.2	Agrícola Riego	1,313.472	12.3		
	0.3	Pastizal	1,252.001	11.7		
	0.7	Agrícola Temporal	176.518	1.6		
Futuro Cercano	0	ZU, CA	144.729	1.4	+ 40.633	+ 0.4
	0.15	Matorral	7,823.470	73	- 45.018	- 0.4
	0.2	Agrícola Riego	1,387.082	12.9	+ 73.610	+ 0.7
	0.3	Pastizal	1,223.828	11.4	- 28.173	- 0.3
	0.7	Agrícola Temporal	135.466	1.3	- 41.052	- 0.4

ZU = Zonas Urbanas. CA = Cuerpos de Agua. IR (Importancia Relativa) = (Superficie\*100)/Área Total. CS (Cambio en la superficie) Superficie Futuro Cercano - Superficie Histórico. CRC (Cambio Relativo en la clase) = (CS\*100)/Superficie histórica. El Signo positivo (+) indica incremento y el signo negativo indica decremento (-). Área total = 10714.575.

El cambio probable esperado entre CAUSO<sub>H</sub> y CAUSO<sub>FC</sub> es en alrededor del 1% (114.243 Km<sup>2</sup>) del área de estudio, si las tendencias 2000 - 2015 prosiguieran. La clase Agrícola Riego, con valor CAUSO 0.2, obtendrá una ganancia de superficie probable del 0.7% (73.610 Km<sup>2</sup>), que será aportada según la Tabla 5.3 por la clase Agrícola Temporal con una probabilidad del 11 %, y dichos cambios se distribuirán mayormente en el municipio de Mapimí, particularmente en el ejido de Ceballos.

Las Zonas Urbanas (ZU) y Cuerpos de Agua (CA) tendrán un incremento probable en su superficie del orden del 0.4 % (40.633 km<sup>2</sup>) con respecto al área de estudio, la cual será cedida con una probabilidad del 2 % por la clase Agrícola de Riego, dichos cambios serán evidentes en la zona urbana de Gómez Palacio y Lerdo.

El matorral (CAUSO = 0.15), que se distribuye históricamente en el 73.4 % (7868.488 km<sup>2</sup>), tendrá una disminución en su extensión territorial del 0.4 % (45.018 km<sup>2</sup>), la cual pasará a formar parte, con una probabilidad del 1.8 %, de la clase Agrícola Riego.

La clase Pastizal (CAUSO = 0.3) disminuirá su extensión territorial en un 0.3 % (28.173 km<sup>2</sup>), cediendo su territorio a la clase de Matorral, con un probabilidad de 4.87 %, y a la clase Agrícola Riego, con una probabilidad de 4.11 %.

La clase Agrícola Temporal (CAUSO = 0.7), posiblemente perderá una extensión del 0.4 % (41.052 km<sup>2</sup>) con respecto al área de estudio, y que con una probabilidad del 17 % se convertirá a la clase Pastizal, y a la clase Agrícola Riego con una probabilidad de 11.4%.

Tabla 5. 3. Matriz de probabilidades de transición

USO		Periodo Actual 2015				
		ZU, CA	Matorral	Agrícola Riego	Pastizal	Agrícola Temporal
Proyección 2039	ZU, CA	0.9552	0.0001	0.0445	0.0002	0
	Matorral	0.0017	0.9739	0.018	0.003	0.0034
	Agrícola Riego	0.0285	0.0234	0.9051	0.042	0.001
	Pastizal	0.0033	0.0487	0.0411	0.9069	0
	Agrícola Temporal	0.0003	0.0705	0.114	0.1705	0.6447

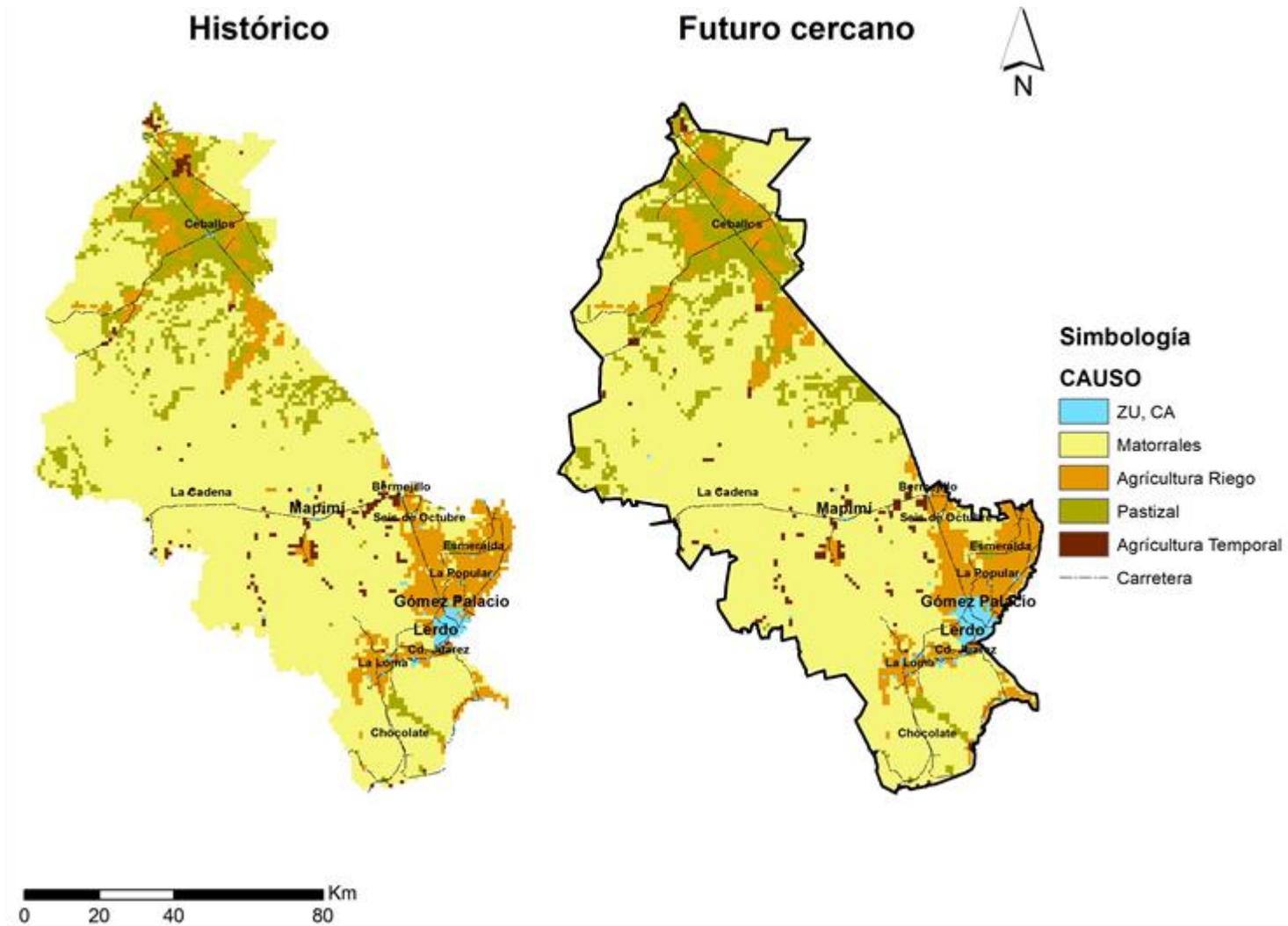


Figura 5. 2. Distribución del índice CAUSO en el periodo histórico y en el Futuro Cercano en el área de estudio.

### 5.1.2 Datos meteorológicos

Los resultados del análisis de varianza y prueba de Tukey (Tabla 5.4) muestran que para las variables históricas de temperatura media anual (TMA) y precipitación media anual (PMA), las diferencias no son significativas al tomar diferentes fuentes de información.

Tabla 5. 4. Promedios de TMA y PMA  $\pm$  Error Estándar (EE) por fuente de información.

<b>Fuente</b>	<b>TMA <math>\pm</math> EE*</b>	<b>PMA <math>\pm</math> EE*</b>
	-- °C --	-- mm --
ERIC III	20.30 $\pm$ 0.32 <sup>a</sup>	261.58 $\pm$ 15.84 <sup>b</sup>
UNIATMOS	20.51 $\pm$ 0.27 <sup>a</sup>	266.50 $\pm$ 12.69 <sup>b</sup>

\*(Tukey,  $P < 0.5$ ). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Los registros de la TMA no mostraron significancia ( $P = 0.6286$ ), y como se aprecia en los resultados la fuente de información ERIC III mostró una media 20.30 °C  $\pm$  0.32 °C y la fuente UNIATMOS una media de 20.51 °C  $\pm$  0.27 °C, lo que indica que el intervalo de confianza de ERIC III y de UNIATMOS tienen coincidencia en sus rangos, como se muestra en la Figura 5.3.

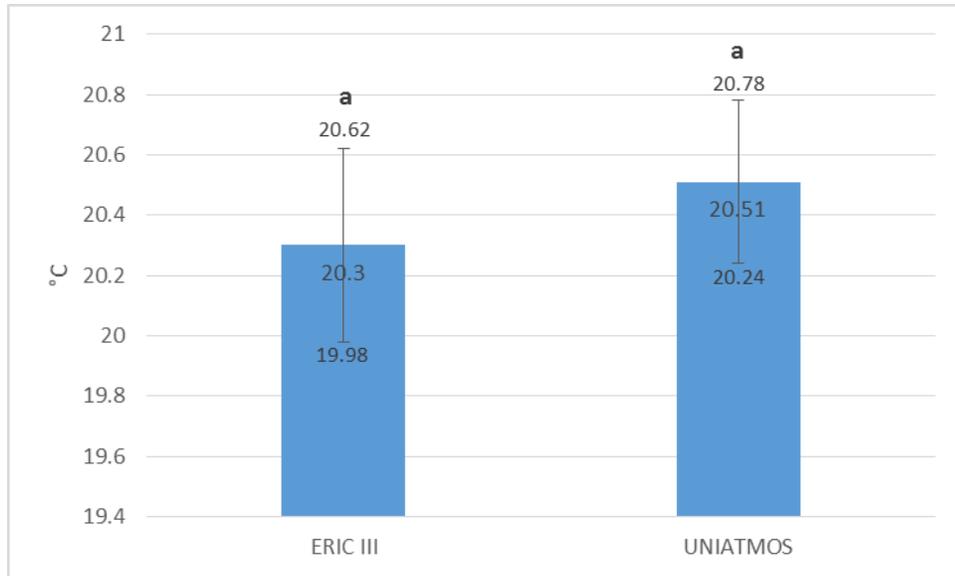


Figura 5. 3. Temperatura media anual y error estándar.

Los datos de PMA no mostraron significancia ( $P = 0.8135$ ), la fuente de información ERIC III mostró una media de  $261.58 \pm 15.84$  y UNIATMOS una media de  $266.50 \pm 12.69$ , teniendo de igual forma coincidencia en sus rangos (Figura 5.4).

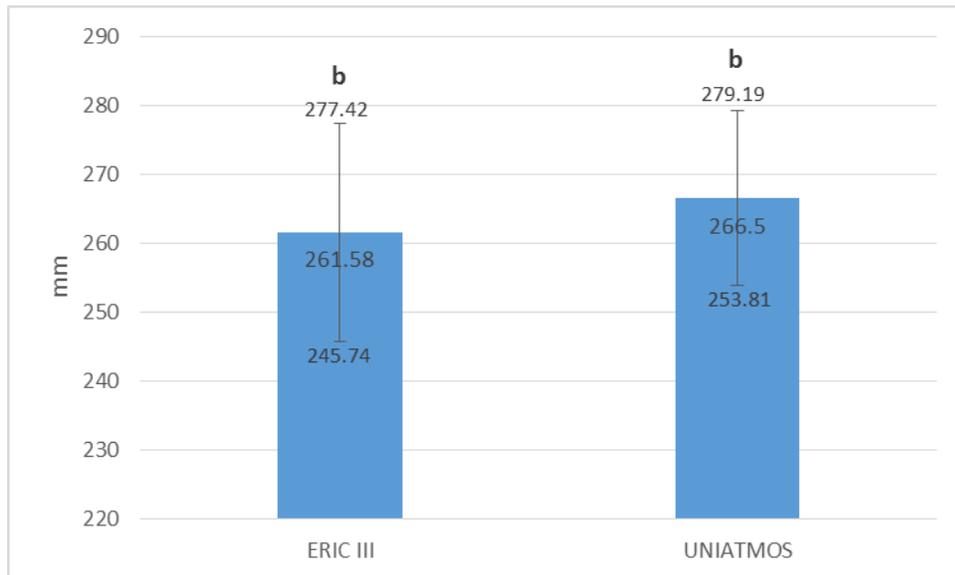


Figura 5. 4. Precipitación media anual y error estándar.

En ambos casos se tiene un nivel de significancia que se encuentra dentro de la zona de rechazo ( $P > 0.0005$ ) por tanto, se puede decir que la diferencia no es estadísticamente significativa y por consiguiente los valores de PMA y TMA de UNIATMOS pueden ser utilizados representativamente para el periodo de tiempo comprendido por los datos del ERIC III (1980 - 2010), dado que UNIATMOS presenta sus datos para el periodo 1950 - 2000.

### 5.1.3 Análisis de vientos

Los resultados del análisis de dirección y velocidad de viento anual muestran que la procedencia común de los vientos de la unidad de estudio tiene un gradiente que se extiende de Noreste a Suroeste ( $180^\circ$ ), donde los vientos del Este, y sus variantes, Noreste y Sureste son los dominantes. Para el caso de la velocidad de viento, la mayor frecuencia en el área de estudio fueron las de  $0$  a  $5 \text{ ms}^{-1}$ , y  $5$  a  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

Los resultados del análisis de viento para cada estación de la unidad de estudio se muestran en las Tablas.

Tabla 5. 5. Estación Agua Nueva. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Estación	Dirección	Velocidad ( $\text{ms}^{-1}$ )					Acumulado
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	$\geq 20$	
Agua Nueva Hidalgo, Dgo.	Norte	0.137	2.785	3.059	0.731	0.137	6.849
	Noreste	0.137	7.945	7.808	1.370	0.502	17.763
	Este	0.000	7.169	10.320	2.694	0.183	20.365
	Sureste	0.091	6.073	7.671	1.187	0.000	15.023
	Sur	0.046	5.068	5.982	2.283	1.050	14.429
	Suroeste	0.000	3.059	6.301	4.521	6.484	20.365
	Oeste	0.046	1.005	1.507	0.457	0.183	3.196
	Noroeste	0.046	0.868	0.822	0.274	0.000	2.009
<b>Acumulado</b>	<b>0.502</b>	<b>33.973</b>	<b>43.470</b>	<b>13.516</b>	<b>8.539</b>	<b>100</b>	

Los vientos dominantes de la estación Agua Nueva, Hidalgo, Dgo., ubicada al Oeste del municipio de Mapimí, provienen del Suroeste y del Este ambos con una frecuencia de 20.365 %, pero es importante notar cómo los vientos del Este en sus variantes Noreste (17.763 %) y Sureste (15.023 %) son de gran importancia, la velocidad común de estos vientos serán del orden de 10 a 15  $\text{ms}^{-1}$ , como se puede observar en la Figura 5.5.

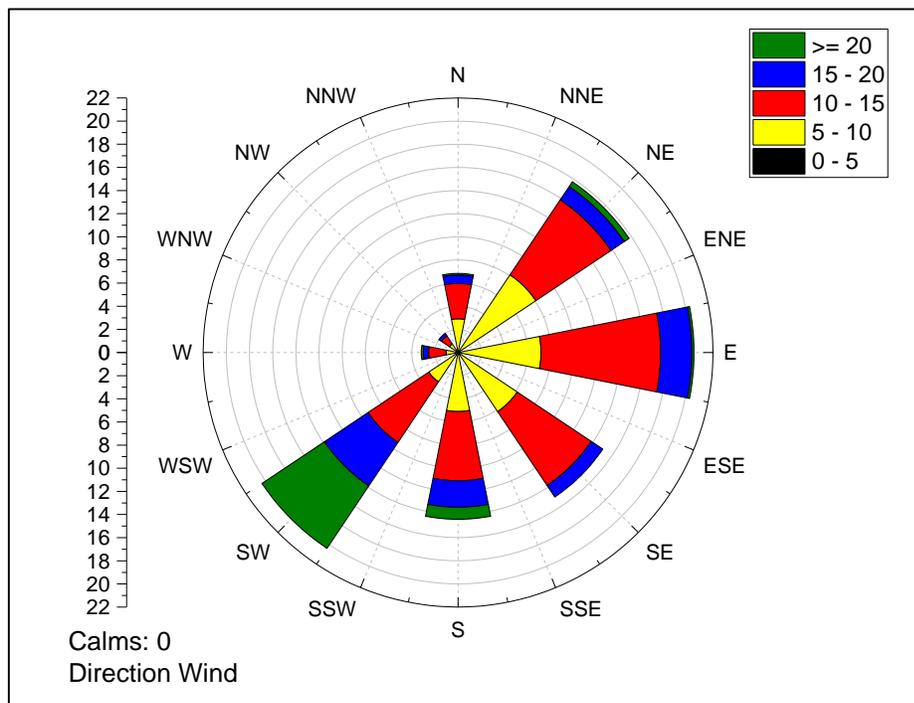


Figura 5. 5. Rosa de los vientos de la estación Agua Nueva Hidalgo, Dgo.

La estación **Campo Experimental La Laguna**, ubicada en Matamoros Coah., presenta los siguientes resultados:

Tabla 5. 6. Estación Campo Experimental La Laguna. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Estación	Dirección	Velocidad (ms <sup>-1</sup> )					Acumulado
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	
Campo Experimental La Laguna	Norte	7.392	1.081	0.000	0.000	0.000	8.473
	Noreste	16.004	6.311	0.907	0.105	0.000	23.326
	Este	30.091	4.707	0.105	0.000	0.000	34.902
	Sureste	9.379	0.314	0.000	0.000	0.000	9.693
	Sur	2.650	0.732	0.174	0.000	0.000	3.557
	Suroeste	1.674	0.872	0.209	0.035	0.000	2.789
	Oeste	2.476	0.209	0.139	0.000	0.000	2.824
	Noroeste	12.169	2.057	0.139	0.070	0.000	14.435
	<b>Acumulado</b>	81.834	16.283	1.674	0.209	0.000	100.000

La estación se encuentra al este del municipio de Lerdo, y sus vientos dominantes provienen del Este (34.902 %) y del Noreste (23.326 %), la velocidad común será de 0 a 5 ms<sup>-1</sup>, como se aprecia en la Figura 5.6.

