



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Proceso de desertificación por influencia natural
y antropogénica en el centro-norte de México**

Tesis que presenta

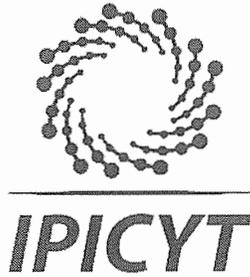
María de Jesús Guevara Macías

Para obtener el grado de

Doctora en Geociencias Aplicadas

**Director de la Tesis:
Dr. Noel Carbajal Pérez**

San Luis Potosí, S.L.P., 7 de febrero de 2020



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "***Proceso de desertificación por influencia natural y antropogénica en el centro-norte de México***" presentada para obtener el Grado de Doctora en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **María de Jesús Guevara Macías** y aprobada el siete de febrero del dos mil veinte por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Director de la tesis

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez
Miembro del Comité Tutorial

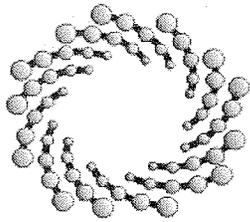
Dr. José Tuxpan Vargas
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de (Nombre del Laboratorio) de la División Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Noel Carbajal Pérez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología **230709** y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.; certifica que en el Acta 014 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 7 días del mes de febrero del año 2020, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Secretario	IPICYT
Dr. José Noel Carbajal Pérez	Sinodal	IPICYT
Dr. Luis Felipe Pineda Martínez	Sinodal externo	UAZ

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

DOCTORA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

María de Jesús Guevara Macías

sobre la Tesis intitulada:

Proceso de desertificación por influencia natural y antropogénica en el centro-norte de México

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Noel Carbajal Pérez

El Jurado, después de deliberar, determinó

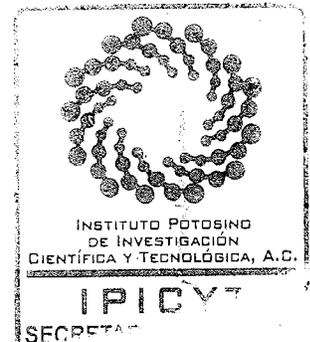
APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 13:08 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 7 días del mes de febrero de 2020.

Dr. Márcial Bonilla Marín
Secretario Académico

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



Dedicatoria

A mis ancestros

Agradecimientos

A Dios, la vida y el Universo por la oportunidad y todo lo aprendido.

Agradezco de forma infinita al Dr. Noel Carbajal por la gran oportunidad profesional y personal a lo largo de estos cuatro años. A los doctores José Tuxpan y Felipe Pineda por sus enseñanzas, aporte y apoyo en de desarrollo de la presente investigación.

A mis Padres por el apoyo brindado. A mis hermanas Liliana, Elvia y Estefanía por su apoyo, comprensión y por escucharme en los momentos difíciles y por hacerme reír.

A mis compañeros en el instituto por sus enseñanzas y ayuda durante la investigación: Francisco, Christian, Pablo e Hiram por sus enseñanzas y apoyo.

A los grandes amigos que encontré en el instituto y a los amigos de años por todo su apoyo.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de tablas	x
Lista de Figuras	x
Resumen	xv
Abstract	xvi

Contenido

Capítulo 1.	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Cambio de uso de suelo en el Desierto de Chihuahua	5
1.2 Proceso de erosión eólica	7
1.3 Tormentas de polvo	9
1.4 Desertificación	11
1.5 Frentes fríos	13
Capítulo 2.	
Caracterización geográfica del área de estudio.	16
2.1 Localización geográfica de la zona de estudio	16
2.2 Geología	18
2.3 Edafología	20
2.4 Clima	21
2.5 Uso de Suelo y Vegetación	22
Capítulo 3.	
Metodología	24
3.1 Análisis y estimación de deterioro de suelo mediante técnicas de percepción remota	24
3.1.1 Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)	26
3.1.2 Índice de Brillo del Suelo (BI)	26
3.1.3 índice de Suelo de Diferencia Normalizada (NDSI)	27

3.2	Análisis de datos de viento	28
3.3	WRF-Chem	29
3.3.1	Modelaciones de tormentas de polvo en el área de estudio	31
3.4	Análisis granulométrico del suelo	34
Capítulo 4.		
Análisis multi-temporal de la degradación del suelo en el centro-norte de México		35
4.1	Cambios en la vegetación- NDVI multitemporal	35
4.2	Estimación de suelo deteriorado mediante la aplicación del BI	38
4.3	Estimación de suelo deteriorado mediante la aplicación del NDSI	44
Capítulo 5.		
Condiciones meteorológicas en el centro-norte de México		47
5.1	Variables meteorológicas	47
5.2	Datos de Temperatura	48
5.3	Humedad relativa	51
5.4	Precipitación	54
5.5	Viento	59
5.5.1	Ciclo anual del viento	73
Capítulo 6.		
Tormentas de polvo en el centro-norte de México		76
6.1	Tormentas de polvo de intensidad baja	76
6.1.1	Condiciones sinópticas de las tormentas de polvo de intensidad baja	76
6.1.2	Temperatura y velocidad de viento en las tormentas de polvo de intensidad baja	79
6.1.3	Humedad relativa en las tormentas de polvo de intensidad baja	83
6.1.4	Desarrollo de las tormentas de polvo de intensidad baja	85
6.2	Tormentas de polvo de intensidad media	87
6.2.1	Condiciones sinópticas de las tormentas de polvo de intensidad media	87
6.2.2	Temperatura y velocidad de viento de las tormentas de polvo de intensidad media	88
6.2.3	Humedad relativa en las tormentas de polvo de intensidad media	91
6.2.4	Desarrollo de las tormentas de polvo de intensidad media	92
6.3	Tormentas de polvo de intensidad alta	94
6.3.1	Condiciones sinópticas de las tormentas de polvo de intensidad alta.	94
6.3.2	Temperatura y velocidad de viento de las tormentas de polvo de intensidad alta	95

6.3.3 Humedad relativa de las tormentas de polvo de intensidad alta	97
6.3.4 Desarrollo de las tormentas de polvo de intensidad alta	97
6.3.4.1 Tormenta de polvo extrema	98
Capítulo 7.	
Discusión	103
Conclusiones	119
Referencias	121
Anexo	128

Lista de tablas

Tabla 3.1 Fechas de las imágenes Landsat.

Tabla 3.2 Datos disponibles en las estaciones agroclimáticas del INIFAP

Tabla 3.3 Fechas de eventos simulados.

Tabla 3.4 Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo WRF-Chem.

Tabla 3.5 Parametrizaciones utilizadas del módulo químico del WRF-Chem.

Tabla 3.6 Tamaños de tamices utilizados

Tabla 6.1 Resumen de eventos de polvo simulados por WRF-Chem. Los datos corresponden al punto central de la D1 en WRF-Chem. La temperatura y la humedad relativa son el promedio de 24 horas para el día del evento. El viento representa el valor máximo alcanzado durante el evento. La concentración de polvo representa el promedio de PM10 para la velocidad máxima del viento.

Tabla 7.1 Días con vientos mayores a 9 m/s por estación en el periodo 2005-2017.

Lista de figuras

Figura 1.1 Porcentaje de Participación de los principales usos generadores de cambio, en la pérdida de vegetación natural entre 1976 y 2016

Figura 1.2 Degradación de suelos en

Figura 1.3 Ciclos de realimentación de la desertificación: A. ciclo de realimentación social y B. Ciclo de realimentación biofísico.

Figura 1.4 Vista vertical del estado del tiempo a través de un frente

Figura 1.5 Frentes fríos en el periodo de 2001-2016

Figura 2.1 Localización geográfica de las áreas de trabajo.

Figura 2.2 Regionalización fisiográfica del Estado de Zacatecas

Figura 2.3 Geología en la zona de estudio

Figura 2.4 Suelos dominantes en la zona de estudio

Figura 2.5 Climas dominantes en la zona de estudio

Figura 2.6 Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio.

Figura 3.1 Localización de las estaciones agroclimáticas y puntos de muestras de suelo.

Figura 3.2 Localización geográfica de los dominios: D1=dominio 1 y D2= dominio 2

Figura 4.1 Resultados del NDVI para el mes de febrero a) 1996 y b) 2016

Figura 4.2 Áreas estimadas de NDVI para el mes de febrero de 1996 y 2016

Figura 4.3 Resultados del NDVI para el mes de octubre: a) 1996 y b) 2015

Figura 4.4 Áreas estimadas de NDVI para el mes de octubre de 1996 y 2015

Figura 4.5 Clasificación de áreas deterioradas basadas en la Bright Index (BI) durante la estación lluviosa: a) octubre 1995, b) octubre 1996 y c) octubre 2015.

Figura 4.6 Precipitación para varios meses durante: a) 1995, b) 1996 y c) 2015. Las flechas indican las fechas (31 de octubre de 1995, 17 de octubre de 1996, 22 de octubre de 2015) cuando las imágenes fueron tomadas.

Figura 4.7 Clasificación de áreas deterioradas basadas en la Bright Index (BI) durante el mes de febrero en los siguientes años: a) 1996 y b) 2016.

Figura 4.8 Áreas estimadas de BI para el mes de octubre de 1996 y 2015

Figura 4.9 Áreas estimadas de BI para el mes de octubre de 1996 y 2015.

Figura 4.10 Resultados del NDSI para la zona de estudio en el mes de febrero: a) 1996 y b) 2016.

Figura 4.11 Áreas estimadas de NDSI para el mes de febrero de 1996 y 2016

4.12 Resultados del NDSI para el mes de octubre: a) 1996 y b) 2015

Figura 4.13 Áreas estimadas de NDSI para el mes de octubre de 1996 y 2015

Figura 5.1 Localización geográfica de las estaciones del INIFAP, los números indican la estación por orden alfabético.

Figura 5.2 Temperatura en el mes de enero, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.3 Temperatura en el mes de abril, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.4 Humedad relativa en el mes de enero en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.5 Humedad relativa en el mes de abril en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía.

Figura 5.6 Precipitación mensual en el mes de enero en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía.

Figura 5.7 Precipitación mensual en el mes de abril en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.8 Velocidad máxima de viento en el mes de enero en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.9 Velocidad máxima de viento en el mes de febrero en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.10 Velocidad máxima de viento en el mes de marzo en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.11 Velocidad máxima de viento en el mes de abril en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.12 Velocidad máxima de viento en el mes de diciembre en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Figura 5.13 Velocidad máxima de viento en la estación de Ábrego en el periodo invernal 2010-20110, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Figura 5.14 Velocidad máxima de viento en la estación de U.A. Agronomía en el año de 2006, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Figura 5.15 Velocidad máxima de viento en la estación de Emancipación en el año de 2008, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Figura 5.16 Velocidad máxima de viento en la estación de Ábrego en el año de 2011, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Figura 5.17 Velocidad máxima de viento en la estación de Rancho Grande en el año de 2013, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Figura 5.18 Velocidad máxima de viento en la estación de U.A. Agronomía en el año de 2016, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Figura 5.19 Velocidad máxima absoluta de viento, la línea puntada indica la velocidad de viento de 9 m/s y la línea continua indica la tendencia anual de la velocidad de viento máxima.

Figura 5.20 Velocidad máxima promedio de viento, la línea puntada indica la velocidad de viento de 9 m/s y la línea continua indica la tendencia anual de la velocidad de viento máxima.

Figura 6.1 Condiciones sinópticas en superficie a las 18:00 para los días: a)14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010 y d) 20 de marzo de 2012

Figura 6.2 Condiciones sinópticas en superficie a las 18:00 para los días: a) 21 de febrero de 2013, b) 14 de febrero de 2017 y c) 7 de diciembre de 2017.

Figura 6.3 Temperatura y velocidad de viento (m/s) en las siguientes fechas: a)14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010, d) 20 de marzo de 2012, e) 21 de febrero de 2013, f) 14 de febrero de 2017 y g) 7 de diciembre de 2017.

Figura 6.4 Temperatura los días 6 (a) y 8 (b) de diciembre de 2017 a las 17:00 hora local.

Figura 6.5 Humedad relativa en las siguientes fechas: a)14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010, d) 20 de marzo de 2012, e) 21 de febrero de 2013, f) 14 de febrero de 2017 y g) 7 de diciembre de 2017.

Figura 6.6 Tormentas de polvo en las siguientes fechas: a) 14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010, d) 20 de marzo de 2012, e) 21 de febrero de 2013, f) 14 de febrero de 2017 y g) 7 de diciembre de 2017.

Figura 6.7 Condiciones sinópticas en superficie en las siguientes fechas y horas: a) 1 de diciembre de 2009 a las 18:00 Z, b) 27 de diciembre de 2015 a las 09:00 Z, c) 9 de marzo a las 00:00 Z y d) 10 de abril de 2018 a las 00:00.

Figura 6.8 Temperatura y velocidad de viento (m/s) en las siguientes fechas: a) 1 de diciembre de 2009, b) 27 de diciembre de 2015, c) 8 de marzo de 2016 y d) 10 de abril de 2018.

Figura 6.9 Temperatura en diciembre los días: a) 27 y b) 28 a las 17:30 UTC

Figura 6.10 Humedad relativa en las siguientes fechas: a) 1 de diciembre de 2009, b) 27 de diciembre de 2015, c) 8 de marzo de 2016 y d) 10 de abril de 2018

Figura 6.11 Tormenta de polvo en las siguientes fechas: a) 1 de diciembre de 2009, b) 27 de diciembre de 2015, c) 8 de marzo de 2016 y d) 10 de abril de 2018

Figura 6.12 Condiciones sinópticas en superficie en las siguientes fechas y horas: a) 29 de diciembre de 2006 a las 18:00 Z, a las 21:00 Z b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

Figura 6.13 Temperatura y velocidad de viento (m/s): a) 29 de diciembre de 2006, b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

Figura 6.14 Temperatura: a) 31 de enero de 2007 y b) 1 de febrero de 2007.

Figura 6.15 Humedad relativa en las siguientes fechas: a) 29 de diciembre de 2006, b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

Figura 6.16 Tormentas de polvo en las siguientes fechas: a) 29 de diciembre de 2006, b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

Figura 6.17 Condiciones sinópticas en superficie del día 03 de febrero de 2011 a las 18:00 Z.

Figura 6.18 Temperatura: a) 3 de febrero y c) 4 de febrero; humedad relativa: b) 3 de febrero y d) 4 de febrero.

Figura 6.19 Tormenta de polvo el 3 de febrero de 2011 a las 22:00 UTC.

Figura 7.1 Clasificación de áreas deterioradas basado en el índice de brillo de suelo (BI).

No se observan cambios significativos entre a) febrero y b) octubre de 1993.

Figura 7.2. Velocidad máxima de viento en la estación de Ábrego en el año 2011.

Figura 7.3 ENSO Index y velocidad máxima de viento durante el año de 2015 en la estación de Abrego (Fuente <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>).

Figura 7.4 ENSO Index y velocidad máxima de viento durante el año de 2016 en la estación de U.A. Agronomía (Fuente <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>).

Figura 7.5 Rosa de vientos de los años de 2015: a) Mesa de Fuentes, b) U.A. Agronomía y 2016: c) Ábrego d) Rancho Grande.

Figura 7.6 Estela de polvo rojo. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) imagen, adquirida por el satélite de la NASA MODIS-Aqua con fecha de toma 17 de marzo de 2008.

Figura 7.7 Distribución de la cantidad de polvo emitido (t) en relación con el área de emisión (km²).

Figura 7.8 Zonas de emisión de polvo: a) Frecuencia de emisión de polvo y b) Imagen en color natural, los números identifican puntos escogidos al azar para ser identificados en la imagen satelital (Imagen Landsat 8, fecha de toma: 11/02/2016).

Figura 7.9. Desarrollo de la tormenta de polvo el 3 de febrero de 2011 en los siguientes tiempos: a) 18:00, b) 20:00, c) 22:00 y d) 24:00 UTC.

Figura 7.10 Promedio estimado de suelo perdido en el periodo 2006-2018.

Figura 7.11 Estimación de suelo perdido en 50 años.

Figura 7.12 Distribución en porcentaje del tamaño de partículas de las muestras de suelo.

Resumen

“Proceso de desertificación por influencia natural y antropogénica en el centro-norte de México”

Palabras clave: Desertificación, cambio de uso de suelo, frentes fríos, tormentas de arena.

A nivel mundial los procesos que causan desertificación se encuentran relacionados con las condiciones físicas del ambiente y las actividades humanas que se practican, las regiones áridas y semiáridas se han visto particularmente afectadas por estos agentes que potencializan la desertificación. En la parte sur del desierto de Chihuahua, localizada en el centro-norte de México al incrementarse la apertura de tierras de cultivo, los cambios en el uso de suelo tienen diferentes impactos sobre la vegetación y el suelo, una cantidad importante son convertidas a zonas de cultivo de temporal, las cuales sólo son aprovechadas durante la temporada de lluvias. Durante la temporada de invierno muchas de estas áreas quedan desprovistas de vegetación. La incidencia de frentes fríos en México durante la estación de invierno trae consigo diferentes fenómenos meteorológicos como la presencia de fuertes vientos que pueden ocasionar eventos como tolvaneras y tormentas de arena o polvo que causan erosión y pérdida de calidad del suelo. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de un análisis multi-temporal empleando imágenes satelitales Landsat y modelaciones realizadas en el WRF-Chem que permitió entender y evidenciar el proceso de desertificación que se está presentando en el área de estudio como consecuencia de la interacción de las actividades antropogénicas y los procesos naturales de la Tierra

Abstract

Desertification process due to natural and anthropogenic influence in central-northern Mexico.

Key word: Desertification, land use change, cold fronts, sandstorms.

Worldwide the process that caused desertification are related with environmental physical conditions and the practice of human activities, the arid and semi-arid region result affected for agents that potentialize desertification. In the southern part of Chihuahuan Desert, located in central-north from Mexico as the opening of farmland increases, the land use change has different impacts in vegetation and soil, import quantities are changed into rainfed areas, which are only are used during the rainy season. In winter many areas are devoid of vegetation. The incidence of cold fronts in winter is causing different meteorological phenomena as the presence of intense winds, which could cause events like hoppers and sand or dust storm that cause erosion and soil loss quality. In this research is presented the result of multi-temporal analysis using Landsat images and WRF-Chem simulation which allowed us to understand and to demonstrate the desertification process that is occurring in the study area, as a result of the interaction of anthropogenic activities and the natural processes of the Earth.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En el pasado y presente, la intervención de la humanidad en la utilización y manipulación de los recursos naturales está teniendo consecuencias inesperadas (Odeman, 1992). Los estudios sobre el cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y la pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Limbin et al., 2001). La degradación en tierras secas es una de las mayores preocupaciones del siglo XXI, porque tiene impactos en la seguridad alimentaria y en la calidad del suelo y del aire (Millennium Ecosystem Assessment por sus siglas en inglés MEA, 2009). Los cambios de uso de suelo son predominantemente una consecuencia del crecimiento exponencial de la población mundial junto con la expansión de las zonas urbanas. Con el crecimiento poblacional se incrementan las áreas que son dedicadas para la producción de alimentos y materias primas necesarias para la producción de otros bienes. Sin embargo, las actividades económicas primarias, incluyendo la agricultura intensiva y la ganadería, continuamente crean nuevas áreas en zonas con suelos inapropiados, modificando grandes extensiones de terreno y conduciendo a la deforestación. La expansión de las tierras de cultivos afecta diferentes ecosistemas, principalmente pastizales y bosques. Los cambios de uso de suelo convierten estas zonas en áreas de cultivo de temporal y una pequeña parte de estas zonas agrícolas son destinadas para riego. Uno de los principales problemas que surge a raíz de este proceso es cuando el cambio de uso de suelo se realiza en zonas con periodos de sequía con cobertura vegetal nula. La incidencia de fuertes vientos puede causar intensos procesos de erosión (McLeman et al., 2014). En la región de los trópicos, las áreas de cultivo se han expandido principalmente a expensas de la cubierta forestal en los últimos 40 - 50 años (Gibbs et al., 2010).

La degradación incluye la desertificación por efectos de la acción humana como el cambio de uso de suelo, la pérdida de productividad de los suelos cultivados, la disminución de la capacidad de las tierras de pastoreo para alimentar al ganado y la deforestación (Shoijet, 2005). La acción de fenómenos meteorológicos como los fuertes vientos causa erosión en extensas zonas lo cual representa una componente principal para la degradación de los suelos. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas

en Inglés FAO) define la desertificación como un conjunto de factores geológicos, climáticos, biológicos y humanos que provocan la degradación de la calidad física, química y biológica de los suelos de las zonas áridas y semiáridas poniendo en peligro la biodiversidad y la supervivencia de las comunidades humanas. La desertificación tiene impactos adversos sobre tierras no áridas, afecta áreas localizadas a miles de kilómetros de las zonas desertificadas. Los impactos geofísicos incluyen tormentas de polvo, inundaciones, disminución en absorción del carbono, cambio climático regional y global (MEA, 2009).

Algunos problemas ambientales son resultado del cambio masivo del uso de suelo, como la desertificación los cuales han sido bien documentados. Durante 1932-1941 en los Estados Unidos se presentaron grandes tormentas de arena, que derivaron del proceso de desertificación, al crear extensas zonas de cultivo y la presencia de sequías en la zona. En este periodo llamado “Dust Bowl” las tormentas de arena afectaron la salud de la población, la causa principal fue la practica inadecuada como lo son: monocultivo, surcos en dirección del viento y la eliminación de la cobertura vegetal (Shoijet, 2005; Ravi, 2009). Durante el siglo XIX en Nueva Gales del Sur, Australia, se introdujo ganado ovino en zonas de suelo frágil y profundo, la proliferación del ganado en la zona en un periodo de 20 años, a causa del sobrepastoreo la vegetación natural fue remplazada por especies no apta para consumo del ganado.

En la Unión Soviética entre 1954 y 1960 se lanzó un programa para cultivar tierras vírgenes en las praderas, en el cual se repitió la historia de lo ocurrido en el sureste de los Estados Unidos (Shoijet, 2005). A China se le considera un país con una acelerada degradación ambiental, propiciada por la deforestación, sobrepastoreo, sobreexplotación agrícola y de los acuíferos. La tasa de desertificación en China ha expandido las áreas que abarca el desierto de Gobi a causa del sobrepastoreo, reflejando impactos en el aumento de la cantidad de polvo durante las tormentas de arena. Esto repercute en la salud de la población creando enfermedades en el sistema respiratorio y afecta actividades dentro de la industria y el transporte (Shoijet, 2005; Ravi, 2009). Los impactos de agricultura en el noreste de China han causado la erosión del suelo negro a una profundidad de 0.4 m. lo que resulta en una reducción de casi 10 % en la producción de soja (Gao et al., 2014). En Mongolia la erosión eólica y el intenso pastoreo son las principales causas de desertificación arenosa, ha provocado más impactos en la cobertura vegetal además de acelerar los procesos de erosión,

lo que lleva a la pérdida de la estructura del suelo y su deterioro (Zhao et al., 2005). En Argentina cerca del 80% del territorio está dedicado a las actividades agrícolas y forestales, sin embargo, estas actividades incrementaron las tasas de deterioro del suelo. Por lo tanto, la expansión de la frontera agrícola y la falta de planeación en actividad forestal parecen haber degradado seriamente los recursos naturales (Maris 2000). La degradación del suelo en cualquier forma es un problema global y cuya consecuencia inmediata es evidente en la disminución de la capacidad productiva de los suelos agrícolas (Rodríguez Moreno et al., 2017).

En México más del 80 % de las tierras de cultivo presentan algún grado de desertificación como resultado de los monocultivos, deforestación y producción ganadera. Estimaciones indican que cerca del 97% de la tierra dedicada a la agricultura en México es muy vulnerable a la desertificación. Mientras tanto, cerca del 48% del territorio es altamente susceptible a la degradación y alrededor del 49% es moderadamente susceptible (Oropeza, 2004). Adicionalmente, del total del área convertida a zonas agrícolas o ganaderas, aproximadamente el 82% tenía cobertura forestal, y cerca del 18% estaba cubierto por pastizales (Meneses, 2008). La degradación en México se produce por el cambio de uso de suelo que afecta grandes extensiones de tierra de zonas áridas y semiáridas. La deforestación, sobrepastoreo, la labranza posterior a la cosecha y el mal manejo del suelo está aumentando el riesgo de desertificación en estas regiones. Según Reynolds and Stafford (2002) las condiciones naturales del ambiente y las actividades económicas pueden llevar a la desertificación de una zona, de forma específica afectar al suelo, la vegetación, la fertilidad, etc. y a las condiciones de los grupos involucrados con su escala temporal y espacial. Existe una necesidad de generar políticas a todos los niveles, la degradación de las áreas secas incluye un rango amplio de escalas espaciales y temporales sus relaciones causales con la dinámica del clima, los impactos ecológicos y las estrategias de respuesta política (Reynolds and Stafford, 2002). Para crear políticas para combatir la desertificación, es necesario conocer la dinámica y los eventos que la están originando.

La parte sur del desierto de Chihuahua, una zona semiárida, está cubierta por extensos pastizales y matorrales y en la zona montañosa por bosques. Esta zona no está exenta de problemas ambientales asociados con los cambios de uso de suelo en favor a la práctica agrícola y la ganadera. En el estado de Zacatecas los cambios se producen hacia zonas de

agricultura, principalmente área de agricultura de temporal, estas zonas de agricultura de temporal quedan desprovistas de vegetación durante la temporada seca, que en México corresponde a la temporada de invierno. Durante esta temporada se presentan frentes fríos, que en su avance por el territorio van acompañados de vientos fuertes. En la zona del centro norte de México al interactuar con los suelos desprovistos de vegetación crean tormentas de polvo, acelerando el proceso de desertificación en esta región del país. En la presente investigación se planteó la siguiente hipótesis: las modificaciones en la cobertura vegetal en la zona semiárida del centro-norte de México de forma conjunta con los vientos asociados a los frentes fríos contribuyen al proceso de desertificación.

El objetivo general de la investigación es establecer y cuantificar mediante una investigación multidisciplinaria el proceso de desertificación derivado de las actividades humanas que en forma conjunta con los elementos hidrometeorológicos se está produciendo en la región del centro-norte de México.

Para lo cual se siguieron los siguientes objetivos particulares:

- Determinar los cambios en la cobertura vegetal, uso de suelo y extensión de la frontera agrícola en la región centro norte de México de la década de 1990 a la actualidad.
- Estudiar en detalle la incidencia de las tormentas de polvo generadas por frentes fríos.
- Cuantificar las toneladas de suelo erosionado por los vientos asociados a frentes fríos.
- Determinar factores humanos y elementos naturales que potencializan la desertificación en el centro-norte de México.
- Establecer el grado de desertificación que se presenta en la zona de estudio, así como la relación de la desertificación-sequía para identificar los cambios de vegetación y clima asociados a la desertificación.
- Analizar y establecer la relación entre los cambios de la cobertura vegetal y los usos de suelo con la presencia de tormentas de arena en la región centro-norte de México.

1.1 Cambio de uso de suelo en el Desierto de Chihuahua

Las zonas semiáridas ocupan aproximadamente el 17% de los ecosistemas en el mundo (UNEP, 1992). Grover and Musick (1990) en presentaron tres factores que son los responsables en el cambio regional de la vegetación en el sureste de Estados Unidos de América, los factores son: (1) sobrepastoreo, (2) supresión de incendios y (3) cambios históricos en el clima, estos tres factores inciden en la invasión de arbustos durante el último siglo, la cual se vio disparado por la coincidencia de las condiciones climáticas y el sobrepastoreo, creando un cambio en los pastizales dentro de esta área. La principal forma de afectación a este tipo de ecosistemas se debe al cambio que se realiza en la vegetación, donde la vegetación natural es removida para la introducción de pastizales para el aprovechamiento pecuario (Fredrickson et al., 2006). Según Bestelmeyer et al. (2015) los cambios de uso de suelo resultan de la interacción de la presión socioeconómica y cultural sobre los factores biofísicos del entorno, el cambio de uso de suelo puede ejercer diferentes niveles de presión. Él introduce un esquema de clasificación el cual permite identificar el cambio que presentan los pastizales hacia otros usos de suelo:

- a) Baja presión de conversión: la baja presión que puede existir sobre zonas de pastizales en las cuales no se realiza una conversión es que el uso de suelo puede estar asociado a otros factores como pueden ser baja productividad y degradación del suelo, difícil accesibilidad y falta de infraestructura, conflictos por la tenencia de la tierra, etc.
- b) Presión fluctuante de conversión: este caso responde de forma específica a los diversos factores socioeconómicos como son: cambios en la población, migración, tenencia de la tierra, precios en insumos y productos agrícolas y políticas de conservación ambiental. La variación climática a escala decenal (sequías o incremento en la precipitación) contribuye en este tipo de fluctuaciones.
- c) Alta presión de conversión: La fuerte presión por los cambios en la cobertura de pastizales a zonas de cultivo y de pastizales o áreas agrícolas a zonas de uso urbano, se asocia con el incremento en el valor adyacente de las áreas urbanas, principalmente las zonas peri-urbanas.

Los cambios de uso de suelo en México se han presentado de forma constante en los últimos años, principalmente el cambio es más evidente a partir de la segunda mitad del siglo XX. Para 1976, Challenger et al. (2009) y Cuevas et al. (2010) afirman que la cobertura vegetal

del país se había reducido en un 38%, hacia 1993 sólo cubría 54% y para el 2002 ocupaba la vegetación sólo al 50% de su superficie original. En una comparación sobre el cambio de uso de suelo en el periodo de 1976-2009 realizado por Cuevas, et al. (2010) se presenta que los principales agentes de cambio de uso de suelo es hacia agricultura 48%, introducción de pastos 50% y urbanización 2% (Figura 1.1), en este periodo la parte que corresponde al desierto de Chihuahua perdió al menos el 10% de vegetación secundaria que en suma con toda la porción norte de México resulta en 51 507 hectáreas.

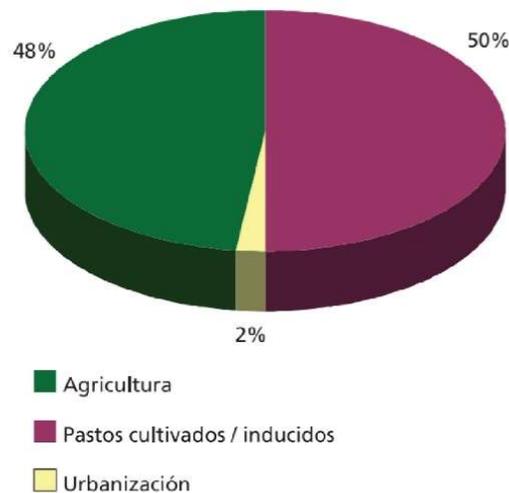


Figura 1.1 Porcentaje de Participación de los principales usos generadores de cambio, en la pérdida de vegetación natural entre 1976 y 2016 (Fuente: Cuevas et al. 2010).

En la pérdida de vegetación que corresponde al centro norte de México, compuesta entre vegetación primaria y vegetación secundaria se pierden entre 1000 a 10 000 hectáreas por año lo cual equivale a 36% del territorio de México. Los matorrales de la zona norte, principalmente el matorral xerófilo tiene un impacto negativo por la extensión que ocupan en el territorio del país, la degradación representa el 1.5% del total de los matorrales. La variabilidad intrínseca de la ecología de los pastizales, hace difícil distinguir la dirección del cambio en estos, como son la pérdida de biodiversidad o la degradación del suelo.

1.2 Proceso de erosión eólica

En México la degradación de suelo es resultado de los usos agropecuarios y forestales en tierras secas y montañosas (Granados, et al. 2013). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el 2002 en el inventario sobre suelos degradados en México, presentó los resultados que evidencian las principales causas de la degradación. En el país, el 28 % se debe a erosión hídrica, el 23% a erosión eólica, 6 % por erosión química, 2% erosión física y el 41% sin erosión aparente, estos datos se presentan en la figura 1.2.