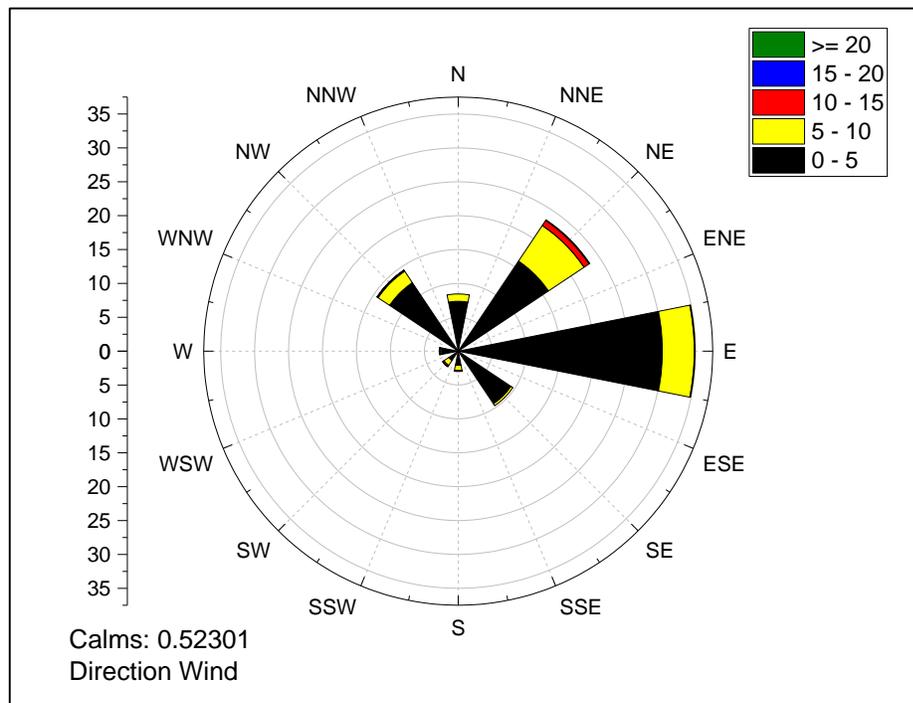


Figura 5. 6. Rosa de los vientos de la estación Campo Experimental La Laguna.

La estación **Colonia Emiliano Zapata, Mapimí, Dgo.** Presentó los siguientes resultados:

Tabla 5. 7. Estación Colonia Emiliano Zapata, Mapimí, Dgo. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Estación	Dirección	Velocidad (ms <sup>-1</sup> )					Acumulado
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	
Colonia Emiliano Zapata, Mapimí, Dgo.	Norte	5.765	2.694	0.323	0.000	0.000	8.782
	Noreste	7.435	2.478	0.054	0.000	0.000	9.967
	Este	9.267	6.627	0.269	0.000	0.000	16.164
	Sureste	11.261	4.957	0.377	0.000	0.000	16.595
	Sur	11.045	3.287	0.162	0.000	0.000	14.494
	Suroeste	5.388	4.149	2.155	0.485	0.000	12.177
	Oeste	4.957	3.610	0.539	0.054	0.000	9.159
	Noroeste	5.388	6.735	0.431	0.108	0.000	12.662
	<b>Acumulado</b>	60.506	34.537	4.310	0.647	0.000	100.000

Esta estación se encuentra al norte del municipio de Mapimí, y la mayoría de sus vientos tendrán un gradiente de Este a Suroeste, pero dominaran los vientos procedentes del Este (16.164) y Sureste (16.595). Las velocidades más comunes del viento tendrán un valor de entre 0 y 5 ms<sup>-1</sup>, y 5 a 10 ms<sup>-1</sup>., como se muestra en la Figura 5.7.

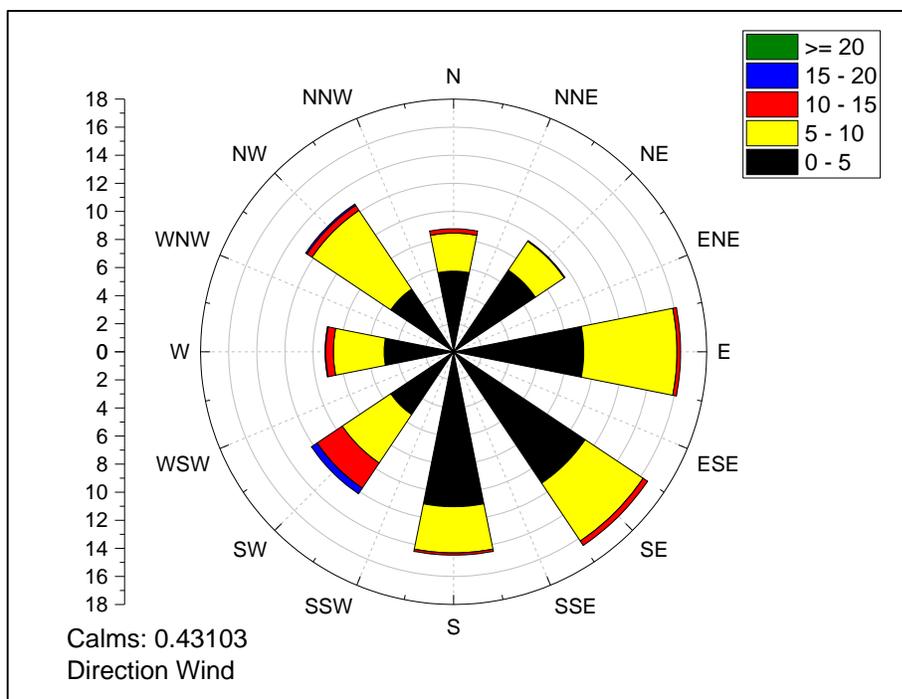


Figura 5. 7. Rosa de los vientos de la estación Colonia Emiliano Zapata, Mapimí, Dgo.

La estación **El Porvenir, Francisco I. Madero, Coah.** Presentó los siguientes resultados:

Tabla 5. 8. Estación El Porvenir, Francisco I. Madero, Coah. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Estación	Dirección	Velocidad (ms <sup>-1</sup> )					Acumulado
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	
El Porvenir Francisco I. Madero, Coah.	Norte	6.863	1.283	0.064	0.000	0.000	8.21
	Noreste	14.304	7.826	1.796	0.577	0.128	24.631
	Este	17.704	14.240	4.105	0.513	0.257	36.818
	Sureste	4.875	0.962	0.192	0.000	0.000	6.030
	Sur	3.784	1.475	0.192	0.000	0.000	5.452
	Suroeste	2.373	0.577	0.064	0.064	0.000	3.079
	Oeste	3.464	0.449	0.064	0.000	0.000	3.977
	Noroeste	9.108	2.502	0.128	0.064	0.000	11.802
	<b>Acumulado</b>	62.476	29.314	6.607	1.219	0.385	100

La estación se encuentra al Este del municipio de Gómez Palacio, Los vientos dominantes provienen del Este (36.818 %) y del Noreste (24.631 %), las velocidades comunes serán las de 0 a 5 ms<sup>-1</sup> y 5 a 10 ms<sup>-1</sup> como se aprecia en la Figura 5.8

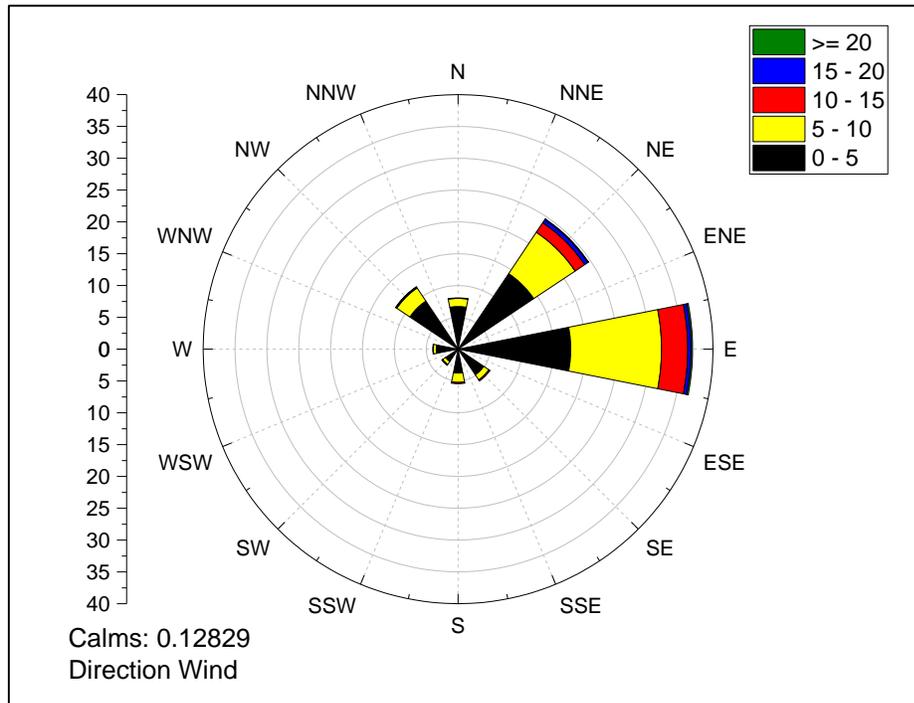


Figura 5. 8. Rosa de los vientos de la estación El Porvenir, Francisco I. Madero.

La estación **URUZA, Mapimí, Dgo.** Presentó los siguientes resultados:

Tabla 5. 9. Estación URUZA, Mapimí, Dgo. Porcentaje de frecuencias anual para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Estación	Dirección	Velocidad (ms <sup>-1</sup> )					Acumulado
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	
URUZA Mapimí, Dgo.	Norte	3.724	1.955	0.186	0.000	0.000	5.866
	Noreste	1.583	1.769	0.093	0.000	0.000	3.445
	Este	4.935	6.518	1.210	0.000	0.000	12.663
	Sureste	11.639	12.756	1.490	0.000	0.000	25.885
	Sur	6.238	5.121	0.279	0.000	0.000	11.639
	Suroeste	3.352	10.894	0.745	0.000	0.000	14.991
	Oeste	1.397	10.335	4.655	0.186	0.000	16.574
	Noroeste	4.097	4.190	0.652	0.000	0.000	8.939
	<b>Acumulado</b>	36.965	53.538	9.311	0.186	0.000	100.000

La estación se encuentra al Sureste del municipio de Mapimí, sus vientos dominantes provienen del Sureste 25.885 %, donde la velocidad más común es de 5 a 10 ms<sup>-1</sup>, como se muestra en la Figura 5.9.

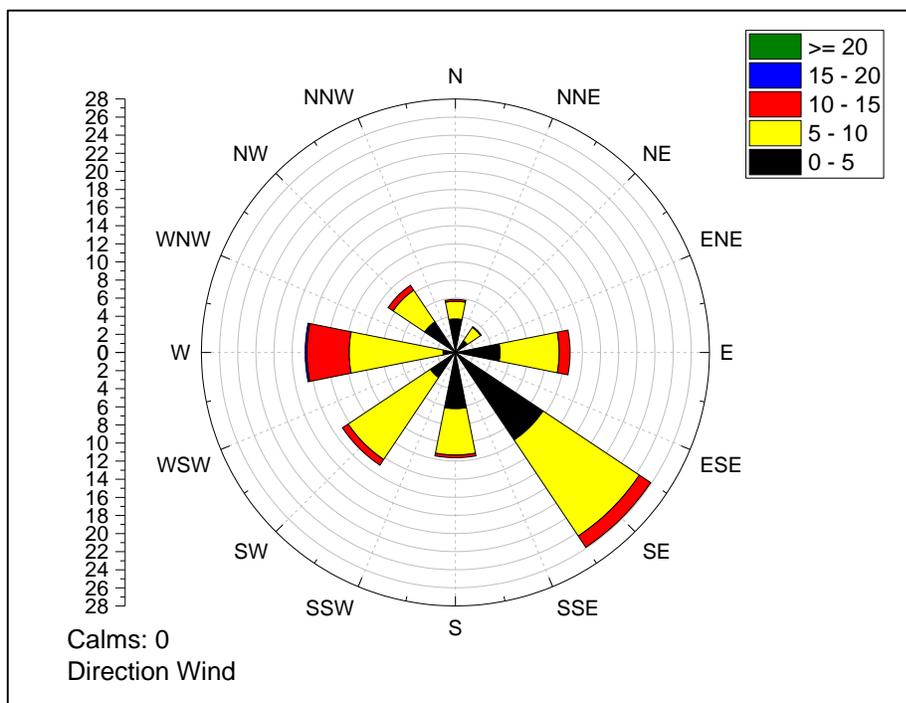


Figura 5. 9. Rosa de los vientos de la estación URUZA, Mapimí, Dgo.

El análisis de viento trimestral mostró los siguientes resultados.

### Trimestre 1

Tabla 5. 10. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 1 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Periodo	Dirección	Velocidad (ms <sup>-1</sup> )					Frecuencia
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	%
Trimestre 1	Norte	4.607	1.766	0.921	0.230	0.038	7.562
	Noreste	5.950	3.493	1.459	0.269	0.115	11.286
	Este	11.516	5.489	1.536	0.154	0.038	18.733
	Sureste	9.866	3.877	1.727	0.154	0.000	15.624
	Sur	6.142	3.762	1.958	0.768	0.576	13.205
	Suroeste	3.109	3.301	2.956	1.420	2.380	13.167
	Oeste	3.762	1.881	1.305	0.230	0.038	7.217
	Noroeste	8.369	3.877	0.691	0.269	0.000	13.205
	<b>Acumulado</b>	53.320	27.447	12.553	3.493	3.186	100.000

Se tendrá un 32.054 % de vientos provenientes del Norte, con sus variantes Noreste y Noroeste con velocidades de 0 a 5 ms<sup>-1</sup>, hasta de 10 a 15 ms<sup>-1</sup>. Pero los vientos dominantes serán provenientes del Este y Sureste, que representan el 34.357 % del total, con velocidades de 0 a 5 ms<sup>-1</sup>, hasta de 10 a 15 ms<sup>-1</sup> como se observa en la Figura 5.10.

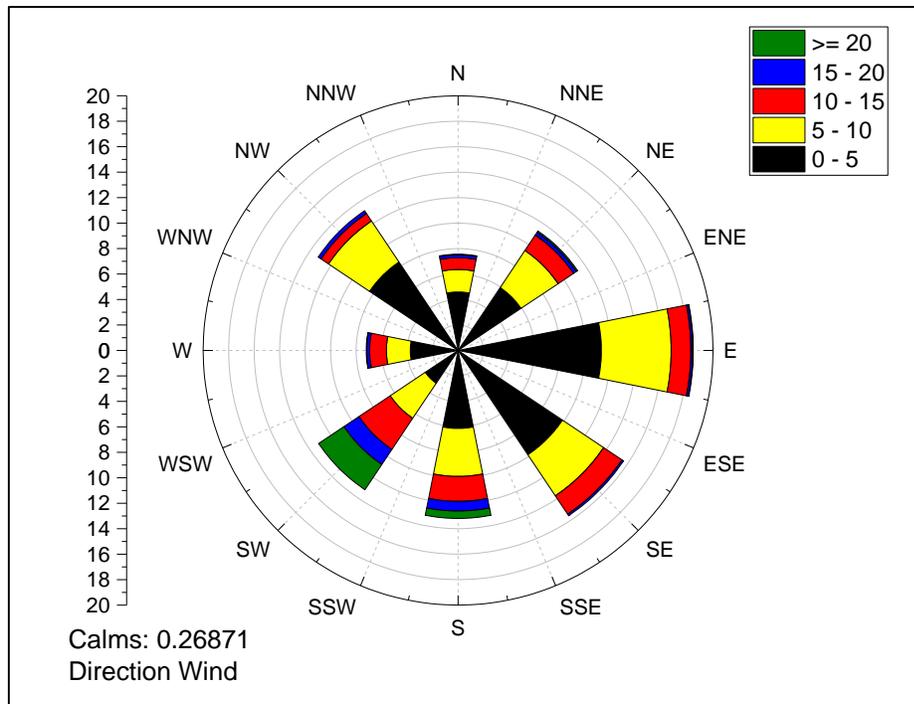


Figura 5. 10. Rosa de los vientos para el trimestre 1 del área de estudio.

## Trimestre 2

Tabla 5. 11. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 2 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Periodo	Dirección	Velocidad (ms <sup>-1</sup> )					Frecuencia	
		0 a 5	%	10 a 15	15 a 20	>= 20	%	
Trimestre 2	Norte	4.341	2.572	0.683	0.322	0.000	7.918	
	Noreste	9.124	5.908	3.215	0.844	0.241	19.333	
	Este	11.897	8.079	3.416	1.085	0.281	24.759	
	Sureste	3.256	4.582	2.170	0.482	0.000	10.491	
	Sur	2.090	2.974	0.844	0.201	0.040	6.150	
	Suroeste	1.648	4.582	2.974	1.768	1.809	12.781	
	Oeste	1.608	4.059	1.688	0.241	0.121	7.717	
	Noroeste	6.109	3.939	0.723	0.080	0.000	10.852	
<b>Acumulado</b>	<b>40.073</b>	<b>36.696</b>	<b>15.715</b>	<b>5.024</b>	<b>2.492</b>	<b>100.000</b>		

Para el trimestre 2, los vientos del Norte, con sus variantes Noreste y Noroeste, serán del orden del 38.103 %, con velocidades de hasta  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Pero los vientos con mayor dominancia serán los provenientes del Este, ya que representan el 24.759 % del total con velocidades de hasta  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Es importante mencionar que los vientos del Suroeste presentaron con mayor frecuencia velocidad mayores a  $20 \text{ ms}^{-1}$ , como se aprecia en la Figura 5.11.

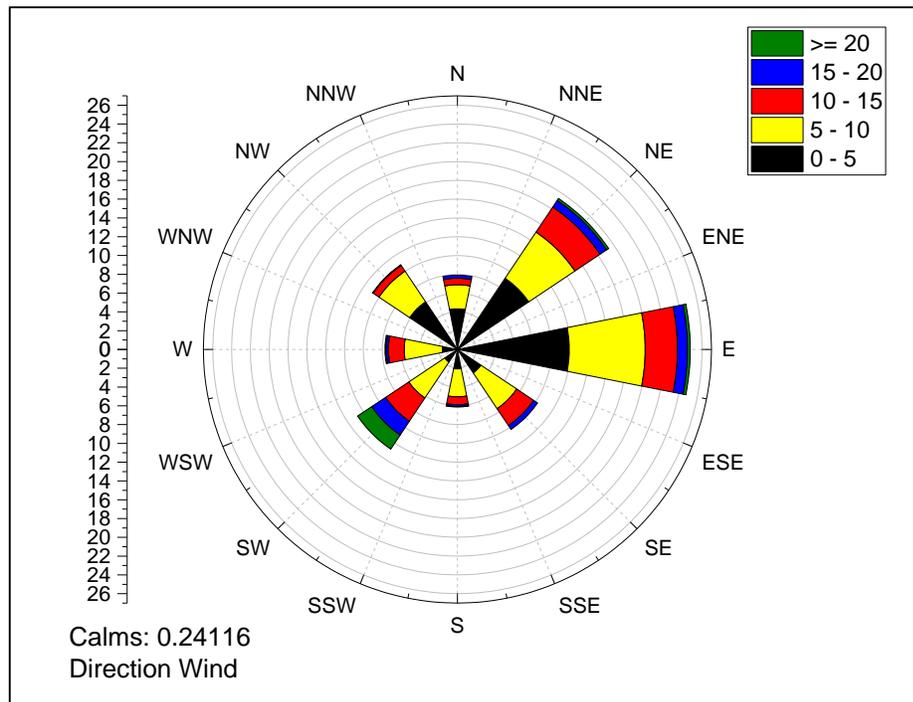


Figura 5. 11. Rosa de los vientos para el trimestre 2 del área de estudio.