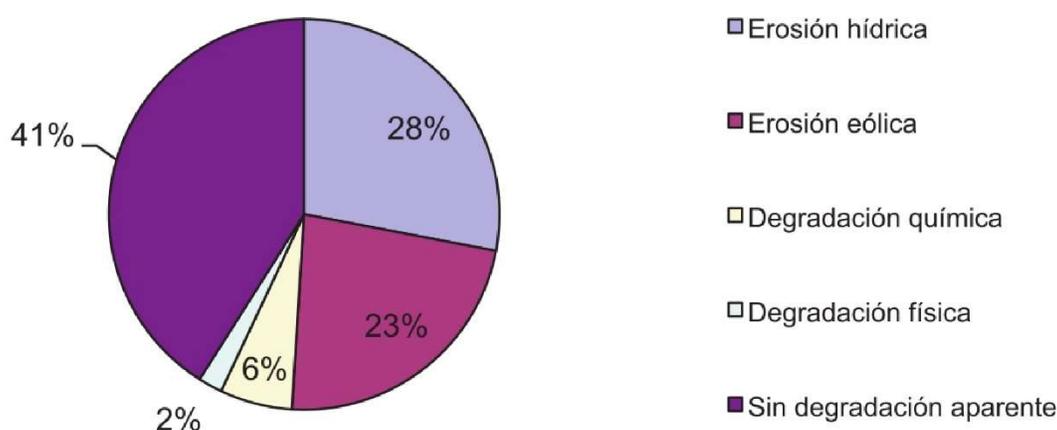


Figura 1.2 Degradación de suelos en México (SEMARNAT, 2002).

En México el riesgo por erosión potencial eólica representa un 89% del total del territorio desde Zacatecas hasta el norte de Chihuahua, incluyendo la franja costera y el desierto de Sonora, costas del Golfo de California y las costas de Baja California sobre la zona del Pacífico (García, et al., 2013). Los estados donde la erosión eólica es potencialmente muy severa (superior a 200 ton/ha/año) son Zacatecas con 61.2% de su superficie estatal, Sonora con 45.5%, Chihuahua con 34%, Baja California Sur con 29.9%, San Luis Potosí con 29.9%, Coahuila con 28.9% y Baja California con 23.4% (SEMARNAT-COLPOS, 2002). Según García et al. (2013), la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica controla la cantidad de polvo en suspensión, las cuales se producen bajo condiciones específicas como son; la textura del suelo, cantidad de contenido de materia orgánica, reacción del carbonato con HCl, humedad del suelo, temperatura ambiente, precipitación y la perturbación del suelo por causas naturales o antropogénicas. El desplazamiento del material llevado por el viento en la

mayoría de los casos es causado por el decremento de la cobertura vegetal, debido al sobrepastoreo o a la remoción de la vegetación para uso urbano o uso agrícola. Este fenómeno es muy amplio en las zonas áridas y semiáridas (Oldeman, 1992). En general, los suelos de textura gruesa son más vulnerables que los suelos de textura fina. Según la Evaluación Global de la Degradación del Suelo (GLASOD por siglas en inglés) realizada por el Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente (PNUMA) se reconocen tres tipos de erosión eólica:

1. Pérdida de la capa superficial del suelo por erosión eólica (Et), definido como un desplazamiento uniforme de la capa superficial del suelo.
2. Deformación en el Terreno (Ed), definido como un desplazamiento desigual en el material del suelo, conduciendo a huecos por deflación y dunas. Este tipo de erosión eólica puede ser considerada como la forma más extrema en la que se pierde la capa superficial del suelo.
3. Viento excesivo (Eo) se define como la zona en superficie de donde las partículas son transportadas por el viento. En contraste con los efectos causados por la erosión hídrica, los efectos de la erosión por viento abarcan áreas más grandes fuera de la zona donde se origina fenómeno. El viento excesivo puede causar algunos daños sobre la infraestructura (camino, vías, carreteras) construcciones y afectar los cultivos” (Oldeman, 1992).
4. El transporte de sedimentos por acción del viento se debe principalmente a dos mecanismos que son la saltación (que transporta los granos) y la suspensión (el flujo moviliza o atrapa los granos). En la saltación las partículas son removidas de la superficie por levantamiento aerodinámico y es transportado una pequeña distancia, dando saltos por el aire, que requiere un bombardeo de partículas de mayor tamaño de (60-2.00 μm) que destruyen las partículas teniendo como resultado un menor tamaño (<20 μm) inyectándose de forma vertical a la atmósfera (Bagnold en Okin, 2006; García et al., 2013). La erosión del suelo tiene lugar cuando se supera la velocidad umbral del viento que depende de las condiciones del terreno y el flujo de aire (García et al., 2013). La incorporación de partículas de suelo en el aire, se relacionan a la saltación de agregados o partículas minerales menores que 20-30 μm . En suelos que presentan modificaciones realizadas por el hombre resulta más factible que haya transporte de sedimentos comparados con suelos no alterados donde se

necesita que el viento tenga velocidades mayores para que sean una fuerte de emisión (García et al., 2013). En el año 2015 durante la 22 Semana Nacional de Ciencia y Tecnología en la conferencia “Las propiedades de los suelos en Zacatecas” se presentaron los siguientes datos sobre erosión de suelo. Se estimó que se pierden entre 7 y 8 toneladas de suelo por erosión hídrica y eólica, esto como consecuencia de las actividades agrícolas, para el 2015 el 75% de las zonas agrícolas en Zacatecas estaban tecnificadas, principalmente en los sistemas de riego (Rodríguez, 2015). En el suroeste de Zacatecas las pérdidas por erosión hídrica representan más de 10 ton de suelo por hectárea por año donde se encuentran los nutrientes y materia orgánica. En la parte central del Estado la erosión eólica produce pérdidas de suelo por 5 toneladas por hectárea en promedio como consecuencia de la falta de cobertura vegetal (Ríos, 2015).

5. En el Estado de Zacatecas 46.4% de su superficie tiene problemas de erosión, la erosión eólica tiene un total de 1 549 384.89 ha que representan un 46%, la erosión hídrica afecta 1 137 118.87 ha equivalente al 34.9% de la superficie, la erosión físico química cubre un área de 782 597.02 ha que es el 17.52% de superficie (PCA EZ, 2018).

1.3 Tormentas de polvo

La erosión eólica es un proceso generalizado en las tierras secas y contribuye a la pérdida de la fertilidad del suelo, alteración en la radiación atmosférica y contaminación del aire (Ravi, et al. 2004). Las tormentas de arena afectan grandes extensiones de tierra, se pueden considerar eventos catastróficos desencadenados por la desertificación, no sólo al reducir la productividad del suelo, sino también por los efectos en la salud y algunas actividades humanas (Schoijet, 2005). Una tormenta puede ser considerada de polvo si la visibilidad horizontal se reduce a menos de un kilómetro, la pequeña medida y peso de partículas de polvo y las corrientes de aire dispersan el polvo por áreas extensas y a alturas entre los 5000 y 7000 m (Moneja et al., 2006). En las tormentas de arena la visibilidad se reduce a cero metros y son de carácter local, las partículas son levantadas y el tiempo de duración es menor (Moneja et al. 2006). En vastas extensiones de la superficie terrestre las tormentas de polvo

y tormentas de arena tienen lugar, las principales fuentes de emisión a nivel mundial son el Norte de África, Medio Oriente, Asia Central (Prospero et al. 2002).

A escala regional en Norteamérica las zonas de emisión de polvo se encuentran en el suroeste de Estados Unidos de América y en distintas regiones del desierto de Chihuahua que incluye área de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí (Prospero, 2002 en Domínguez Acosta, et al., 2012). En la zona del desierto de Chihuahua las tormentas de polvo se presentan durante la estación seca de noviembre a mayo (Gill, 2009 en Domínguez et al., 2012). Durante la temporada de lluvia se presenta otro evento asociado a las tormentas de polvo se presentan de junio a agosto, a las tormentas de polvo que se presentan durante esta temporada se les conoce como “Haboob” (del árabe vientos fuertes) y son causadas por la entrada de los sistemas de tormenta de verano (Domínguez et al., 2012). Existen casos estudiados sobre tormentas de arena y polvo en el norte de México. Rivera et al. (2009) plantean que el desierto del Chihuahua es una importante fuente de emisión de aerosoles minerales afectando principalmente las ciudades de El Paso en Estados Unidos y Ciudad Juárez en México donde una de las principales causas meteorológicas para que se presenten este tipo de eventos se asocia a velocidades de viento cercana a los 10 m/s aunando a esto la poca cobertura vegetal del suelo facilitando la erosión y el transporte del suelo. Rivera et al. (2009) determinaron las zonas de emisión de polvo y su localización dentro del desierto de Chihuahua. Pineda-Martínez et al. (2011) investigaron una tormenta de polvo que se presentó en la parte sur del desierto de Chihuahua particularmente en la parte central del Estado de Zacatecas, el evento tuvo lugar el 18 de marzo de 2008, este evento se considera como resultado en la degradación a causa de los cambios en la vegetación por zonas agrícolas, donde se estimó que en un lapso de 12 horas con vientos intensos se perdió 9162 toneladas de suelo en un área de 4320 km².

Álvarez y Carbajal (2019) presentan los resultados de un evento asociados a los vientos de Santa Ana que se presentan en el suroeste de los EUA y noroeste de México, el evento se presentó en octubre de 2007 donde el viento se propagó el viento entre 500 y 1000 km a lo largo de la costa de Baja California sobre el océano Pacífico.

1.4 Desertificación

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD, 1992) define la desertificación como: la degradación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. La desertificación, en sentido estricto, es la degradación del recurso suelo en ecosistemas productivos (Romero Díaz et al. 2012) y a nivel mundial es una de las principales causas de desertificación según la UNEP (1992).

Se considera que las zonas de mayor grado de vulnerabilidad de desertificación son las regiones semiáridas (Granados-Sánchez et al. 2013). La desertificación puede ser por causas de origen natural y de origen antrópico, dentro de las causas naturales de la desertificación se encuentran las siguientes condiciones: a) climáticas, b) geomorfológicas, c) edáficos, d) litológicas, e) fitogeográficas y f) hidrológicas. En las causas antrópicas se encuentran: a) el manejo no conservacionista de la vegetación, b) uso de técnicas de labranza inadecuadas, c) labranza en terreros marginales, d) abandono de tierras de cultivo, e) uso excesivo de agroquímicos, f) sistemas de riego inadecuado, g) sobreexplotación de acuíferos, h) monocultivos, i) tenencia de la tierra y falta de organización, j) actividades mineras y k) prácticas de gobernanza. Existen siete procesos responsables de la desertificación: 1) degradación de la cobertura vegetal, 2) erosión hídrica, 3) erosión eólica, 4) salinización, 5) reducción de la materia orgánica del suelo, 6) encostramiento y compactación del suelo y 7) acumulación de sustancias tóxicas para los seres vivos (Granados et al., 2013). Para medir el impacto de la desertificación en un área determinada se deben considerar tres criterios: a) estado actual, b) velocidad y c) riesgo a partir de estas tres se puede clasificar en cuatro grados de desertificación: ligera, moderada, severa y muy severa (Granados et al., 2013). Para Thomas and Middleton (1994) la desertificación es resultado de varios procesos que surgen de la acción conjunta de aspectos sociales y proceso de la Tierra, que parte de la reducción de la vegetación y degradación del suelo, como resultado de la sequía y presión humana. En la figura 1.3 se muestra los ciclos de realimentación de la desertificación (Thomas y Middleton, 1994). En el esquema propuesto por Thomas y Middleton, se destaca dos principales ciclos de realimentación de la desertificación en el primero se relaciona con las habitantes y la presión que estos ejercen sobre la vegetación y el impacto que este podría llevar hacia el recurso suelo. En un segundo ciclo se encuentran los aspectos biofísicos los cuales se encuentran íntimamente relacionados con los procesos atmosféricos principalmente

la reducción de la lluvia y el descenso de aire, al conjugarse los ciclos de realimentación se incrementa la posibilidad de que un área sea desertificada. Para 1993 los procesos de desertificación/ degradación se manifiestan en: 1) degradación de la cobertura vegetal (deforestación, sobrepastoreo, talas, incendios, cortes de leña y otros), 2) erosión hídrica, 3) erosión eólica, 4) ensalitramiento, 5) compactación, encostramiento y afloramiento de materiales subsuperficiales, 6) disminución de materia orgánica, 7) pérdida de nutrientes, 8) acumulación de sustancias tóxicas y 9) sequía, en conjunto afectan más del 70% del país (Granados et al., 2013).

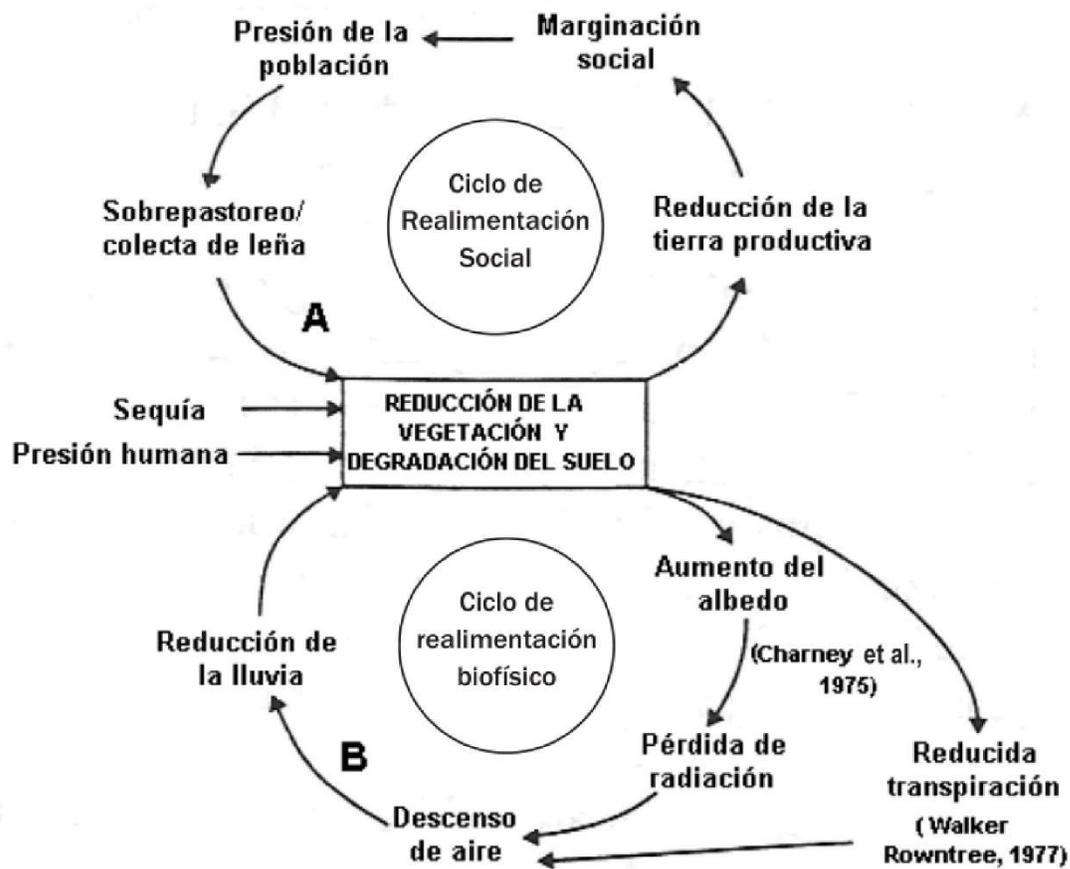


Figura 1.3 Ciclos de realimentación de la desertificación: A. ciclo de realimentación social y B. Ciclo de realimentación biofísico (Thomas y Middleton, 1994 en Granados, et al. 2013).

Granados, et al. (2013) exponen que según el Plan de acción para Combatir la Desertificación (PACD) en México la mayor parte de la superficie en México presenta algún grado de vulnerabilidad a desertificación entre moderada, severa y extrema. Principalmente las zonas áridas y semiáridas se encuentran con valores altos de vulnerabilidad a la desertificación, al

ser la vegetación la más afectada por actividades humanas donde se presenta una reducción de la vegetación hasta del 0.89% anual. La desertificación en el desierto de Chihuahua se caracteriza principalmente por la pérdida de pastizales incrementando la dominancia de matorrales (Fredrickson et al., 2006), debido a la conversión de pastizales de zonas semiáridas en matorrales (Huenneke et al., 2002). El desplazamiento de los pastizales tiene implicaciones económicas y ambientales, los arbustos son menos capaces de soportar el pastoreo, lo que los hace más vulnerables a la pérdida de suelo. Huenneke (2012) concluye que la conversión de la vegetación crea zonas de vegetación heterogéneas a escala de plantas individuales, pero entre éstas existen áreas grandes de suelo desnudo que propician el proceso de erosión que conducen a la degradación del suelo. La vulnerabilidad a la desertificación en el desierto de Chihuahua es moderada en cuanto a erosión y sedimentación; es elevada la salinización de las tierras bajo riego. La presión demográfica es de baja a moderada (Gatica-Colima, sin fecha). Dos estudios de caso evidencian el proceso de desertificación en el desierto de Chihuahua en dos diferentes zonas; Huber-Sannwald et al. (2006) realizaron una investigación en una zona rural, la investigación se centra en la relación humano-sistema ambiente que causa desertificación. En el sur del desierto de Chihuahua una evaluación temporal usando indicadores de desertificación: Índice de Vegetación Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), Índice Normalizado de Agua (NDWI), Índice de Óxidos de Hierro (OI) y Temperatura Superficial (ST). Los resultados muestran que la zona más afectada en el altiplano de San Luis Potosí es la parte este (Noyola-Medrano, et. Al, 2017).

1.5 Frentes fríos

Como definición un frente es la zona de transición entre dos masas de aire con diferentes densidades (Figura 1.4). Las diferencias de densidad son causadas por diferencias en temperatura y humedad. Las masas de aire tienen extensión vertical y horizontal en consecuencia, la extensión hacia arriba de un frente se denomina zona frontal.

En México, la presencia de frentes fríos se encuentra asociada a la circulación general de la atmósfera, los frentes fríos entran como incursiones de aire frío polar de tormentas frontales de latitud media. La mayoría de las tormentas frontales de latitud media que afectan a México consisten en grandes masas de aire frío polar de latitudes altas. Cuando las masas de aire frío

entran en México producen frentes o líneas de tormentas a lo largo de la zona de contacto con el aire caliente tropical. Largas áreas de nubes cúmulos y en ocasiones precipitación se presentan a lo largo de la zona frontal. Después del paso del frente se presenta una fuerte caída en la temperatura, especialmente en el norte del país. En montañas y las elevaciones altas de la meseta, como en Chihuahua los frentes fríos consecuentemente producen nevadas y en algunos casos causan tormentas de polvo en Zacatecas, San Luis Potosí, y en otras regiones (Vivó, 2014).

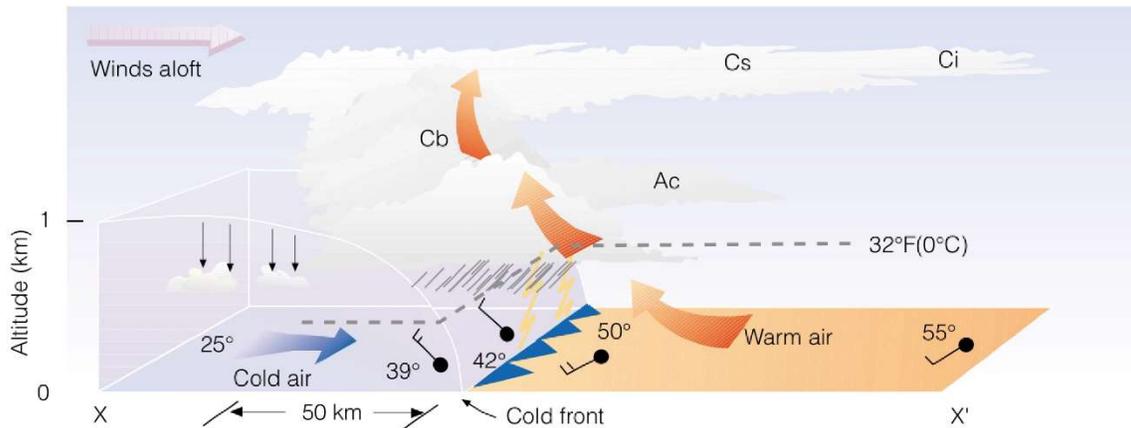


Figura 1.4 Vista vertical del estado del tiempo a través de un frente frío (Donald, 2001).

En una climatología realizada por la Comisión Nacional del Agua (CNA) considerando datos en el periodo de 2001 a 2016 se determinó que en la temporada entre los meses de septiembre a mayo se presentan en promedio aproximadamente 44 frentes fríos en México por año, su distribución en los meses mencionados anteriormente se presenta en la figura 1.5, se puede observar que el mayor número de frentes fríos se presentan en los meses de enero, febrero y marzo los tres meses con un registro de seis eventos en total. Los meses de noviembre, diciembre y abril con un promedio de cinco fríos por temporada, con cuatro eventos los meses de octubre y mayo, el mes con una menor cantidad de frentes fríos es el mes de septiembre con tres eventos en promedio. Se puede observar de forma clara que la mayor cantidad de frentes se registran durante los meses de invierno, seguidos por los meses previos y contiguos a estos.

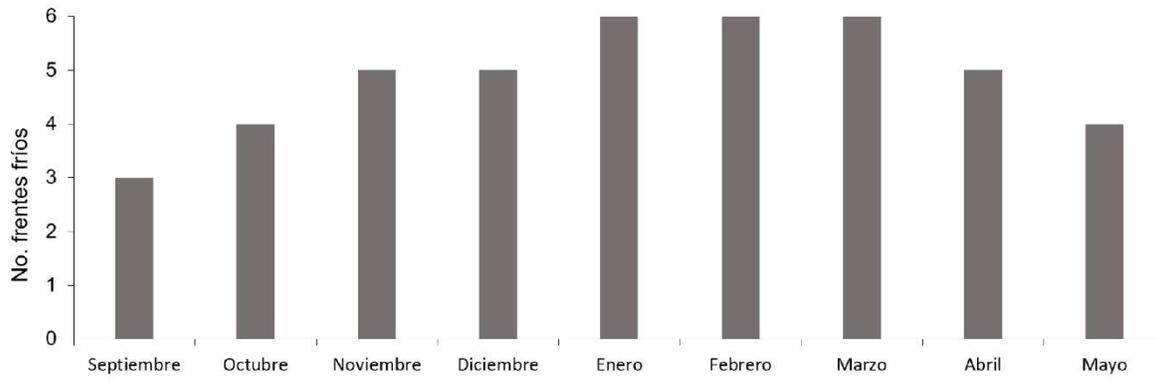


Figura 1.5 Promedio mensual de frentes fríos en el periodo de 2001-2016. Elaboración propia a partir de los datos de la CNA.

Capítulo 2

Caracterización geográfica del área de estudio.

En el presente capítulo se presenta una caracterización física de la zona de estudio, en este apartado se incluyen aspectos como la localización geográfica y aspectos como fisiografía, geología, edafología, clima, uso de suelo y vegetación.

2.1 Localización geográfica de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en el centro-norte de México, dentro de este se delimitaron dos áreas de trabajo, uno para trabajar con imágenes Landsat con una extensión territorial de 7358 km² y otra zona para realizar las modelaciones en el Weather Research and Forecasting (WRF por sus siglas en inglés) con una extensión de 278 784 km² (Figura 2.1) ambas áreas quedan comprendidas dentro de los límites territoriales del Estado de Zacatecas.

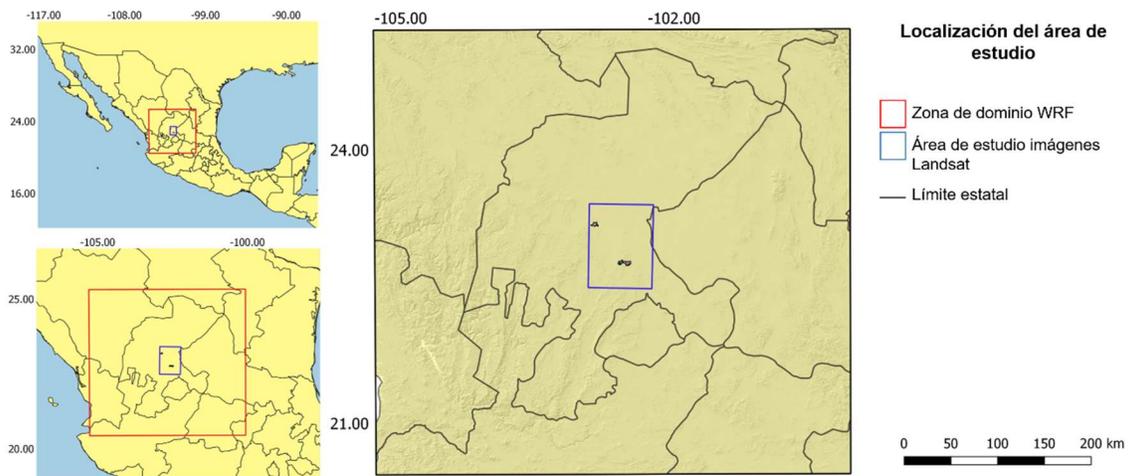


Figura 2.1 Localización geográfica de las áreas de trabajo.

A nivel regional la zona del dominio se encuentra dentro de 27 provincias fisiográficas, estas quedan comprendidas dentro de diferentes territorios de los estados de Zacatecas en la parte

central, Coahuila al norte, San Luis Potosí al este, Aguascalientes y Jalisco al sur y Durango al Oeste. La parte central del estado de Zacatecas queda comprendida dentro de las Sierras y Valles Zacatecanos y las llanuras y sierras potosino-zacatecanas. Las provincias de las sierras transversales, Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, así como Sierras y llanuras del norte se encuentran en el norte y noreste del estado. En menor proporción se encuentran las provincias de Sierras y Llanuras de Durango, Mesetas y Cañadas del sur, Provincia de los Altos de Jalisco y la Provincia de Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes (Figura 2.2).

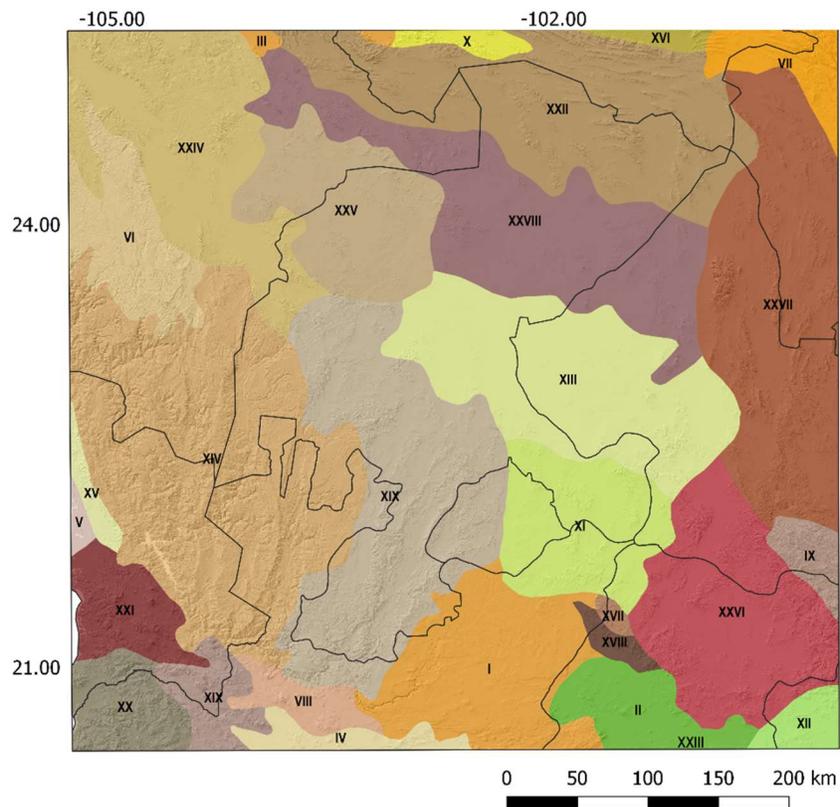


Figura 2.2 Regionalización fisiográfica del Estado de Zacatecas: I. Provincia de los Altos de Jalisco, XI. Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, XIII. Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, XIV. Mesetas y Cañadas del sur, XIX. Provincias y Valles Zacatecanos, XXII. Sierras Transversales, XXIV. Sierras y Llanuras de Durango, XXV. Sierras y Llanuras del norte y XXVIII. Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande (Fuente: Elaboración Propia a partir de Cervantes, et al. 1990).

2.2 Geología

La zona de estudio se encuentra comprendida dentro de dos provincias geológicas Mesa Central y Sierra Madre Occidental (Figura 2.3), la mayor parte corresponde al estrato continental Cenozoico (Nieto, et. Al., 2007) se encuentran algunos afloramientos de rocas riolíticas del Oligoceno, Jurásico superior-inferior, rocas volcánicas del Eoceno, conglomerado continental del Paleógeno, estratos marinos del Cretácico superior (Nieto, et. Al., 2007). La Mesa Central cubre una gran parte del centro de Zacatecas donde se encuentran afloramientos antiguos de rocas metamórficas (pizarras, filitas y esquistos). Del cretácico las formaciones de rocas marinas clásticas (areniscas y lutitas) e interacciones de clásticas y químicas (calizas-lutitas) (INEGI, 1981). En la estratigrafía de la Sierra Madre Occidental se localizan los afloramientos más antiguos del estado de Zacatecas que corresponden a rocas metamórficas (pizarras, filitas y esquistos). En esta provincia predominan las rocas ígneas extrusivas ácidas. En la parte superior de las mesetas y cuevas predominan los basaltos, en los valles existen depósitos aluviales que han rellenado antiguas fosas tectónica (INEGI, 1981).

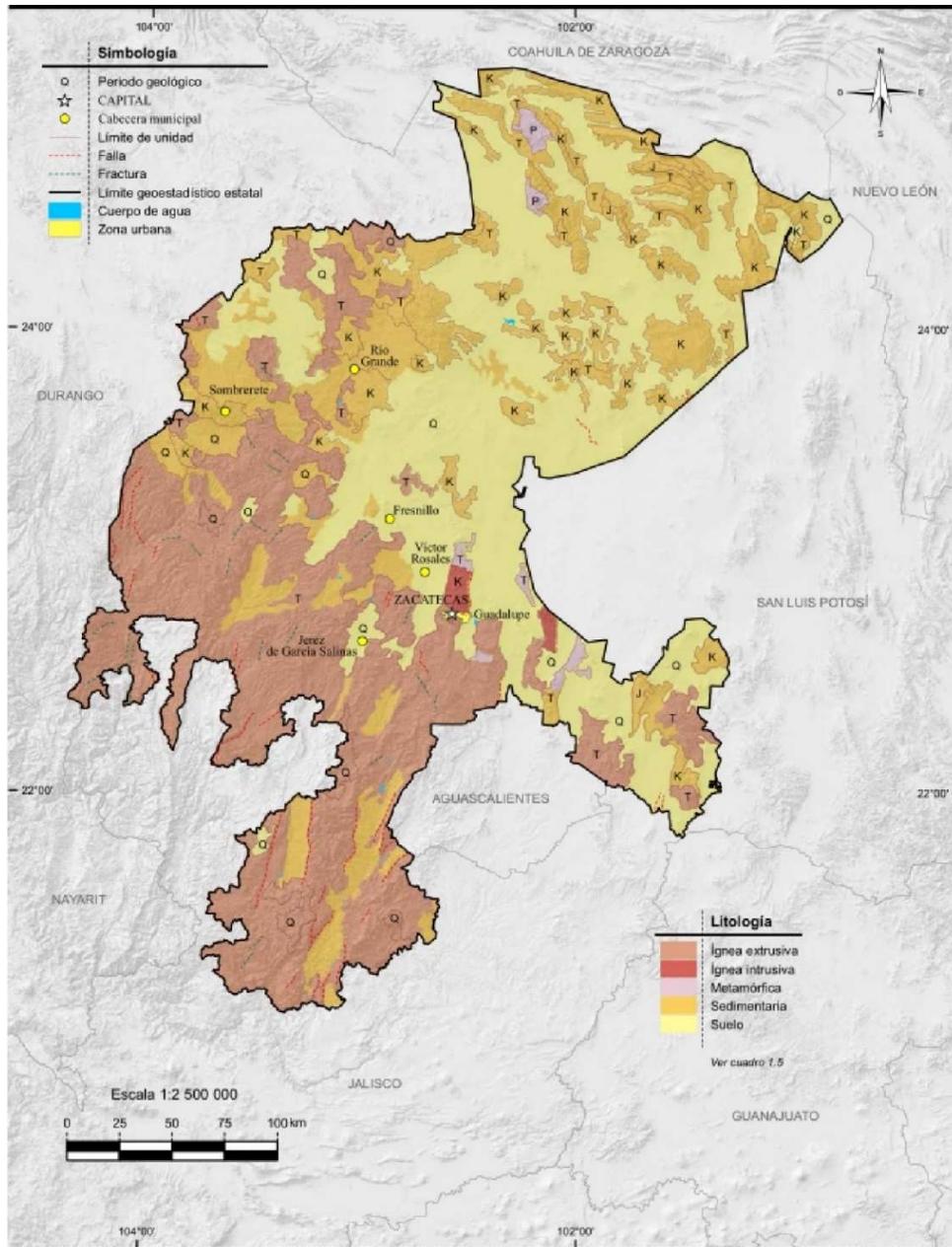


Figura 2.3 Geología en la zona de estudio (Fuente: INEGI, 2017).

2.3 Edafología

Las clases de suelo dominantes (Figura 2.4) en el área de estudio son Leptosoles, Xerosoles, Yermosoles, Feozem, Castañosem, femozem mayormente son de textura media (WRB, 2006; INEGI, 2017). Se puede observar la distribución de los suelos en dos grandes áreas en el estado de Zacatecas. Los litosoles y yermosoles ocupando el norte y noreste del estado, mientras que el sur y suroeste los suelos dominantes son feozem, castañosem y en menor proporción los vertisoles. Los suelos de color rojo y café predominan en las zonas de agricultura de temporal y los suelos color café oscuro se encuentran en las zonas de agricultura de riego. Su clasificación de acuerdo a la textura es: arcillo-arenosos, arcillosos, arcillosos y arenosos (INEGI, 2007).

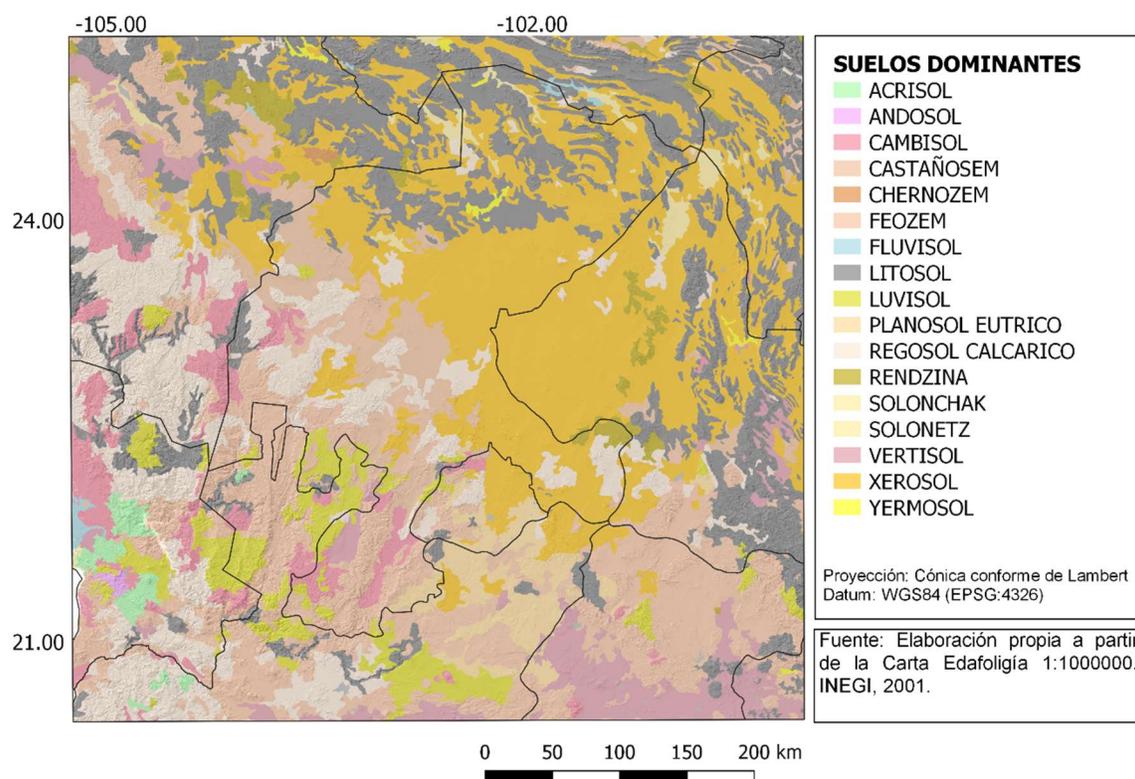


Figura 2.4 Suelos dominantes en la zona de estudio

2.4 Clima

Dentro de la zona de estudio, se identifica que la mayor parte del área central del estado de Zacatecas que encuentra dentro BS₁kw, con un promedio de temperatura anual entre 15° a 18° y un promedio de precipitación de 355 mm (Gracia, 1987). En la parte noreste existen zonas con clima BSohw que corresponde a un árido, semicálido con temperaturas entre 18° y 22°C, durante el mes más frío la temperatura es menor a los 18°C y la temperatura más caliente es mayor a los 22°C. Las lluvias se presentan principalmente durante el verano con un porcentaje de entre 5 y 10.2% de lluvias en invierno (García, 1998). Como se observa en la figura 2.5, la porción suroeste del estado de Zacatecas los climas corresponden a un subcálido subhúmedo y a un templado subhúmedo que se ubica dentro de la zona montañosa del suroeste del Estado, en reto de esta parte en el dominio al estar sobre la sierra los climas van de los cálidos húmedos y subhúmedos hasta los templados húmedos, subhúmedos y semifríos.

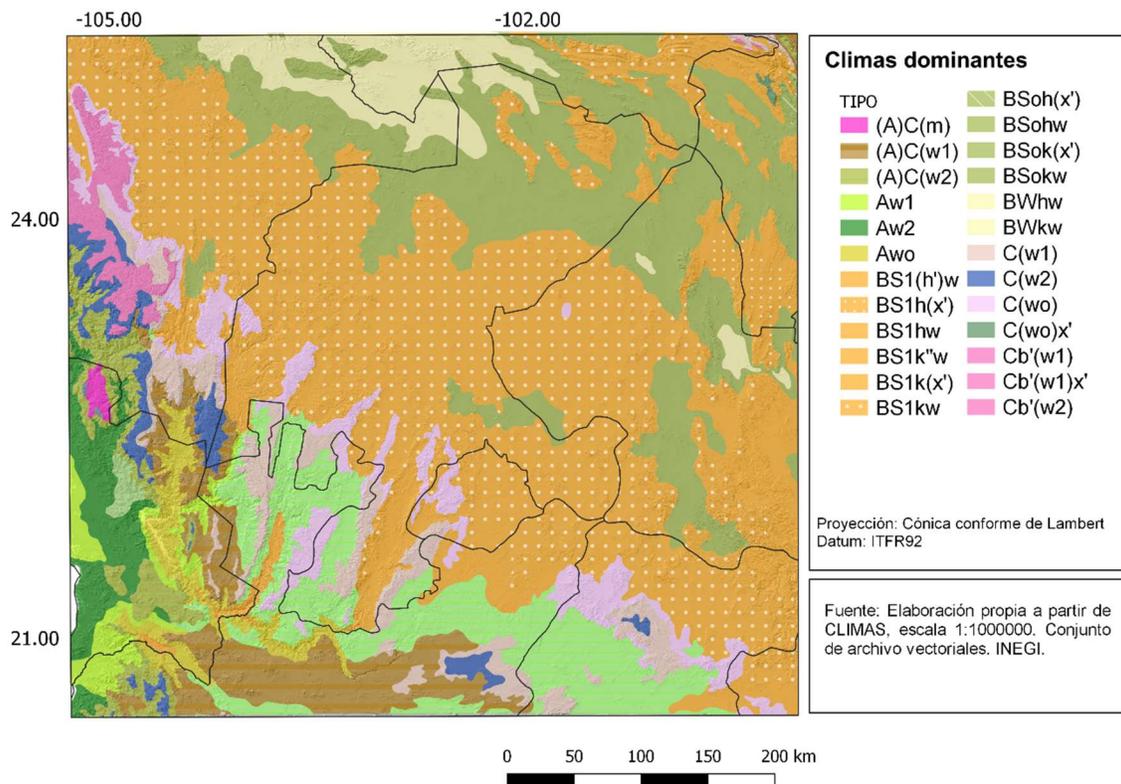


Figura 2.5 Climas dominantes en la zona de estudio.

2.5 Uso de Suelo y Vegetación

La vegetación en el área de estudio incluye diferentes tipos; como bosque de coníferas en las partes altas. En otras áreas mezquital, matorral desértico y pastizales (COTECOCA, 1980). El bosque de coníferas se encuentra entre los 1800 y 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), dentro de estos se encuentran los bosques de pinos (*Pinus Cembroides*). Los matorrales presentes en la zona de estudio se desarrollan entre los 1100 – 2800 msnm como son el matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo y matorral crasicaule (Rzedowski, 1978; INEGI, 2015). El matorral crasicaule se ubica sobre suelos someros, agrupándose en comunidades arbustivas de tallo suculento que corresponden al tipo de las *Opuntia* (Rzedowski, 1978). Los pastizales en el estado de Zacatecas se encuentran en altitudes entre los 1700-2600 msnm (COTECOCA, 1980), siendo el más común el pastizal *Bouteloua*. En los suelos con alto contenido salino los tipos de pastos son: Zacate Alcalino (*Sporobolus airoides*), Pasto salado (*Distichlis spicata*) y Zacate Jihuite (*Eragrostis obtusiflora*) (Balleza y Villaseñor, 2002; INEGI, 2015).

En la figura 2.6 se muestran las condiciones actuales del uso de suelo y vegetación según el INEGI (2015). En la parte suroeste del estado de Zacatecas, que corresponde a la parte alta se presentan la selva caducifolia y diferentes tipos de bosque, esto al encontrarse en sobre las zonas montañosas. La zona central del estado, el uso de suelo se encuentra destinado principalmente a la agricultura, la parte noreste se encuentra cubierta por diferentes tipos de matorrales. En porcentaje los usos de suelo y la vegetación quedaría como sigue: 36.6% matorral, 24.9% agricultura, 14.3% bosque, 5.2% selva, 0.8% otro y 0.1% suelo desprovisto de vegetación (INEGI, 2014).

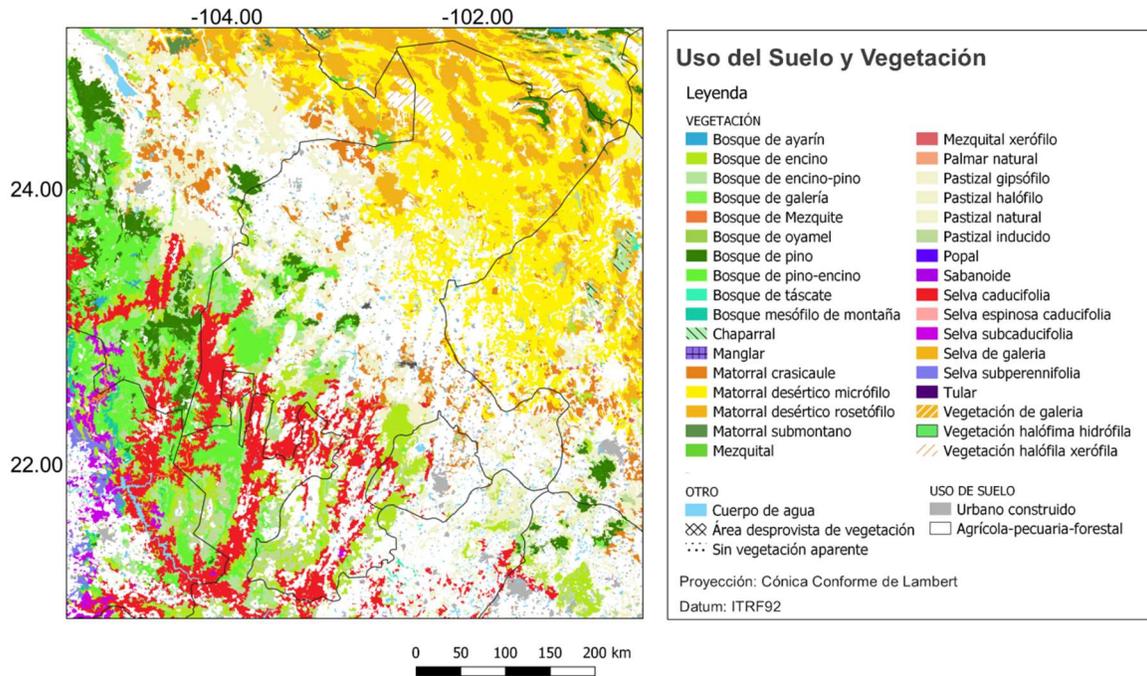


Figura 2.6 Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio (Fuente: INEGI, 2015).

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo, se presenta la metodología empleada en el desarrollo de la investigación. Se realizó un estudio multi-temporal utilizando técnicas de percepción remota mediante el uso de imágenes de los satélites Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI-TIRS. Posteriormente, se presenta la metodología utilizada en el WRF-Chem para la simulación de 15 eventos de tormentas de polvo en la zona de estudio.

3.1 Análisis y estimación de deterioro de suelo mediante técnicas de percepción remota

Se utilizaron imágenes Landsat 5 y 8 de diferentes años, para cada año se obtuvo una imagen en la estación de verano y otra correspondiente al periodo de invierno. En la tabla 3.1 se muestra las fechas de las imágenes adquiridas.

Tabla 3.1 Fechas de las imágenes Landsat.

Sensor	Fecha aa/mm/dd
Landsat 5 TM	1993/02/11
	1993/10/25
	1995/10/31
	1996/01/19
	1996/10/17
Landsat 8 OLI-TIRS	2015/10/22
	2016/02/11

Las imágenes obtenidas del satélite Landsat 5 fueron corregidas utilizando la metodología propuesta por Chander et. al. en el 2009, la cual permite convertir los valores digitales [DN] de la imagen a valores de reflectancia utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda}$$

o puede ser la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale}$$

Donde:

$$G_{rescale} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) Q_{calmin}$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura de sensor [W / (m² sr μm)]

Q_{cal} = Valor del pixel [DN] cuantificado y calibrado

Q_{calmin} = Valor mínimo del pixel [DN] cuantificado y calibrado correspondiente a $LMIN_{\lambda}$

Q_{calmax} = Valor máximo del pixel [DN] cuantificado y calibrado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor que es escala para Q_{calmin} [W / (m² sr μm)]

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor que es escala para Q_{calmax} [W / (m² sr μm)]

$G_{rescale}$ = Banda específica reescalando el factor de ganancia [(W / (m² sr μm)) / DN]

$B_{rescale}$ = Banda específica reescalando el factor de sesgo [W / (m² sr μm)]

Para las correcciones para las imágenes obtenidas del Landsat 8 OLI-TIRS se aplicó la metodología propuesta por Ariza (2013) que propone utilizar una ecuación general para la conversión de reflectancia que incluye la corrección del ángulo solar:

$$\frac{M\rho * Q_{cal} + A\rho}{\sin(\theta_{se})}$$

Donde:

ρ_{λ} = Es el valor reflectancia planetaria o en el techo de la atmosfera TOA, con corrección ángulo solar.

$M\rho$ = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda.

$A\rho$ = Es el factor aditivo de escalado específico por banda

$\sin \theta_{sen}$ = Es el ángulo de elevación solar.

Qcal = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel [DN].

Los factores multiplicativo y aditivo, así como el ángulo de elevación solar se obtienen de los metadatos correspondientes a cada imagen.

Con las imágenes se calcularon diversos índices que permitieran calcular el área de suelo deteriorado en la zona de estudio, en una primera fase se obtuvieron índices que toman como base la vegetación como son: el Índice de Vegetación Ajustada (NDVI), Índice de Brillo de Suelo (BI) y el Índice de Suelo de Diferencia Normalizada (NDSI).

3.1.1 Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)

Uno de los índices de vegetación más utilizados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. El índice se obtiene combinando dos bandas espectrales la roja y la infrarroja cercana (NIR), se utiliza la banda roja porque la vegetación absorbe las longitudes de onda del rojo y el azul (Chuvieco, 1996), en el NIR las combinaciones verde-rojo son más importantes el cual es un indicador de biomasa verde (Tucker, 1979). El NDVI se obtiene de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

donde:

IR=Banda Infrarroja cercana

R= Banda roja.

Los resultados del cálculo del NDVI para un pixel dado varia de -1 a +1. Los valores negativos se encuentran asociados a agua y a nieve, mientras que los valores positivos con valores cercanos a cero representan zonas desprovistas de vegetación como puede rocas y suelos desnudos, los valores de vegetación se presentan a partir de 0.3, los valores entre 0.8-0.9 indican la presencia de verdor y follaje abundante (Noyola et al. 2017).

3.1.2 Índice de Brillo del Suelo (BI)

El BI aplica la reflectancia de dos bandas visibles y la del infrarrojo cercano para calcular el brillo de la superficie (Escadafal and Bacha, 1996). Se considera el brillo del suelo porque presenta un mejor desempeño con respecto de los índices de vegetación; esto debido a su mayor sensibilidad espectral en zonas áridas y semiáridas donde la vegetación es más escasa. El índice BI se calcula:

$$BI = (G^2 + R^2 + NIR^2)^{1/2}$$

donde:

G = banda verde

R = banda roja

NIR = banda infrarroja cercana

3.1.3 índice de Suelo de Diferencia Normalizada (NDSI)

En este índice, su principio de operación se basa en que la reflectancia del suelo es mayor en la banda *SWIR* que en la *NIR* (Rogers, 2004), siendo entonces una herramienta útil para discriminar esta cobertura con respecto de otras. El índice se calcula como sigue:

$$NDSI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

donde:

SWIR es la banda de infrarrojo de onda corta

NIR es la banda del infrarrojo cercano

R corresponde a la banda roja

Los índices SAVI, NDVI y NDSI fueron calculados utilizando la calculadora raster del Programa de QGIS, el BI se obtuvo usando el programa Matlab. Los índices SAVI, NDSI y BI se clasificaron en cinco categorías equidistantes para determinar el grado de deterioro del suelo.

La elaboración de la cartografía obtenida de los resultados de los índices se realizó en QGIS para todos los índices.

3.2 Análisis de datos de viento

Se obtuvieron datos meteorológicos de diferentes estaciones agroclimáticas para un periodo de 2005 a 2018, las estaciones se encuentran localizada dentro de la zona de estudio (Figura 3.1) y pertenecen a la red de estaciones agroclimáticas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el estado de Zacatecas, los datos se encuentran disponibles en internet (<http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/historico.php?id=18851>).

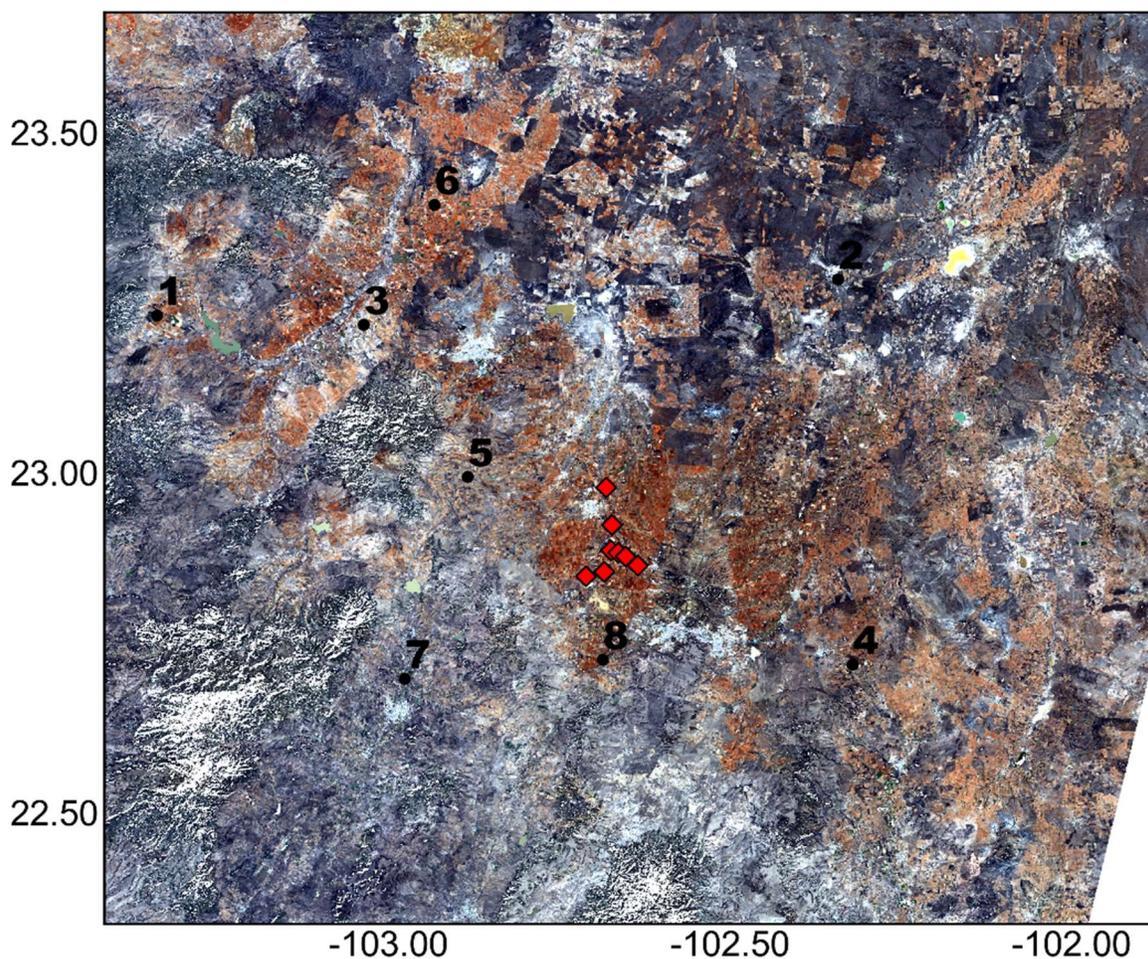


Figura 3.1 Localización de las estaciones agroclimáticas y puntos de muestras de suelo. Los números indican las estaciones y los puntos en rojos los sitios donde se tomaron las muestras de suelo.

Los datos registrados por las estaciones son se presentan en la tabla 3.2, los datos fueron obtenidos para las estaciones de: 1) Ábrego, 2) COBAEZ, 3) Emancipación, 4) Las Arcinas, 5) Mesa de Fuentes, 6) Rancho Grande, 7) Santa Rita, 8) U.A. Agronomía (Figura 3.2).

Con los datos de velocidad de viento se realizaron gráficas anuales para identificar las velocidades altas y así establecer fechas de tormentas de polvo que estén asociadas a frentes fríos en el área de estudio, posteriormente se analizó la carta sinóptica que permitió conocer la dirección en la que desplaza el frente frío, aunado a esto se realizaron graficas de dirección de viento que permitieron establecer la dirección dominante del viento principalmente durante el invierno.

Tabla 3.2 Datos disponibles en las estaciones agroclimáticas del INIFAP

Fecha (Día-Mes-Año)	Temperatura (°C)			Precipitación (mm) Acumulada	Humedad relativa (%)			Radiación (W/m) Total	Viento (Km/hr)			Evapotranspiración (mm) Acumulada
	Max	Min	Med		Max	Min	Med		Velocidad	Dirección	Proveniente	
									Max	Med		

Con los datos de velocidad de viento se realizaron gráficas anuales para identificar las velocidades altas y así establecer fechas de tormentas de polvo que estén asociadas a frentes fríos en el área de estudio, posteriormente se analizó la carta sinóptica que permitió conocer la dirección en la que desplaza el frente frío, aunado a esto se realizaron graficas de dirección de viento que permitieron establecer la dirección dominante del viento principalmente durante el invierno.

Se graficaron datos de precipitación para la estación de verano correspondiente a los años que se trabajaron con las imágenes Landsat esto ayudó a determinar que tanto afectaba la cantidad de precipitación en el cálculo de los índices. Para los años de 1993, 1995 y 1996 los datos de precipitación se obtuvieron del programa ERIC III.

3.3 WRF-Chem

El Weather Research and Forecasting con Química acoplada (WRF-Chem por sus siglas en inglés) se ha utilizado para la modelación de tormentas de polvo (Su & Fung, 2015; Rizza et al. 2018).

El módulo químico fue diseñado para ser compatible con el WRF, ambos usando un esquema de transporte, mismo mallado y la misma física. El paquete del WRF-Chem consiste en los siguientes componentes:

- Deposición seca, junto con el esquema de suelo/ vegetación
- Cuatro opciones para emisiones biogénicas
- Tres opciones para emisiones antropogénicas
- Algunas opciones para mecanismos químicos en forma gaseosa
- Tres opciones de esquema de fotosíntesis
- Cinco opciones para esquemas de aerosoles
- Efecto directo del aerosol a través de la interacción con la radiación atmosférica, la fotólisis y rutinas de microfísica.
- Emisiones volcánicas
- Emisión de polvo.
- La modelación dentro del WRF-Chem se realiza en cuatro etapas, en la primera de ellas es la obtención de datos, que pueden ser obtenidos del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y pueden ser de tres tipos: a) FNL (Final Global Assimilation System), b) GFS (Global Forecast System) y c) ENS (Ensamble forecast).
- La segunda etapa consiste en la configuración de dominio, donde se ubica la zona de estudio, y los datos meteorológicos, en esta etapa se hacen las configuraciones físicas y químicas del modelo. En la tercera etapa se aplican las ecuaciones que incluye en núcleo ARW y el módulo químico, en este se aplican las opciones que se seleccionaron en la segunda etapa, sobre cada punto del mallado, en cada paso de tiempo establecido en el dominio. En la cuarta etapa se trata de la visualización de los resultados obtenidos del WRF-Chem, que pueden ser usados programas de NCL (NCAR Command Language) o post procesamiento GrAds (Grid Analysis and Display System) (Álvarez, 2017).
- Uno de los principales esquemas de polvo incluidos en el WRF-Chem, es el esquema GOCART, este modelo para la simulación de concentración de polvo que necesita valores de velocidad de viento de 10 m/s, límite de velocidad de fricción, características del suelo, particularmente la erosión (Nikfal, et al. 2018).

- El esquema de emisión Shao (2004) de polvo basado en física, se representan los principales procesos de emisión de polvo como la saltación y la disgregación del material. En el esquema de Shao (S04), el factor de erodabilidad es solamente usado para restringir las zonas potenciales de emisión (Shao, 2004; Su & Fung, 2015). En este esquema se consideran cuatro tamaños de granos de polvo: 0-0.25 μm , 2.5-5 μm , 5-10 μm y 10-20 μm . Una parte importante es la función de las propiedades de la superficie, los datos de uso de suelo usados en el modelo WRF-Chem juegan un papel importante en la simulación de emisión de polvo (Shao, 2004; Su & Fung, 2015).

3.3.1 Modelaciones de tormentas de polvo en el área de estudio

Se seleccionaron 15 eventos para ser modelado, los eventos corresponden a los meses de la estación de invierno en el área de estudio. La selección se realizó a partir de la dirección de avance del frente frío sobre el territorio y de las velocidades de viento mayores a 9 m/s (Csavina, et al. 2014; Liu, et al. 2008) registradas en todas las estaciones agroclimáticas considerándose las siguientes fechas presentadas en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Fechas de eventos simulados.

<i>No. Evento</i>	<i>Día</i>	<i>Mes</i>	<i>Año</i>
1	29	Diciembre	2006
2	31	Enero	2007
3	14	Febrero	2007
4	16	Febrero	2008
5	11	Abril	2009
6	01	Diciembre	2009
7	09	Marzo	2010
8	03	Febrero	2011
9	20	Marzo	2012
10	21	Febrero	2013
11	27	Diciembre	2015
12	7-9	Marzo	2016
13	13	Febrero	2017
14	07	diciembre	2017
15	10	Abril	2018

Las condiciones iniciales y de frontera para la simulación de las tormentas fueron generadas cada seis horas por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés) usando los archivos Global Forecast System (GFS)

(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>) con una escala de 0.5° x 0.5°. Los datos incluyen variables en superficie y variables tridimensionales como son temperatura, vapor de agua, energía geopotencial y perfiles horizontales de viento en 26 niveles de presión (entre 1000 y 10 hPa) (Song, 2018).

Para la configuración del modelo se crearon dos dominios, el dominio 1 para generar las condiciones de entorno de 120 x 120 puntos con un espaciamiento de 15 km, el dominio 2 de alta resolución de 175 x 175 puntos con un espaciamiento de 3 km ambos con coordenadas centrales 22.43 de latitud norte y -102.65 de longitud oeste (Figura 3.2) y 29 niveles verticales, con un paso de tiempo de 90 segundos (s). Las parametrizaciones físicas utilizadas en las modelaciones se muestran en la tabla 3.4.

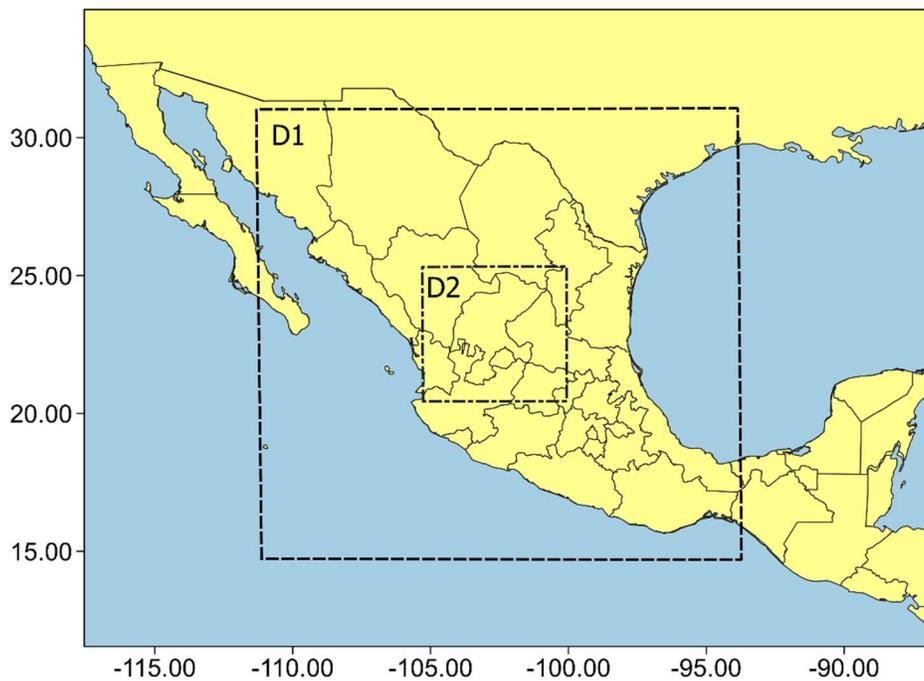


Figura 3.2 Localización geográfica de los dominios: D1=dominio 1 y D2= dominio 2

Tabla 3.4 Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo WRF-Chem.