### Trimestre 3

Tabla 5. 12. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 3 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Periodo	Dirección	Velocidad (m/s)					Frecuencia
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	%
Trimestre 3	Norte	6.721	2.210	0.677	0.045	0.045	9.698
	Noreste	12.991	9.427	3.022	0.316	0.180	25.936
	Este	18.584	12.224	6.676	1.443	0.000	38.926
	Sureste	3.293	4.285	2.120	0.226	0.000	9.923
	Sur	0.857	1.398	0.406	0.045	0.000	2.706
	Suroeste	0.722	1.759	0.451	0.000	0.000	2.932
	Oeste	1.308	1.624	0.541	0.000	0.000	3.473
	Noroeste	4.465	1.940	0.000	0.000	0.000	6.405
<b>Acumulado</b>	48.940	34.867	13.893	2.075	0.226	100.000	

Para el trimestre 3, el 64.862 % de los vientos tendrán una procedencia del Noreste y del Este, con velocidades de 0 a 5 ms<sup>-1</sup> hasta 15 a 20 ms<sup>-1</sup>, como se puede ver en la Figura 5.12.

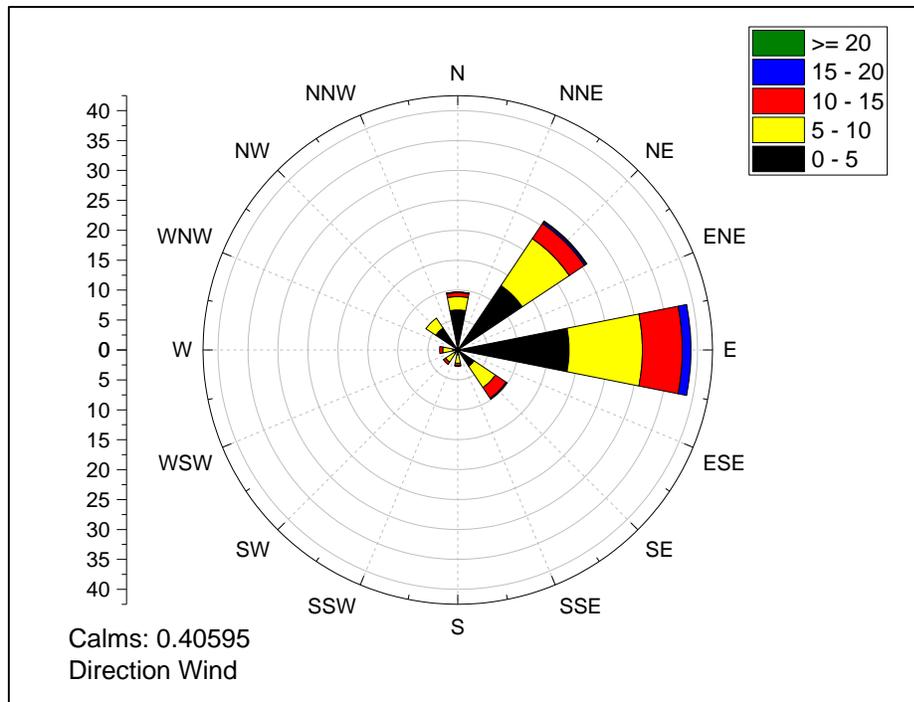


Figura 5. 12. Rosa de los vientos para el trimestre 3 del área de estudio.

### Trimestre 4

Tabla 5. 13. Porcentaje de frecuencias en el trimestre 4 para 8 direcciones de viento en 5 clases de velocidad.

Periodo	Dirección	Velocidad (m/s)					Frecuencia
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	>= 20	%
Trimestre 4	Norte	4.049	1.045	0.871	0.044	0.044	6.052
	Noreste	7.053	4.179	1.828	0.305	0.000	13.365
	Este	15.803	4.658	2.569	0.174	0.000	23.204
	Sureste	12.016	3.570	2.786	0.218	0.000	18.589
	Sur	7.053	2.960	2.873	1.045	0.305	14.236
	Suroeste	3.613	2.438	1.393	1.263	1.524	10.231
	Oeste	3.265	1.175	0.435	0.044	0.000	4.919
	Noroeste	7.227	1.959	0.131	0.087	0.000	9.404
<b>Acumulado</b>	<b>60.079</b>	<b>21.985</b>	<b>12.886</b>	<b>3.178</b>	<b>1.872</b>	<b>100.000</b>	

Para el trimestre 4, el 41.794 % de los vientos tuvieron una procedencia del Este y del Sureste con velocidades de 0 a 5 ms<sup>-1</sup> hasta 10 a 15 ms<sup>-1</sup>. Es importante hacer mención que el 28.821 % de los vientos tuvieron procedencia del Norte, como se puede ver en la Figura 5.13.

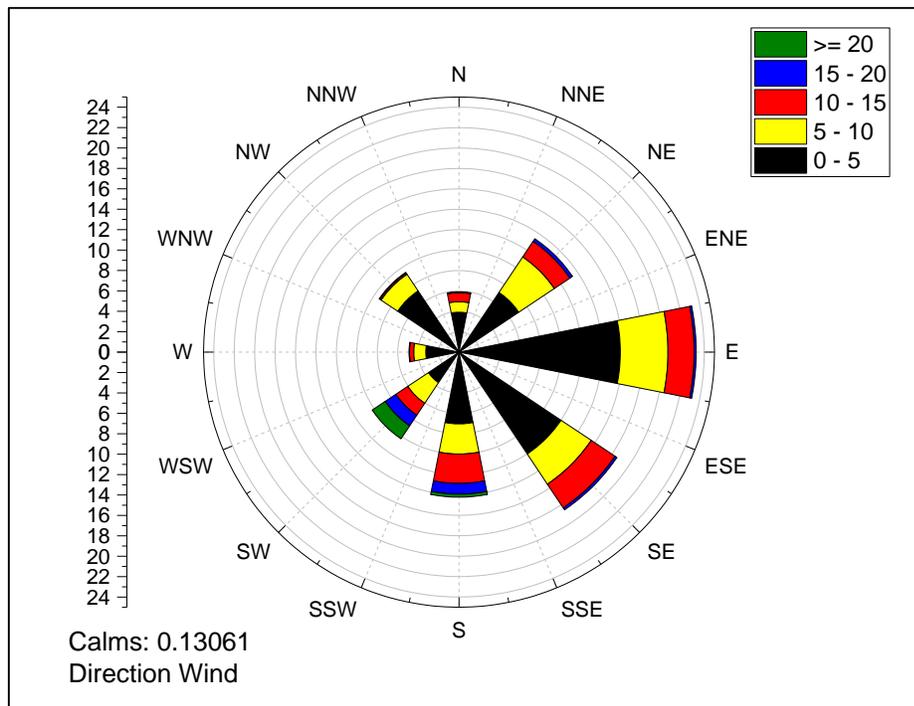


Figura 5. 13. Rosa de los vientos para el trimestre 4 del área de estudio.

## 5.2 Valores críticos para variables climáticas

Los valores críticos (máximos y mínimos) para las variables climáticas entre los periodos históricos y futuro cercano se presentan a continuación:

### 5.2.1 Para Temperatura Media Anual

Los valores críticos de la TMA (Tabla 5.14) para el límite máximo, tuvo un valor histórico de 21.408 °C y para el periodo futuro cercano de 22.783 °C, lo cual implica un posible aumento de 1.375 °C (6.423 %). Para el límite mínimo de la TMA el valor

histórico fue de 14.283 °C y para el periodo futuro cercano de 15.633 °C, lo cual implica un posible aumento de 1.350 °C (9.452 %).

Los promedios de TMA presentaron en el histórico (TMA<sub>H</sub>) un valor de 17.846 °C y para el futuro cercano (TMA<sub>FC</sub>) un valor de 19.208 °C, lo que implica un cambio promedio de 1.363 °C que representa un aumento general del 7.635 %.

Tabla 5. 14. Valores críticos de TMA

Rango	TMA		Impacto	
	Histórica	Futuro Cercano	Cambio	IR
	----- °C -----			--- % ---
Máximo	21.408	22.783	+ 1.375	+ 6.423
Mínimo	14.283	15.633	+ 1.350	+ 9.452
Promedio	17.846	19.208	+ 1.363	+ 7.635

Cambio = Futuro Cercano – Histórica; IR (Importancia Relativa) = (Cambio \*100) / Hist. El Signo positivo (+) indica incremento y el signo negativo indica decremento (-).

La distribución espacial de la TMA se presenta en la Figura 5.6, además se presentan los cambios entre el periodo histórico y el futuro tomando en cuenta las estaciones de referencia (Figura 5.14).

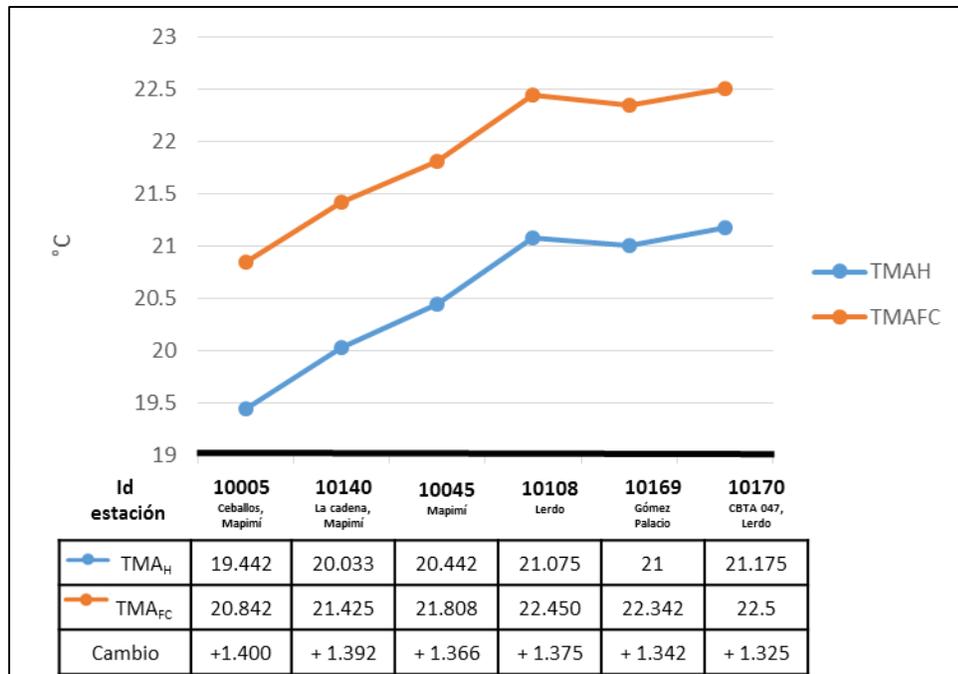


Figura 5. 14. Valores de TMA para el Histórico y para el Futuro Cercano en las estaciones de referencia.

Los valores de TMA muestran en la Figura 5.14 un comportamiento ascendente, lo cual indica que se tiene un gradiente positivo de temperaturas con dirección Norte – Sur. La Figura 5.15 muestra como la TMA tendrá valores bajos en la parte norte de la unidad de estudio, principalmente en el municipio de Mapimí, y los valores altos de temperatura se ubicaran en el sur de la unidad de estudio en los municipios de Gómez Palacio y Lerdo, lo cual tendría posibles efectos negativos sobre el sector urbano.

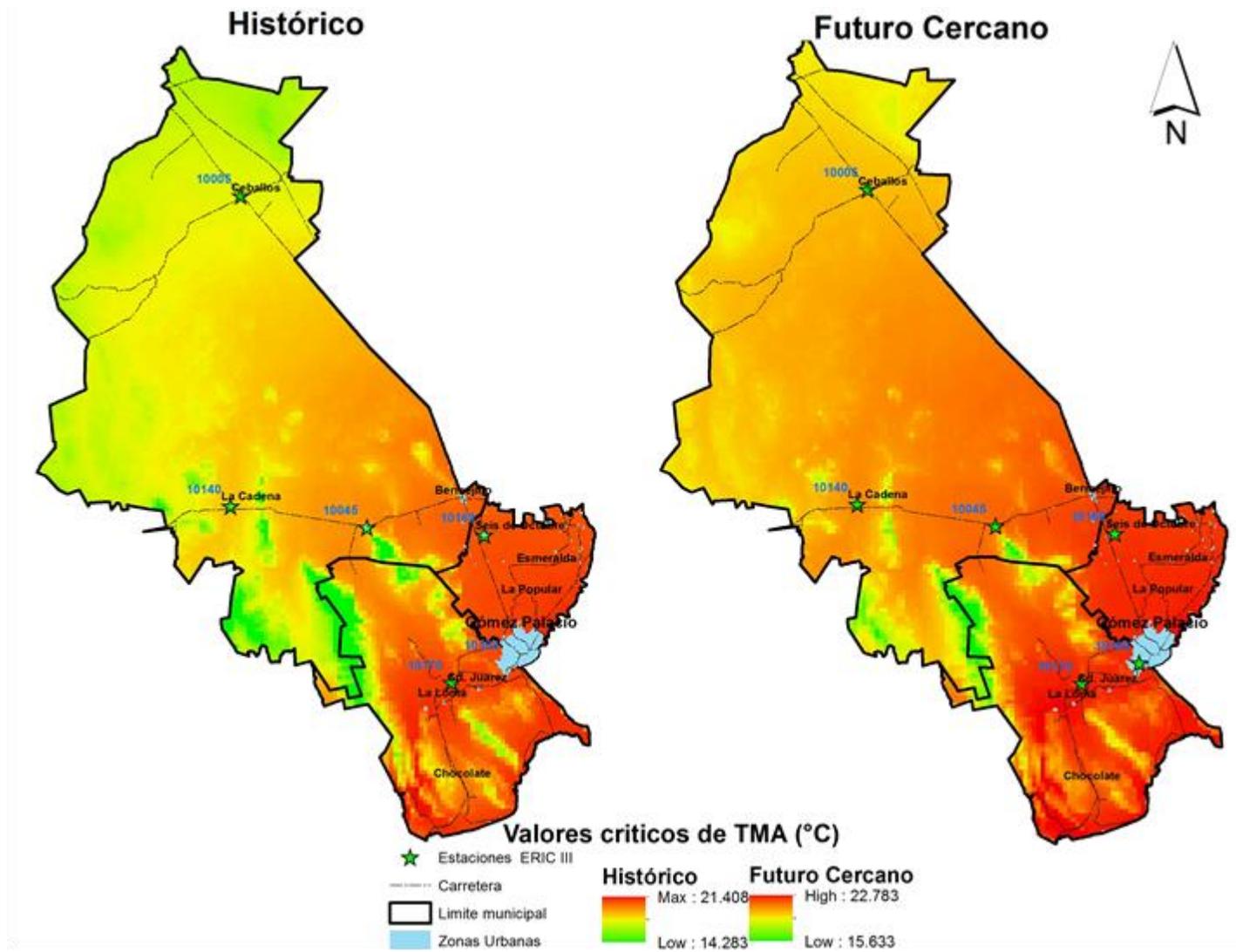


Figura 5. 15. Distribución espacial de la TMA.

### 5.2.2 Para Precipitación Media Anual

Los valores críticos de PMA muestran que para el límite máximo se tendrá un histórico de 453 mm y para el futuro cercano un valor de 407 mm, lo cual implica un posible decremento de aproximadamente del 10 %, respecto del histórico, que equivale una disminución del 46 mm. Para el límite mínimo se espera un valor histórico de 198 mm y para el futuro cercano 142 mm, lo cual implica un posible decremento de 56 mm correspondiente a una pérdida del 28 % respecto al histórico.

La PMA tendrá un valor promedio histórico ( $PMA_H$ ) de 325.5 mm y un valor promedio para el futuro cercano ( $PMA_{FC}$ ) de 274.5, presentando un posible decremento de 51 mm que equivale a una disminución del 15 % respecto al histórico.

Tabla 5. 15. Valores críticos de PMA

Rango	PMA		Impacto	
	Hist	FC	Cambio	IR
	----- °C -----			--- % ---
Máximo	453	407	- 46	- 10.15
Mínimo	198	142	- 56	- 28.28
<i>Promedio</i>	325.5	274.5	- 51	- 15.67

Hist = Histórico; FC = Futuro Cercano; Cambio = FC – Hist; IR (Importancia Relativa) = (Cambio \*100) / Hist. El Signo positivo (+) indica incremento y el signo negativo indica decremento (-).

La distribución espacial de la PMA se presenta en la Figura 5.17, además se presenta los cambios entre el periodo histórico y el futuro tomando en cuenta las estaciones de referencia (Figura 5.16).

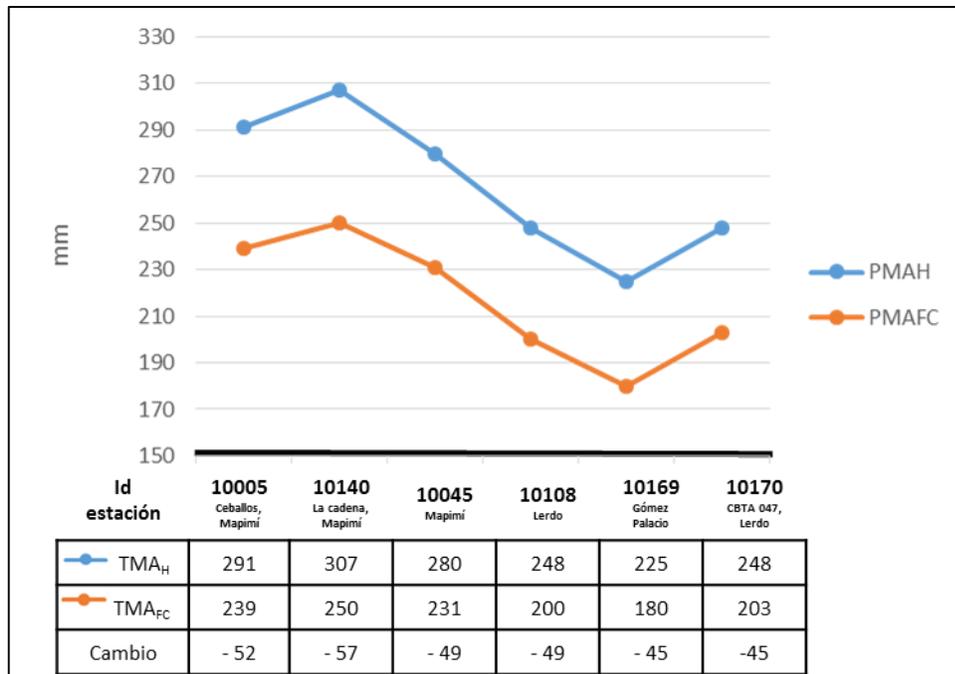


Figura 5. 16. Valores de PMA para el Histórico (PMA<sub>H</sub>) y para el Futuro Cercano (PMA<sub>FC</sub>) en las estaciones de referencia.