Micro Physics Options mp_physics = 3	WRF Single-moment 3- clases Scheme Hong, Song–You, Jimmy Dudhia, and Shu–Hua Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. <i>Mon. Wea. Rev.</i> , 132 , 103–120. <a href="https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2">doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2
Longwave Options	RRTM Longwave Scheme

ra_lw_physics = 1	Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough (1997), Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. <i>J. Geophys. Res.</i> , 102, 16663–16682.
Shorthwave Options ra_sw_physics = 1	Dudhia Shortwave Scheme Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. <i>J. Atmos. Sci.</i> , 46 , 3077–3107.
Surface Layer Options sf_sfclay_physics = 1	MM5 Similarity Scheme Paulson, C. A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. <i>J. Appl. Meteor.</i> , 9 , 857–861. Dyer, A. J., and B. B. Hicks, 1970: Flux–gradient relationships in the constant flux layer. <i>Quart. J. Roy. Meteor. Soc.</i> , 96 , 715–721. Webb, E. K., 1970: Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. <i>Quart. J. Roy. Meteor. Soc.</i> , 96 , 67–90. Beljaars, A.C.M., 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection. <i>Quart. J. Roy. Meteor. Soc.</i> , 121 , 255–270. Zhang, D.–L., and R.A. Anthes, 1982: A high–resolution model of the planetary boundary layer– sensitivity tests and comparisons with SESAME–79 data. <i>J. Appl. Meteor.</i> , 21 , 1594–1609.
Land Surface Options sf_surface_physics = 2	Unified Noah Land Surface Model Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.
Planetary Boundary Layer bl_pbl_physics = 1	Yonsei University Scheme (YSU) Hong, Song–You, Yign Noh, Jimy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. <i>Mon. Wea. Rev.</i> , 134 , 2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1

Las parametrizaciones para el módulo químico utilizadas se presentan en la Tabla 3.5 donde sólo se considera la opción de polvo y el esquema de polvo.

Tabla 3.5 Parametrizaciones utilizadas del módulo químico del WRF-Chem.

Chem Option chem_ops = 401	Dust concentration only
Dust Option dust_opt = 4	Include GOCART Dust emission with UOC modifications
Dust Scheme dust_scheme = 2	Dust emissions following Shao, 2004.

3.4 Análisis granulométrico del suelo

Se tomaron muestras en campo de suelos, en áreas que se identificaron previamente con el índice BI como deterioradas de consideraron seis puntos de muestra y dos puntos más que corresponden a zonas de emisión de polvo identificadas por el WRF (Figura 3.1).

Con las ocho muestras de suelo obtenidas en campo, se realizó el tamizado de las muestras, el cual consiste en separar los distintos componentes sólidos de una mezcla (Quezada, 2012) se aprovecharon los diferentes tamaños de partículas, los cuales se pasaron por los siguientes tamaños de tamices (Tabla 3.6):

Tabla 3.6 Tamaño de tamices utilizados.

No. de tamiz	Apertura de malla
120	125 µm
80	180 µm
60	250 µm
35	500 µm
30	600 µm
18	1 mm
10	2 mm

El tamaño de cada muestra analizada fue de 1 kg, posteriormente se obtuvieron los porcentajes de los pesos retenidos por cada tamiz para ser graficados, y así determinar la granulometría presente en área de estudio.

Capítulo 4

Análisis multi-temporal de la degradación del suelo en el centro-norte de México

En el presente capítulo, se muestra un análisis multi-temporal realizado con imágenes Landsat 5 y Landsat 8 de los años 1996, 2015 y 2016. Los índices permiten identificar los principales cambios en el suelo en la zona de estudio. Se utilizó el NDVI para realizar una estimación de áreas con cobertura vegetal durante los meses de febrero y octubre. Posteriormente, se estimó el BI asociando una categorización de deterioro de suelo a partir de los valores de reflectancia calculados. Se establecieron cinco categorías que permite entender la evolución del proceso de deterioro del suelo durante 20 años analizados en este estudio. Por último, se presenta los resultados del NDSI, que permiten corroborar los valores de estimados para el NDVI.

4.1 Cambios en la vegetación- NDVI multitemporal

Los cálculos de NDVI en la zona de estudio permiten detectar cambios en la cobertura vegetal, principalmente en las zonas agrícolas. En esta investigación, se adquirieron datos satelitales de dos estaciones importantes invierno y otoño, temporada en la se realiza la última cosecha del ciclo agrícola. Los resultados obtenidos corresponden a los meses de febrero y octubre de 1996; así como de los meses de octubre de 2015 y febrero de 2016.

En la figura 4.1, se muestra la comparación entre los meses de febrero de 1996 y 2016 de índice calculado NDVI. El rango de valores de reflectancia oscila entre ~ -0.7 t 0.84 . Los valores positivos y más cercanos a 1 representa una mayor presencia de vegetación; en cambio valores cercanos a 0.2 la vegetación es muy escasa; y valores negativos y cercanos a -1 son un indicativo de que la cobertura corresponde a una clase que no es vegetación, por ejemplo, agua. En el caso de las imágenes mostradas en la figura 4.1 la mayor parte de la cobertura del suelo corresponde a una zona con escasa vegetación. También se logra apreciar

algunas zonas, de forma rectangular que poseen los mayores valores del NDVI, esto se debe a que esas zonas en particular son cultivos según lo reportado por Noyola, et al. (2017).

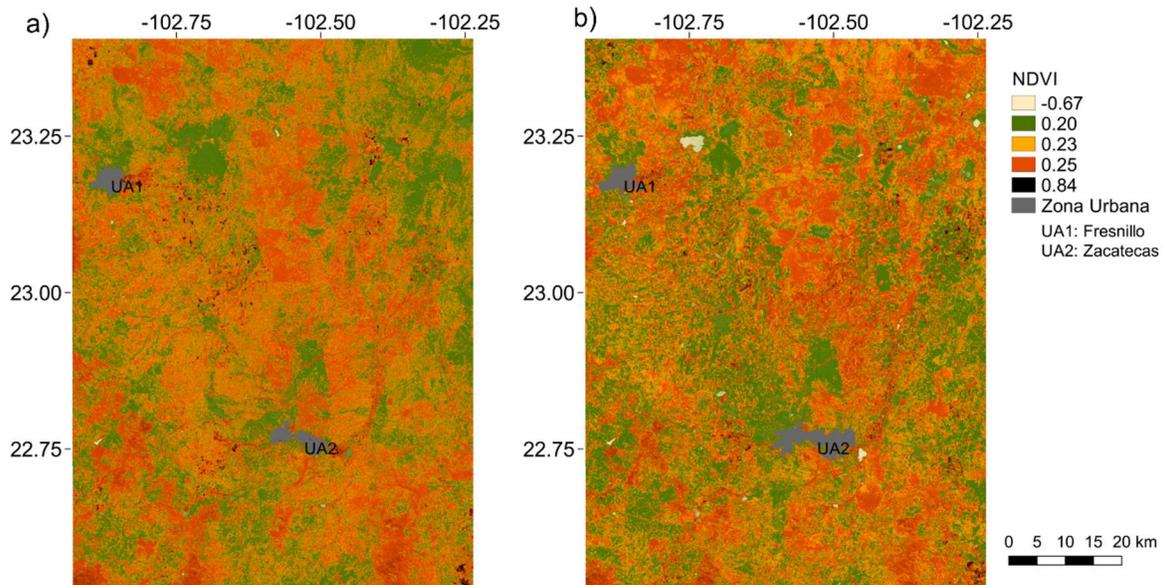


Figura 4.1 Resultados del NDVI para el mes de febrero: a) 1996 y b) 2016

En la figura 4.2 se muestra la distribución del área en km^2 por rango para cada uno de los resultados obtenidos. En febrero de 1996 la mayor parte del área que se estimó está asociada a cobertura vegetal nula o muy escasa (0.2 e inferior de reflectancia) con 6987 km^2 , en segundo lugar, se encuentra los valores asociados a vegetación densa/saludable con 443.3 km^2 identificando principalmente cultivos. La distribución de la cobertura se modifica para febrero del 2016, donde se aprecia un incremento de cobertura vegetal. Una posible razón del incremento es debido a la presencia de precipitación en días previos a la adquisición de la escena satelital, lo que resultó en un incremento aparente de vegetación. En esta escena, la “vegetación escasa” estimada se reduce a 2630.8 km^2 y la correspondiente a cobertura vegetal moderada/densa es de 12.46 km^2 . Durante este año también se presenta incremento en los valores más negativos (cobertura no vegetal) con un área estimada de 21.29 km^2 que puede corresponder a pequeños cuerpos de agua intermitentes.



Figura 4.2 Áreas estimadas de NDVI para el mes de febrero de 1996 y 2016

Los mapas de reflectancias obtenidos para las imágenes del mes de octubre de 1996 y 2015 se presentan en la figura 4.3, donde se puede observar una diferencia clara entre los dos cálculos de NDVI realizados. Para octubre de 1996 la mayor parte la superficie se encuentra en los rangos de 0.2 y 0.6 (vegetación moderada a densa). La vegetación identificada corresponde con la zona agrícola cercana con las ciudades de Fresnillo y Zacatecas. En el inciso b (figura 4.3) corresponde al mes de octubre de 2015, el resultado muestra un decremento en los valores del NDVI, quedando la mayor parte del área de estudio con valores de reflectancia de 0.2, lo que nos habla de una menor cantidad de vegetación presente para este mes.

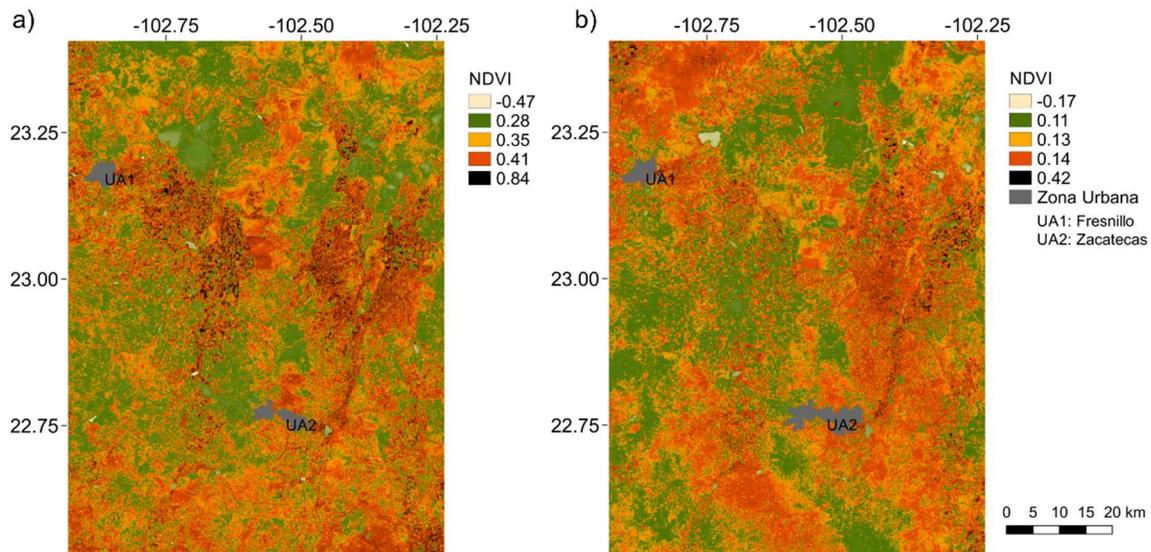


Figura 4.3 Resultados del NDVI para el mes de octubre: a) 1996 y b) 2015

La estimación de área en km² por categoría se presenta en la figura 4.4, las áreas para el mes de octubre de 1996 quedan principalmente en el rango de 0.6 a 1 con 6795.6 km² y 163.5

km² respectivamente, con valores de entre -0.2 y 0.2 se estimó un área de 389.6 km² y sólo un área de 6.4 km² en la categoría de -0.6. Para octubre de 2015, la mayor cantidad del área estimada se ubica en el rango de entre -0.2 y 0.2 con 7171 km², presentando una reducción considerable en la categoría de 0.6 con 184.2 km², lo que resulta en una disminución de la cobertura en la vegetación para los meses de octubre en el periodo de 19 años entre los cálculos obtenidos de las imágenes Landsat.

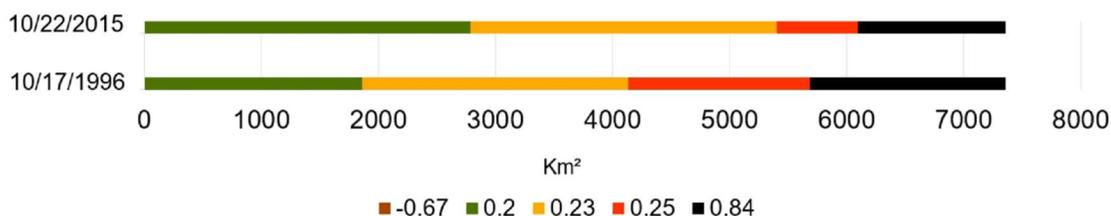


Figura 4.4 Áreas estimadas de NDVI para el mes de octubre de 1996 y 2015

4.2 Estimación de suelo deteriorado mediante la aplicación del BI

Del cálculo del índice de brillo del suelo (BI) se obtuvieron múltiples resultados. Se obtuvieron comparaciones estacionales de cada año analizado, la primera corresponde al verano y la segunda al invierno.

Los cambios observados con el cálculo del BI correspondientes al mes de octubre en los años 1995, 1996 y 2015, se muestran en la figura 4.5. En las imágenes se aprecia que las áreas clasificadas como altamente deterioradas (en negro) son muy similares para los años de 1996 y 2015. Por otro lado, las áreas que fueron clasificadas como deterioradas o en proceso de ser deteriorado cambia de forma significativa, una posible razón de la variabilidad puede estar relacionada con la cantidad de precipitación. Para el caso específico del 22 de octubre del 2015, se observa que existe un incremento en la clasificación de suelo en buenas condiciones, pero este se debe principalmente a la cantidad de precipitación en el área de estudio en los días previos a la fecha de captura de la imagen. La cantidad de precipitación tiene una alta influencia en la humedad del suelo, así como el crecimiento de arbustos y pastos, estos causan impactos en los valores del BI. Resulta importante destacar que la categoría altamente deteriorada no muestra cambios importantes entre las fechas analizadas.

Para corroborar la influencia de la precipitación en el cálculo del índice, registros de estaciones climáticas localizadas en el área de estudio fueron consultados. Las estaciones utilizadas se muestran en la figura 4.6. Las flechas negras indican las fechas de las capturas de las imágenes. En octubre de 1995 y 1996 no existe registro de precipitación los días anteriores a la fecha de captura de la imagen, pero para octubre de 2015 se presentó un evento de precipitación intensa. Por lo tanto, analizando en conjunto las figuras 4.5 y 4.6 se revela que el índice BI es sensible a la presencia de humedad. El índice BI debería ser mayormente aplicado durante la temporada seca. Es importante notar que el aumento en la precipitación en el área de estudio es muy similar en los años analizados, es decir, la cantidad de precipitación no es muy variable.

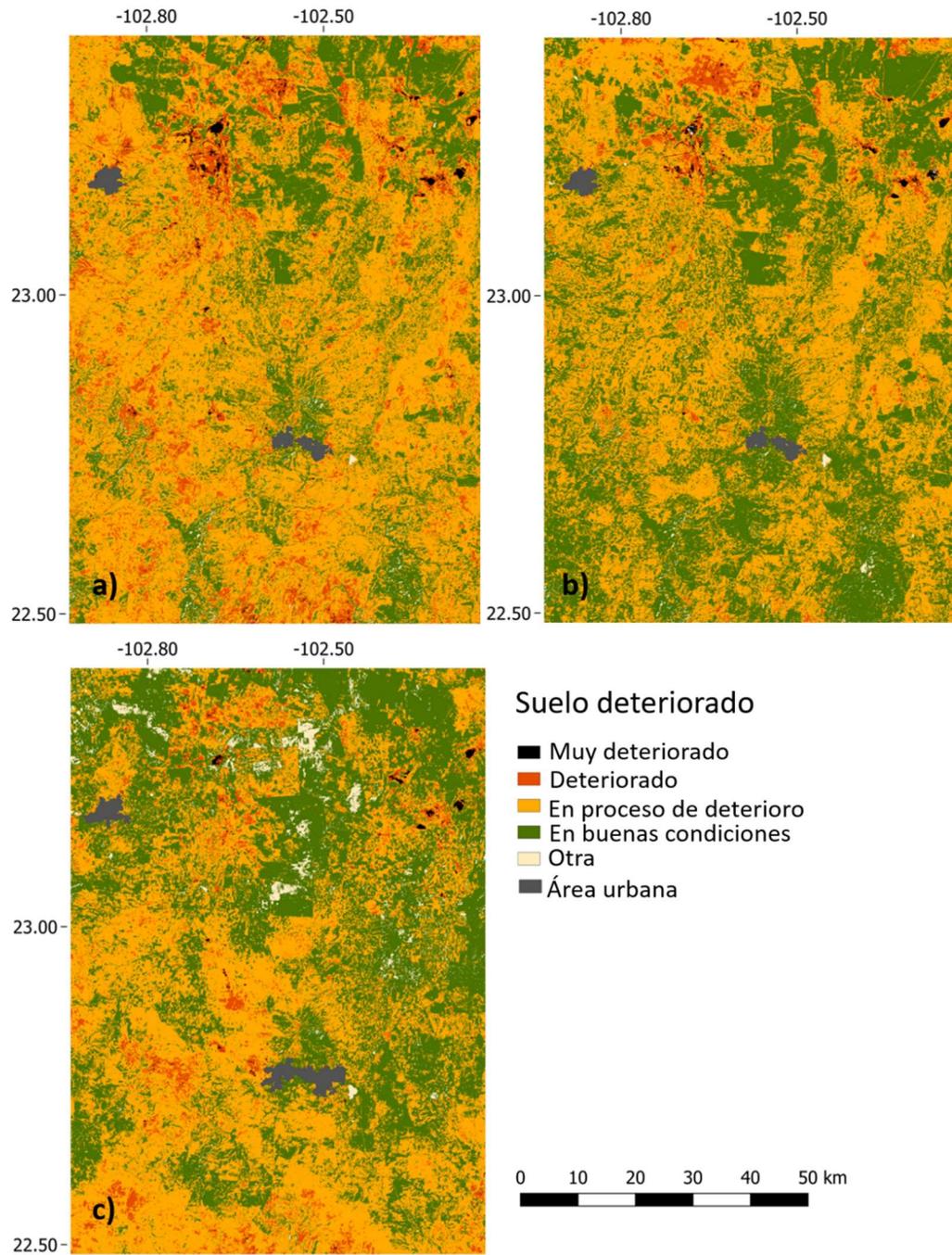


Figura 4.5 Clasificación de áreas deterioradas basadas en la Bright Index (BI) durante la estación lluviosa: a) octubre 1995, b) octubre 1996 y c) octubre 2015.

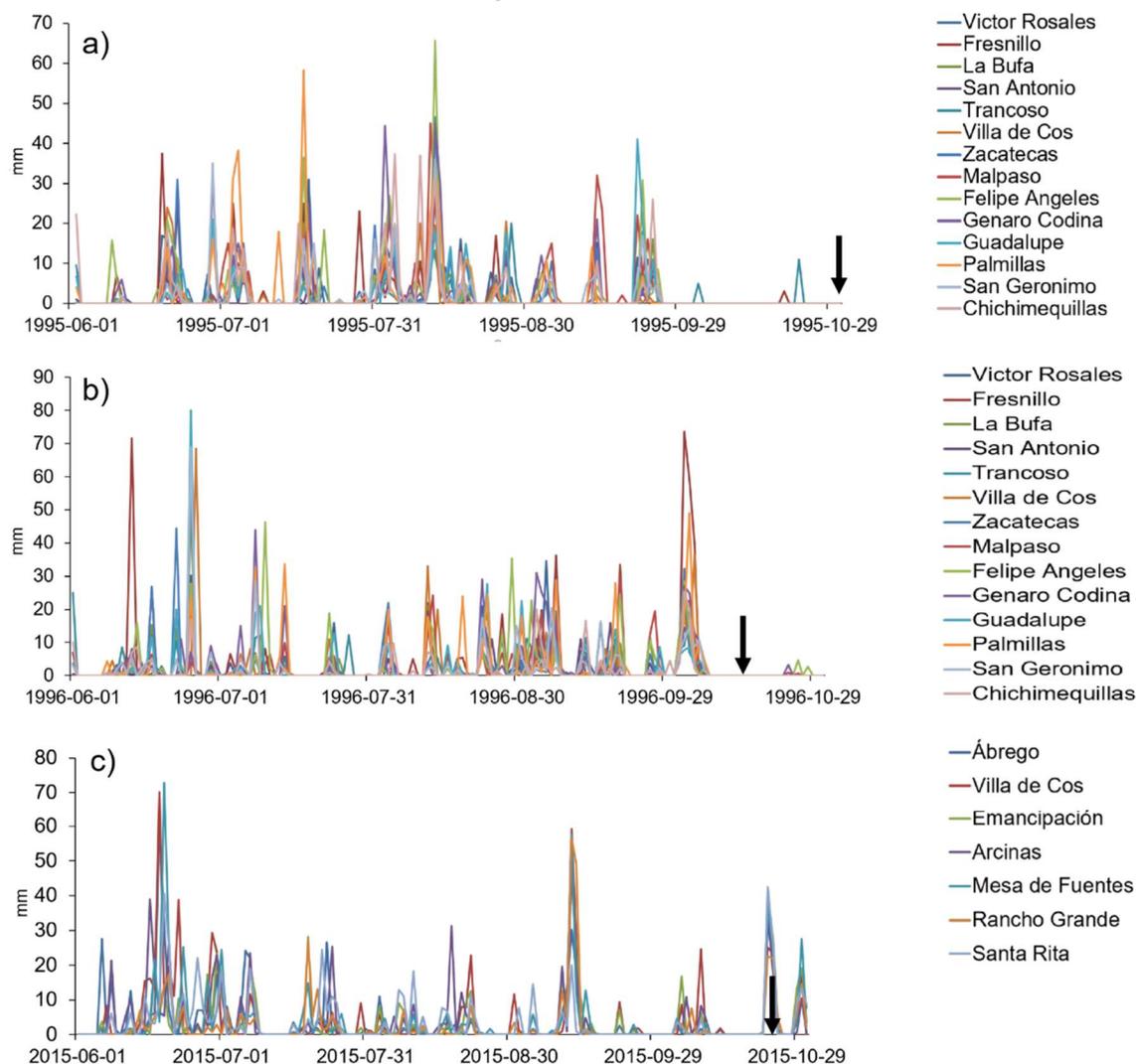


Figura 4.6 Precipitación para varios meses durante: a) 1995, b) 1996 y c) 2015. Las flechas indican las fechas (31 de octubre de 1995, 17 de octubre de 1996, 22 de octubre de 2015) cuando las imágenes fueron tomadas.

La aplicación del índice es de mayor utilidad durante la temporada de invierno, donde los suelos tienen un menor contenido de humedad, en comparación con los meses de verano. En la figura 4.7, se muestran los resultados obtenidos en la reclasificación del BI para el mes de febrero en dos diferentes años. En el a) se muestra el correspondiente al año 1996. Se observa que la mayor parte del área de la zona de estudio, se encuentra clasificada en las categorías de en proceso de deterioro y áreas con suelo en buenas condiciones. También, se observan algunos puntos localizados al noreste de fresnillo como deteriorados, y sólo una zona

pequeña altamente deteriorada. En el este de la zona de estudio en la línea de los 23.03 de latitud norte, se ubican unas zonas con suelo deteriorado.

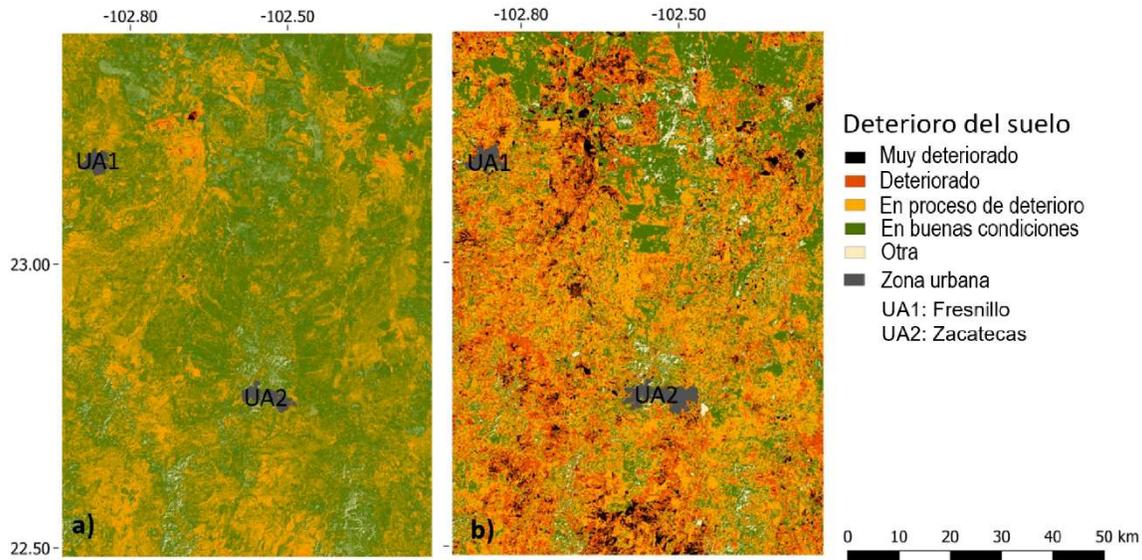


Figura 4.7 Clasificación de áreas deterioradas basadas en la Bright Index (BI) durante el mes de febrero en los siguientes años: a) 1996 y b) 2016.

En b) de la figura 4.7, se presenta la clasificación que corresponde al mes de febrero de 2016. Las zonas en esta clasificación se encuentran en áreas deterioradas, seguidas por zonas en proceso de deterioro. Las zonas que tiene suelo en buenas condiciones son menores, y se encuentran ubicadas en la parte del centro con dirección al norte de la zona. Se presenta un incremento considerable en área con suelo muy deteriorado, principalmente en las zonas cercanas a la zona urbana de fresnillo y otras áreas entre las zonas urbanas de Zacatecas y Fresnillo. Las zonas ubicadas en la línea de los 23.03 norte, presenta un incremento, al cambiar de una categoría de deterioradas en 1996 a muy deterioradas en el 2016.

En la figura 4.8 se muestran las áreas estimadas por categoría para el mes de octubre en los años de 1996 y 2015. Las diferencias entre las áreas en cada categoría presentan un cambio en este lapso de 20 años, los cambios en las categorías poseen una tendencia hacia la reducción, que como ya se explicó en la figura 4.6, esta reducción puede deberse a la precipitación, la cual ejerce cierto nivel de influencia en el suelo.

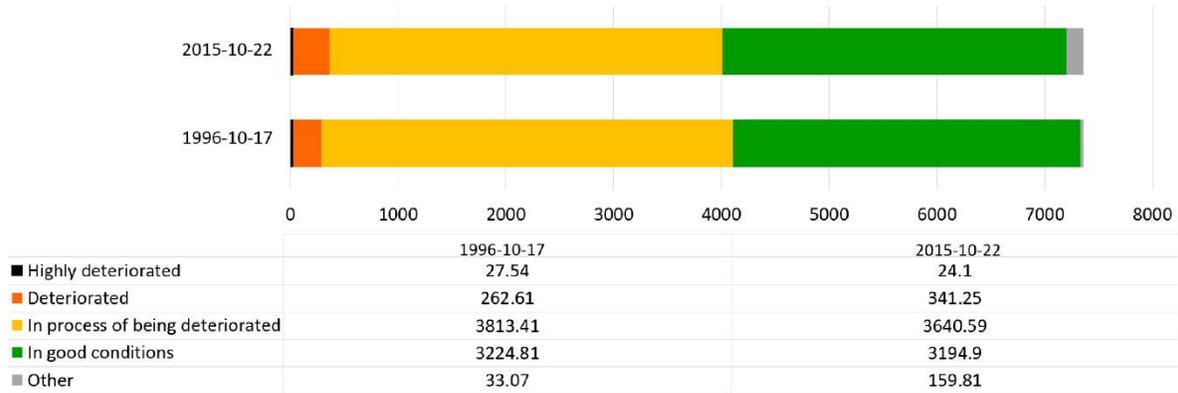


Figura 4.8 Áreas estimadas de BI para el mes de octubre de 1996 y 2015.

En la figura 4.9, se muestran los principales cambios en área estimada obtenida del cálculo del BI para el mes de febrero en los años de 1996 y 2016. La transición entre categorías en este periodo de 20 años es más evidente. En la categoría de muy deteriorado se tiene una diferencia de 415.7 km², mientras que en la categoría de deteriorado en 1996 se estimaron 60.82 km² a 1718.6 km² para el 2016. En la tercera categoría que corresponde al suelo que está en proceso de deterioro el aumento se estimó en 542.4 km². Por otro el área que corresponde a suelo en buenas condiciones en 1996 disminuye, dando paso a zonas en proceso de deterioro. La gráfica permite mostrar de forma concisa los cambios que se presentaron durante el estudio de 20 años, los cuales han creado diferentes tipos de impacto en la zona de estudio.

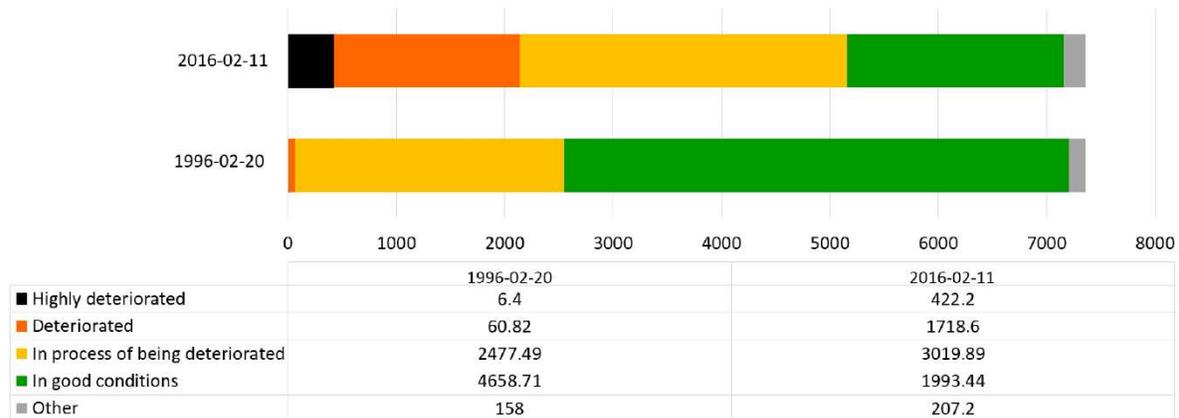


Figura 4.9 Áreas estimadas de BI para el mes de octubre de 1996 y 2015.

4.3 Estimación de suelo deteriorado mediante la aplicación del NDSI

Los resultados del índice NDSI del mes de febrero en los años 1996 y 2016, se muestran en la figura 4.10. En el a) se presenta lo correspondiente a febrero de 1996. La mayor parte del área tiene un valor de 0.2, los cuerpos con valores -0.6 corresponde a cuerpos de agua algunos intermitentes. La zona que corresponde a pastizales mantiene valores de 0.2 y los píxeles que tienen valores de -0.2 son áreas agrícolas.