Los valores de PMA extraídos de las estaciones meteorológicas de referencia muestran un comportamiento decreciente, lo cual indica que existe un gradiente de precipitación negativo que se distribuye de Norte – Sur.

Los valores más bajos de PMA están ubicados en el municipio de Gómez Palacio y Lerdo (Figura 5.17), donde también se encuentran las temperaturas más altas de la unidad de estudio.

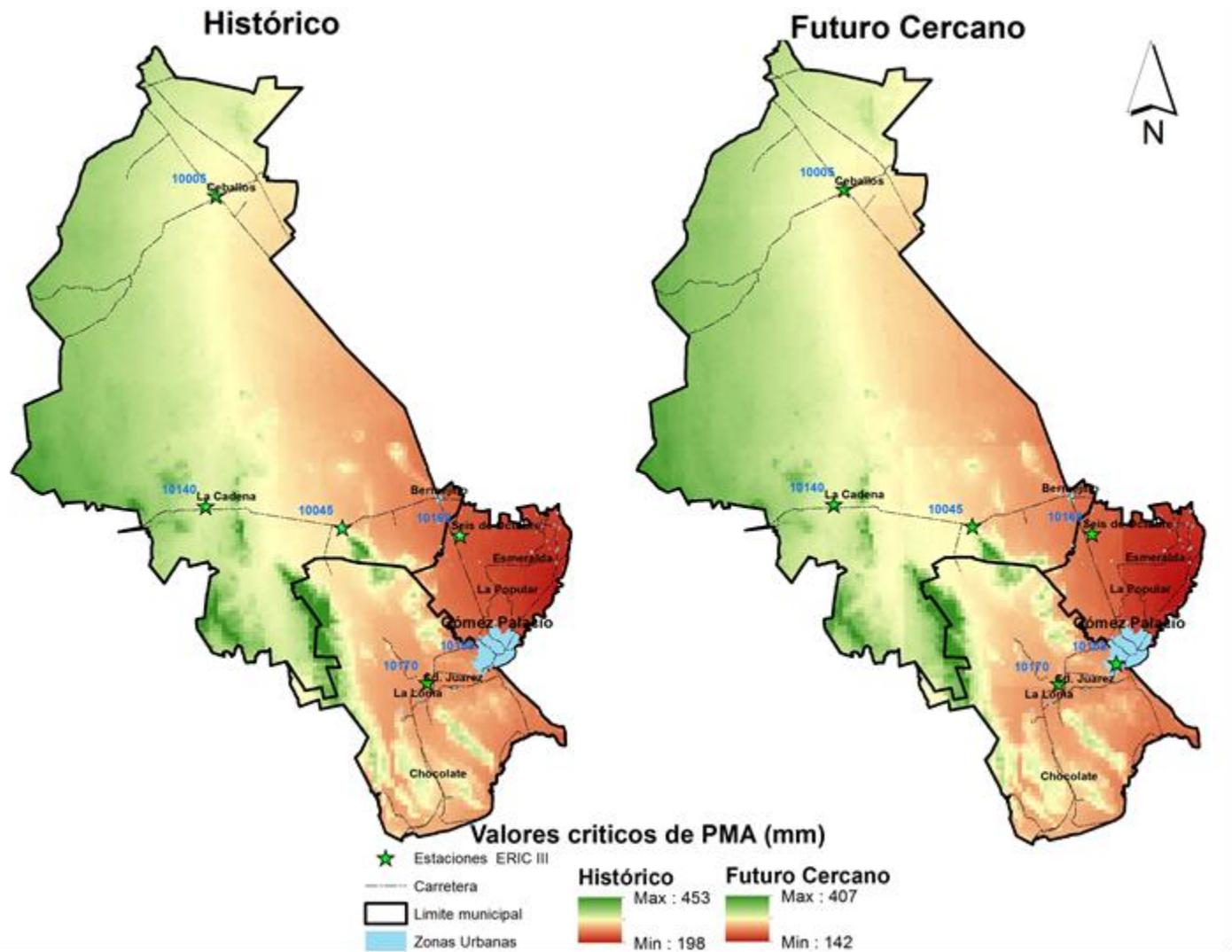


Figura 5. 17. Distribución espacial de la PMA.

### 5.3 Erosión Eólica Laminar

Los resultados de la Erosión Eólica Laminar para el periodo Histórico (EEL<sub>H</sub>) y para el futuro cercano (EEL<sub>FC</sub>) se muestran en la Tabla 5.16. Los rangos de erosión por acción del viento fueron calculados en t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La distribución espacial de las clases se muestra en la Figura 5.18.

Tabla 5. 16. Análisis de cambios e impactos en la EEL entre cuatro clases comparables para el periodo histórico y el futuro cercano.

EEL	Clase	Rangos		Superficie	CS	IR	CRC
		<i>t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup></i>		<i>----- km2 -----</i>		<i>----- % -----</i>	
Histórica	E1	0	- 12	1,493.008		13.93	
	E2	12	- 50	7,829.292		73.07	
	E3	50	- 100	1,220.26		11.39	
	E4	100	- 189.9	172.015		1.61	
Futuro Cercano	E1'	0	- 12	203.545	- 1,289.46	1.90	- 12.03
	E2'	12	- 50	8,604.832	+ 775.54	80.31	+ 7.24
	E3'	50	- 100	1,760.664	+ 540.40	16.43	+ 5.04
	E4'	100	- 196.2	145.534	- 26.48	1.36	- 0.25

Prom = Promedio; CS (Cambio en la Superficie) = Superficie A1' - Superficie A1; IR (Importancia Relativa) = (Superficie\*100) / Área Total; CRC (Cambio Relativo en la Clase) = IR A1' - IR A1; El Signo positivo (+) indica incremento y el signo negativo indica decremento (-). Área total = 10714.575 km<sup>2</sup>.

El valor máximo de EEL<sub>H</sub> y EEL<sub>FC</sub> es de 189.9 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 196.2 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente, indicando un cambio probable de 6.3 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

La clase E1, que presentó una erosión ligera (0 - 12 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), históricamente ocupa una extensión territorial de 1,493.008 Km<sup>2</sup>, pero en el periodo futuro cercano tendrá una probable disminución de 1,289.46 Km<sup>2</sup> en su extensión territorial y que se ubicarán principalmente en las zonas urbanas y en las zonas con lluvias mayores a 327 mm anuales.

La clase E2, representa un pérdida de suelo moderada (12 - 50 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), que se distribuye en 7,829.292 km<sup>2</sup>, pero para el periodo futuro cercano se tendrá un posible

aumento de 775.54 km<sup>2</sup>, que seguirá posicionándola como la clases más extensa con un 80.31 % del área de estudio, ubicándose primordialmente en las áreas de matorral (CAUSO = 0.15).

La clase E3, representa una pérdida de suelo alta (50 - 100 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), presentará en su extensión territorial un incremento probable para el periodo futuro cercano de 540.40 Km<sup>2</sup>, aumentando de 1,220.26 Km<sup>2</sup> a 1,760.664 Km<sup>2</sup>. Esta se distribuye en un 16.43% del área de estudio, asociándose principalmente a las áreas de pastizales (CAUSO = 0.30) y a una textura fina (CATEX = 1.85) y gruesa (CATEX = 3.5).

La clase E4, representó una pérdida de suelo muy alta (>100 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Tendrá un decremento de 26.48 Km<sup>2</sup>, disminuyendo de 172.015 Km<sup>2</sup> a 145.534 Km<sup>2</sup>, siendo la clase con menor extensión ocupando un 6 % del área de estudio principalmente distribuida sobre las áreas agrícolas de temporal (CAUSO = 0.7).

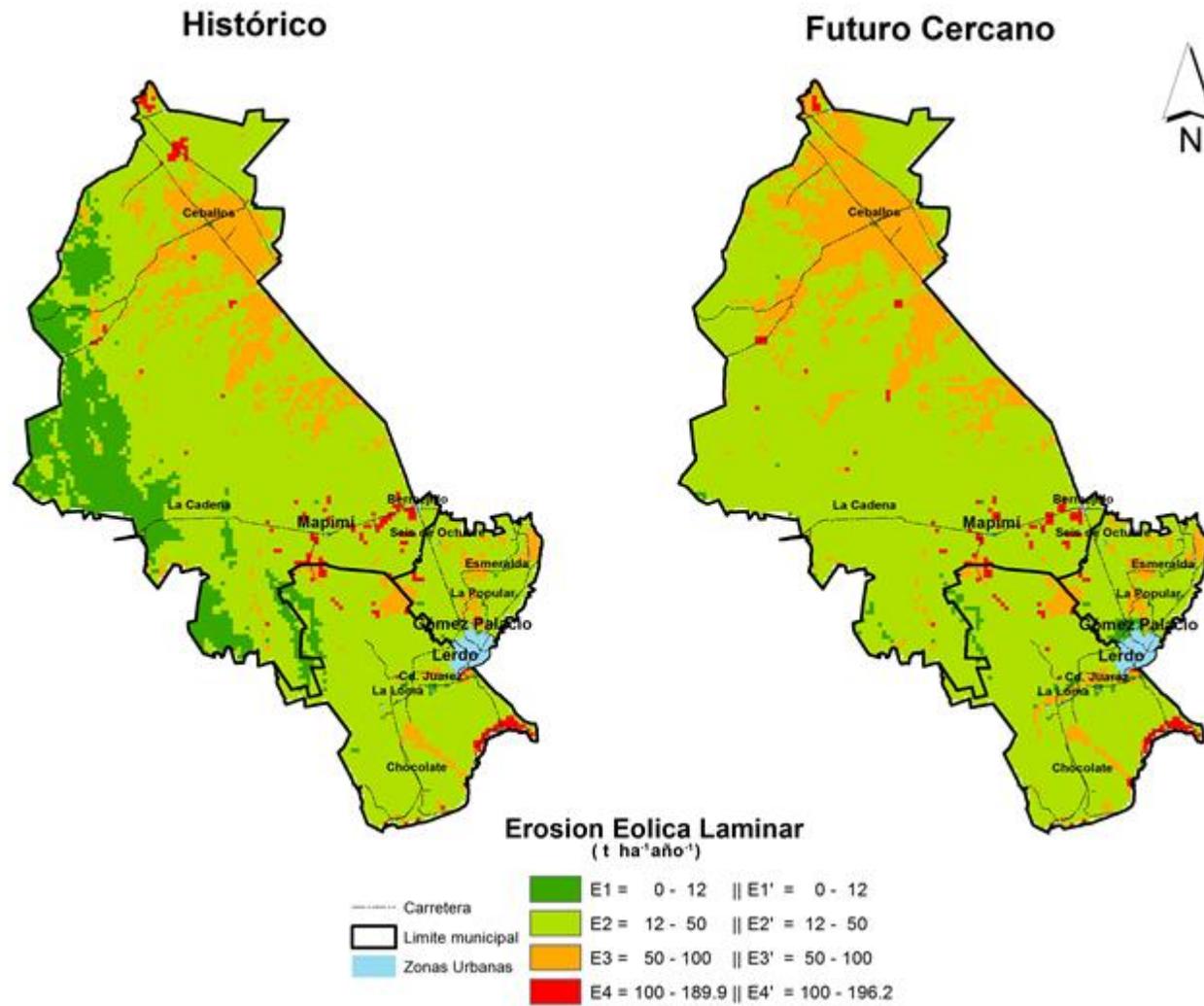


Figura 5. 18. Distribución espacial de los cambios en la EEL en el periodo Histórico y en Futuro Cercano.

## 5.4 Índice de aridez

Para la unidad de estudio, los valores del índice de aridez (IA) se distribuyeron en 5 clases comparables (Tabla 5.17) tomando en cuenta el principio de que menor valor del índice corresponde una mayor aridez y viceversa. La distribución espacial de las clases se muestra en la Figura 5.19.

Tabla 5. 17. Análisis de cambios e impactos en el IA entre cinco clases comparables para el periodo histórico y el futuro cercano.

IA	Clase	Rangos		Prom	Superficie	CS	IR	CRC
					----- km <sup>2</sup> -----		----- % -----	
Histórica	A1	6.352	- 7.025	6.69	371		3.46	
	A2	7.025	- 7.7	7.36	522		4.87	
	A3	7.7	- 8.8	8.25	2,044.37		19.08	
	A4	8.8	- 10.6	9.70	4,586.46		42.81	
	A5	10.6	- 18.7	14.65	3,190.74		29.78	
Futuro Cercano	A1'	4.372	- 7.025	5.70	3,113.36	+ 2742.36	29.06	+ 25.59
	A2'	7.025	- 7.7	7.36	2,006.14	+ 1484.14	18.72	+ 13.85
	A3'	7.7	- 8.8	8.25	3,369.23	+ 1324.86	31.45	+ 12.37
	A4'	8.8	- 10.6	9.70	1,975.41	- 2611.05	18.44	- 24.37
	A5'	10.6	- 15.878	13.24	250.43	- 2940.31	2.34	- 27.44

Prom = Promedio; CS (Cambio en la Superficie) = Superficie A1'-Superficie A1; IR (Importancia Relativa) = (Superficie\*100) / Área Total; CRC (Cambio Relativo en la Clase) = IR A1' - IR A1; El Signo positivo (+) indica incremento y el signo negativo indica decremento (-). Área Total = 10,714.575 km<sup>2</sup>.

Según la clasificación de De Martonne, el valor mínimo histórico del IA se ubica en la categoría de árido con un valor de 6.352, pero para el periodo futuro cercano se espera un decremento probable de 1.98, cambiando a la categoría de hiperárido con un valor de 4.372. Para el límite máximo se espera también un decremento de 2.822, pasando de un valor histórico de 18.7 a un valor futuro cercano de 15.878, que en ambos casos se ubican en la categoría semiárido.

Debido al gradiente climático existente en el área de estudio que indica que la temperatura incrementa hacia el sur, contraria a la precipitación, las clases con mayor aridez se ubican en la zona sur del área de estudio.

Las clases A1, A2, y A3, tienen rangos que las catalogan como zonas áridas, las cuales históricamente se encuentran en el 27.41 % (2,937.37 km<sup>2</sup>) cubriendo al municipio de Gómez Palacio, la porción Sureste de Mapimí y más de la mitad del territorio de Lerdo. Para el periodo futuro cercano la clase A1 se ubicará como zona hiperárida, las clases A2 y A3, se mantendrán como zonas áridas. La distribución territorial de estas tres clases tendrá un incremento probable ocupando 79.23 % (8,488.73 km<sup>2</sup>) cubriendo al municipio de Gómez Palacio, la mayor parte de Lerdo y más de la mitad de Mapimí.

Las clases A4 y A5, por la extensión de sus rangos, se catalogan como zonas semiáridas, históricamente se distribuye en el 72 % (7,777.2 Km<sup>2</sup>) cubriendo el centro hasta la parte Norte-Oeste del área de estudio. Para el periodo futuro cercano, su distribución tendrá un decremento probable que la hará que se distribuyan sólo en el 20.78 % (2,225.84 km<sup>2</sup>) en la parte Oeste de los municipios de Mapimí y Lerdo.

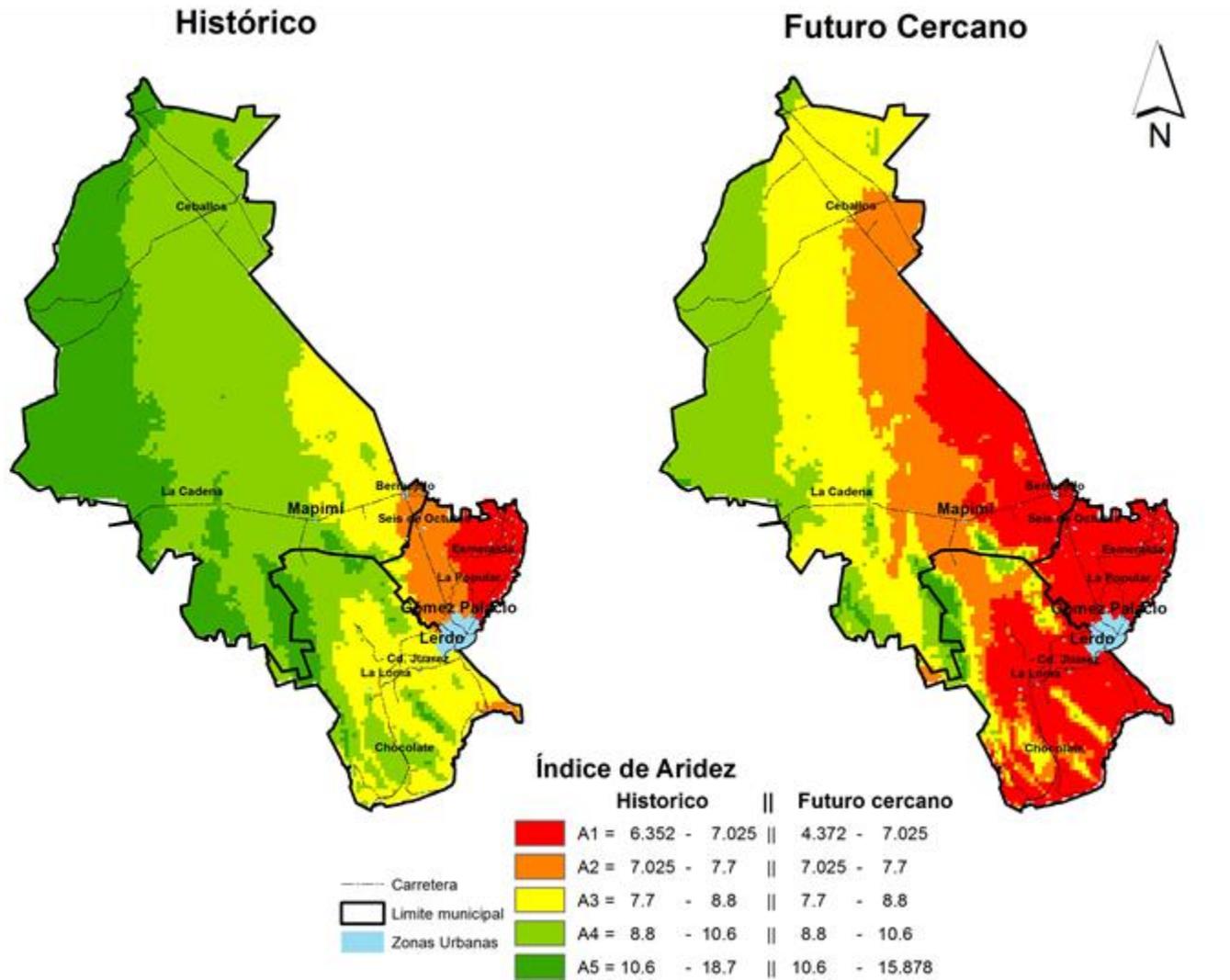


Figura 5. 19. Distribución espacial de los cambios del IA en el periodo histórico y en el futuro cercano.

## 5.5 Áreas críticas

Los resultados de la población expuesta en las áreas críticas a los peligros bioclimáticos para el periodo histórico y para el periodo futuro cercano se presentan en la Tabla 5.18, y la distribución espacial de las localidades se muestra en la Figura 5.20.

Tabla 5. 18. Análisis de cambios en la población de localidades rurales y urbanas del área de estudio.

Periodo	Localidades		Población		Total	
	Rurales	Urbanas	Rural	Urbana	Localidades	Población
Histórico	211	15	89 821	396 495	226	486 316
Futuro cercano	155	15	113 552.7	746 002.3	170	859 555
Cambio	- 56	0	+ 23 731.7	+ 349 507.3	- 56	+ 373 239

Cambio = Futuro cercano - Histórica. El Signo positivo (+) indica incremento y el signo negativo indica decremento (-)

La población para el año 2010 en la unidad de estudio es de 486 316 habitantes que se distribuirán en 226 localidades (211 rurales y 15 urbanas). Pero para el periodo futuro cercano se espera un incremento probable en la población, alcanzando 859,555 habitantes, el cual se distribuirá en 176 localidades (155 rurales y 15 urbanas)

Las localidades rurales tendrán una población histórica de 89 821 habitantes distribuidas en 211 localidades, las cuales en un futuro cercano disminuirán a 155, principalmente en Lerdo y Mapimí, pero presentarán un aumento en su población total, alcanzando 113,552.7 habitantes.

El número de localidades Urbanas se mantendrán en 15 en los dos periodos de tiempo evaluados, pero su población tendrá un aumento probable de 349,507.3 habitantes pasando de 396,495 a 746,002.3

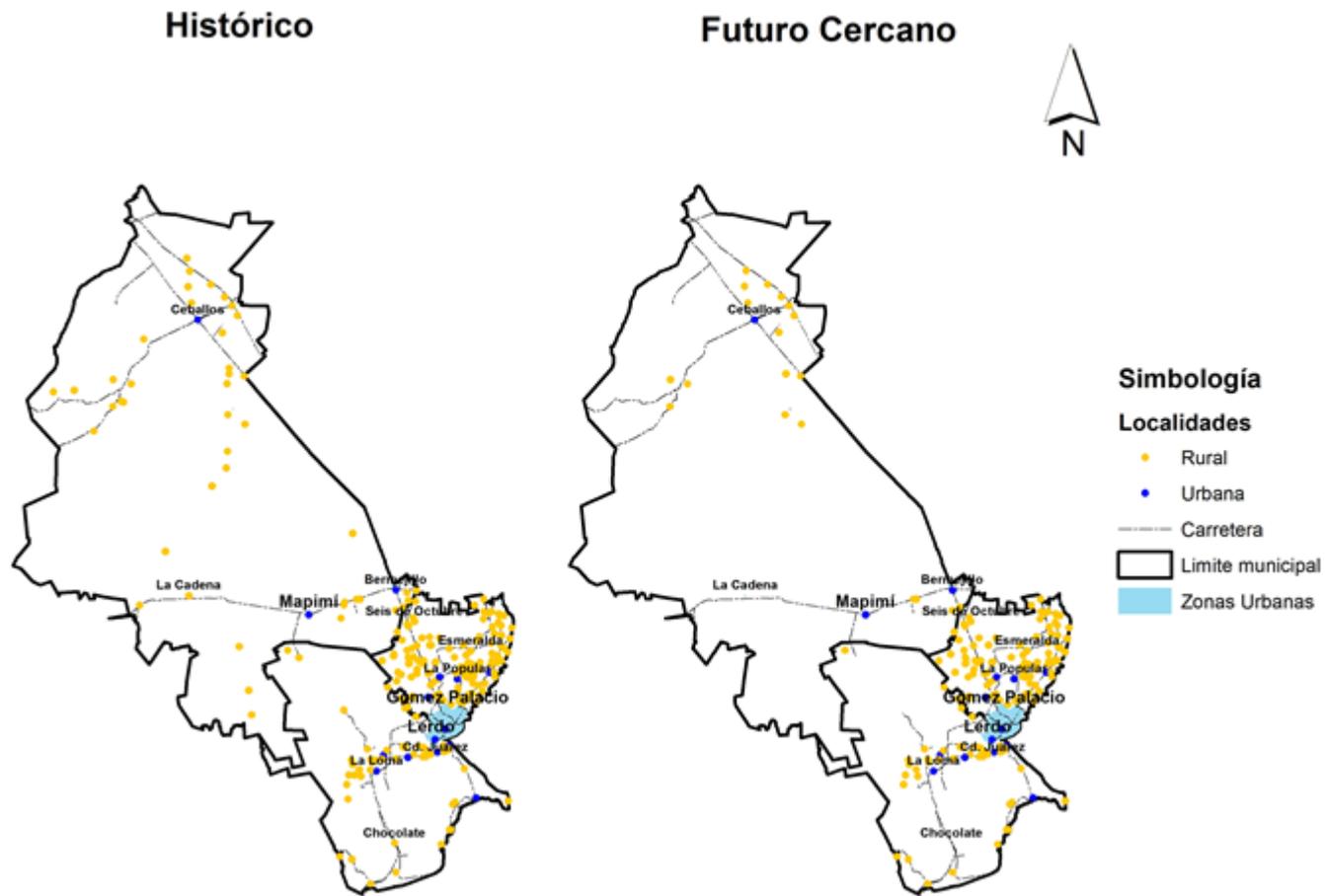


Figura 5. 20. Distribución espacial de las localidades en el área de estudio.

### 5.5.1 Zonas potenciales

Los datos de superficie de las zonas potenciales y de la población expuesta para el periodo histórico y para el periodo futuro cercano se muestran en la Tabla 5.19, la distribución espacial se muestra en la Figura 5.21.

Tabla 5. 19. Análisis de cambios en la superficie de las zonas potenciales y la población expuesta.

	Superficie	IRS	Localidades expuestas	Población expuesta	IRPE
	-- Km <sup>2</sup> --	-- % --			-- % --
Histórico	3,398.611	31.71951	17	10,753	2.211
Futuro Cercano	1,967.67	18.36442	0	0	0
Cambio	- 1,430.94	- 13.3551	- 17	- 10,753	

Cambio = Futuro cercano - Histórico. IRS (Importancia relativa de la superficie) = (Superficie \*100) / Área total. IRPE (Importancia Relativa de la Población Expuesta) = (Población expuesta \* 100) / Población total. Población total: histórico 486,316, futuro cercano 859,555. Área Total = 10,714.575 km<sup>2</sup>.

Las zonas potenciales se distribuyen históricamente desde el Norte hasta el Sur en 3,398.611 Km<sup>2</sup> (31 %) por la zona centro del área de estudio, donde se encuentran 17 localidades las cuales exponen a 10,753 habitantes, localizados principalmente en el municipio de Mapimí.

Para el periodo futuro cercano se espera un decremento probable de 1,430 Km<sup>2</sup> que hará que las zonas potenciales se distribuyan en 1,967.67 Km<sup>2</sup> (18 %) del área de estudio, ubicándose en la zona Oeste del municipio de Mapimí. En este periodo de tiempo posiblemente no se afecten a sus localidades, debido a que las proyecciones de población para estas indican valores negativos de población.

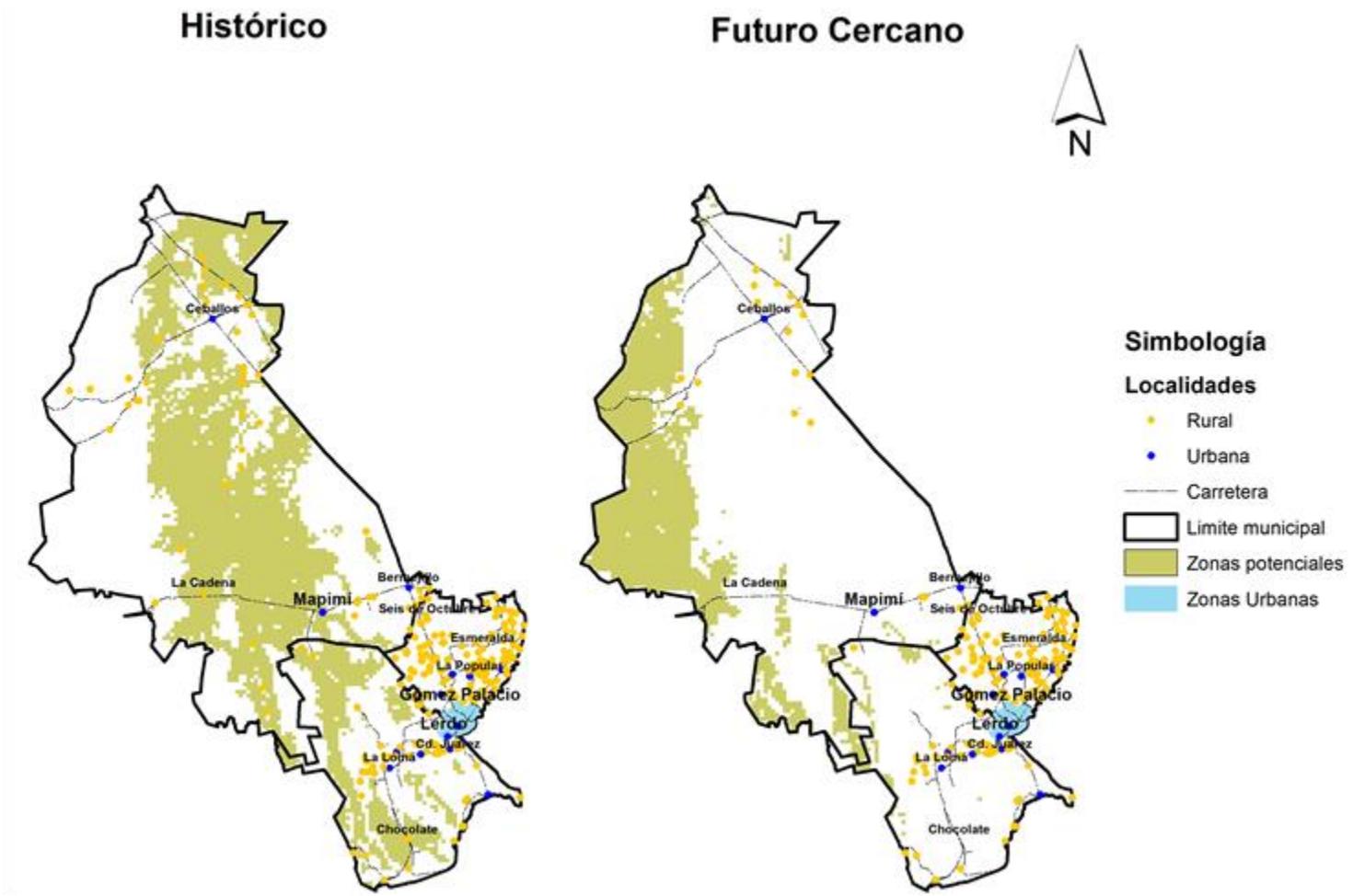


Figura 5. 21. Distribución espacial de las zonas potenciales en el área de estudio.

### 5.5.2 Zonas prioritarias

Los datos de superficie de las zonas prioritarias y de la población expuesta para el periodo histórico y para el periodo futuro cercano se muestran en la Tabla 5.20, la distribución espacial se muestra en la Figura 5.22.

Tabla 5. 20. Análisis de cambios en la superficie de las zonas potenciales y la población expuesta.

	Superficie	IRS	Localidades expuestas	Población expuesta	IRPE
	-- Km <sup>2</sup> --	-- % --			-- % --
Histórico	386.5	3.6	23	17,118	3.5
Futuro Cercano	1,706.3	15.9	35	28,930.6	3.4
Cambio	+ 1,319.8	+ 12.3	12	+ 11,812.6	

Cambio = Futuro cercano - Histórico. IRS (Importancia relativa de la superficie) = (Superficie \*100) / Área total. IRPE (Importancia Relativa de la Población Expuesta) = (Población expuesta \* 100) / Población total. Población total: histórico 486,316, futuro cercano 859,555. Área Total = 10,714.575 Km<sup>2</sup>.

Las zonas prioritarias históricamente están presentes en 386 Km<sup>2</sup> (3.6 %) del área de estudio cubriendo a 23 localidades que exponen a 17,118 (3.5 %) habitantes que mayormente se ubican en el municipio de Gómez Palacio.

Para el periodo futuro cercano las zonas prioritarias tendrán un incremento en su área de distribución de 1,319.8 Km<sup>2</sup> extendiéndose en 1,706.3 Km<sup>2</sup> (15.9 %) del área de estudio, afectando ahora a 35 localidades que exponen a 28,930.6 habitantes, 3.4 % de la población proyectada para un futuro cercano, principalmente en los municipios de Mapimí y Gómez Palacio.

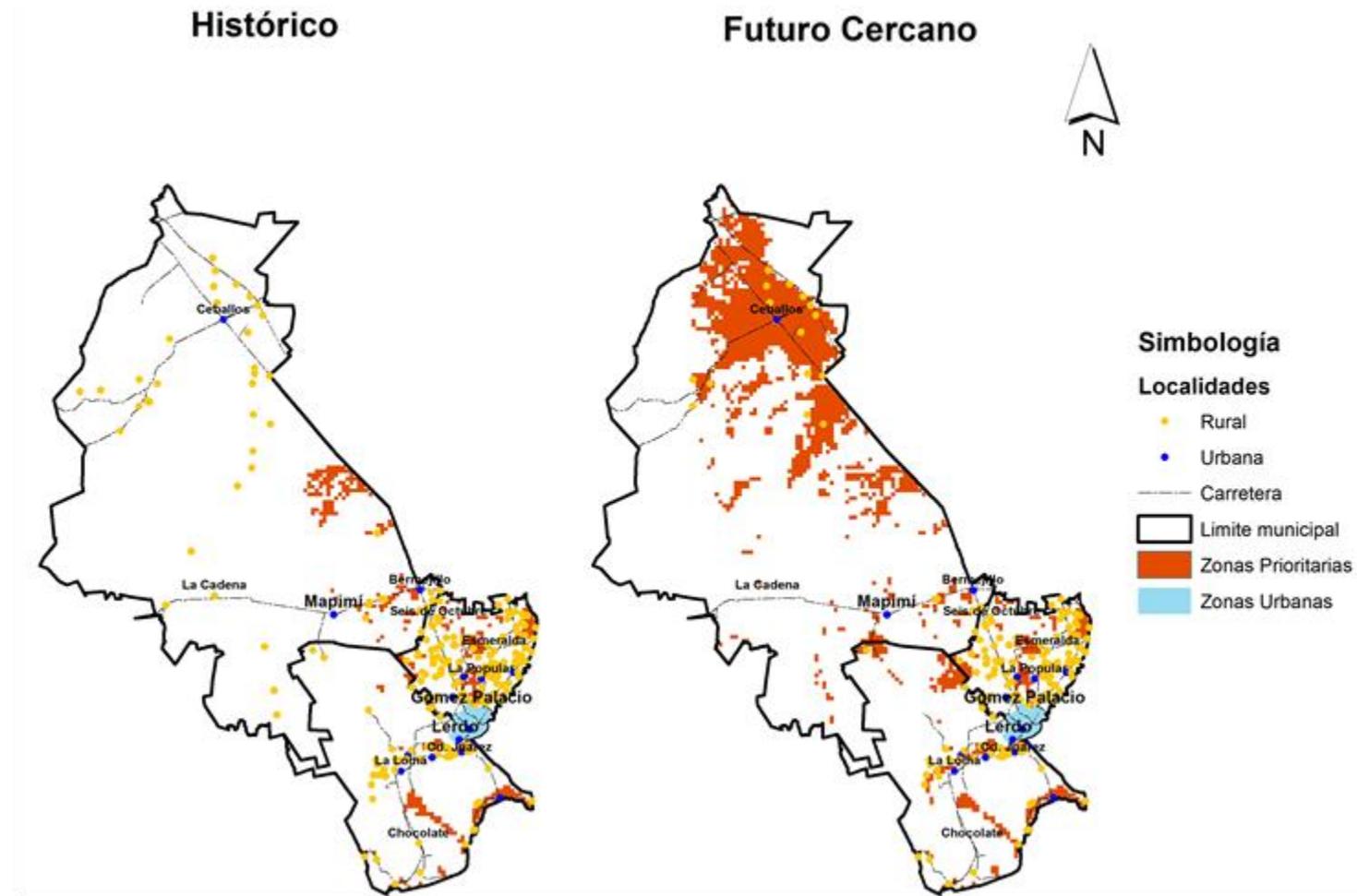


Figura 5. 22. Distribución espacial de las zonas prioritarias en el área de estudio

## 5.6 Densidad de partículas

### 5.6.1 PM<sub>10</sub>

La concentración de partículas PM<sub>10</sub>, no pudo ser determinada para todos los trimestres del año, ya que la EMA UJED tenía series de datos incompletas, debido a fallos en su propio sistema de registro de datos.

En el análisis de dispersión de las PM<sub>10</sub>, se realizó en base al sotavento, que indica hacia donde se dirige el viento.

Los resultados del análisis de concentración y dispersión de partículas PM<sub>10</sub> para el año 2010 son los siguientes.

#### - Trimestre 2

El valor de la concentración de PM<sub>10</sub> del trimestre 2 del año 2010 fue de: 95.5  $\mu\text{g m}^{-3}$  en 24 horas, excediendo el límite permisible por 20  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Los valores promedio diarios de concentración PM<sub>10</sub> y su dispersión se muestran en la Figura 5.23.

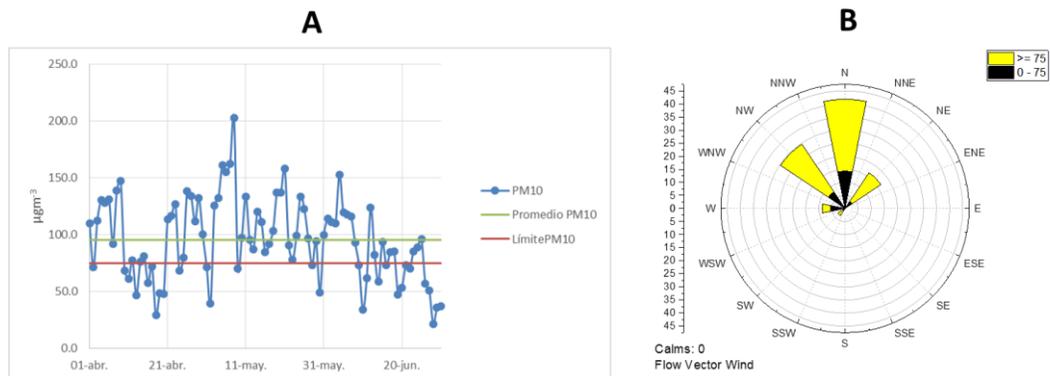


Figura 5. 23. Concentración diaria de PM<sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 2 del año 2010.