El cambio que se presenta para el año de 2016 en la representación espacial (Figura 4.10 b), la parte del norte de la zona de estudio presentada se parecía un cambio en el rango, presentándose valores de 0.6 que corresponde a zonas de pastizales, al igual que en el caso anterior destacan los valores de -0.2 las zonas que son destinadas para uso agrícolas, de igual forma se aprecia claramente los cuerpos de agua.

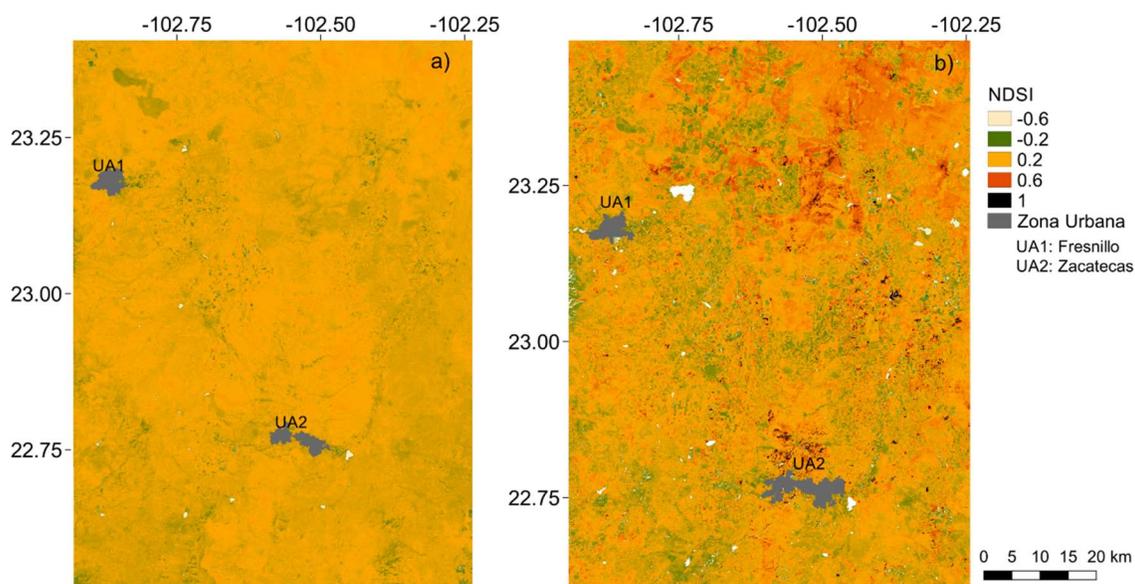


Figura 4.10 Resultados del NDSI para la zona de estudio en el mes de febrero: a) 1996 y b) 2016.

En la figura 4.11 se muestra el porcentaje en área km^2 de los rangos obtenidos del DNSI, para el mes de febrero de 1996 los valores del índice se concentraban en el rango de -0.2 y 2 con 6538.1 km^2 , en el rango de 0.6 con 796.2 km^2 , el rango de -0.6 se estimó un valor mínimo de 5.32 km^2 . Estos rangos presentan un cambio en área para febrero de 2016, al presentarse valores de 1 de NDSI con 112 km^2 . En el segundo rango de 0.6 se estimó un área de 3008

km², los valores para rango de -0.2 a 0.2 queda en 4180.5 km², que dando el rango de -0.6 con un valor 43.7 km².

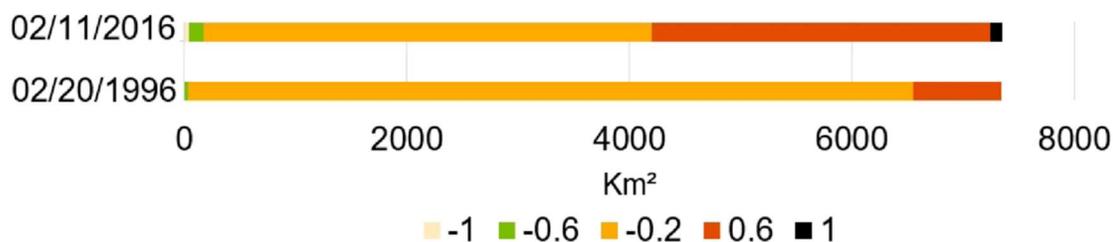
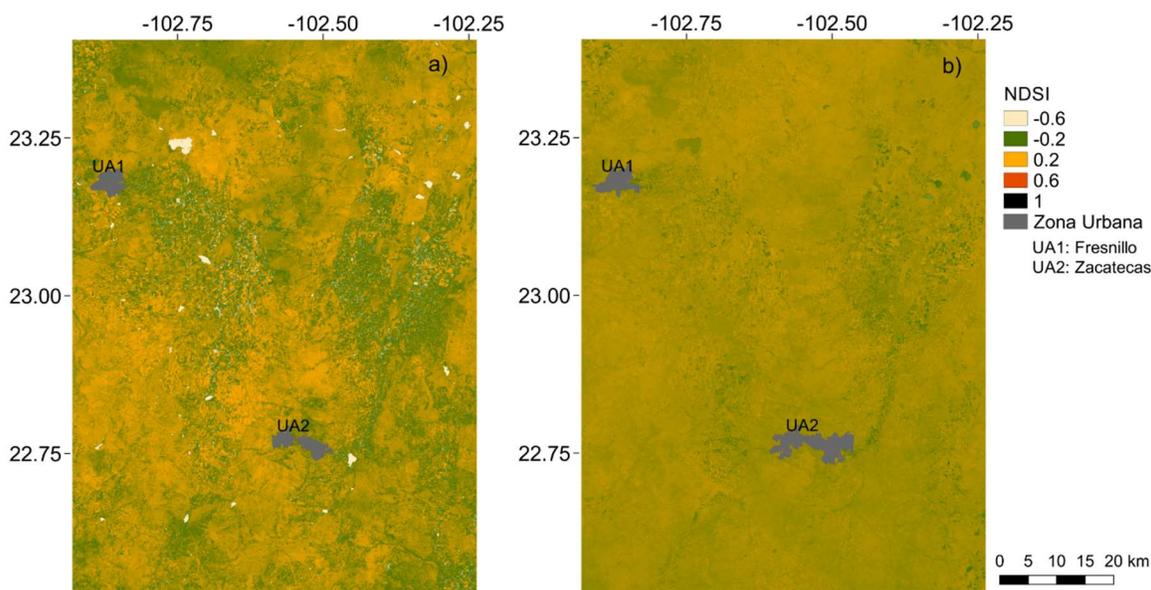


Figura 4.11 Áreas estimadas de NDSI para el mes de febrero de 1996 y 2016

La representación espacial del NDSI para el mes de octubre se presenta en la figura 4.12, en a) se muestra el resultado para el año de 1996, donde se observa que la mayor parte del área se distribuye en dos rangos y destacando los cuerpos de agua. Para octubre de 2015 en b), la mayor parte de las zonas quedan en un solo rango.



4.12 Resultados del NDSI para el mes de octubre: a) 1996 y b) 2015

En la figura 4.13 se muestra las áreas estimadas en km² para cada rango del NDSI, para este caso en el mes de octubre de los años de 1996 y 2015. Para el caso de octubre de 1996 el área estimada para el rango que identifica los cuerpos de agua (-0.6) es de 6.1 km², para el rango de -0.2 es de 418.28 km² y para 0.2 es de 6878.6 km² concentrándose la mayor parte del área en este rango, para el rango de 0.6 el área es de 32.23 km². En octubre de 2015 las áreas

estimadas por rango se presentan sólo en dos de estos, con 14.45 km² para el rango de -0.2 y 7340 km² para el rango de 0.2.

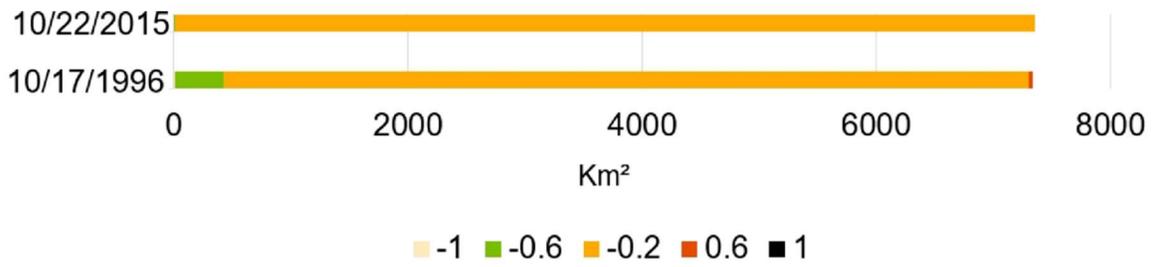


Figura 4.13 Áreas estimadas de NDSI para el mes de octubre de 1996 y 2015

Capítulo 5.

Condiciones meteorológicas en el centro-norte de México

En este capítulo se presenta un análisis de cuatro variables meteorológicas a partir de los registros de las ocho estaciones del INIFAP identificadas en la zona de estudio. Las variables que se presentan son temperatura, velocidad de viento, humedad relativa y precipitación. Los resultados obtenidos se presentan para seis meses de la temporada de frentes fríos en México, en el análisis se consideraron los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre en el periodo de 2005 a 2018.

5.1 Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa y precipitación juegan un papel importante en estudios climáticos, determinan la vegetación y las condiciones para los asentamientos humanos. El efecto del viento es relevante, es asociado a la presencia de frentes y masas de aire frío, así como otros fenómenos meteorológicos. Además controla el transporte de humedad, polvos y otro tipo de contaminantes. Los eventos extremos de polvo causan erosión, levantamiento de la fracción fina del suelo y tormentas de arena, generando el deterioro del suelo, en regiones donde los cambios de uso han sido, principalmente aquellos destinados a la práctica agrícola.

En la figura 5.1 se presenta la localización geográfica de las ocho estaciones agroclimáticas del Instituto Nacional en Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, disponibles en <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/historico.php>) en el estado de Zacatecas, las estaciones se encuentran ubicadas en la parte central de Zacatecas, en el este se encuentran las estaciones de COBAEZ (2) en la localidad de Villa de Cos y Las Arcinas (4), seguida por la estación de U.A. Agronomía (8) la cual es la más cercana a la ciudad de Zacatecas, cercano a los -103°W se encuentran las estaciones de Mesa de Fuentes (5), Rancho Grande (6), Santa Rita (7) y Emancipación (3), en la porción occidental se ubica la estación de Ábrego (1).

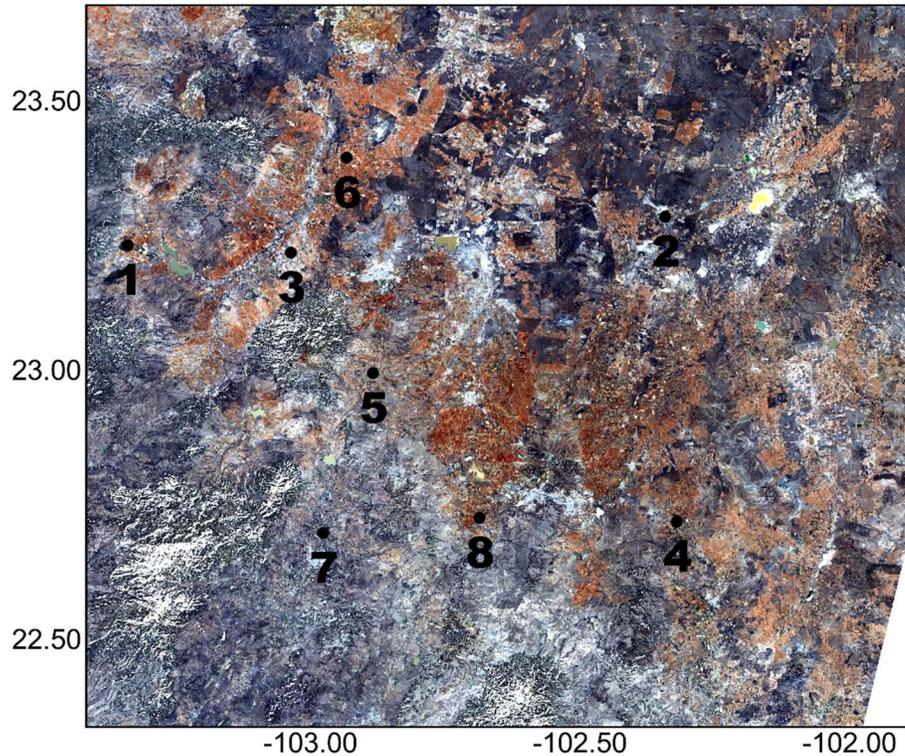


Figura 5.1 Localización geográfica de las estaciones del INIFAP, los números indican la estación por orden alfabético.

5.2 Datos de Temperatura

En esta sección se muestran los datos de temperatura observada en las estaciones automáticas del inifap seleccionadas para este estudio.

En la figura 5.2 se presenta la temperatura máxima para el mes de enero, los registros de las ocho estaciones se encuentra entre los 20°C y 30 °C, presentando una temperatura más baja durante enero del 2007 y enero del 2010, durante enero del 2017 se registró el valor más alto en temperatura máxima en las ocho estaciones.

Los valores registrados para temperatura minima (Figura 5.1) oscilan entre valores de 5 °C a -10 °C. En estaciones como Ábrego, Mesa de Fuentes, Santa Rita y U.A. Agronomía la temperatura mínima durante el mes de enero oscila entre los 5 °C y los -5 °C mientras que en las cuatro estaciones restantes la temperatura minima va en un rango de 5 °C a -10 °C. En las ocho estaciones se puede observar que durante enero de 2017 y 2018 las temperaturas

registradas son las menores de este periodo, como se puede observar la temperatura mínima se mantiene desde 2006 hasta 2015 con valores muy cercanos a 0 °C.

La temperatura media en el mes de enero en las ocho estaciones se oscila en valores cercanos a los 10 °C, para en año de 2010 los valores registrados en las ocho estaciones fue menor, de igual forma se presenta un decremento en la temperatura media en enero de 2017, mientras que los valores más altos en la temperatura media se registraron en enero de 2015 esto para las ocho estaciones presentadas.

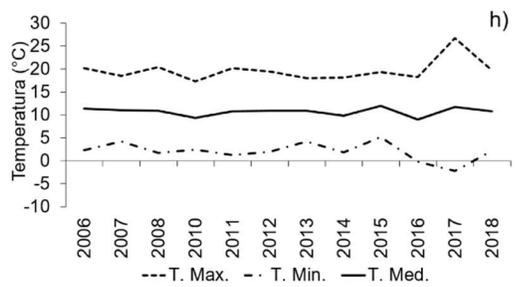
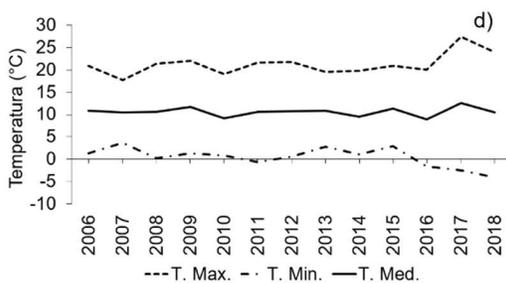
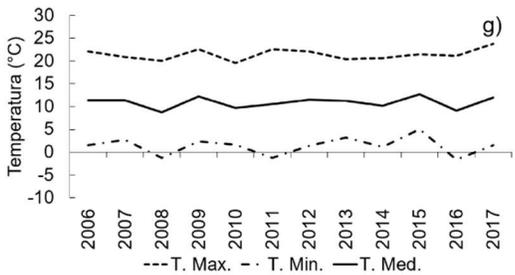
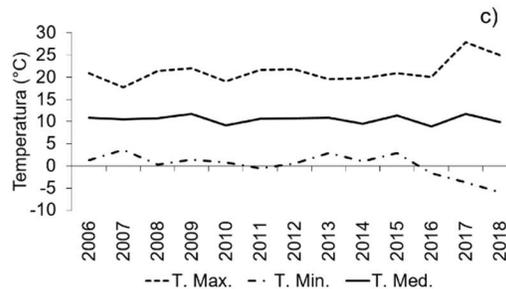
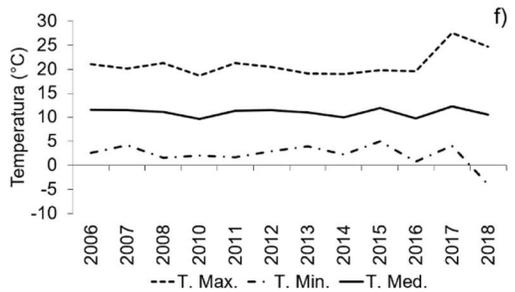
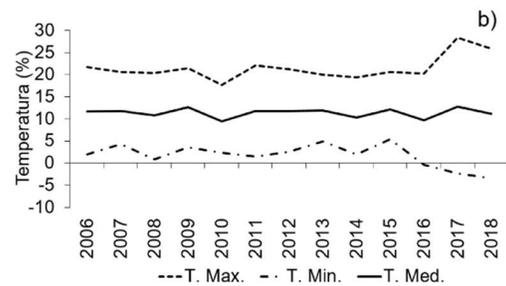
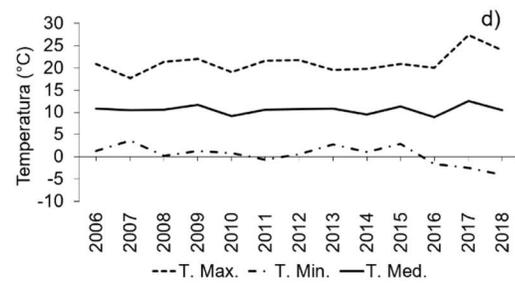
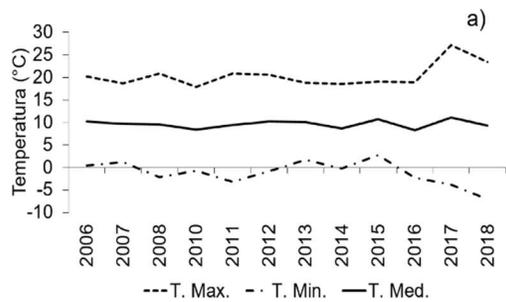


Figura 5.2 Datos de temperatura máxima, mínima y media de enero, en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

La temperatura corresponde al mes de abril se presenta en la figura 5.3, se puede observar que la temperatura máxima promedio registrada por las ocho estaciones durante el mes de abril es mayor a los 25°C en todas las estaciones, de los valores máximos que se presentan la figura 5.3 en abril de 2007 y abril de 2015 se registraron los menores valores de temperatura máxima promedio.

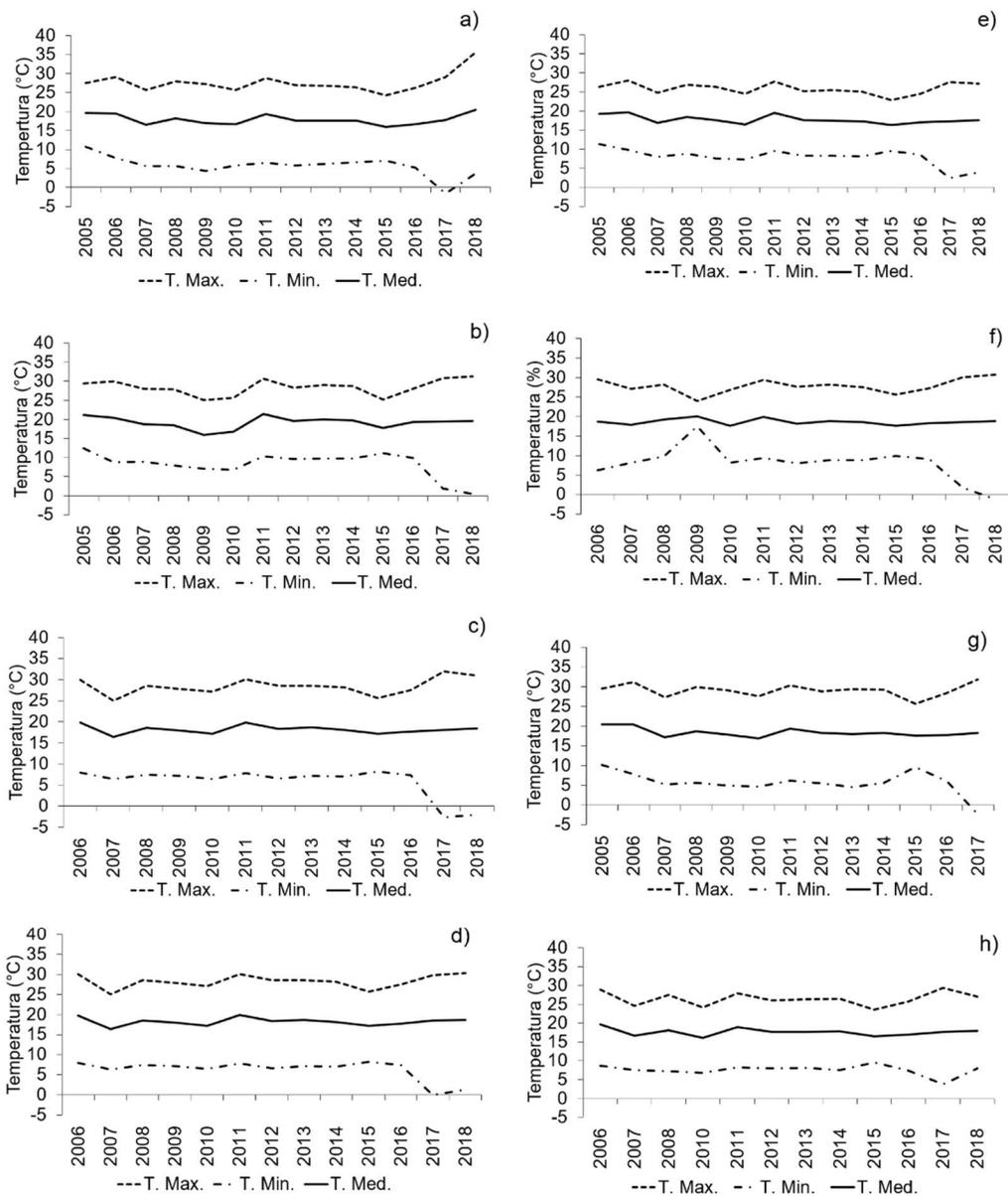


Figura 5.3 Datos de temperatura máxima, mínima y media de abril, en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Para los años de 2006, 2011 y 2017 se muestran incrementos en la temperatura máxima quedando con valores entre 30 °C y 35 °C en siete estaciones, mientras que en la estación de Ábrego la temperatura máxima promediada fue de un valor cercano a los 40 °C.

La temperatura media en la zona de estudio se encuentra en el rango de los 20 °C en las ocho estaciones, en todas las estaciones se observa el incremento de temperatura media en abril de 2011, en la estación de Ábrego la temperatura medio también presenta el incremento en los dos últimos años 2017 y 2018 para este mes, alcanza valores cercanos a los 25 °C.

La temperatura mínima en el mes de abril se encuentra en valores menores a los 10 °C, en las estaciones de Ábrego, COBAEZ, Mesa de Fuentes y Santa Rita la temperatura mínima presenta un comportamiento similar, en parte de una temperatura cercana a los 10 °C en abril de 2005 que decrece en abril de los años posteriores hasta abril de 2011 donde presenta un incremento que se mantiene hasta abril de 2016, para abril de 2017 se presenta una disminución en la temperatura mínima con valores cercanos a 0 °C. Por otro lado, las estaciones de Emancipación, Las Arcinas y U.A. Agronomía presentan la temperatura mínima casi en una línea recta desde abril de 2005 hasta abril del 2016 en las estaciones de Emancipación y las Arcinas, en la estación de U.A. Agronomía este periodo es menor hasta el 2015. En estas tres estaciones al igual que en las anteriores se observa el descenso de la temperatura mínima, en los registros de Emancipación con valores negativos, en las Arcinas con valores cercanos a 0 °C y en U.A. Agronomía el valor menor sólo se presenta en el 2017 y para el 2018 incrementa a 10 °C. En la estación de Rancho Grande se registran los valores más altos de temperatura mínima de las ocho estaciones, en el 2009 se observó un registro con un valor mayor a los 15 °C, a partir de este año la temperatura registrada es similar a las otras estaciones, registrando en descenso en la temperatura durante el mes de abril para los años de 2017 y 2018.

5.3 Humedad relativa

La humedad relativa presente en el mes de enero (Figura 5.4) en las estaciones en el área de estudio, registran valores mayores al 35% y los valores mayores se encuentran cerca al 70%.

Los años que presentaron un mayor porcentaje de humedad son los correspondientes a enero de 2007, 2010 y 2017. Los años que se presentó un menor contenido de humedad (%) son enero de 2008 y enero de 2011, esto para las ocho estaciones. En el periodo de 2006 a 2011 la presencia de humedad relativa aumenta y disminuye sus valores, es partir de 2012 la humedad relativa presenta un aumento, lo que se ve reflejado en las gráficas de las ocho estaciones como una curva, que comienza a disminuir en enero de 2017.

En las estaciones de Ábrego, Emancipación, Mesa de Fuentes y Rancho Grande los valores de humedad relativa en enero de 2016 y 2017 tienen valores similares, creando una línea entre estos dos años, en la gráfica. En el resto de las estaciones sólo se aprecia el descenso del valor de la humedad relativa en enero de 2017 para volver a incrementar su valor en enero de 2018.

La humedad relativa que corresponde al mes de abril se puede observar en la Figura 5.5, el registro con el valor más alto fue con un valor del 60% de humedad relativa en la zona de estudio en abril de 2015 el valor se aprecia de forma clara en las ocho estaciones.

En las estaciones de Ábrego, Mesa de Fuentes y Santa Rita los valores de humedad relativa tienen un comportamiento similar, tienen un incremento en el valor de la humedad relativa en abril de 2007, que disminuye en 2008 y 2009, con un incremento en 2010, en abril de 2011 disminuye ligeramente hasta 2012. En abril de 2015 se muestra el valor máximo de humedad relativa para el periodo de estudio. Durante los meses de abril de 2016 y 2017 en estas tres estaciones se registró un valor menor para incrementar de nuevo en abril de 2018, y seguir con la tendencia de los años anteriores al 2015, donde incrementaban y disminuían los valores registrados de humedad relativa.

Las estaciones de Emancipación, Las Arcinas y U.A. Agronomía tienen valores de humedad relativa similares, en las tres estaciones en abril de 2006 la humedad es mayor que en la presentada con anterioridad. Para abril de 2007 alcanzan un registro mayor que en los años siguientes por lo que en estas tres estaciones se tienen tres años con una mayor cantidad de humedad abril de 2007, abril de 2015 y abril de 2018. Entre abril de 2007 y de 2015 hace que de forma aparente entre estos dos años se observa como una baja en la humedad relativa. La estación de Rancho Grande tiene un patrón diferente a las otras siete estaciones, comienza con un registro de humedad relativa de 20% en abril de 2006 para incrementarse en abril de 2007 y 2008 con valores de 30% de humedad relativa. Para el año de 2009 se presenta un

bajo llegando al 20%, a partir de este año el comportamiento del porcentaje presentado es similar al resto de las estaciones.

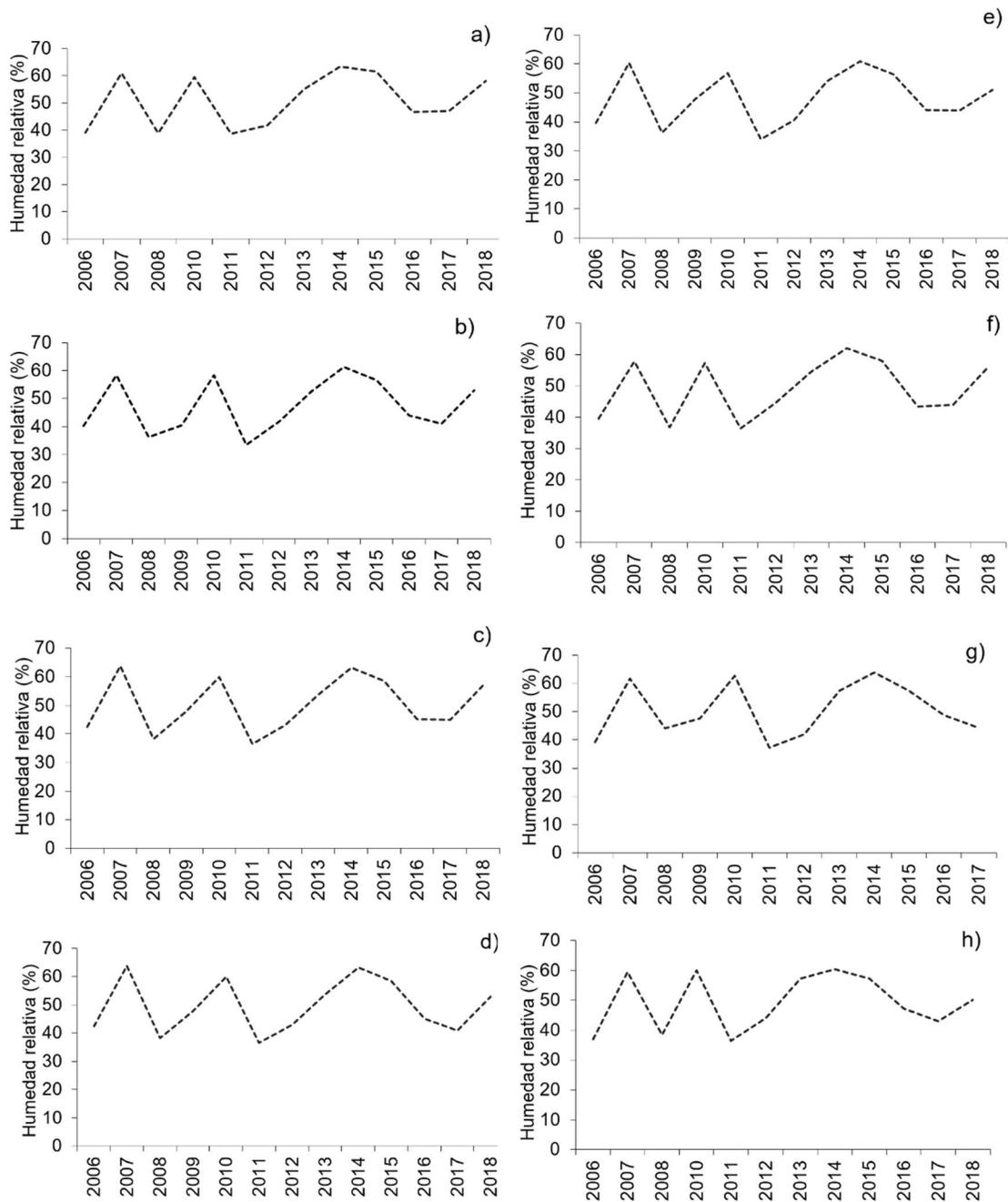


Figura 5.4 Humedad relativa en el mes de enero en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

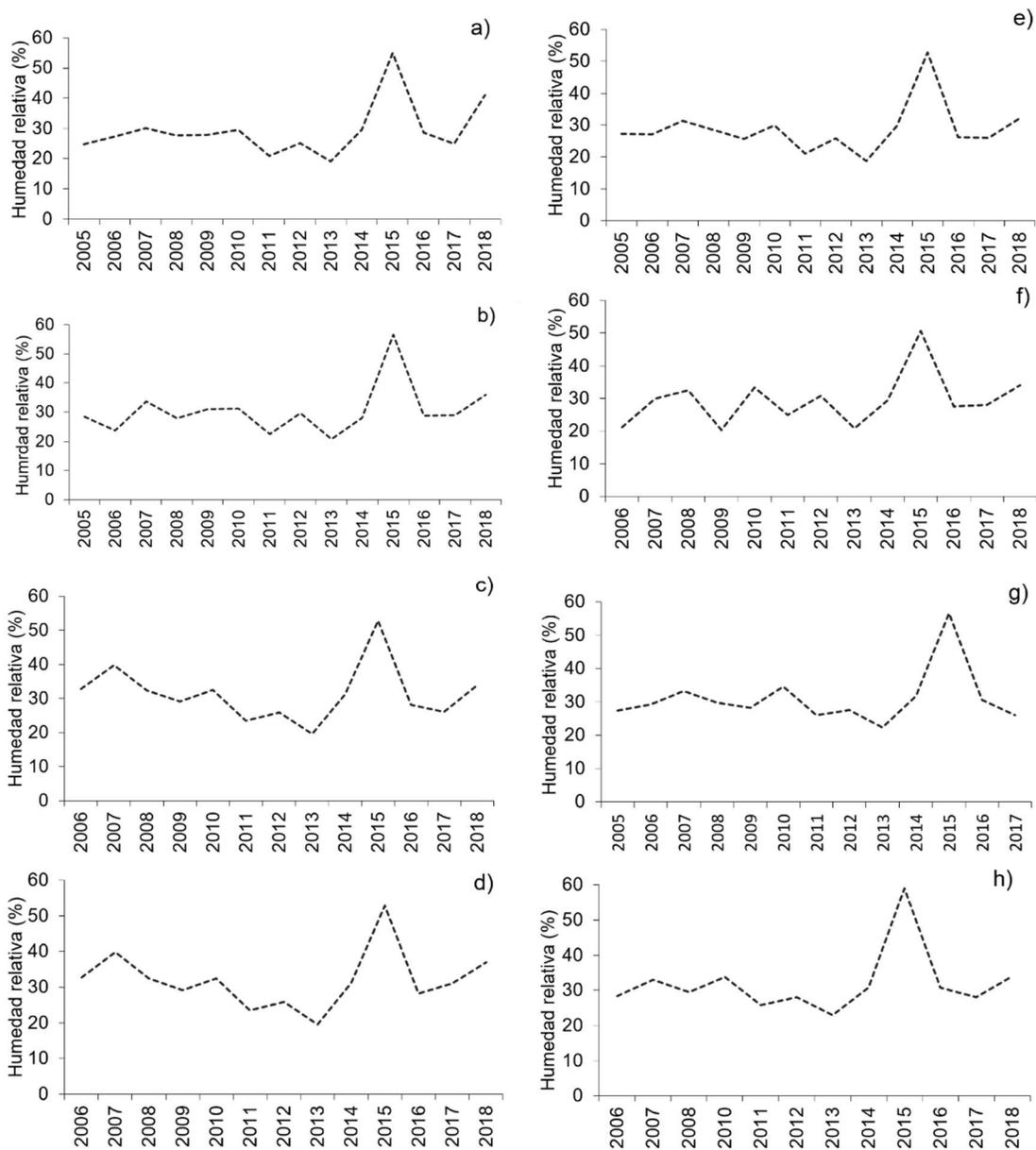


Figura 5.5 Humedad relativa en el mes de abril en las ocho estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía.