El 68% de los días del trimestre 2 del año 2010 tienen una concentración por encima de valor máximo para la protección de la salud de la población susceptible, y principalmente se tendrá una dispersión hacia el Norte, en sus variantes Noreste y Noroeste.

### Trimestre 3

El valor de la concentración  $PM_{10}$  del trimestre 3 del año 2010 fue de  $70.2 \mu g m^{-3}$  en 24 horas, ubicándose solo  $4.8 \mu g m^{-3}$  por debajo del límite permisible. Los valores promedio diarios de concentración  $PM_{10}$  y su dispersión se muestran en la Figura 5.24.

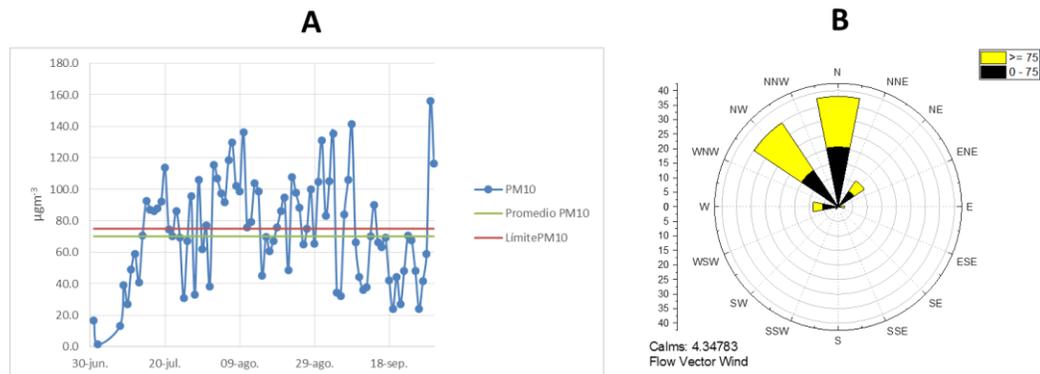


Figura 5. 24. Concentración diaria de  $PM_{10}$  (A) y dispersión (B) para el trimestre 3 del año 2010.

El 45.652 % de los días del trimestre presentaron una concentración por encima del valor límite permisible por la NOM-025-SSA1-2014, la dispersión en este trimestre será hacia el Norte y Noreste.

## Trimestre 4

El valor promedio de concentración  $PM_{10}$  del trimestre 4 del año 2010 es de:  $165.6 \mu\text{gm}^{-3}$  en 24 horas, excediendo en más del doble al límite permisible. Los valores promedio diarios de concentración  $PM_{10}$  y su dispersión se muestran en la Figura 5.25.

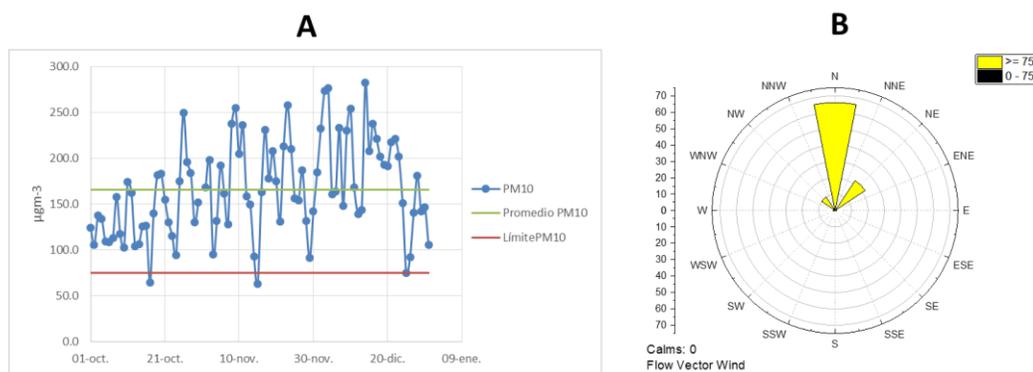


Figura 5. 25. Concentración diaria de  $PM_{10}$  (A) y dispersión (B) para el trimestre 4 del año 2010.

El 95.652 % de los días del trimestre 4 tienen valores por arriba del límite permisible de concentración  $PM_{10}$ , la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Norte.

El análisis de concentración de partículas  $PM_{10}$  para el año 2012 muestra los siguientes resultados trimestrales:

## Trimestre 2

El valor promedio de la concentración de  $PM_{10}$  del trimestre 2 del año 2012 es de:  $121.7 \mu\text{gm}^{-3}$  en 24 horas, lo cual excede por  $46.7 \mu\text{gm}^{-3}$  al límite permisible.

Los valores promedio diarios de concentración  $PM_{10}$  y su dispersión se muestran en la Figura 5.26.

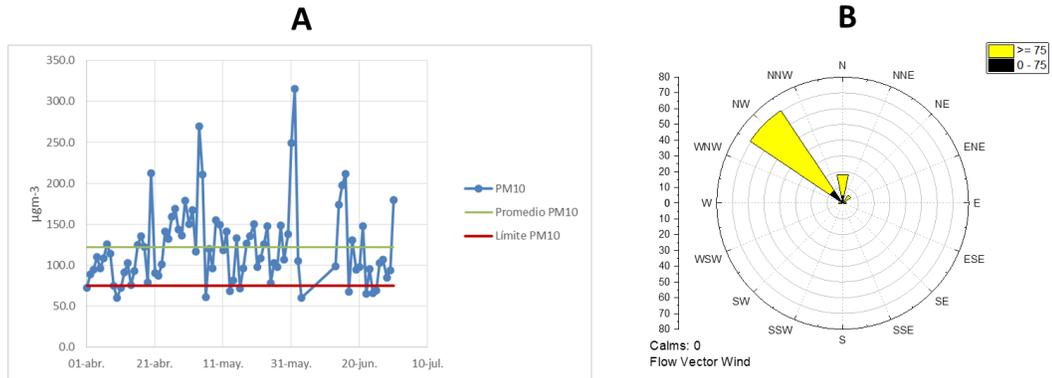


Figura 5. 26. Concentración diaria de  $PM_{10}$  (A) y dispersión (B) para el trimestre 2 del año 2012.

El 83.366 % de los días del trimestre 2 del año 2012 tiene un valor por arriba del límite permisible de concentración  $PM_{10}$ , la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Noroeste.

### Trimestre 3

El valor promedio de la concentración de  $PM_{10}$  del trimestre 3 del año 2012 es de  $83.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en 24 horas, excediendo por  $8.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  al límite permisible. Los valores promedio diarios de concentración de las  $PM_{10}$  y su dispersión se muestran en la Figura 5.27.

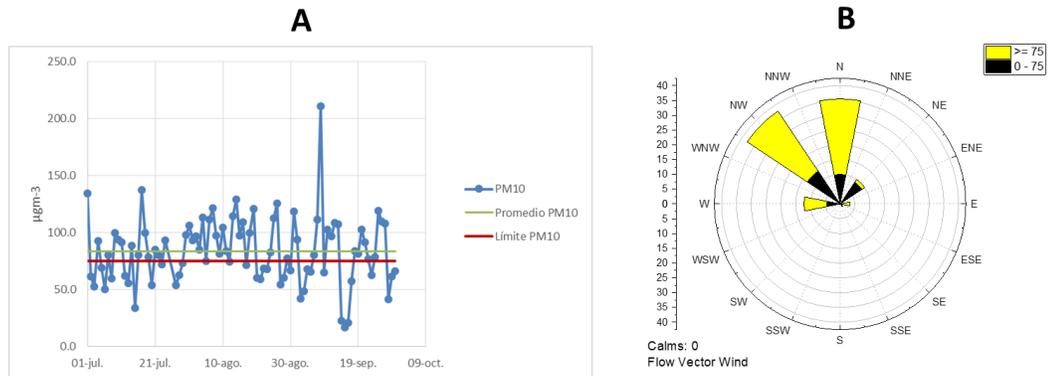


Figura 5. 27. Concentración diaria de PM<sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 3 del año 2012.

El 61.11 % de los días del trimestre 3 del año 2012 tiene valor por arriba del límite permisible de concentración PM<sub>10</sub>, la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Norte y Noroeste.

#### Trimestre 4

El valor promedio de la concentración de PM<sub>10</sub> del trimestre 4 del año 2012 es de 111.3 µgm<sup>-3</sup> en 24 horas, excediendo por 36.3 µgm<sup>-3</sup> al límite permisible. Los valores promedio diarios de concentración PM<sub>10</sub> y su dispersión se muestran en la Figura 5.28.

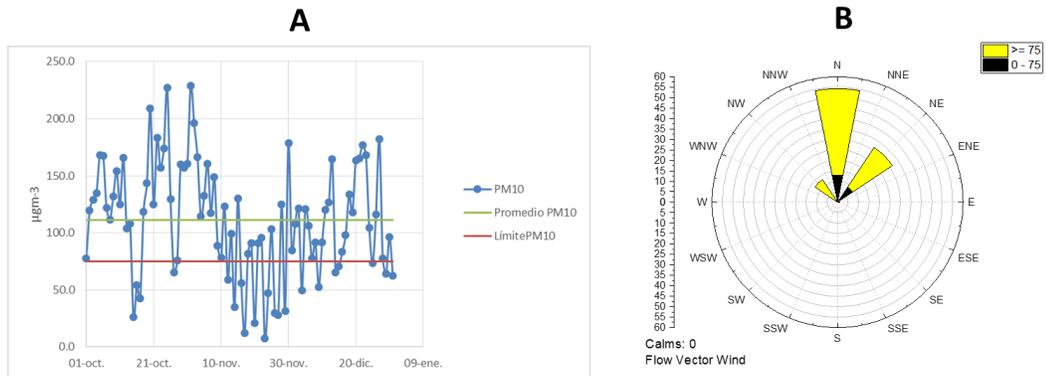


Figura 5. 28. Concentración diaria de  $PM_{10}$  (A) y dispersión (B) para el trimestre 4 del año 2012.

El 77. 174 % de los días del trimestre 4 del año 2012 presentan valor por arriba del límite permisible de concentración  $PM_{10}$ , la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Norte y Noreste.

El análisis de concentración de partículas  $PM_{10}$  para el año 2013 muestra los siguientes resultados trimestrales:

### Trimestre 1

El valor promedio de la concentración de  $PM_{10}$  del trimestre 1 del año 2013 es de  $119.6 \mu\text{g m}^{-3}$  en 24 horas, excediendo por  $44.6 \mu\text{g m}^{-3}$  al límite permisible. Los valores promedio diarios de la concentración de las  $PM_{10}$  y su dispersión se muestran en la Figura 5.29.

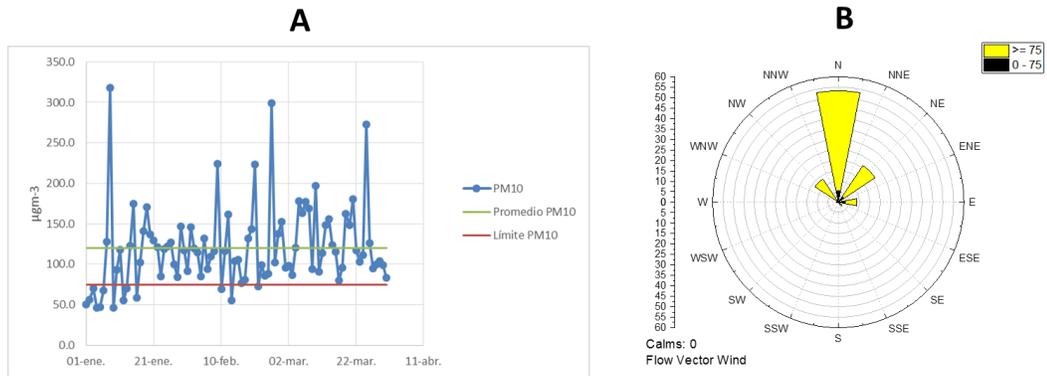


Figura 5. 29. Concentración diaria de PM<sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 1 del año 2013.

El 85.556 % de los días del trimestre 1 del año 2013 presentan valor por arriba del límite permisible de la concentración de las PM<sub>10</sub>, la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Norte.

### Trimestre 2

El valor promedio de la concentración de PM<sub>10</sub> del trimestre 2 del año 2013 es de 111 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas, excediendo por 36 µg/m<sup>3</sup> al límite permisible. Los valores promedio diarios de la concentración de las PM<sub>10</sub> y su dispersión se muestran en la Figura 5.30.

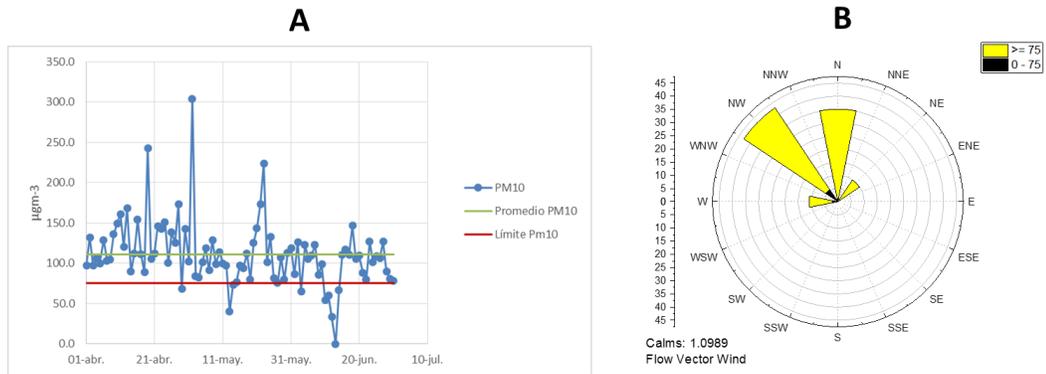


Figura 5. 30. Concentración diaria de  $PM_{10}$  (A) y dispersión (B) para el trimestre 2 del año 2013.

El 90.110 % de los días del trimestre 2 del año 2013 presentaron un valor por arriba del límite permisible de la concentración de las  $PM_{10}$ , la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Noroeste y Norte.

El análisis de concentración de las partículas  $PM_{10}$  para el año 2014 muestra los siguientes resultados para el trimestre 1.

El valor promedio de la concentración de  $PM_{10}$  del trimestre 1 del año 2014 fue de  $127 \mu\text{g m}^{-3}$  en 24 horas, excediendo por  $52 \mu\text{g m}^{-3}$  al límite permisible. Los valores promedio diarios de la concentración de las  $PM_{10}$  y su dispersión se muestran en la Figura 5.31.

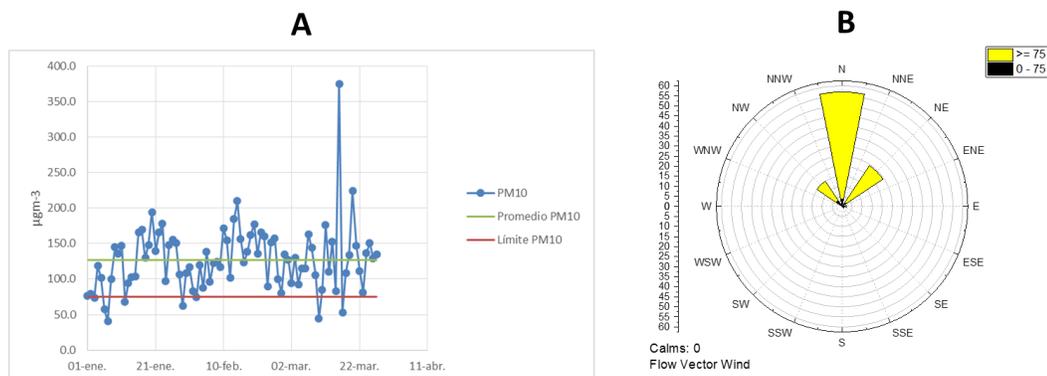


Figura 5. 31. Concentración diaria de PM<sub>10</sub> (A) y dispersión (B) para el trimestre 1 del año 2014.

El 90.698 % de los días del trimestre 1 del año 2014 presentaron un valor por arriba del límite permisible de la concentración de las PM<sub>10</sub>, la dispersión de este trimestre será principalmente hacia el Norte.

A fin de tener un valor de referencia anual, se obtuvo el valor promedio de los trimestres válidos, el cual fue de 111.75 µg<sup>m-3</sup>, indicando que el entorno de la EMA UJED presentó una concentración de 71.75 µg<sup>m-3</sup> por arriba del valor límite anual permisible actual.

Es importante mencionar que la EMA UJED, se encuentra ubicada cercana a un estacionamiento sin revestimiento (no pavimentado), con presencia constante de vehículos circulando, además en el entorno cercano al núcleo universitario donde está situada la estación UJED, existe una planta industrial de Grupo alimentario Tyson, en la cual se tiene una circulación constante (24 horas) de vehículos de carga pesada para el transporte de alimentos.

### 5.6.2 PST

A continuación, se presentan los resultados de la concentración de partículas PST, cuantificadas con equipo de la marca Airmetrics (Modelo: Minivol TAS), de la EMA URUZA-UACH (longitud: -103.599; latitud: 25.897) ubicada en la localidad de Bermejillo del municipio de Mapimí para los dos periodos de muestreo.

En el análisis de dispersión de las PST, se realizó en base al sotavento, que indica hacia donde se dirige el viento.

#### Primer muestreo

El primer muestreo de partículas PST se vio interrumpida por las lluvias, por lo que se logró muestrear 26 días del periodo de 22 de febrero a 23 de mayo del año 2015, los cuales se muestran gráficamente a continuación en la Figura 5.32.

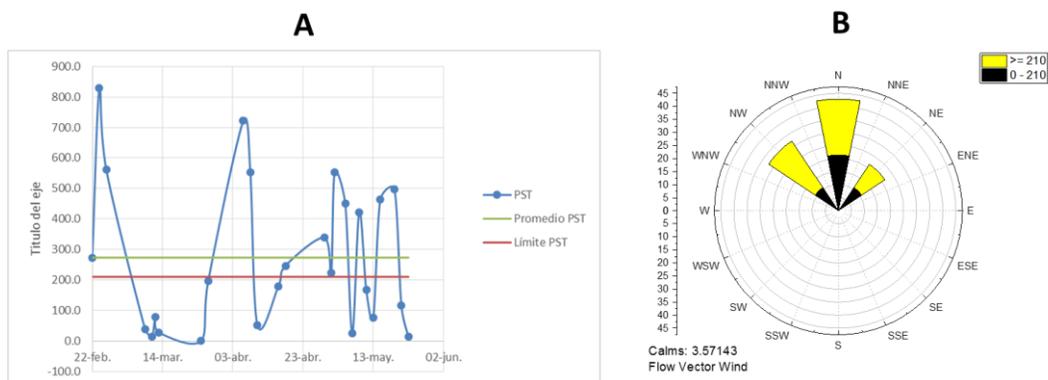


Figura 5. 32. Primer muestreo. Valores de concentración de PST (A) y dispersión (B).