5.4 Precipitación

El promedio mensual de precipitación para el mes de enero se presenta en la figura 5.6, la cantidad de precipitación acumulada varía en las ocho estaciones. Las estaciones de Ábrego

y Rancho Grande presentan un registro similar no mayor a 20 mm en 2006 y comienza un descenso en el registro hasta el 2011, incrementando la cantidad de precipitación en los meses de enero de 2012, 2013, 2014 y 2015 disminuyendo de forma drástica en enero de 2016 y 2017, para presentar un incremento en enero de 2018. Las estaciones de COBAEZ, Emancipación, Las Arcinas y Santa Rita presentan registros parecidos en los promedios mensuales para el mes de enero. Comienzan con un valor de precipitación alto en enero de 2006 dicho valor cae de forma significativa de para enero de 2007 con un valor menos a 5 mm y para enero de 2008 y 2009 el valor queda en cero, incrementando en enero de 2010 las estaciones de COBAEZ y Santa Rita tienen valores de 40 mm, en las estaciones de Santa Rita y COBAEZ los valores para los dos siguientes años es casi nulo el registro de precipitación, mientras que en Emancipación y La Arcinas en 2010 el valor es cercano a 10 mm, en las estaciones a partir de 2012 hasta abril de 2016 existe un incremento en la cantidad de precipitación, en las cuatro estaciones durante el 2016 y 2017 los valores de precipitación son de cero, para incrementar en enero de 2018.

Para la estación de Rancho Grande los valores graficados de precipitación presentan un comportamiento diferente a diferencia de las otras estaciones donde se observa los cambios en la cantidad de precipitación registrada evidenciando una diferencia clara, en esta estación de Rancho Grande se suavizan los datos principalmente entre los años de 2012 a 2015 donde se forma una curva, aunque la precipitación es menor a los 30 mm es constante entre este lapso de tiempo, de igual que las otras siete estaciones se evidencia la baja precipitación en enero de 2008, enero de 2011, enero de 2016 y enero de 2017 para incrementar nuevamente en enero de 2018.

La precipitación en el mes de abril en las estaciones tiene valores menores a los que se registraron durante el mes enero, en este mes de abril el valor más alto de precipitación se registró en abril de 2018 en la estación de Las Arcinas con 40 mm, a partir de este los valores en el resto de las estaciones registraron menores valores.

Las estaciones de Ábrego, Emancipación, Las Arcinas y Mesa de Fuentes tienen registros similares de precipitación, en 2005 y 2006 no se presentó precipitación, hasta abril de 2008 y 2009 se registraron valores de precipitación con 10 mm, sólo en la estación de Mesa de Fuentes durante el 2008 se alcanzó los 20 mm de precipitación para posteriormente disminuir a valores menores a 5 mm en abril de 2010 y quedar con valores cercanos a cero mm

precipitación en abril de 2011, 2012, 2013 y 2014. En abril de 2015 existe un incremento de la precipitación con valores entre 10 y 5 mm, disminuyendo de nuevo en 2016 y 2017 para incrementar en abril de 2018.

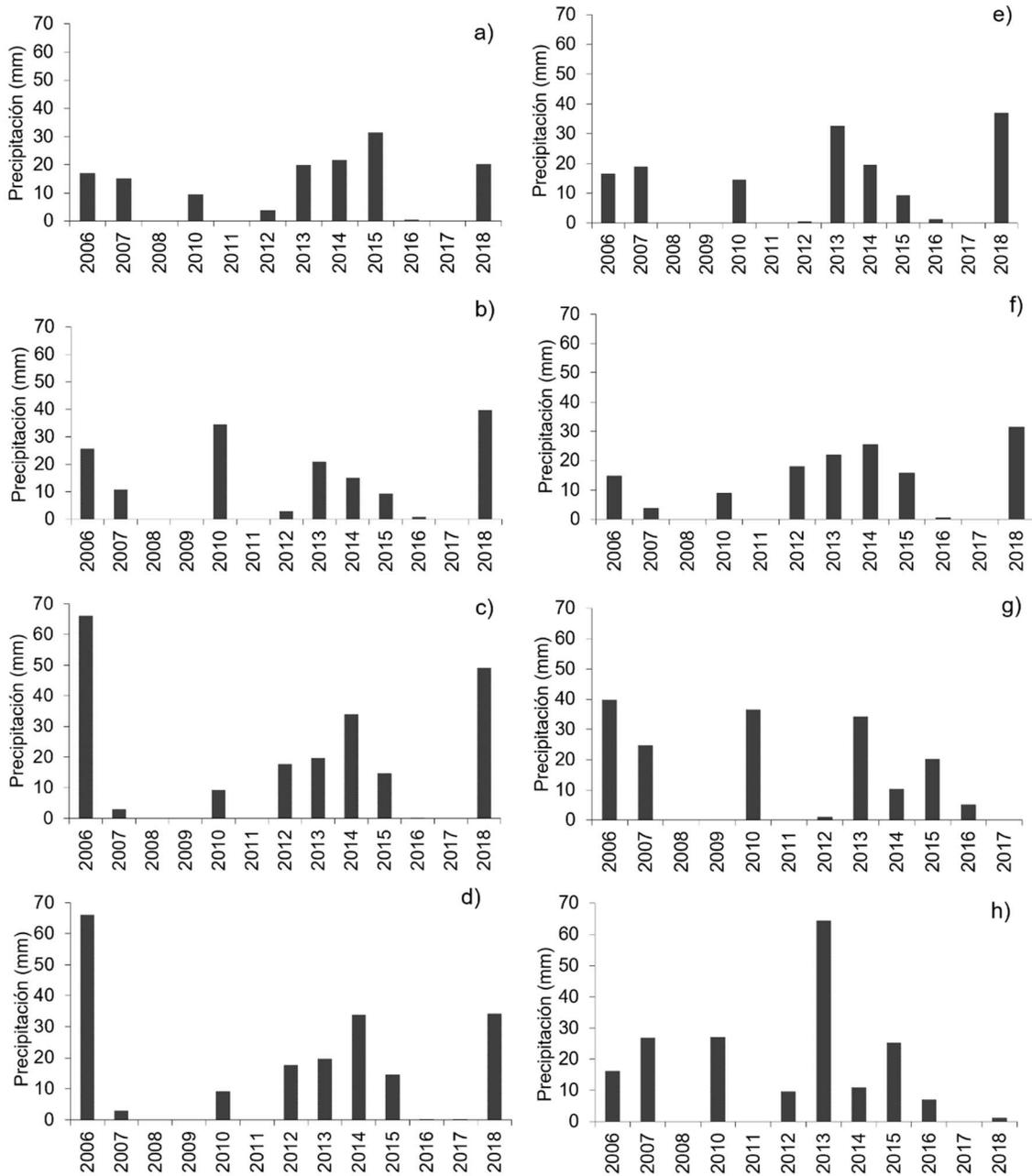


Figura 5.6 Precipitación acumulada mensual de enero en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía.

En la estación de COBAEZ los registros de precipitación graficados muestran resultados diferentes, se observa en la figura 5.7 (b) que estos registros muestran una gráfica con forma de zigzag donde se tienen tres picos con valores de 20 mm de precipitación para los años de 2007, 2008, 2012, 2015 y 2018, los meses de abril restantes los valores son cercanos a cero. Para la estación de Rancho Grande los valores de precipitación durante el mes de abril en los años presentados son muy cercanos a cero, hasta en los años donde en el resto las estaciones se observa un aumento en la precipitación, en esta estación queda el máximo en 5 mm en abril de 2015.

Las estaciones de Santa Rita y U.A. Agronomía parten de una baja precipitación en abril de 2006 que se incrementa en abril de 2008 con valores de 5 mm y que disminuyen de forma considerable en abril de 2010, en la estación de Santa Rita la precipitación es inexistente en abril de 2011, 2012, 2013 y 2014, mientras que en esos mismos años en la estación de U.A. Agronomía los valores de precipitación quedan cercanos a valores de cero. En ambas estaciones se observa un incremento en la precipitación en abril de 2015 con 13 y 20 mm respectivamente, para continuar con valores cercanos a cero en abril de 2017 y abril de 2018.

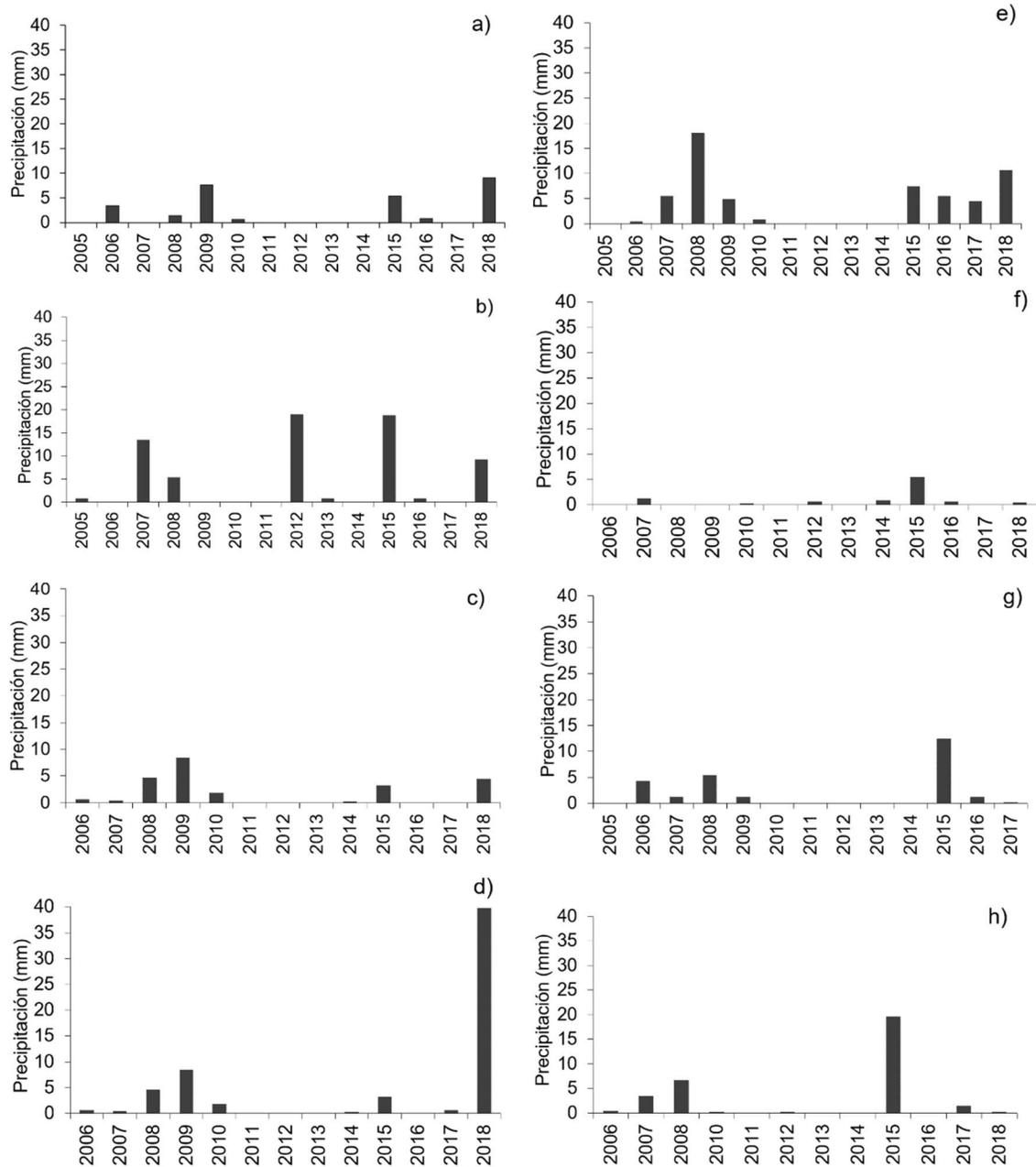


Figura 5.7 Precipitación acumulada mensual de abril en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

5.5 Viento

En este estudio, el viento toma una importancia relevante debido a que es el principal factor analizado en la generación de tormentas de polvo. La velocidad de viento para causar erosión en función del tamaño, peso y humedad de las partículas de suelo, con pequeños movimientos, las partículas comienzan a ser perturbadas por ligeras ráfagas ligeras de viento con velocidades de 20 a 30 km/h (5.5-8.3 m/s) (DERM, 2011). El viento es uno de las variables meteorológicas en el presente estudio, por eso presenta diferentes graficas que muestran el comportamiento de este principalmente durante la estación de invierno. En la figura 5.8 se muestran los promedios de velocidad de viento para el mes de enero en las ocho estaciones en el periodo de 2006 a 2018.

En las estaciones de Ábrego y COBAEZ las velocidades de viento son similares, en enero de 2006 en la estación de COBAEZ el viento es menor a 6 m/s, en enero de 2007 y 2008 la velocidad de viento incrementa en el caso de Ábrego en el 2006 la velocidad es de 7 m/s e incrementa en 2007 y 2008 hasta llegar a los 8 m/s, la velocidad de viento presenta una velocidad menor en el durante 2009 y 2010, en la estación de Ábrego aumenta en 2011 mientras que en COBAEZ continua disminuyendo hasta 2014 con valores de 4 m/s en la velocidad del viento. En la estación de Ábrego los valores de velocidad de viento entre 2011 y 2013 quedan entre 7 y 8 m/s y disminuye hasta 6 m/s en el 2014 y mantenerse en ese rango de velocidad en enero de 2016, en enero de 2016 el valor de la velocidad del viento incrementa a 11 m/s y disminuye a 10 m/s en enero de 2018. En la estación de COBAEZ también incrementa la velocidad del viento en 2017 sin alcanzar los 9 m/s.

Las estaciones de Emancipación, Las Arcinas y Rancho Grande tienen una gráfica similar, las tres estaciones comienzan con valores de 6 m/s en enero de 2006 para incrementar durante 2007 y 2008 con valores de 8 m/s, en las tres estaciones el valor de la velocidad de viento disminuye en 2009 para incrementar en enero de 2010 y seguir el incremento en 2011 llegando a valores cercanos de a los 9 m/s. En enero de 2012 los valores de la velocidad de viento disminuyen en las tres estaciones para incrementarse en enero de 201 y mantienen los registros este comportamiento de incrementar y disminuir hasta enero de 2015, a partir de este enero de este año comienza un incremento en la velocidad del viento en las estaciones de Emancipación y Rancho Grande quedando con un valor promedio durante el mes de enero

de 14 m/s en ambas estaciones, el valor disminuye en enero de 2018. Los valores en la estación de Las arcinas son constantes en los tres últimos años presentados.

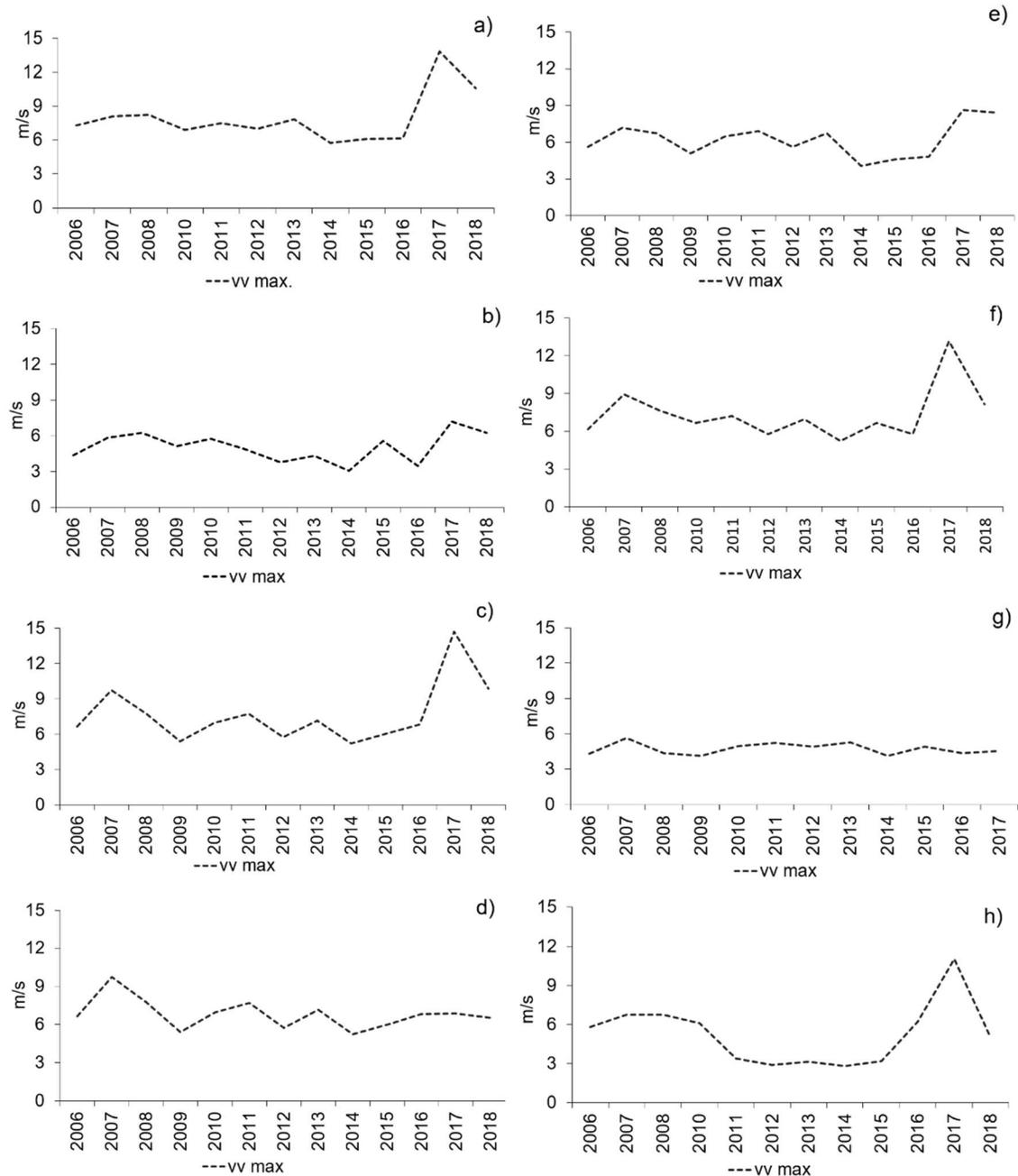


Figura 5.8 Velocidad máxima de viento en el mes de enero en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

En la figura 5.9 se muestra la velocidad de viento para el mes de febrero en diferentes años, para las estaciones de Ábrego, Emancipación, Mesa de Fuentes, Rancho Grande y U.A. Agronomía comienzan con un valor de 6 m/s en febrero de 2006, que van en aumento hasta llegar a febrero de 2008 donde llega a valores de 8 m/s, la velocidad de viento disminuye en febrero de 2009, a partir del 2010 comienza a incrementar la velocidad del viento que se mantienen hasta febrero de 2013, en la estación de Ábrego va en aumento alcanzando en febrero de 2013 una velocidad máxima de viento mayor a 9 m/s, mostrando un comportamiento similar las estaciones de Emancipación, Mesa de Fuentes y Rancho Grande. Por otro lado, la estación de U.A. Agronomía los valores de la velocidad máxima de viento son menores a los 6 m/s presentando el valor mínimo en febrero de 2015 con un valor de 3 m/s. En febrero de 2017 se presenta un incremento en la velocidad máxima de viento en las cinco estaciones, en la estación de Ábrego alcanzó los 12 m/s, en Emancipación la velocidad máxima es de 14.8 m/s, en Mesa de Fuentes es de 10 m/s y en la estación de Rancho Grande 13 m/s.

En la estación de COBAEZ el mes de febrero los valores en la mayor parte de los años presentados registraron una velocidad de viento máxima de 6 m/s, entre los años de 2014 a 2016 se tienen los registros más bajos con velocidades menores a 4 m/s. Durante febrero de 2017 se tiene el registro con la velocidad más alta con 7 m/s y disminuye durante el siguiente año. La estación de Santa Rita presenta condiciones en los registros de velocidad de viento parecidos a la estación de COBAEZ en el periodo de febrero de 2006 a febrero de 2013 las velocidades máximas de viento se encuentran entre los 4 m/s - 7 m/s. En esta estación de Santa Rita el año que registró una velocidad mayor de viento en el mes de febrero fue el 2013 con 7 m/s a partir de este año las velocidades de viento disminuyeron.

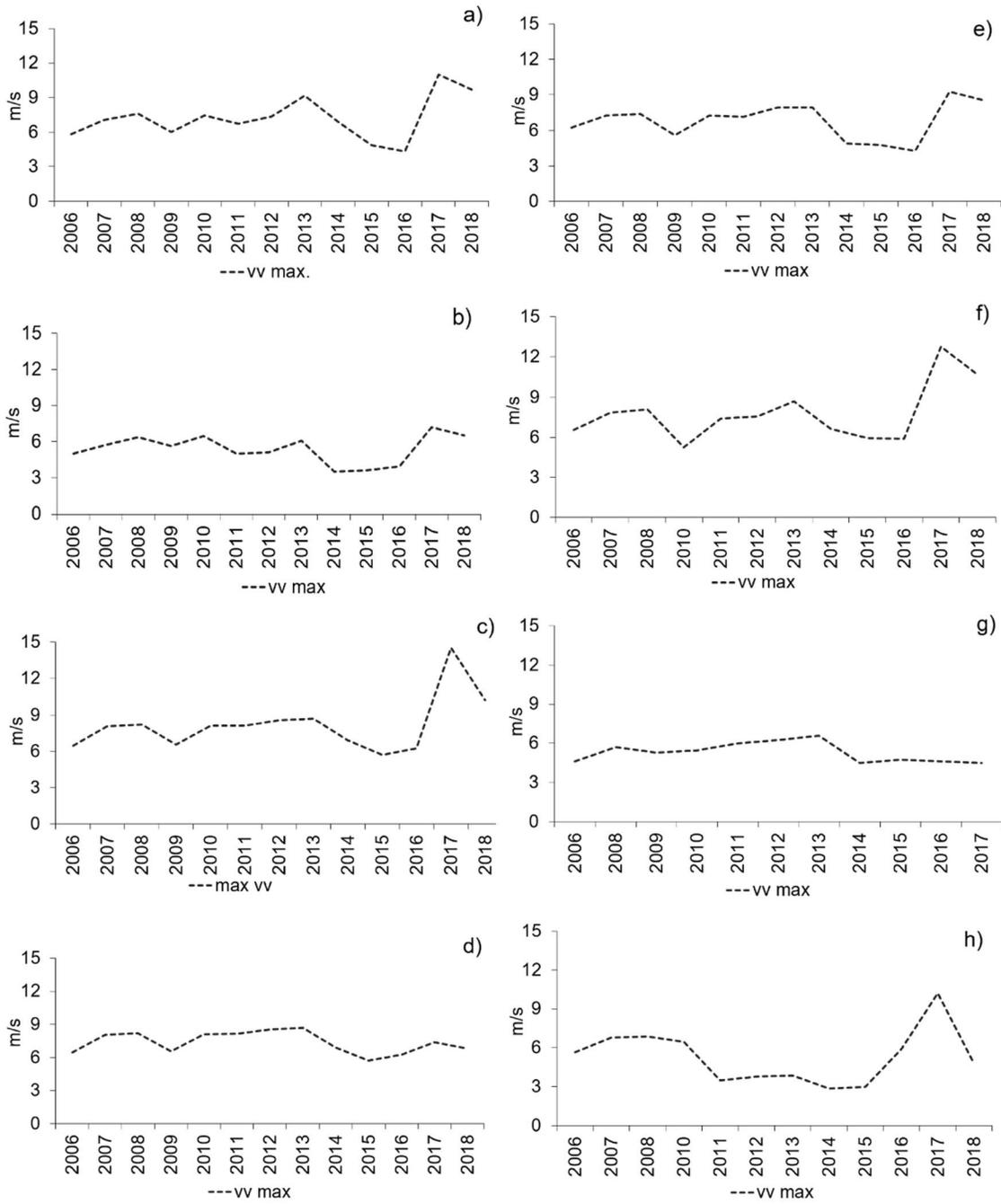


Figura 5.9 Velocidad máxima de viento en el mes de febrero en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

Las velocidades de viento que corresponden al mes de marzo se presentan en la figura 5.10 para las ocho estaciones. En el mes de marzo en los diferentes años presentados en las

estaciones de Ábrego, Emancipación y Rancho Grande en marzo de 2006 las velocidades máximas registraron valores entre 7 y 9 m/s, valores que disminuyeron para marzo del 2007, e incrementaron en marzo de 2008, a partir de este año la velocidad del viento comenzó a disminuir hasta marzo de 2011 es una de las velocidades mínimas Ábrego registró una velocidad de 6 m/s, Emancipación de 7 m/s y Rancho Grande el valor mínimo se registró durante marzo de 2009 con 6 m/s. A partir de marzo del 2012 las velocidades de viento durante este mes comenzaron a incrementar hasta alcanzar un valor máximo en marzo de 2017 en Ábrego se registró una velocidad de 12 m/s, en Emancipación de 12.5 m/s y en Rancho Grande de 10.9 m/s, en las tres estaciones se presenta un descenso en la velocidad de viento para al último año presentado.

En las estaciones de COBAEZ, Las Arcinas, Mesa de Fuentes y Santa Rita también se observa una diferencia entre las velocidades de viento entre marzo de 2006 y marzo de 2007, los registros de las velocidades en estas estaciones aumentan y disminuyen de forma constante, se observa un descenso desde marzo de 2008 que sigue disminuyendo hasta marzo de 2011 donde se tienen la menos velocidad de viento en el periodo registrado para las cuatro estaciones descritas, en COBAEZ la velocidad de 4 m/s, en Las Arcinas de 6.8 m/s, en Mesa de Fuentes de 6.5 m/s y en Santa Rita en 5.2 m/s. A partir de marzo de 2012 en las estaciones de COBAEZ, Mesa de Fuentes y Santa Rita los valores se mantienen menores a 7 m/s registrando un segundo valor mínimo en marzo de 2015, para mostrar un incremento en marzo de 2016 y marzo de 2017, en las estaciones de COBAEZ, Mesa de Fuentes y Santa Rita el incremento de la velocidad se mantiene hasta marzo de 2018, mientras que en la estación de las Arcinas la velocidad máxima de viento presenta una forma de zigzag donde los valores aumentan y disminuyen año con año a partir de marzo del 2012 hasta marzo del 2018, lo valores quedan entre los 7 y 9 m/s.

La estación de U.A. Agronomía al igual que el resto de las estaciones entre marzo de 2006 y 2008 aumenta y disminuye entre 6 y 7 m/s, quedando con este último valor hasta marzo de 2010. Los valores más bajos de velocidad máxima durante el mes de marzo de las ocho estaciones se registran en esta estación de U.A. Agronomía en el periodo de marzo de 2011 a marzo de 2015 con valores en el rango de 3m/s, a partir del marzo de 2016 los valores de la velocidad incrementan alcanzando un máximo en marzo de 2017 con 9.8 m/s y el valor se mantiene hasta marzo de 2018.