El valor promedio de la concentración de las PST para el primer muestreo es de 273.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando 63.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  por arriba del valor límite permisible. La estación presenta un 50% de datos con valores por arriba del límite permisible, y de

manera general las partículas PST probablemente tuvieron una dispersión hacia el Norte y Noreste.

### Segundo muestreo

El segundo muestreo de partículas PST tuvo un total de 20 muestras de PST, los cuales se muestran gráficamente en la Figura 5.33

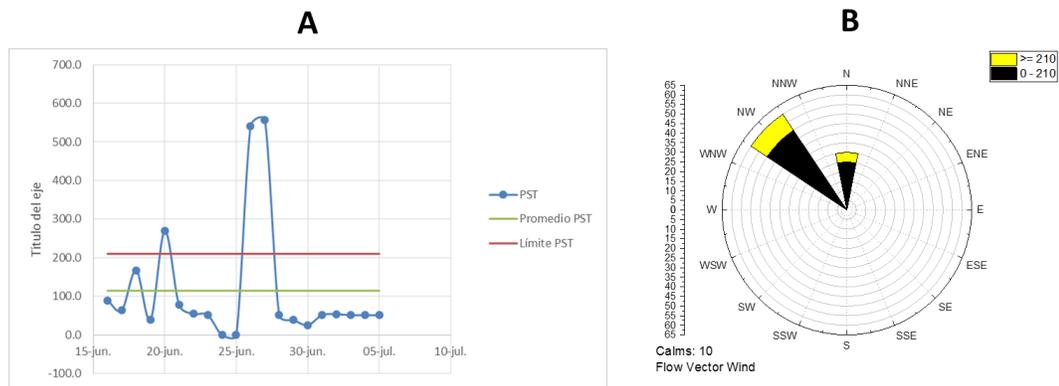


Figura 5. 33. Segundo muestreo. Valores de concentración de PST (A) y dispersión (B).

El promedio de concentración de las PST es de  $114.4 \mu\text{gm}^{-3}$ , el cual está  $95.6 \mu\text{gm}^{-3}$  por debajo del valor límite permisible. Solo un 15% de los días muestreados presentaron valores por arriba de valor límite permisible. La dispersión de las partículas fue hacia el Noroeste.

El valor promedio para ambos muestreos fue de  $193.85 \mu\text{gm}^{-3}$ , lo cual indica que en el periodo de muestreo en el entorno inmediato de la EMA URUZA estuvo  $16.15 \mu\text{gm}^{-3}$  por debajo del valor límite de concentración PST, de acuerdo a la NOM-025-SSA-1993.

Es importante mencionar que si se comparan los dos periodos de muestreo se puede deducir que en el primer periodo de muestreo existieron más días con concentraciones de PST elevadas, con máximos de alrededor de  $800 \mu\text{gm}^{-3}$ . Lo anterior puede ser debido a que la EMA URUZA se encontraba en un área de producción agrícola, donde las prácticas culturales de producción son constantes. Un detalle importante es que a unos metros de la EMA URUZA existe un camino sin revestir, el cual fue constantemente transitado en el primer periodo, ya que el segundo periodo coincidió con el ciclo vacacional de la URUZA-UACH.

## **5.7 Riesgo socio-ambiental en La Comarca Lagunera**

Los cambios promedio en el clima calculados en el presente estudio indicaron que para un futuro cercano se esperan aumentos en la TMA (+ 1.363 °C) y decrementos en la PMA (- 51 mm), lo cual es coincidente con el patrón de cambios globales que se describe en la sección Cambio Climático a Corto Plazo del quinto informe del IPCC (AR5) (Kirtman et al., 2013), donde se menciona que de manera general en un futuro cercano (2015 - 2039) la precipitación en las zona áridas (incluyendo gran parte de las zonas subtropicales) tendrá una disminución, sin embargo, la temperatura tendrá un aumento que podría llegar a ser mayor a 1°C pero muy poco probable mayor a 1.5°C.

Lavell et al. (2012) mencionan que los aumentos en la temperatura inducirán a un incremento en la evapotranspiración, lo cual en conjunto con el déficit de la precipitación y el abatimiento de las fuentes de agua subterránea, exacerbaban las condiciones de sequía. Seneviratne et al., (2012) indican que los cambios en el clima proyectados para el cuarto informe del IPCC (AR4) agudizarían las sequías en América central y de México.

Magaña et al. (2012) realizaron una evaluación del impacto del cambio climático, utilizando los escenarios del AR4, en los recursos hídricos del Norte de México, los resultados mostraron que los aumentos de temperatura pueden ser más grandes en el noroeste de los que en la parte noreste del país, la precipitación tiene grandes probabilidades de disminución sobre la parte Noreste de México, con reducciones de hasta un 30 %.

La Comarca Lagunera se encuentra en la parte centro Norte de México, es considerada la cuenca lechera más grande del Norte del país, la cual se caracteriza por su tener climas secos, y tener una agricultura de riego, donde se siembran forrajes, principalmente el maíz y la alfalfa, los cuales tienen una gran demanda de agua (Wong-Romero et al., 2014).

La agricultura de la región se basa principalmente en la disponibilidad de agua de las presas regionales, cuyos volúmenes se conducen a través del río Nazas. Pero también el agua subterránea tiene un papel fundamental, no sólo en la agricultura, sino en el abastecimiento de agua para el consumo humano (Traxler et al., 2003).

Estudio regionales de la Comarca Lagunera utilizando los escenarios del AR4, han alertado una disminución en la precipitación y un incremento en la temperatura, lo cual puede tener consecuencias en la producción agrícola de la región, por también un efecto negativo sobre el abastecimiento de agua para la población, debido a la disminución de los escurrimientos, los cuales sirven para recargar los mantos freáticos subterráneos (López-Santos & Martínez-Santiago, 2015).

En el presente estudio los indicadores de sequía erosión eólica laminar (EEL) e índice de aridez (IA) calculados para un futuro cercano en el escenario RCP 8.5, muestran incrementos, tanto para la pérdida de suelo por efecto del viento como para la condición de aridez.

La pérdida de suelo por acción del viento calculada para el histórico fue de 189.9 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y para el futuro cercano fue de 196.2 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Dentro de este contexto la SEMANART (2013) menciona que la erosión eólica afecta principalmente a las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país. A escala nacional, 181 200 km<sup>2</sup> (equivalentes al 9.5% del territorio) muestran evidencias de erosión eólica. Las entidades más afectadas por la erosión eólica, en proporción a su superficie en 2002, fueron Chihuahua (28.5% de su territorio), Tlaxcala (26%), Nuevo León (18.9%) y Durango (17.9%).

Para la zona Norte del estado de Durango, donde se localiza la región Comarca Lagunera, la SEMARNAT (2013) reporta tasas potenciales de pérdida de suelo por acción del viento de altas (50 a 200 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y muy altas (> 200 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), lo cual es coincidente con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Estudios locales (López-Santos & Martínez-Santiago, 2015; López Santos et al., 2013) han reportado tasas de erosión eólica máximas para los municipios de Gómez Palacio y Lerdo para un periodo histórico, mayores de 100 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, y para un futuro cercano menores de 150 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Una de las zonas más afectadas en el periodo histórico y en el futuro cercano por la pérdida de suelo por acción del viento, con tasas de erosión de hasta 196.2, se encuentra

al sur del municipio de Mapimí, afectando principalmente a localidades rurales como lo son Bermejillo, San José de Bellavista, Roma-Texas, San Isidro, La Purísima, San Alejandro, las cuales se distribuyen contiguas a la Carretera Federal #30, tramo Bermejillo – Mapimí. En esta parte del área de estudio, ha sido puesto en evidencia el uso irracional del agua subterránea por la mina La Platosa, la cual influye en el decremento y contaminación de los mantos freáticos (Rojas, 2015).

Para el índice de aridez, tomando en cuenta el principio de que menor valor del índice corresponde una mayor aridez y viceversa, los valores mínimos de aridez mostraron un decremento entre en el periodo histórico y el periodo futuro cercano, pasando de 6.352 a 4.372, respectivamente. Lo cual indica un incremento en la aridez de la región, y según la clasificación de De Martonne, convertirse de una zona árida a una zona hiperárida.

López Santos et al. (2013) indicaron que para el municipio de Gómez Palacio entre el periodo histórico, y el periodo futuro, no mencionan aumentos en el grado de aridez, pero sí se espera que las zonas con valores bajos del índice de aridez aumenten su distribución territorial en el municipio. Para el caso de Lerdo, López-Santos & Martínez-Santiago (2015) mencionaron un aumento en el grado de aridez entre el histórico y el futuro cercano, pero también aumentos en la extensión territorial en las zonas con valores bajos del índice.

Los cambios en la aridez calculados en el presente estudio indicaron que el municipio de Gómez Palacio será el más afectado por los cambio en la aridez, ya que para un futuro cercano se espera que este territorio pase de ser una zona árida a ser una zona hiperárida, lo cual tendría efectos negativos que impactarían directamente la

disponibilidad y calidad de agua, afectando a su población, así como a los ecosistemas naturales y agroecosistemas.

Los indicadores EEL e IA, en cuanto a magnitud y distribución territorial, fueron un referente para la identificación de áreas críticas o vulnerables, tanto para el periodo histórico como para el futuro cercano, las cuales se dividieron en zonas potenciales y zonas prioritarias. Para los sistemas socio-ambientales este tipo de determinación permiten orientar y optimizar las estrategias de mitigación y de adaptación a los peligros actuales y futuros, en donde la exposición de sus habitantes es un factor fundamental para el análisis de riesgo (Chávez & González, 2015 CONAGUA, 2011; Arriaga-Cabrera, 2009).

Las zonas potenciales se encontrarán, para el periodo histórico y para el futuro cercano, principalmente en la parte Oeste del municipio de Mapimi, y en partes de Lerdo, ya que ahí es donde existe una mayor disponibilidad de agua proveniente de las precipitaciones y temperaturas más bajas, esto puede ser debido a que en esta zona inicia el ecotono o zona de transición, entre las zonas áridas y la sierra madre occidental (González-Elizondo et al., 2012).

En este contexto, diversos estudios (Muñoz et al., 2012; Jacobo-Salcedo et al., 2011) han puesto de manifiesto la abundancia de especies faunísticas en el municipio de Mapimí, las cuales incluso se utilizan con fines medicinales. Además importante mencionar que a 130 km de Mapimí se encuentra la Presa Lázaro Cárdenas, principal fuente de agua para la agricultura de riego de la región (Chávez-Ramírez et al., 2013).

Las zonas prioritarias se distribuirán en ambos periodos de tiempo en todos los municipios, y representan los sitios con mayor vulnerabilidad y exposición de la población. Su distribución estará asociada en una gran medida a las clases de textura fina (1) y gruesa (3) del área de estudio, a través del índice CATEX, en cual indica su alta erodabilidad.

Belnap et al. (2007) mencionaron que los suelos arenosos son inherentemente más erosionables que los suelos de textura fina, ya que tienen menos sal, arcilla y limo para mejorar la formación de costras física y la agregación del suelo.

Pero también es importante tomar en cuenta que estas zonas poseen una cobertura vegetal pobre, como los pastizales sobre pastoreados, o han sido utilizadas para la producción agrícola de temporal, lo cual en conjunto con la degradación de la precipitación hace que uno de los principales problemas ecológicos sean la generación y transporte de partículas (Li et al., 2007; Okin, 2005).

Singh et al. (2012) mencionaron que las áreas agrícolas, especialmente las de temporal son contribuidores importantes en la emisión de sedimentos a la atmósfera. El aire cargado de sedimentos, en ocasiones, conlleva a cierres de carreteras debido a la visibilidad cero, pero además contienen partículas  $PM_{10}$ , un contaminante del aire que afecta negativamente a la salud humana, ya que se les considera capaces de bloquear los mecanismos de defensa del aparato respiratorio, a nivel de vías aéreas superiores y alveolos (DOF, 2014b).

Las estaciones de monitoreo atmosférico se encontraron en el área de estudio mostraron concentraciones medias de  $PM_{10}$  de  $111.75 \mu\text{gm}^{-3}$  y de PST de  $193.85 \mu\text{gm}^{-3}$ ,

valores por arriba o cercanos a los límites permisibles por las normas oficiales mexicanas NOM-025-SSA1-2014, para PM10 y NOM-025-SSA1-1993, para PST.

Lo anterior es de importancia en la región, ya que para el periodo futuro cercano se espera un aumento en la población del área de estudio, lo cual implica una mayor exposición de población, incrementando así la vulnerabilidad a los riesgos ambientales descritos en el presente estudio.

## 6 CONCLUSIONES

Los indicadores EEL, IA permitieron advertir que la unidad de estudio en un futuro cercano, periodo 2015 – 2039, tendrá aumentos en la pérdida de suelo, así como también un aumento en la aridez, lo cual implica una disminución de la calidad ambiental, como consecuencia de los cambios probables tanto en el clima como en los usos del suelo en la unidad de estudio.

Las concentraciones medias de  $PM_{10}$  y PST se encuentran por encima o cercanas a los límites permisibles para mantener una buena salud ambiental, lo cual incrementa la vulnerabilidad debido a los efectos colaterales de sobre exposición a estas partículas como consecuencia de una condición de déficit hídrico en la unidad de estudio.

La determinación de áreas críticas es un referente importante para determinar la cantidad de población expuesta a los peligros actuales y futuros producidos por el cambio climático, así como para orientar y optimizar las estrategias de mitigación y de adaptación.

Los resultados del presente estudio deben de ser un referente para advertir a la población de los riesgos a los cuales están expuesto y las consecuencias que éstos pueden generar para su calidad de vida, además de ser un apoyo para los tomadores de decisiones acerca de prevenir impactos en los recursos naturales como lo son el suelo y el agua.

## 7 LITERATURA CITADA

- Ackerman, S.A, Knox, J. A. 2011. *Meteorology: Understanding the Atmosphere*. Third Edition. Jones & Bartlett Publishers. 580 pp.
- Al-Kaisi M., R. W. Elmore, J. G. Guzman, H. M. Hanna, Ch. E. Hart, M. J. Helmers, E. W. Hodgson, A. W. Lenssen, A. P. Mallarino, A. E. Robertson, and J. E. Sawyer. (2012). Drought impact on crop production and the soil environment: 2012 experiences from Iowa. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol., 68, 1: 19-24. DOI:10.2489/jswc.68.1.19A.
- Aguado, E., & Burt, J. E. (2007). *Understanding weather and climate* (p. 562). Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.
- Anil, I., Golcuk, K., & Karaca F. (2014) ATR-FTIR spectroscopic study of functional groups in aerosols: the contribution of a Saharan dust transport to urban atmosphere in Istanbul, Turkey *Water Air Soil Pollut* 225:1-14 doi:10.1007/s11270-014-1898-9.
- Annalee, Y. A. S. S. I., Tord, K., de Kok, T., & Tee, G. L. (2002). *Salud ambiental básica*. PNUMA, oficina regional para América Latina y El Caribe, OMS, Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y microbiología-Ministerio de Salud Pública de Cuba. Serie de textos básicos para la formación ambiental.
- Arriaga-Cabrera, L., Aguilar, V., Espinoza, J. M., Galindo, C., Herrmann, H., Santana, E., ... & Rosenzweig, L. (2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. En: *Capital natural de México*, 2, 433-457

- Baldi, G. L., García, E. Q. (2005). Calidad de vida y medio ambiente. La psicología ambiental. Universidades, julio-diciembre, 9-16.
- Baede, A. P. M., Ahlonsou, E., Ding, Y., & Schimel, D. S. (2001). The climate system: an overview. In *Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 87-98). Cambridge University Press.
- Batjargal, Z., Dulam, J., & Chung, Y. S. (2006). Dust storms are an indication of an unhealthy environment in East Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 114(1-3), 447-460.
- Belnap, J., Phillips, S. L., Herrick, J. E., & Johansen, J. R. (2007). Wind erodibility of soils at Fort Irwin, California (Mojave Desert), USA, before and after trampling disturbance: implications for land management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1), 75-84.
- Benestad, R. E., & Schmidt, G. A. (2009). Solar trends and global warming. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- Beran, M. A., & Rodier, J. A. (1985). Hydrological aspects of drought: a contribution to the International Hydrological Programme (Vol. 39). Unesco.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., ... & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease an update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
- Buschiazzo, D. E., Panebianco, J., Guevara, G., Rojas, J., Zurita, J. J., Bran, D., ... & Hurtado, P. (2009). Incidencia potencial de la erosión eólica sobre la degradación

del suelo y la calidad del aire en distintas regiones de la Argentina. *Ciencia del suelo*, 27(2), 255-260.

Buschiazzo, D. E., & Aimar, S. B. (2003). *Erosión eólica: Procesos y Predicción*. Viento, Suelo y Plantas. Golberg y Kin (eds). INTA.

Cabrera-Silva, S. (2005) *Radiación ultravioleta y salud*. Editorial Universitaria. Santiago de Chile. ISBN: 956-11-1790-8.

Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., Grau, P. de, González, R. P., ... Bravo, M. E. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional*. Informe Final de Proyecto. Recuperado el: 10/05/2016 de: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>.

Chávez, H. G., & González, M. D. J. G. (2015). Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(27), 8-23.

Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L., Dzul-López, E., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Chávez-Simental, J. A. (2013). Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(4), 115-126.

CMIP5 (2013) *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: Overview*. Working Group on Coupled Modelling. World Climate Research Program. Consultado el 15/04/2016 de: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/index.html?submenuheader=0>.

Cohen, I. S., Spring, Ú. O., Padilla, G. D., Paredes, J. C., Inzunza Ibarra, M. A., López, R. L., & Díaz, J. V. (2013). Forced migration, climate change, mitigation and adaptive policies in Mexico: Some functional relationships. *International Migration*, 51(4), 53-72.

CONAGUA (2011) Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.

CONANP (2006) Programa de Conservación y Manejo de la Reserva de la Biosfera de Mapimí. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D.F. ISBN: 968-817-762-8.

De Martonne, E. (1927) Regions of Interior-Basin Drainage. *Geographical Review*, Vol. 17, No. 3. pp. 397-414.

De Martonne, E., (1926) Aréisme et indice d'aridité. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 182, 1395–1398.

Dai, A., 2010. Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change* 2, 45–65.

DOF (2014a). NOM-020-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 19/09/2014. Recuperado el 27/08/2015 de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014).

DOF (2014b) NOM-025-SSA1-2014. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 20/08/2014. Recuperado el 08/03/2016 de: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014).