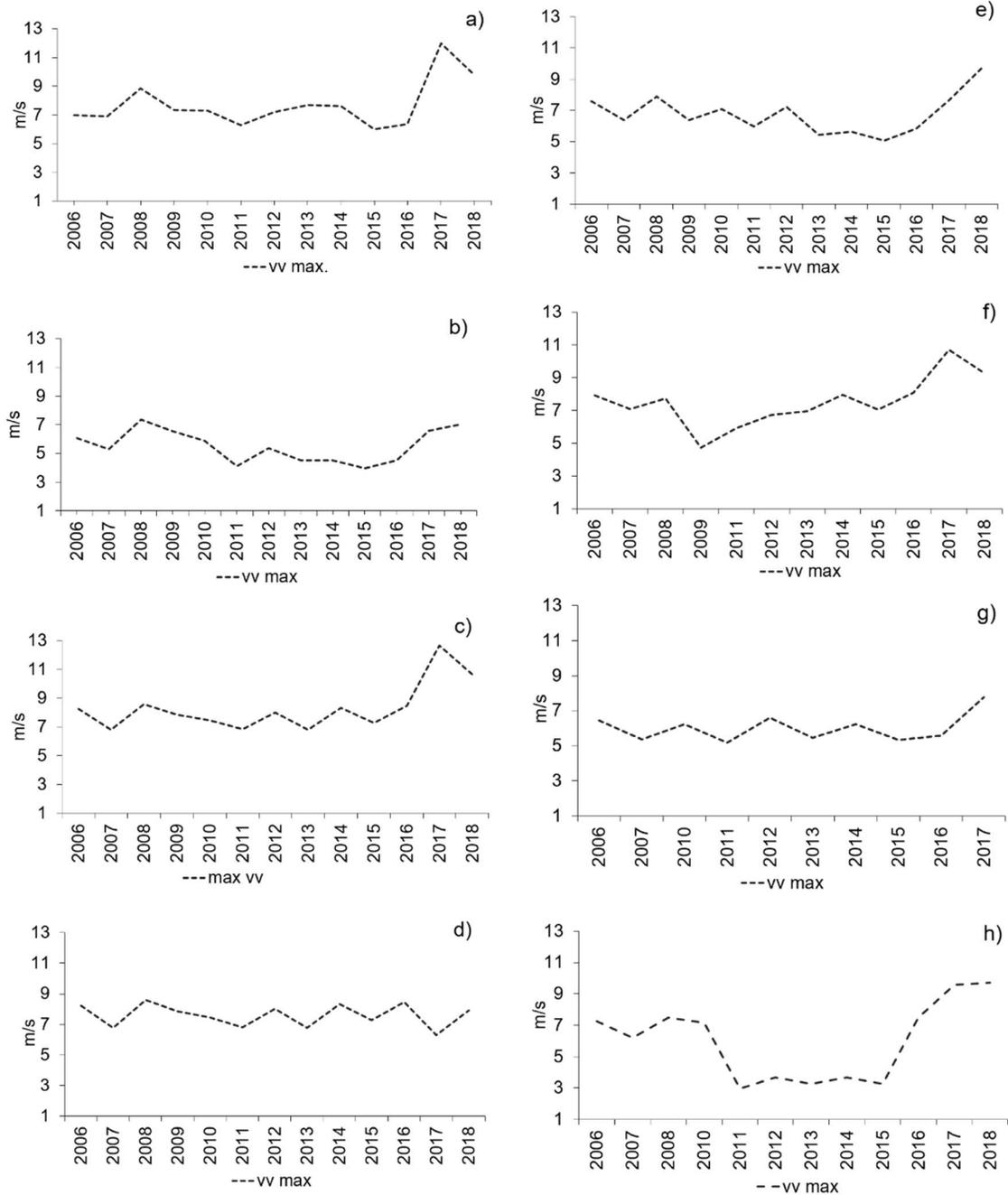


Figura 5.10 Velocidad máxima de viento en el mes de marzo en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

La velocidad máxima de viento durante el mes de abril se presenta en la figura 5.11 comprende el periodo de 2005 a 2018. En las estaciones de Ábrego, Emancipación, Rancho

Grande y U.A. Agronomía tiene una distribución similar de la velocidad de viento máxima para el mes de abril en el periodo presentado. Comienzan con valores entre 6 y 9 m/s que se mantienen casi de forma lineal en las estaciones de Ábrego y Emancipación hasta abril de 2011. Mientras que la estación de Rancho Grande muestra diferencias entre un año y otro, en 2007 se observa un incremento en la velocidad de viento, para continuar en un descenso hasta abril de 2010, a partir de abril de este año constantemente incrementa la velocidad de viento hasta 2016 que comienza a incrementar la velocidad. En la estación de U.A. Agronomía la velocidad de viento se mantiene entre dos rangos, el primero de ellos entre 2006 y 2010 la velocidad de viento se encuentra entre los 6-9 m/s, a partir de 2010 la velocidad disminuye y se mantiene casi lineal con un valor entre 3 y 3.5 m/s hasta el 2015, a partir del 2016 comenzó un incremento en la velocidad de viento. Las velocidades de viento en las cuatro estaciones descritas presentan un incremento en la velocidad máxima de viento a partir de abril de 2016, en las estaciones se alcanza un máximo en las velocidades en abril de 2017 la velocidad de viento quedó entre un rango de 14 y 18 m/s, para posteriormente mostrar un descenso en abril de 2018.

El viento máximo en las estaciones de COBAEZ, Las Arcinas, Mesa de Fuentes y Santa Rita presentan un comportamiento similar en la distribución de los valores de viento en el mes de abril. Se puede observar que en estas cuatro estaciones las velocidades son más uniformes en los diferentes años, las cuatro estaciones registraron un ligero incremento entre abril de 2008 y 2010. Las estaciones de COBAEZ, Mesa de Fuentes y Santa Rita a partir del 2011 presentan un descenso en la velocidad del viento hasta 2016 donde registran un valor mínimo, a partir de este año presentan un incremento en abril de 2017 y el valor sigue en aumento en abril de 2018 en los casos de COBAEZ Y Mesa de Fuentes siendo en este último año el valor más alto para este periodo presentado. La estación de Las Arcinas mantiene las velocidades de viento casi uniformes, van incrementando ligeramente año con año, en esta estación se tiene una velocidad de viento máxima durante abril de 2016 con 8.2 m/s y a diferencia de las otras estaciones esta registró un menor valor en abril de 2017 y vuelve a incrementar en abril de 2018 siendo durante este año el valor más alto de los datos presentados con 11 m/s.

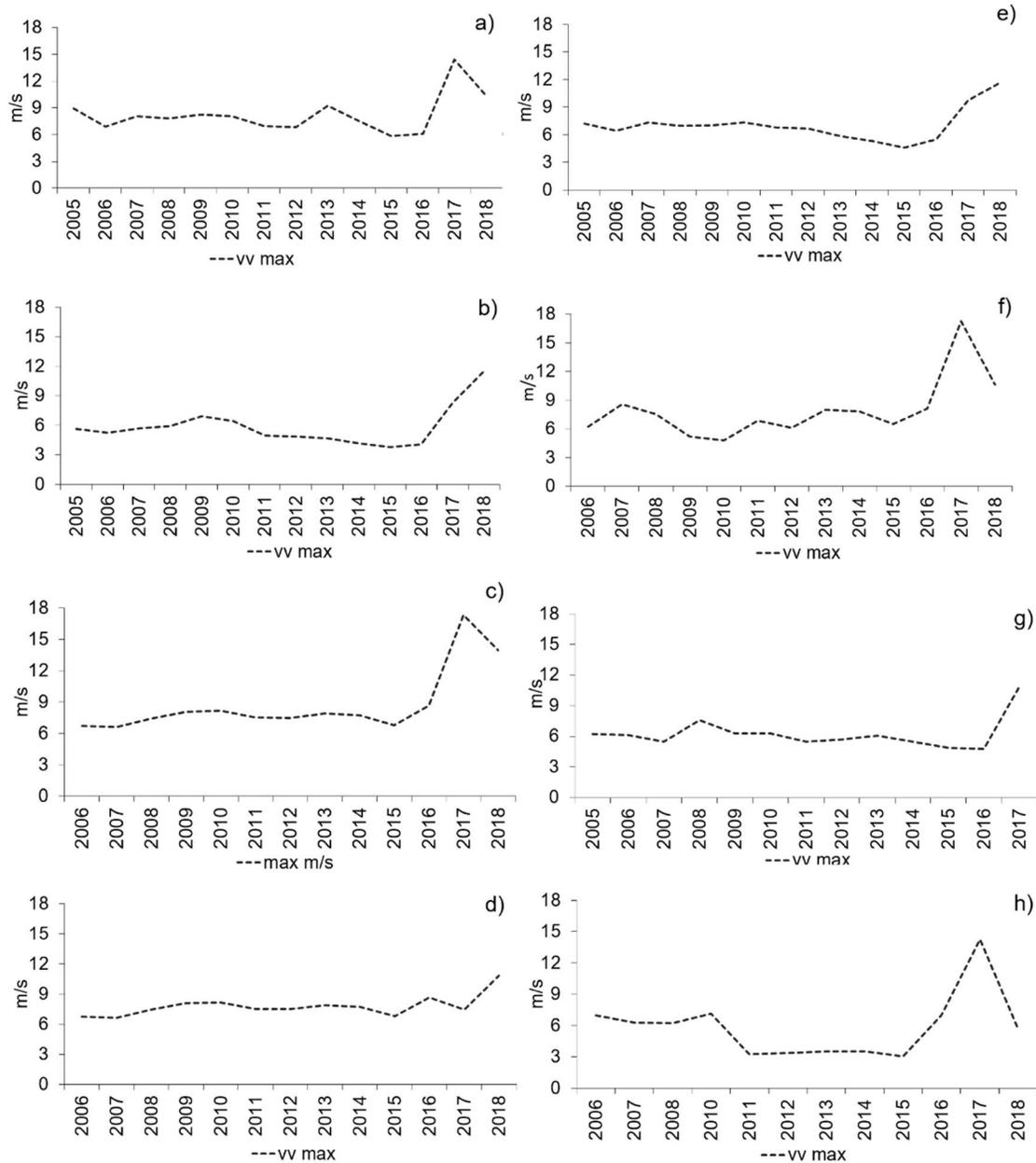


Figura 5.11 Velocidad máxima de viento en el mes de abril en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

La velocidad de viento que corresponde al mes de diciembre en el periodo de 2005 a 2017 se presenta en la figura 5.12. En las estaciones de Abrego y Rancho Grande a partir de diciembre de 2005 comienza un incremento en los valores alcanzando un máximo en diciembre de 2009

con 6.8 y 7.2 m/s respectivamente. En diciembre de 2010 en ambas estaciones se observa una disminución en la velocidad máxima, siendo este el valor más en el periodo presentado. Posteriormente en diciembre de 2011 incrementa la velocidad para continuar en forma descendiente hasta diciembre de 2014, incrementa ligeramente en 2015 y disminuye en 2016, para posteriormente en diciembre de 2017 alcanza un valor máximo de 11 m/s en Ábrego y 12.7 m/s en Rancho Grande.

En la estación de COBAEZ la velocidad de máxima de viento va en incrementos desde diciembre de 2005 hasta diciembre de 2009 donde presenta un valor de 6 m/s, a partir de diciembre de las velocidades se mantienen por debajo de los 5 m/s hasta 2015. En diciembre de 2016 se registró un aumento en la velocidad alcanzando el máximo valor en diciembre de 2017 con una velocidad máxima de 8 m/s.

En las estaciones de Emancipación, Las Arcinas, Mesa de Fuentes y Santa Rita se observa de forma clara variaciones en la velocidad máxima de tiempo en los años presentados, en diciembre de 2006, 2007, 2009 y 2011 son años donde la velocidad del viento se ha incrementado en rangos cercanos a los 7 m/s. El valor mínimo para las estaciones de COBAEZ, Las Arcinas y Mesa de Fuentes se presenta durante diciembre de 2014, mientras que e la estación de Santa se presenta el mínimo hasta diciembre de 2016. De la misma manera que el resto de las estaciones esta cuatro presentan un incremento en la velocidad durante diciembre de 2017 siendo este último el valor más alto en el periodo presentado.

La estación de U.A. Agronomía presenta una distribución diferente de la velocidad máxima del viento durante el mes de diciembre, al partir de valores mayores a 5 m/s entre diciembre de 2005 y 2009, para presentar valores de viento con una menor velocidad en el lapso de 2010-2014 todos estos con valores menores a 5 m/s, de igual forma que la mayoría de las estaciones a partir de diciembre de 2015 comienza un aumento en la velocidad del viento en la estación para alcanzar el valor máximo de este en diciembre de 2017 con 11 m/s.

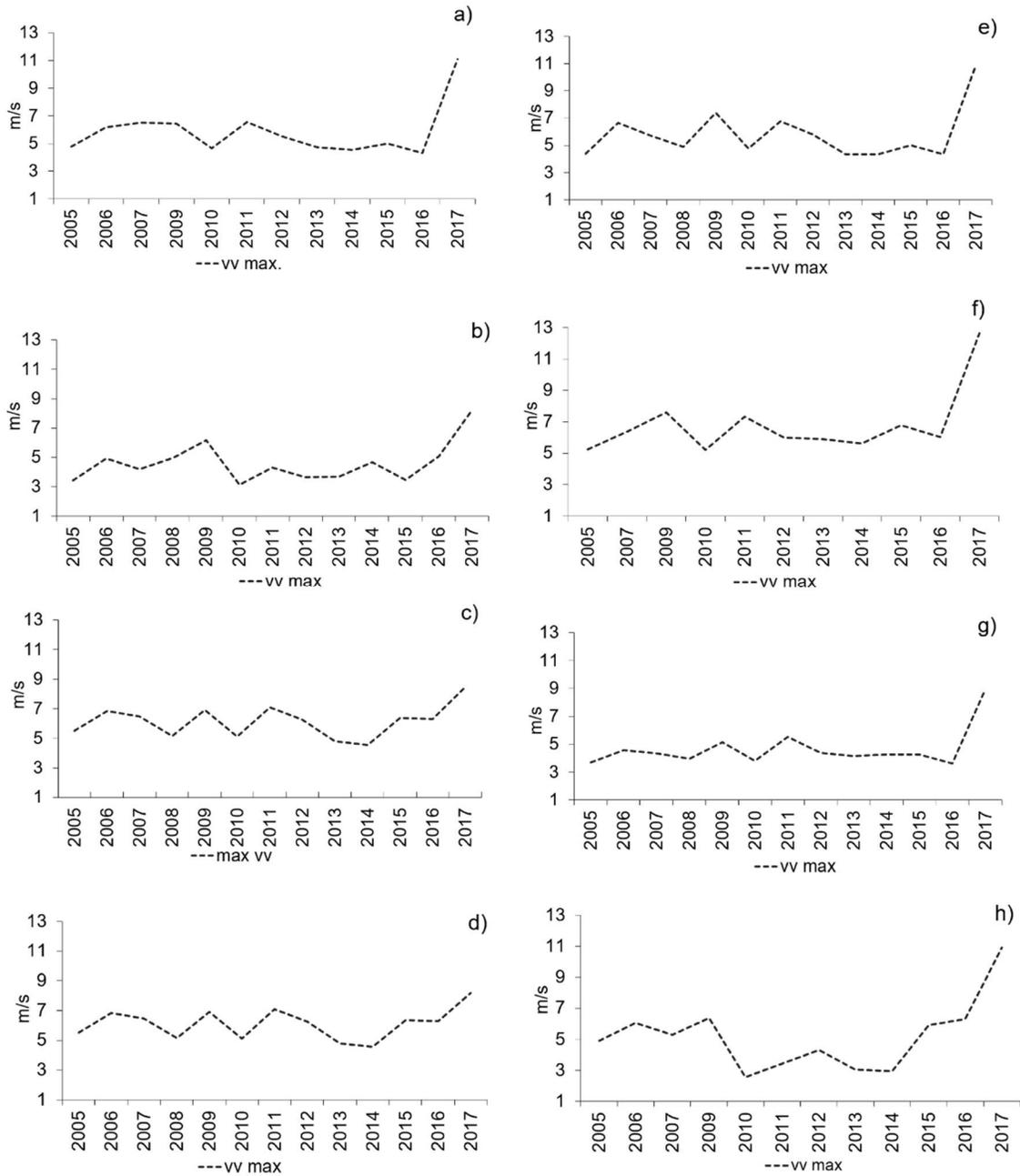


Figura 5.12 Velocidad máxima de viento en el mes de diciembre en las estaciones: a) Ábrego, b) COBAEZ, c) Emancipación, d) Las Arcinas, e) Mesa de Fuentes, f) Rancho Grande, g) Santa Rita y h) U.A. Agronomía

En la de estudio el viento presenta una variación a lo largo del año, para entender esta variación se presentan algunas figuras con el propósito de ejemplificar el comportamiento

del viento. Fueron seleccionados algunos periodos específicos de cada estación para mostrar la alta variabilidad del viento.

En la Figura 5.13 se presenta la velocidad máxima de viento para el invierno de 2010-2011 en la estación de Ábrego, en la figura la línea punteada representa la velocidad de viento de 9 m/s a partir de esta se observa que en diferentes días esta velocidad es rebasa, en el mes de octubre de 2010 la velocidad máxima de viento se mantiene por valores menores a los 7 m/s, es a partir del mes de noviembre cuando las velocidades de viento comienzan a aumentar a mediados del mes se pueden observar velocidades cercanas a los 9 m/s. Para finales del mes de noviembre y principios de diciembre comienzan a presentarse las velocidades de viento mayores a los 9 m/s, posteriormente se presentan días con velocidades menores para incrementar en el mes de enero de 2011, durante el mes de enero comienzan a presentarse más seguido los días con velocidades de viento que pueden originar tormentas de polvo en la zona de estudio, para este periodo presentado en la gráfica se observan 14 eventos donde se rebasa la velocidad de 9 m/s, tres de estos eventos con un rango de velocidad entre los 12 y 14 m/s.

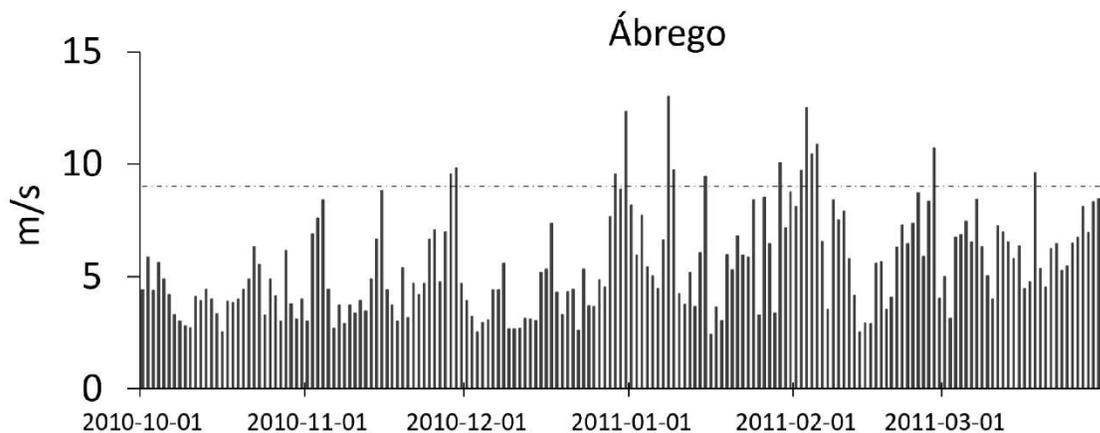


Figura 5.13 Velocidad máxima de viento en la estación de Ábrego en el periodo invernal 2010-2011, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

Tomando en consideración un año completo de datos de velocidad máxima de viento, se presenta la figura 5.14 que corresponde al año de 2006 y los datos de la estación U.A. Agronomía, durante el año de 2006 se observa que en diferentes días se rebasó la velocidad de 9 m/s indicada en línea punteada, se puede ver de forma clara que la mayor parte de los días cuando es rebasada dicha velocidad corresponde a los meses de invierno, el día que registró la velocidad de viento máxima se presentó en el mes de enero con un valor mayor

a los 14 m/s, durante el mes de marzo se tiene la mayor cantidad de días con velocidades altas de viento. Para el caso específico de los meses que corresponden al invierno en el año de 2006 se contabilizaron en total nueve eventos, así como un evento en el mes de mayo y dos para el mes de julio, dando un total de 12 eventos.

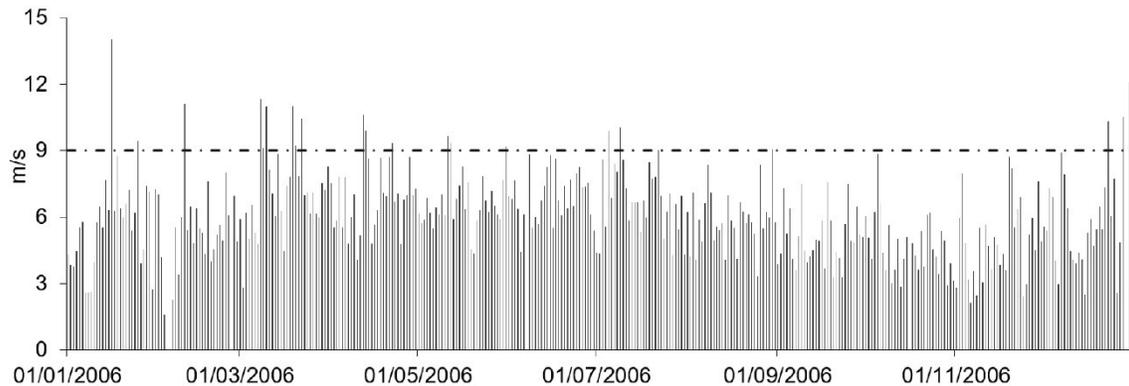


Figura 5.14 Velocidad máxima de viento en la estación de U.A. Agronomía en el año de 2006, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

En la figura 5.15 se presenta la distribución de la velocidad de viento que corresponde a la estación de Emancipación para el año de 2008. En la figura se observa que la velocidad máxima de viento en los primeros meses de año en diferentes fechas se sobrepasa la velocidad de 9 m/s, entre los meses de enero y marzo se contabilizaron 18 eventos, dentro de estos eventos se tiene el día con la velocidad máxima de viento en el año, que corresponde al mes de marzo con velocidad cercana a los 20 m/s, durante el mes de abril se presentaron cuatro eventos y durante el mes diciembre tres eventos. Durante este año sólo se registró un evento durante el verano en el mes de julio y ocho eventos durante el mes de mayo. En la figura 5.15 se puede apreciar de forma clara la distribución de las velocidades máximas de viento, dichas velocidades son más intensas durante los meses de invierno y disminuye de forma considerable a finales del verano y durante los meses de otoño.

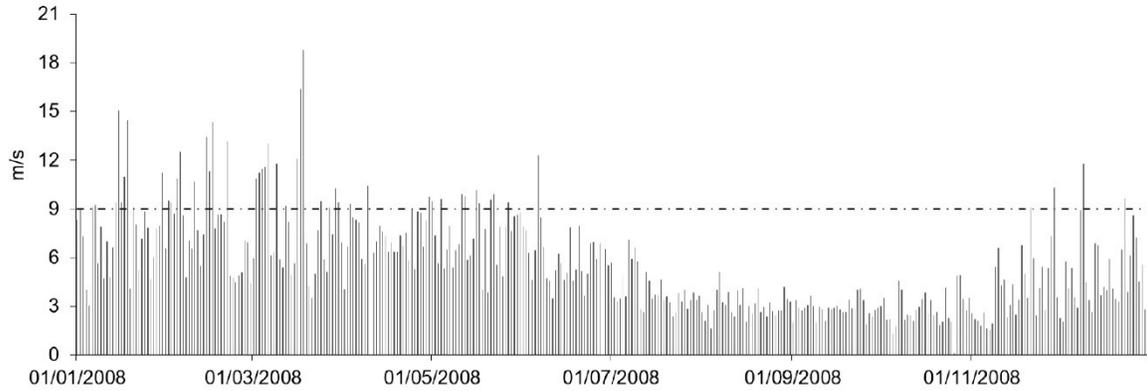


Figura 5.15 Velocidad máxima de viento en la estación de Emancipación en el año de 2008, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

En el año 2011 se registraron 10 eventos con valores superiores a los 9 m/s en entre los meses de enero y marzo en la figura 5.16 en la estación de Ábrego, en el mes de mayo se presentan dos y en los meses de verano otros dos eventos, entre los meses de noviembre y diciembre se contabilizaron cinco eventos. Durante el mes de enero se presentó el día con la velocidad máxima de viento más intensa con 13 m/s. Durante el año de 2011 en la estación de Ábrego las velocidades de viento son más uniforme en los valores registrados durante el año, aun así, se aprecia que los días con velocidades menores corresponden a los meses del otoño, en este caso tiene una menor duración comparado con el año de 2008.

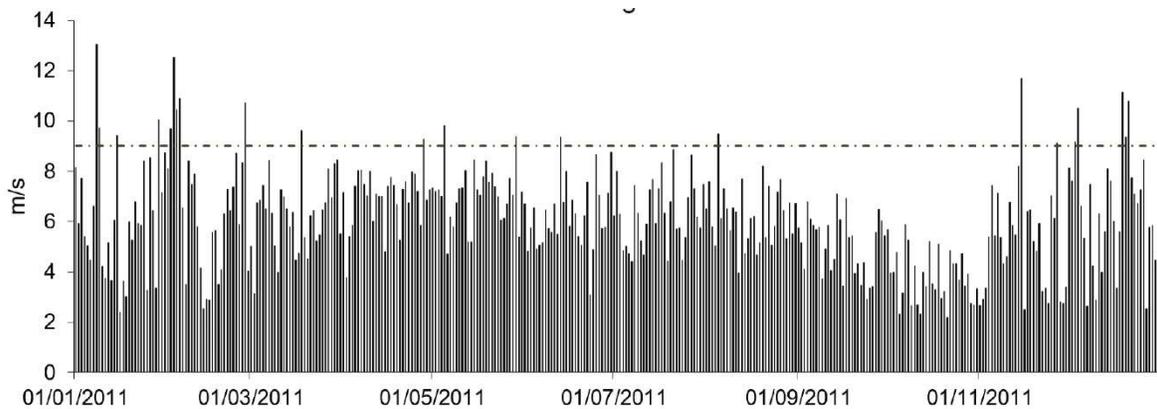


Figura 5.16 Velocidad máxima de viento en la estación de Ábrego en el año de 2011, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

En la figura 5.17 se presenta los registros de la velocidad de viento de la estación de Rancho Grande en el año de 2013, durante este año se contabilizan en total 30 eventos con velocidades mayores a los 9 m/s en los meses de invierno y para los meses de mayo a julio

se contabilizan 15 eventos. En la estación de Rancho Grande el día con la velocidad máxima más alta se registró durante el mes de diciembre con una velocidad de 15.5 m/s. De igual forma los meses que corresponden al invierno registraron los días con velocidad máxima de viento mayores, este año en particular durante los meses de finales de la primavera y verano registró la mayor cantidad de días con una velocidad de viento mayor a los 9 m/s. En la gráfica se puede observar que los días que corresponde a los meses de otoño registran una velocidad de viento uniforme comparada con los meses de inicio de año.

Para el año 2016 se muestra la figura 5.18 con los datos de velocidad máxima de viento en la estación de U.A. Agronomía durante este año y en el caso específico de esta estación se contabilizaron 18 eventos de los cuales 16 tuvieron lugar entre los meses de enero-abril y diciembre, los dos restantes corresponden al mes de mayo. Un evento del mes de diciembre es el que tiene el mayor valor con 13.5 m/s, durante este año también se tiene un evento con una velocidad alta durante el mes de mayo con 13.2 m/s, la mayor cantidad de eventos se concentra entre la segunda quincena de marzo y la primera de mayo. En enero del año descrito son muy bajos los eventos registrados a diferencia de los años anteriores.

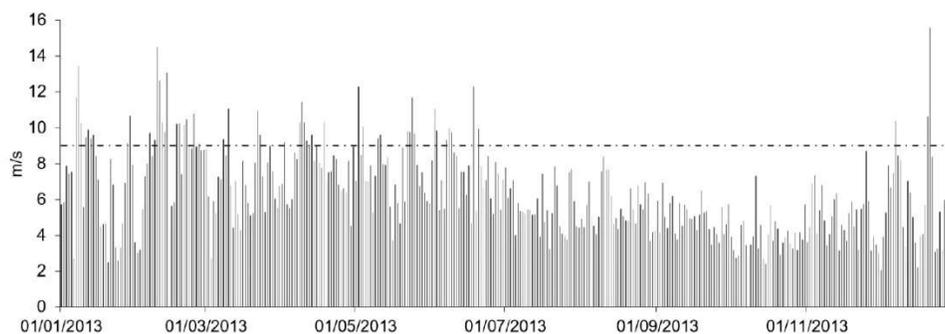


Figura 5.17 Velocidad máxima de viento en la estación de Rancho Grande en el año de 2013, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

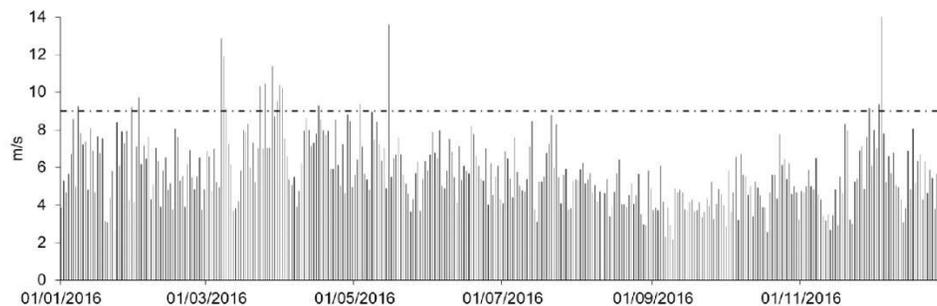


Figura 5.18 Velocidad máxima de viento en la estación de U.A. Agronomía en el año de 2016, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s.

5.5.1 Ciclo anual del viento

Con el objetivo de identificar un patrón en la distribución de las velocidades de viento máximo en la zona de estudio se optó por realizar dos gráficas, en la primera de ellas la figura 5.19 se presenta la velocidad máxima absoluta del viento, la cual se realizó mediante un filtrado de datos donde se obtuvo la velocidad máxima para cada día del año en las ocho estaciones, considerando los trece años de datos meteorológicos con los que se trabajó.

La figura 5.19 muestra la distribución a lo largo del año, se puede observar que durante los trece años considerados las mayores velocidades de viento máximas se concentran en los meses invernales, principalmente entre los meses de febrero y marzo, es durante estos meses donde se puede observar de forma clara los días con velocidades máximas cercanas a los 25 m/s. La línea de tendencia en la figura muestra que los valores durante los primeros meses del año las velocidades quedan con valores de 14 m/s, durante los meses de enero, febrero, marzo y abril las velocidades máximas absolutas quedaron por encima del valor de los 9 m/s, es hasta finales del mes de mayo cuando se comienzan a presentar valores con velocidades menores a los 9 m/s, los meses con menor velocidad quedan entre junio y octubre, sin embargo no se descarta la presencia de vientos fuertes durante los meses de verano e invierno que están asociados a fenómenos diferentes a los frentes fríos. Durante los días que corresponden a los dos últimos meses del año del año se presenta se observa como existe un incremento en las velocidades máximas del viento.

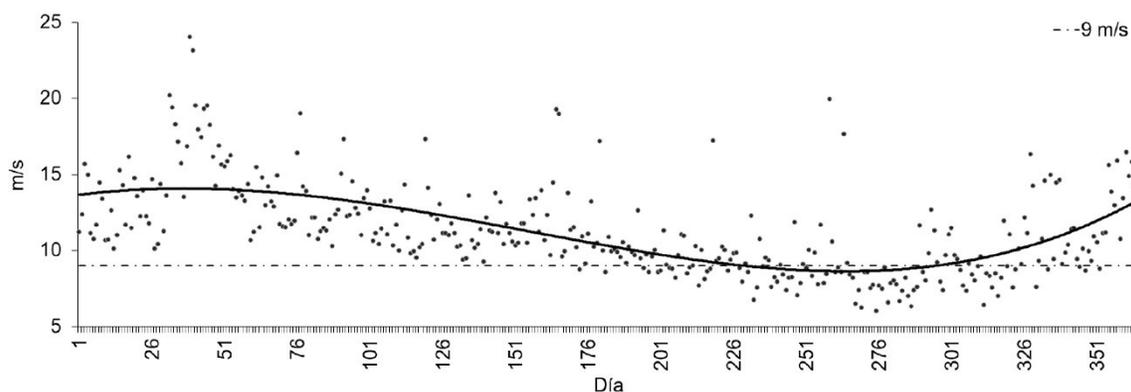


Figura 5.19 Velocidad máxima absoluta de viento, la línea punteada indica la velocidad de viento de 9 m/s y la línea continua indica la tendencia anual de la velocidad de viento máxima.