DOF (2010) NOM-022-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 08/09/2010. Recuperado el 27/08/2015 de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5158348&fecha=08/09/2010](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5158348&fecha=08/09/2010).

DOF (2005) NOM-025-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 26/09/2005. Recuperado el 27 / 08 / 2015 de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994).

DOF (2003) NOM-035-SEMARNAT-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 23/04/2003. Recuperado el 26 / 11 / 2015 de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994).

DOF (1994a) NOM-021-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 19/09/1994. Recuperado el 27/08/2015 de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4780110&fecha=23/12/1994](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780110&fecha=23/12/1994).

DOF (1994b) NOM-023-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 23/12/1994. Recuperado el 27/08/2015 de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780125&fecha=23/12/1994).

DOF (1994c) NOM-026-SSA1-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 23/12/1994. Recuperado el 27/08/2015 de: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4780245&fecha=23/12/1994](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4780245&fecha=23/12/1994).

DOF (1993) NOM-035-ECOL-1993. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 18 octubre de 1993. Recuperado el de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4794235&fecha=18/10/1993](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794235&fecha=18/10/1993).

Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva manual. Clark University. Worcester, Massachusetts, USA.

El Siglo de Torreón (2015) Fallan 11 pozos por tolvana y fuertes vientos. Nota periodística. 22-ago-2015. Recuperado de: <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1145104.fallan-11-pozos-por-tolvanera-y-fuertes-vientos.html>.

El Universal (2013) Afectan tolvana a la Comarca Lagunera. Nota periodística. Recuperado de: <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/905958.html>.

Excelsior (2014) Pronostican tolvana y remolinos en Chihuahua y Coahuila. Nota periodística. Recuperado de: <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2014/04/27/956063>.

EEA (2012) Environmental Quality. Glossary. Environmental terminology and discovery service. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. Recuperado el 07/10/2015 de: [http://glossary.eea.europa.eu/EEAGlossary/E/environmental\\_quality](http://glossary.eea.europa.eu/EEAGlossary/E/environmental_quality).

Emberger, L., (1930) La végétation de la région méditerranéenne: essai d'une classification des groupements végétaux. *Revue Générale de Botanique* 42 (641–662), 705–721.

Enkerlin, E. C., Cano, G., Garza Cuevas, R. A., & Vogel Martínez, E. (1997). *Ciencia ambiental y desarrollo sostenible*. In *Ciencia ambiental y desarrollo sostenible*. International Thomson.

FAO (2007) Secuestro de carbono en tierras áridas. En: Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos (FAO), no. 102 / FAO, Roma (Italia). Dirección de Fomento de Tierras y Aguas , 2007 , 120 p. ISBN: 978-92-5-305230-1.

FAO & ITPS (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy

Fernández, A. E., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A. C. y Trejo Vázquez, R. I. (2015) Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR en trámite. Obtenido de: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>.

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen (2013) Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Flato, G., 2011: Earth system models: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Climate Change*, 2, 783–800.
- García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Instituto de Geografía. UNAM, México, D.F. 246 pp.
- Garmendia, A. S., Alcaide, A. S., Crespo, C. S., & Garmendia, L. S. (2005). *Evaluación de impacto ambiental*. Editorial: Pearson Educación.
- Geng, Q., Wu, P., Zhang, Q., Zhao, X., & Wang, Y. (2014). Dry/wet climate zoning and delimitation of arid areas of Northwest China based on a data-driven fashion. *Journal of Arid Land*, 6(3), 287-299. doi: 10.1007/s40333-013-0206-7.
- Giorgi, F. & Mearns, L. (2001) Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. *Journal of Climate*, 15 (10), pp. 1141-1158.
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., ... & Luterbacher, J. (2010). Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 48(4).
- Griffin, D. W., & Kellogg, C. A. (2004). Dust storms and their impact on ocean and human health: dust in Earth’s atmosphere. *EcoHealth*, 1(3), 284-295.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). *Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis*. *Acta botánica mexicana*, (100), 351-403.

- Goudie, A.S., Middleton, N.J., 2006. Desert Dust in the Global System. Springer, Berlin (287 pp.).
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment international*, 63, 101-113.
- Kim, H. S., Chung, Y. S., & Lee, S. G. (2012). Characteristics of aerosol types during large-scale transport of air pollution over the Yellow Sea region and at Cheongwon, Korea, in 2008. *Environmental monitoring and assessment*, 184(4), 1973-1984. doi:10.1007/s10661-011-2092-9.
- HEI (2000) Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of particulate air pollution and mortality. Health Effects Institute. Recuperado el 27/08/2015 de: <http://pubs.healtheffects.org/view.php?id=6>.
- Heink, U., & Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10(3), 584-593.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., y Jarvis, A. (2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces For Global Land Areas. *International Journal Of Climatology*, 25 (15), 1965 - 1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
- Hrnjak, I., Lukić, T., Gavrilov, M. B., Marković, S. B., Unkašević, M., & Tošić, I. (2014). Aridity in Vojvodina, Serbia. *Theoretical and applied climatology*, 115(1-2), 323-332.
- Hufschmidt, M. M., James, D. E., Meister, A. D., Bower, B. T., & Dixon, J. A. (1983). *Environment, natural systems, and development: an economic valuation guide*.

INEGI (2015) Censos y conteos de población y vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 02/05/2016 de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/>.

INEGI (2014) Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, Ags. Mex.

INEGI (2011) Guía para la interpretación de Cartografía. Edafología Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, Ags. Mex. ISBN: 978-607-494-162-3.

INECC (2009) Normas Mexicanas de Calidad del Aire. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado el 27/08/2015 de: <http://www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/559-calair-nom-cal-air>.

INEGI (2007a) Conjunto de Datos Vectoriales de Edafología Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, Ags. Mex.

INE (2007) Reserva de la Biosfera de Mapimí. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

INEGI (2000) Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, Ags. Mex.

IMTA (2013) Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III©) Versión 3.2. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado el 25/11/2015 de: <http://www.imta.gob.mx/productos/software>.

IPCC (2014a) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC (2014b) Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs

IPCC (2013a) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2013b) Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry, O.F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Van Der Linden and C. E. Hanson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.

Jáuregui, E. (1989). The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology*, 9(2), 169-180.

Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51-63.

Jacobo-Salcedo, M. R., Alonso-Castro, A. J., & Zarate-Martinez, A. (2011). Folk medicinal use of fauna in Mapimi, Durango, México. *Journal of ethnopharmacology*, 133(2), 902-906.

Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167.

Khalili, A. (1992) *Arid and semiarid regions of Iran*. Proceeding of Seminar on the problems of Iranian Deserts and Kavirs, 17–20 May, Yazd, Iran, pp 566–579.

- Kiehl, J. T., & Trenberth, K. E. (1997). Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197-208.
- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., ... & Prather, M (2013) Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Köppen, W. (1936): *Das geographische System der Klimate (Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil C)*.
- Lal, R., Delgado, J. A., Gulliford, J., Nielsen, D., Rice, C. W., & Van Pelt, R. S. (2012). Adapting agriculture to drought and extreme events. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(6), 162A-166A. doi:10.2489/jswc.67.6.162A.
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. SEMARNAT*.
- Lang, R. (1915) Versuch einer exakten Klassifikation der Boden in klimatischer und geologischer Hinsicht. *Int. Mitt. Bodenk. Volume 5, Pages 312-346*.
- Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., ... & Myeong, S. (2012). Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, 25-64.

- Li, J., Okin, G. S., Alvarez, L., & Epstein, H. (2007). Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA. *Biogeochemistry*, 85(3), 317-332.
- Lim, B., Spanger-Siegried, E., Burton, I., Malone, E., & Huq, S. (2005). Marco de Políticas de adaptación al cambio climático. Desarrollando Estrategias, Políticas y Medidas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Logar, I., & van den Bergh, J. C. (2013). Methods to assess costs of drought damages and policies for drought mitigation and adaptation: review and recommendations. *Water resources management*, 27(6), 1707-1720. DOI 10.1007/s11269-012-0119-9.
- López-Santos, A. (2016) Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global.¿ Es posible lograrlo en México? *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 34(2), 239-249.
- López-Santos, A., & Martínez-Santiago, S. (2015). Use of two indicators for the socio-environmental risk analysis of Northern Mexico under three climate change scenarios. *Air Quality, Atmosphere & Health*. August 2015, Volume 8, Issue 4, pp 331-345. DOI: 10.1007/s11869-014-0286-3.
- López-Santos, A., Pinto-Espinoza, J., Ramírez-López, E. M., Martínez Prado, M. A. (2013) Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Atmósfera*, 26(4), 479-498.
- Lucas-Carrasco, R. (2012). The WHO quality of life (WHOQOL) questionnaire: Spanish development and validation studies. *Quality of Life Research*, 21(1), 161-165.

- Magaña, V. (2013) Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático. Informe No. 3 para el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 60p. México, D.F.
- Magaña, V., Zermeño, D. & Neri, C. (2012) Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*, 51(2), 171.
- Magaña, V. (2010) Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magaña, V. (2006) El cambio climático global, ¿Qué significa?. En: Urbina, J. Martínez, F. (eds.) Más allá del cambio climático: Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Mercado-Mancera, G., Troyo-Diéguez, E., Aguirre-Gómez, A., Murillo-Amador, B., Beltrán-Morales, L. F., & García-Hernández, J. L. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zona áridas. *Universidad y ciencia*, 26(1), 51-64.
- Merrill, S. D., Black, A. L., Fryrear, D. W., Saleh, A., Zobeck, T. M., Halvorson, A. D., & Tanaka, D. L. (1999). Soil wind erosion hazard of spring wheat–fallow as affected by long-term climate and tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6), 1768-1777.

- Middleton, N. J., & Sternberg, T. (2013). Climate hazards in drylands: a review. *Earth-Science Reviews*, 126, 48-57.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Mukherjee, S. (2012). *Extraterrestrial Influence on Climate Change*. Springer Science & Business Media.
- Muñoz, D. R., Espino, A. O., Estrada, J. L. R., & Pacheco, S. V. L (2012) Inventario de mamíferos en el macizo montañoso denominado sierra “El Sarnoso” Durango, México.
- Musters, C. J. M., De Graaf, H. J., & Ter Keurs, W. J. (1998). Defining socio-environmental systems for sustainable development. *Ecological Economics*, 26(3), 243-258.
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Special report on emissions scenarios. Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2000., 1.
- NASA (2015). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, California Institute of Technology.
- Nkonya, E., N. Gerber, P. Baumgartner, J. von Braun, A. de Pinto, V. Graw, E. Kato, J. Kloos, and T. Walter. 2011. The economics of land degradation. Toward an

integrated global assessment. *Development Economics and Policy*. Vol. 66. Peter Lang Publishing Group. Frankfurt, Alemania.

OCDE (2003) Core Environmental Indicators. Development, measurement and use. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, 37 pp. Recuperado el 27/08/2015 de: <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>.

Ogurtsov, M. G., & Raspopov, O. M. (2011). Possible impact of interplanetary and interstellar dust fluxes on the Earth's climate. *Geomagnetism and Aeronomy*, 51(2), 275-283.

Okin, G. S. (2005). Dependence of wind erosion and dust emission on surface heterogeneity: Stochastic modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D11).

Olmedo, M. T. C., Pontius, R. G., Paegelow, M., & Mas, J. F. (2015). Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. *Environmental Modelling & Software*, 69, 214-221.

Orea, D. G., & Villarino, M. T. G. (2013). *Evaluación de impacto ambiental*. Mundi-Prensa Libros.

Ortiz-Solorio, C. A. 1987. *Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana*. 3ª edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Parliament of Australia (2010) *Factors influencing climate change*. Recuperado el: 11/05/2016 de:

[http://www.aph.gov.au/About\\_Parliament/Parliamentary\\_Departments/Parliamentary\\_Library/Browse\\_by\\_Topic/ClimateChangeold/whyClimate/factors](http://www.aph.gov.au/About_Parliament/Parliamentary_Departments/Parliamentary_Library/Browse_by_Topic/ClimateChangeold/whyClimate/factors).

Paden, D.B., 2001. Air pollution in asthma: effects of pollutants on airway inflammation. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* 87, 12–17.

Penck, A., 1910. Versuch einer Klimaklassifikation auf physiogeographischer Grundlage. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* 12, 236–246.

Pelkoswski, J. (2014). Insolación terrestre en la climatología teórica: de Halley a Milankovitch. *Tiempo y Clima*, 5(13). Consultado el 10/04/2016 de: <http://pkp.ameweb.org/index.php/TyC/article/view/508>.

Pidwirny, M. (2006). *Fundamental of Physical Geography*. University of British Columbia Okanagan. Consultado el 10/04/2016 de: [www.PhysicalGeography.net](http://www.PhysicalGeography.net).

Quan, C., Han, S., Utescher, T., Zhang, C., & Liu, Y. S. C. (2013). Validation of temperature–precipitation based aridity index: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 86-95.

RAE (2014) *Diccionario de la Lengua Española*. Vigésima segunda edición. Recuperado el 06/10/2015 de: <http://lema.rae.es>.

Rahimi, J., Ebrahimpour, M., & Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 112(3-4), 409-418.

Rashki, A., deW Rautenbach, C. J., Eriksson, P. G., Kaskaoutis, D. G., & Gupta, P. (2013). Temporal changes of particulate concentration in the ambient air over the city of

- Zahedan, Iran. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6(1), 123-135.  
doi:10.1007/s11869-011-0152-5.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2004). Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152(1-4), 129-152.  
DOI:10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c148.
- Rivera, R. R., Crespo, P. G., Arteaga, R. R & Quevedo, A. (2007) Comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, México. *Terra Latinoamericana* 25: 383-392.
- Rojas, C. (2015) Campesinos advierten que el agua de la platosa es mortal. *Periodico Milenio-Laguna. Sección Región*. (30/04/2015).
- Romera, C. J. (2007) *Calidad de Vida: Renta*. Universidad Politécnica de Madrid.  
Recuperado el 06/04/2016 de: <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-calidad-de-vida.html>.
- Rosales, M. A., Cuellar-Ortiz, S. M., de la Paz Arrieta-Montiel, M., Acosta-Gallegos, J., & Covarrubias, A. A. (2013). Physiological traits related to terminal drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(2), 324-331.
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3), 938-943.

- Savage, B. D., & Mathis, J. S. (1979). Observed properties of interstellar dust. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 17, 73-111.
- Scafetta, N., and B. J. West (2008), Is climate sensitive to solar variability? *Phys. Today*, 3, 50–51.
- Scafetta, N., and B. J. West (2007), Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S03. doi:10.1029/2007JD008437.
- Scafetta, N., & West, B. (2006). Phenomenological solar contribution to the 1900–2000 global surface warming. *Geophysical Research Letters*, 33(5).
- SEDESOL-INE (1998) Ordenamiento Ecológico del territorio. Memoria Técnica y Metodológica, México
- SEMARNAT (2015) Impacto Ambiental. Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental. Recuperado el 08/10/2015 de: <http://www.semarnat.gob.mx/transparencia/transparenciafocalizada/impactoambiental>.
- SEMARNAT (2013) Informe de la situación del medioambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental. Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 28/08/2015 de: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Informe\\_2012.pdf](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf).
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., ... & Reichstein, M. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the

natural physical environment. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, 109-230.

Serway, R. A., Jewett, J. W. (2008). Física para ciencias e ingeniería: Volumen 1. Séptima edición. Cengage Learning Editores. ISBN-10: 607-481-357-4.

Shao, Y. (2008). Physics and modelling of wind erosion (Vol. 37). Springer Science & Business Media. ISBN: 978-1-4020-8894-0.

Shao, Y., & Leslie, L. M. (1997). Wind erosion prediction over the Australian continent. Journal of Geophysical Research -All Series-, 102, 30-091.

Singh, P., Sharratt, B., & Schillinger, W. F. (2012). Wind erosion and PM10 emission affected by tillage systems in the world's driest rainfed wheat region. Soil and Tillage Research, 124, 219-225.

Skidmore, E. L. (1986). Wind erosion climatic erosivity. Climatic change, 9(1-2), 195-208.

Stavi, I., & Lal, R. 2014. Achieving Zero Net Land Degradation: Challenges and opportunities. Journal of Arid Environments.

Stern, N. 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University press. ISBN 9780521700801.

Traxler, G., Godoy-Avila, S., Falck-Zepeda, J., & de Jesús Espinoza-Arellano, J. (2003). Transgenic cotton in Mexico: A case study of the Comarca Lagunera. In The economic and environmental impacts of agbiotech (pp. 183-202). Springer US.

- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311-323.
- UNCCD (2011) *Desertificación: una síntesis visual*. United Nations Convention to Combat Desertification Secretariat. Bonn. Germany.
- UNCCD (2013) 2da Conferencia Científica de la CLD; Aspectos económicos de la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía: Metodologías y análisis para la toma de decisiones. Recuperado el: 25/11/2015 de: <http://2sc.unccd.int/es/inicio>. ISBN: 978-92-95043-65-7.
- Verheye, W. (2006). *Soils of arid and semi-arid areas. Land use, land cover and soil science*, Unesco-EOLSS.
- Vidal de los Santos, E. y Franco-López, J. (2009) *Impacto ambiental: Una herramienta para el desarrollo sustentable*. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. AGT Editor. ISBN: 978-607-7551-23-2
- Walton, K. (1969). *The arid zones*. Transaction Publishers.
- Wathern, P. (2013). *Environmental impact assessment: theory and practice*. Routledge.
- WCED (1987) *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development (WCED), Oxford University Press, Oxford, UK, 300 pp
- WEF (2013) *Global Risks 2013*. World Economic Forum. Eighth Edition. ISBN: 92-95044-50-9.

WEF (2015) Annual Report 2014 - 2015. World Economic Forum. Recuperado el: 19/04/2015 de: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Annual\\_Report\\_2014\\_15.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Annual_Report_2014_15.pdf).

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. 58 pp.

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120.

Woodruff N.P and F.H. Siddoway. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci. Am. Proc.* 29(5); 602-608. Recuperado el 31/08/2015 de: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/pdfs/29/5/SS0290050602>.

Wong, G. W. K. 2014. Air pollution and health. *The Lancet Respiratory Medicine* - 1 January 2014 (Vol. 2, Issue 1, Pages 8-9 ). DOI: 10.1016/S2213-2600(13)70284-4.

Wong-Romero, R., Gutiérrez-del Río, E., Rodríguez-Herrera, S. A., Palomo-Gil, A., Córdova-Orellana, H., & Espinoza-Banda, A. (2014). Aptitud combinatoria y parámetros genéticos de maíz para forraje en la Comarca Lagunera, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 22(2).

Zhou Y., F. Zwahlen, Y. Wang, Y. Li. (2010). Impact of climate change on irrigation requirements in terms of groundwater resources. *Hydrogeology Journal*. Vol. 18: 1571-1582. DOI 10.1007/s10040-010-0627-8.

Zobeck, T. M., & Van Pelt, R. S. (2014). Wind erosion. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. Paper 1409. <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1409>.