Tomando los mismos datos de velocidades máximas de viento diaria para cada una de las estaciones se realizó una gráfica de promedios diarios el resultado se presenta en figura 5.20, en dicha figura se puede apreciar que la línea de tendencia trazada conserva la forma de la presentada en la gráfica de velocidad máxima absoluta. Como es de esperarse al calcularse un promedio, los cambios se presentan en los valores que tienen cada uno de los días y los valores que tiene la línea de tendencia, en ambos casos disminuye. Para este caso el día con la velocidad máxima promedio queda con una velocidad de 15.3 m/s, mientras que la línea de tendencia comienza con una velocidad máxima de viento de 10 m/s, de la misma forma que la anterior durante los meses de invierno es cuando se tienen las mayores velocidades y tienden a disminuir durante el verano y el invierno, pero con este valor promedio durante estas temporadas las velocidades quedan en un rango de entre 6 y 9 m/s, para incrementar durante los dos últimos meses del año.

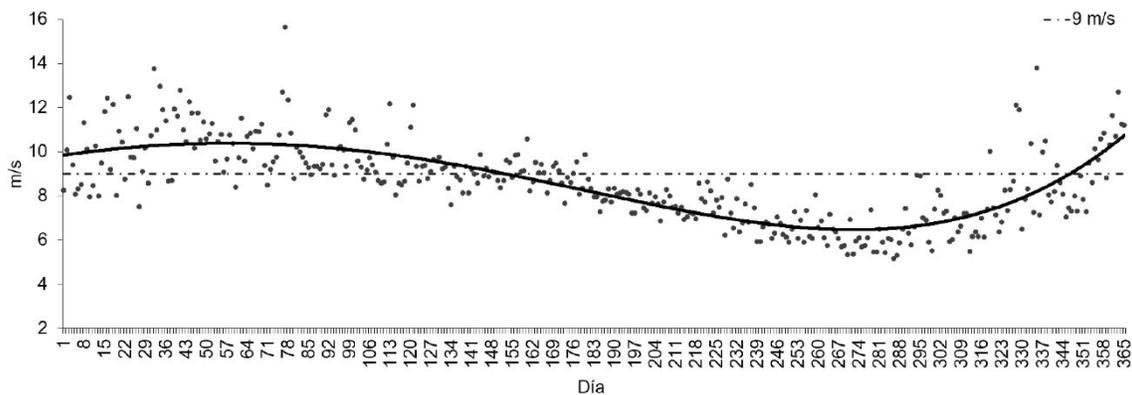


Figura 5.20 Velocidad máxima promedio de viento, la línea puntada indica la velocidad de viento de 9 m/s y la línea continua indica la tendencia anual de la velocidad de viento máxima.

Se puede concluir de este capítulo que las condiciones de temperatura del mes de enero se asocian a los valores de temperatura de las normales climatológicas, la temperatura del mes más frío según García (1998) debe ser menor a 18 °C, los valores de temperatura en el periodo de 2005-2017 de temperatura media se encuentra en valores entre los 8 y 12 °C. Sin embargo. Los valores en la temperatura media durante el mes de abril incrementan con un valor medio entre 18 °C-22 °C.

Los valores de precipitación según las normales climatológicas en la zona de estudio varía entre el 5 y 10.2 % (García, 1998), en los valores de precipitación acumulada de la figura 5.6, se observa que estos valores de precipitación durante el mes de enero se relacionan, los valores de precipitación están dentro del orden de 16.7 a 34.17 mm acumulados. A estos eventos de precipitación se relaciona la cantidad de humedad relativa en la zona de estudio, en enero con valores entre el 40 -70 %. Por otro lado, el mes de abril en cuanto a humedad relativa los valores están por debajo del 60% en la zona de estudio, lo que reduce de forma considerable la cantidad de precipitación en todas las estaciones. El bajo contenido de humedad relativa y de precipitación en las estaciones durante el año 2011 se asocia a la presencia de una sequía meteorológica (Márquez, 2017).

Los vientos con velocidades durante los meses del invierno se asocian a la entrada de los frentes fríos (Calderón, 2017; Luna, 2016) mientras que los vientos fuertes durante el verano en la zona de estudio se encuentran asociados a la entrada de los sistemas de tormenta (Domínguez et. al. 2012).

Capítulo 6.

Tormentas de polvo en el centro-norte de México

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones en el WRF-Chem de 15 eventos, en todos los casos se utilizaron las mismas parametrizaciones físicas y de esquema de polvo, descrito previamente en el capítulo 3. Para cada simulación se modeló tres días, uno anterior al evento para establecer las condiciones iniciales del modelo, el día del evento y un día posterior al evento, modelaciones tienen un paso de tiempo de 90 segundo (s), y los resultados obtenidos fueron graficados cada 30 minutos. Las simulaciones tienen diferentes tiempos de duración y diferentes cantidades de emisión de polvo, considerando este último se realizó una clasificación de las tormentas en tres grupos de intensidad: baja, media y alta, dentro de esta clasificación alta se consideró un evento extremo. De cada grupo de tormentas se presentan las condiciones sinópticas en una hora cercana al evento, las condiciones sinópticas en superficie obtenidas del Waeather Prediction Center (WPC), posteriormente se presentan la temperatura, velocidad de viento y humedad relativa obtenidas de las simulaciones y como parte final las gráficas de las tormentas de polvo.

6.1 Tormentas de polvo de intensidad baja

6.1.1 Condiciones sinópticas de las tormentas de polvo de intensidad baja

Las tormentas de polvo durante el invierno en la zona de estudio están asociadas al avance de los frentes fríos en el territorio. Las cartas sinópticas permiten observar la posición del frente respecto a la masa de aire frío que lo impulsa. La intensificación de las corrientes de viento en superficie sucede justo en el borde de la cuña del frente frío. Es decir, de acuerdo a su posición se puede establecer la dirección de vientos máximos en superficie. A continuación, se muestran las cartas sinópticas divididas en cuatro grupos de acuerdo a la cantidad de emisión de polvo que presentaron durante las simulaciones realizadas en el WRF-Chem.

En la figura 6.1 se muestran las cartas sinópticas de las tormentas de polvo con baja emisión. En a) se muestra la carta que corresponde al 14 de febrero de 2007 a las 18:00 Z, se observa

el frente frío posicionado de principalmente sobre el Golfo de México y sobre el noreste del territorio, el avance que lleva el frente es en dirección suroeste siguiendo la línea de presión de 1016 hPa. En b se muestran las condiciones sinópticas del 16 de febrero del 2008, en el norte del país se observan dos frentes, el primero de ellos en la parte central del norte del país el frente tiene un avance de noroeste a sureste, en la parte sur de los Estados Unidos forma un frente ocluido, el frente avanza de una zona con una presión de 1010 hPa a una de zona con 1008 hPa, cercano a las costas del Golfo de México, en el sureste de EU se presenta un frente estacionario sobre una zona de baja presión de 1008 hPa.

La carta sinóptica del 10 de marzo de 2010 se presenta en c, se puede observar la presencia de dos frentes, para el tiempo presentado los frentes están posicionados en la frontera norte de México, el primero en el noroeste es un frente estacionario en una zona de baja presión de 1015 hPa, hacia la parte central del frente se presenta una zona de alta presión. En la parte del noreste se presenta un frente con un avance de oeste-este que limita con una zona de baja presión. En esta carta se pueden observar el territorio de México entre diferentes líneas de presión, las de mayor valor localizadas en oeste y las de menor en el este.

En d que corresponde el 20 de marzo de 2012 en el noreste del país se observa un frente frío seguido de un frente cálido con lluvia ligera. El avance del frente frío es de noroeste-sureste y se encuentra sobre una zona con presión de 1005 hPa esta principalmente localizada sobre las costas del Golfo de México.

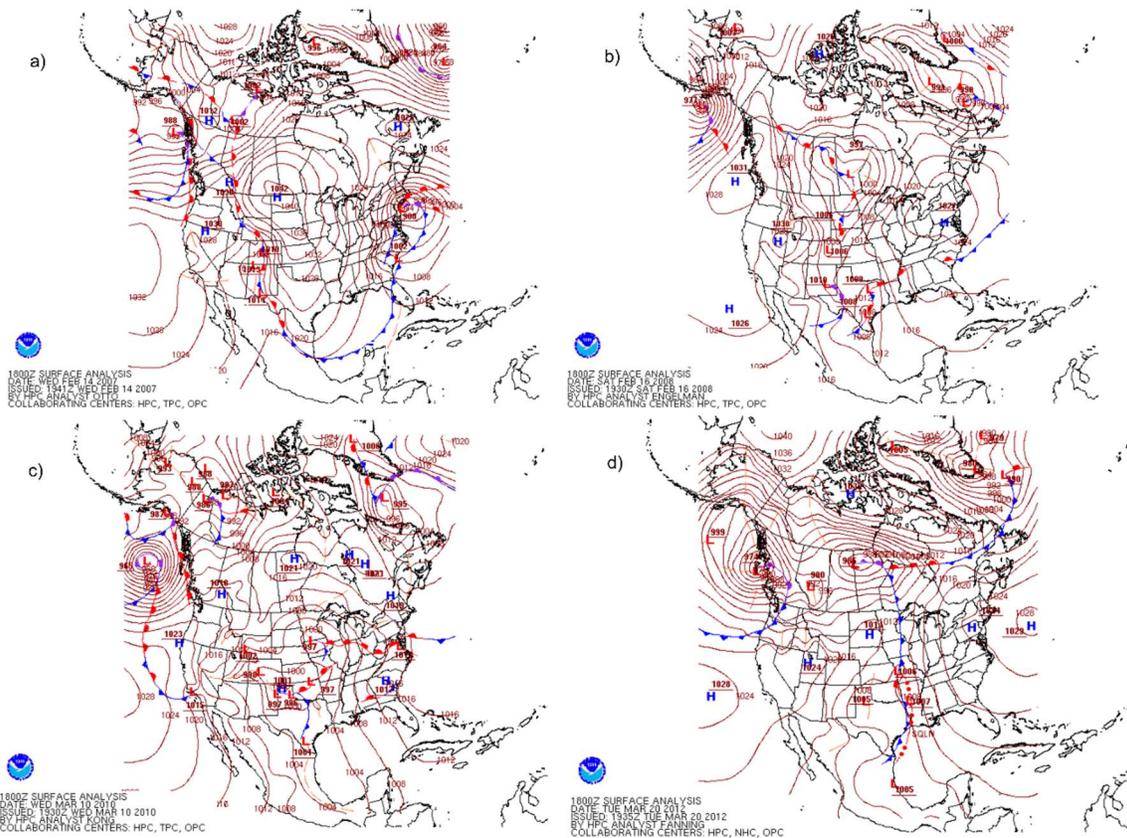


Figura 6.1 Condiciones sinópticas en superficie a las 18:00 para los días: a)14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010 y d) 20 de marzo de 2012

En la figura 6.2 en a) que corresponde al 21 de febrero de 2013, se observa sobre las costas del sureste de EU y en el norte de México un frente frío, el frente se posiciona sobre una zona de baja presión de 1008 hPa, el avance del frente es de noroeste-sureste. En b se muestra el 14 de febrero de 2017 a las 18:00 Z, en este caso se observa un frente frío en el noreste de México este avanzando de norte a sur, la línea de frente es menos angosta y tiene una forma de U, de igual forma que los frentes anteriormente descritos este se encuentra sobre una línea de baja presión de 1012 hPa. Para el 7 de diciembre de 2017 en d, en la parte norte el frente frío avanza de norte a sur sobre el territorio desde una zona de alta presión en la parte central de EU hasta una zona de baja presión que se ubica en la parte central de México, en los límites de la zona de presión se localiza un frente estacionario que cubre el Golfo de México y baja hasta Tabasco para subir hasta la parte central del territorio mexicano, terminado en una zona de baja presión de 1007 hPa.

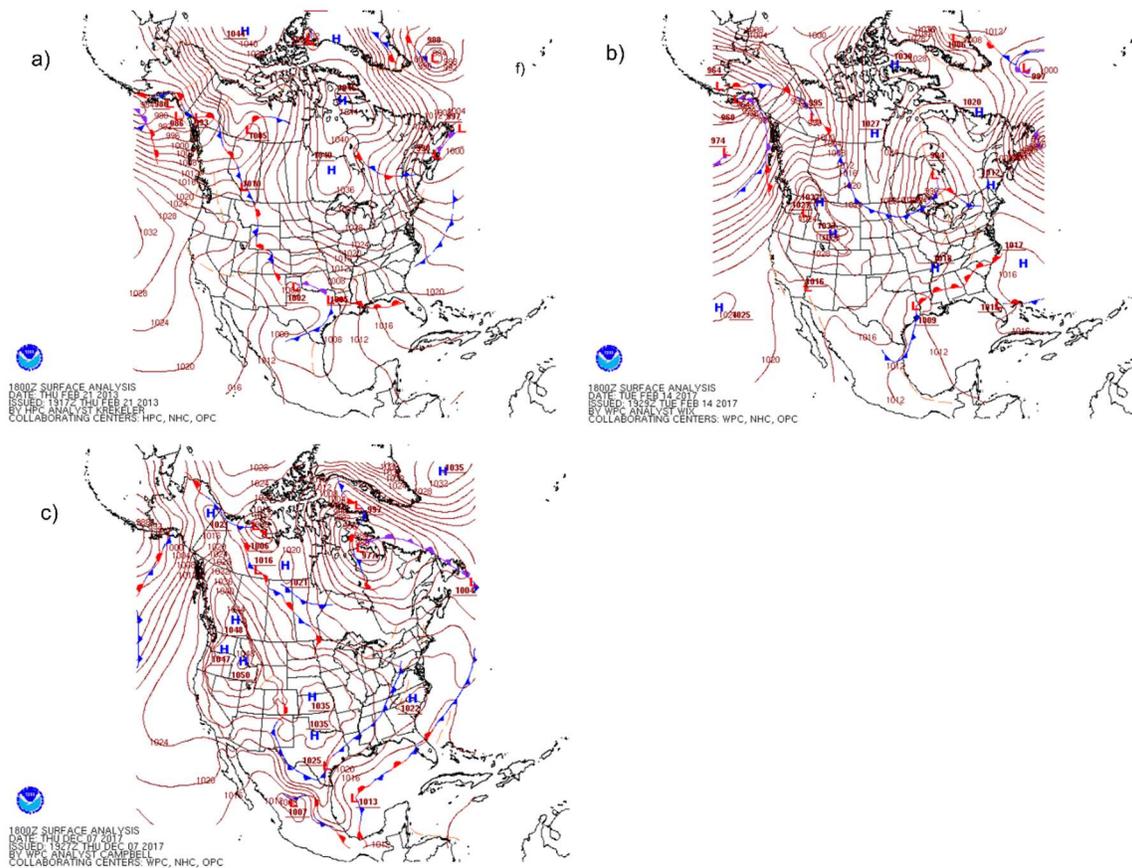


Figura 6.2 Condiciones sinópticas en superficie a las 18:00 para los días: a) 21 de febrero de 2013, b) 14 de febrero de 2017 y c) 7 de diciembre de 2017.

6.1.2 Temperatura y velocidad de viento en las tormentas de polvo de intensidad baja

Dos factores importantes a considerar durante el paso de un frente fríos en el centro-norte de México son la temperatura y la velocidad de viento. La temperatura que se presenta en la figura 6.3 corresponde a la hora cercana de la emisión de polvo, en la figura los incisos a, b, e y f son tormentas que tuvieron lugar durante el mes de febrero en diferentes años, en febrero de 2007 y 2017 las condiciones de temperatura tienen similitudes a pesar de que existe una hora y media de diferencia, principalmente en f existe una zona con temperatura de 30 °C en el este del dominio y del centro al norte la y en el sureste la temperatura muestra patrones y temperaturas en los mismos valores. Por otro lado, en b en febrero de 2008 la temperatura en el dominio es la más elevada para los siete casos presentados en esta sección, porque la temperatura que cubre la mayor parte del dominio es de 25 °C, para este caso en específico

se muestra una zona con una mayor temperatura en la parte norte del dominio. En e) se observan las condiciones de temperatura más frías en febrero de 2013, el dominio se encuentra cubierto en mayor cantidad por una temperatura de 10°C, mientras que las zonas que tienden a mantenerse con una temperatura más cálida para este caso en específico alcanzan una temperatura de 20 °C.

En esta misma clasificación se tienen dos tormentas que corresponden al mes de marzo de 2010 (c) y marzo de 2012 (d), en estos dos casos las condiciones de temperatura son similares, principalmente se mantienen en ambas las zonas con temperatura de 30 °C, aunque la temperatura tiende a ser más alta en d) en la mayor parte centro y norte del dominio. La temperatura de diciembre de 2017 se presenta en g), en este caso es muy notorio la entrada de la masa de aire frío en la zona de estudio, se puede observar en el norte y este del dominio la entrada de aire más frío con una temperatura de 10 °C, mientras que la parte central y sur del dominio mantienen una temperatura más cálida.

El cambio en el descenso en la temperatura se genera por advección de aire frío, que provoca un descenso en la temperatura del ambiente conforme se desplaza hacia el sur (Calderón, 2017), en el caso de diciembre de 2017 es evidente este cambio en la temperatura, por esta razón se muestra la figura 6.4 que corresponde los días 6 (a) y 8 (b) de diciembre ambas a las 16:00 hora local, estas fechas son de un día anterior a la entrada del frente y al día siguiente cuando el frente ya está establecido. En a) el dominio presenta una temperatura cálida entre los 20 °C y 25 °C, la zona del suroeste la temperatura es mayor con 30 °C. Por otro lado, la temperatura para 8 de diciembre es menor, la mayor parte del dominio está en los 5 °C, con pequeñas zonas con valores de 0°C, la variación de temperatura se encuentra entre 15°C y 20°C en un periodo de 48 horas.

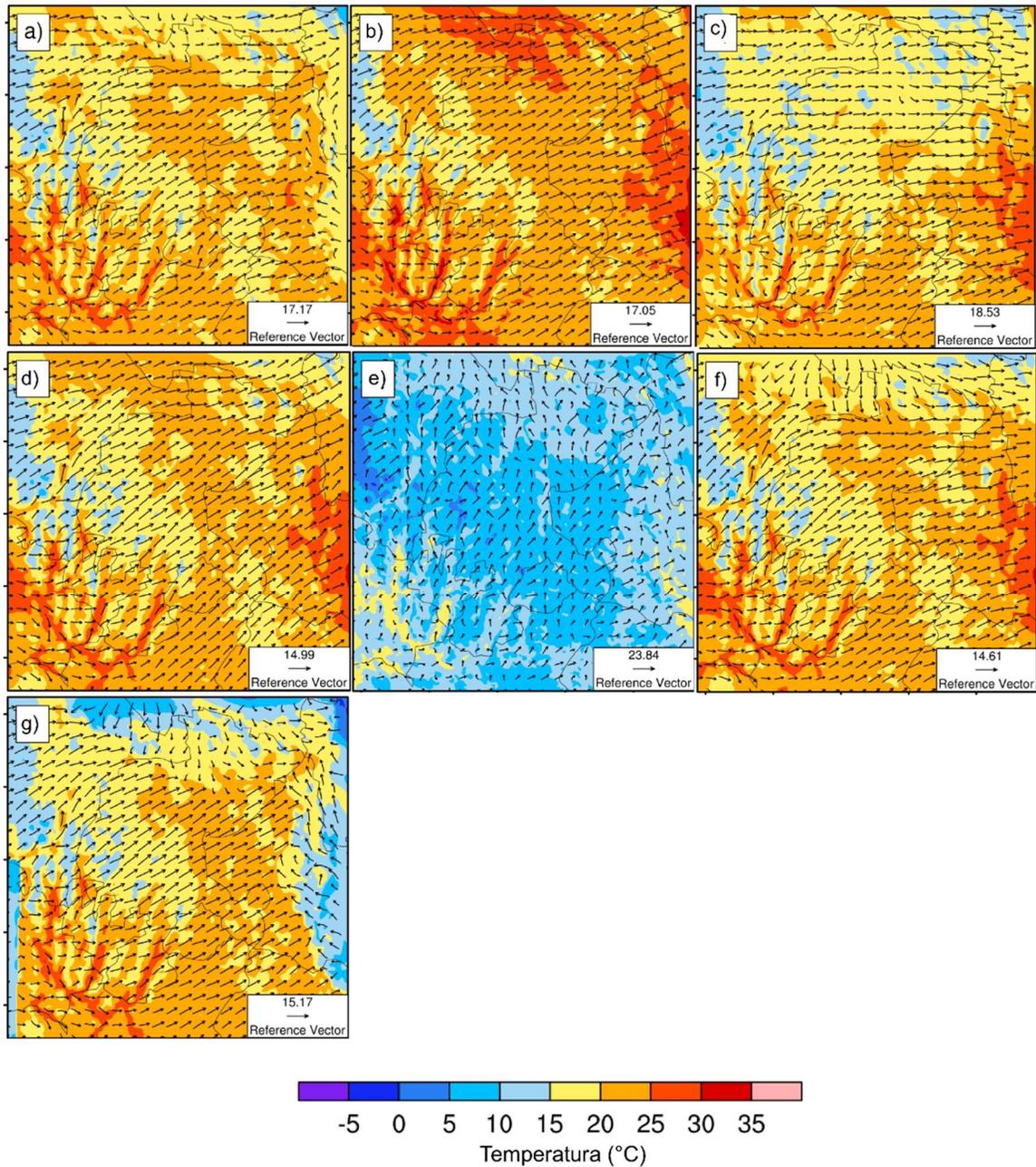


Figura 6.3 Temperatura y velocidad de viento (m/s) en las siguientes fechas: a) 14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010, d) 20 de marzo de 2012, e) 21 de febrero de 2013, f) 14 de febrero de 2017 y g) 7 de diciembre de 2017.

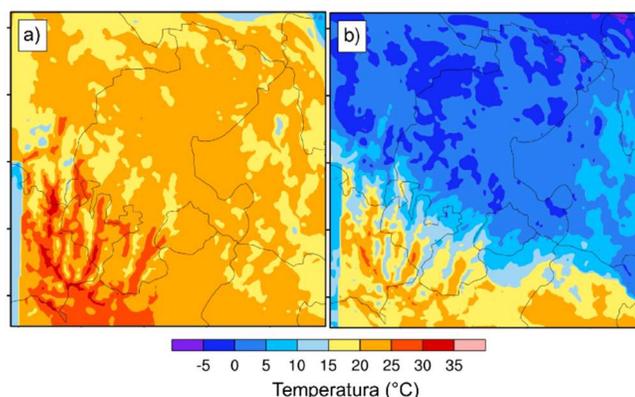


Figura 6.4 Temperatura los días 6 (a) y 8 (b) de diciembre de 2017 a las 16:00 hora local.

Otro aspecto importante con el paso de un frente frío es el viento fuerte, este tiene un avance de promedio de 35 km/h (9.7 m/s) (Calderón, 2017) por lo que se produce un cambio en la velocidad y en la dirección del viento. En la figura 6.3 se presenta la velocidad y dirección del viento con vectores para siete los siete casos con clasificación de intensidad baja. En los casos que corresponden a febrero de 2007 en a), febrero de 2008 en b), marzo de 2010 en c) y marzo de 2012 en d) en estos cuatro casos la dirección del viento es similar, en el norte del dominio la dirección del viento es de oeste-este, mientras que el mayor parte del dominio el viento lleva una dirección de suroeste-noreste, para estos casos al existir una zona de baja presión, los vientos presentados que son en superficie mantienen una circulación ciclónica. Para el caso de febrero de 2013 en d), el viento alcanza velocidades de hasta 23.84 m/s principalmente en la zona noroeste del dominio, en este caso los vectores de viento muestran diferentes direcciones, en el noroeste es lleva una dirección suroeste-noreste como en los casos anteriores, en la parte norte en viento tiene una dirección de sur-norte. En f) y g) la mayor parte del dominio presenta una dirección de viento de suroeste-noreste, en ambos casos en el norte del dominio se observa viento con dirección norte-sur, ambas direcciones de viento crean una zona de convergencia, en g en la parte este del dominio se presenta otra zona de convergencia con viento que viene en dirección de este-oeste. Para diciembre de 2017 en g) la dirección del viento se encuentra asociada a la depresión frontal que acompaña a los frentes, lo que favorece a la convergencia de los vientos y su circulación ciclónica.

6.1.3 Humedad relativa en las tormentas de polvo de intensidad baja

Una de las características de las masas de aire continentales que provienen del norte durante el invierno es que tienen un bajo contenido de humedad (Reyes Coca en Calderón, 2017), en la figura 6.5 se presentan las condiciones de humedad relativa al momento del desarrollo de las tormentas de polvo. Se puede observar que cinco casos de los presentados cuentan con condiciones similares de humedad relativa, estas tormentas se ubicaron en los meses de febrero y marzo. Tanto como en a, b, c, d y f la zona del suroeste y este presentan una humedad del 50 %, la cual abarca hasta la parte este del Estado de Zacatecas. En c, que corresponde a marzo de 2010 las condiciones de humedad relativa son mucho menores que en otros casos, la humedad relativa se queda concentrada sólo en los límites sureste y oeste del área que comprende el dominio. Las condiciones de humedad cambian en e) y g), para febrero de 2013 (e) la mayor parte del dominio se encuentra con un porcentaje de 50%, sólo quedando sin humedad la parte norte del dominio. Por otro lado, en diciembre de 2017 (g) sólo la parte centro en dirección al este tiene un menor contenido de humedad, la mayor tiene un porcentaje del 50%, las zonas frías identificadas en la figura 6.3(g) son zonas que tienen un mayor contenido de humedad con 70% destacando la zona localizada al este del dominio. Por lo que se puede concluir que en cuestiones de humedad relativa en estos siete casos presentados el mes de diciembre es el más húmedo, mientras que los meses de febrero y marzo tienden a ser más secos al momento del desarrollo de las tormentas de polvo en el centro-norte de México.

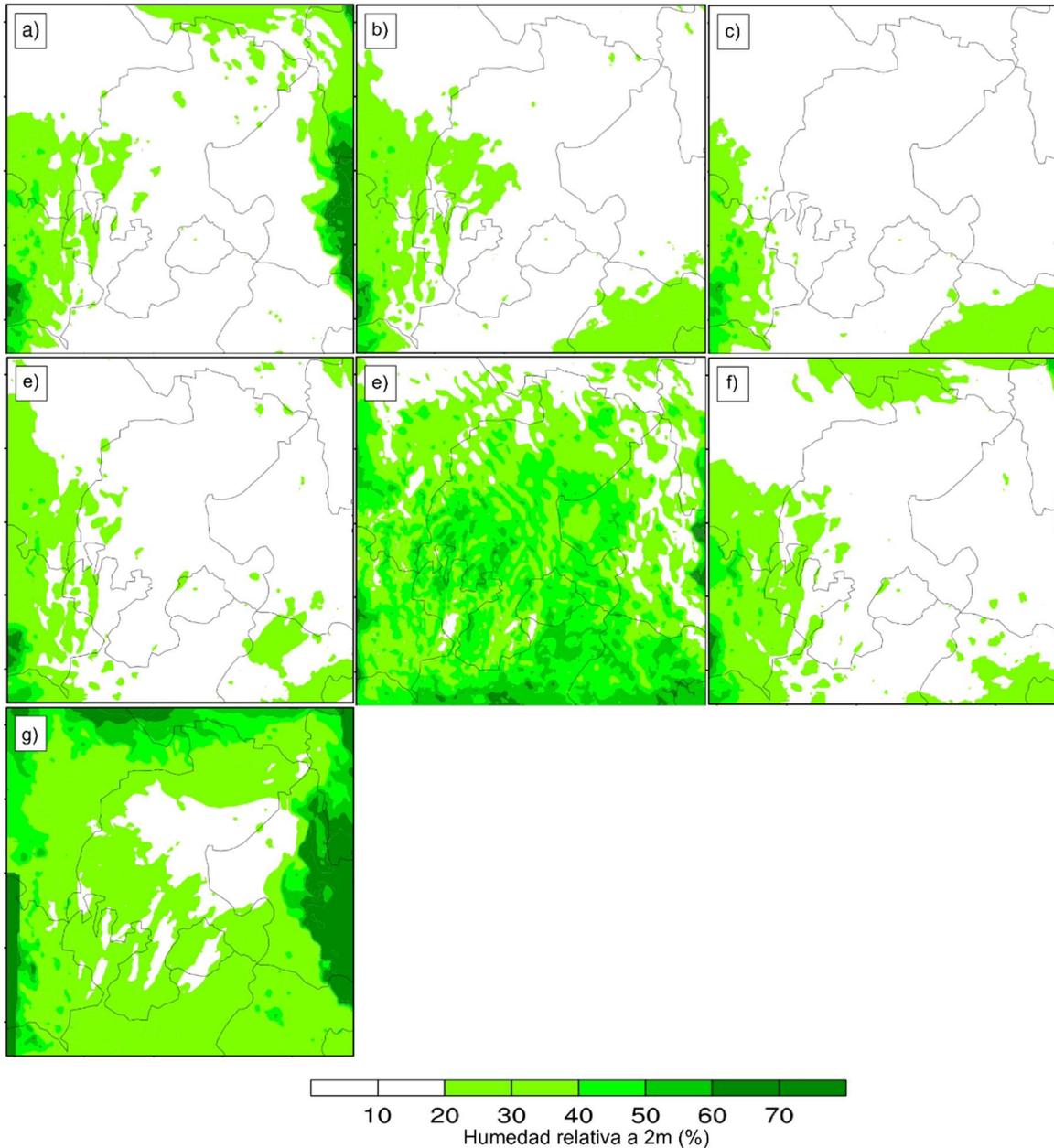


Figura 6.5 Humedad relativa en las siguientes fechas: a)14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010, d) 20 de marzo de 2012, e) 21 de febrero de 2013, f) 14 de febrero de 2017 y g) 7 de diciembre de 2017.

6.1.4 Desarrollo de las tormentas de polvo de intensidad baja

En el centro-norte de México los frentes fríos además de causar bajas temperaturas, lluvias, tormentas de nieve y vientos fuertes, ocasionan tormentas de polvo al interactuar los vientos con la superficie de los suelos desnudos, donde es transportado las partículas finas del suelo, cabe destacar que la emisión de polvo se presenta durante la entrada de la zona frontal en la zona de estudio. A continuación, se presentan siete tormentas clasificadas como de baja intensidad.

En los siete casos presentados (Figura 6.6) se puede observar que las estelas de polvo, siguen la dirección del viento de suroeste-noreste, la cantidad de polvo no está en función de la velocidad del viento. Como se pudo observar en la figura 6.3 en los vectores de viento, al tener la mayor parte del viento la misma dirección se tiene una mayor cantidad de emisión de polvo. La tormenta del 21 de febrero de 2013 (e) es la que tiene emitió una menor cantidad de polvo a pesar de tener tres estelas en la parte central del estado de Zacatecas. Por otro lado, la tormenta de diciembre de 2017 también presenta una baja cantidad de emisión de polvo, por lo que para estos casos se puede concluir que al tener una cantidad arriba del 50% de humedad relativa en la mayor parte del dominio la cantidad de polvo transportado disminuye. En los casos a), b), d) y f) tienen características similares en temperatura, dirección y velocidad de viento, mientras que febrero de 2007 (a), febrero de 2008 y marzo de 2012 los rangos máximos de emisión de polvo están por encima de los $14 \mu\text{m-m}^3$, la tormenta que se identificó en el mes de febrero de 2017 registra valores menores de emisión de polvo, alcanzando un máximo de $7.14 \mu\text{m-m}^3$. La tormenta que tienen una mayor cantidad de emisión de polvo corresponde a 10 de marzo de 2010 (c) tanto la figura 6.5 y 6.6 en la hora 19:30 UTC, se tiene la relación de un bajo contenido de humedad y una mayor cantidad de emisión de polvo, en el tiempo presentado en la figura 6.6 (c) a las 19:30 UTC se presenta el máximo de emisión de polvo de $34 \mu\text{m-m}^3$, en una estela de polvo localizada en la parte central del Zacatecas.

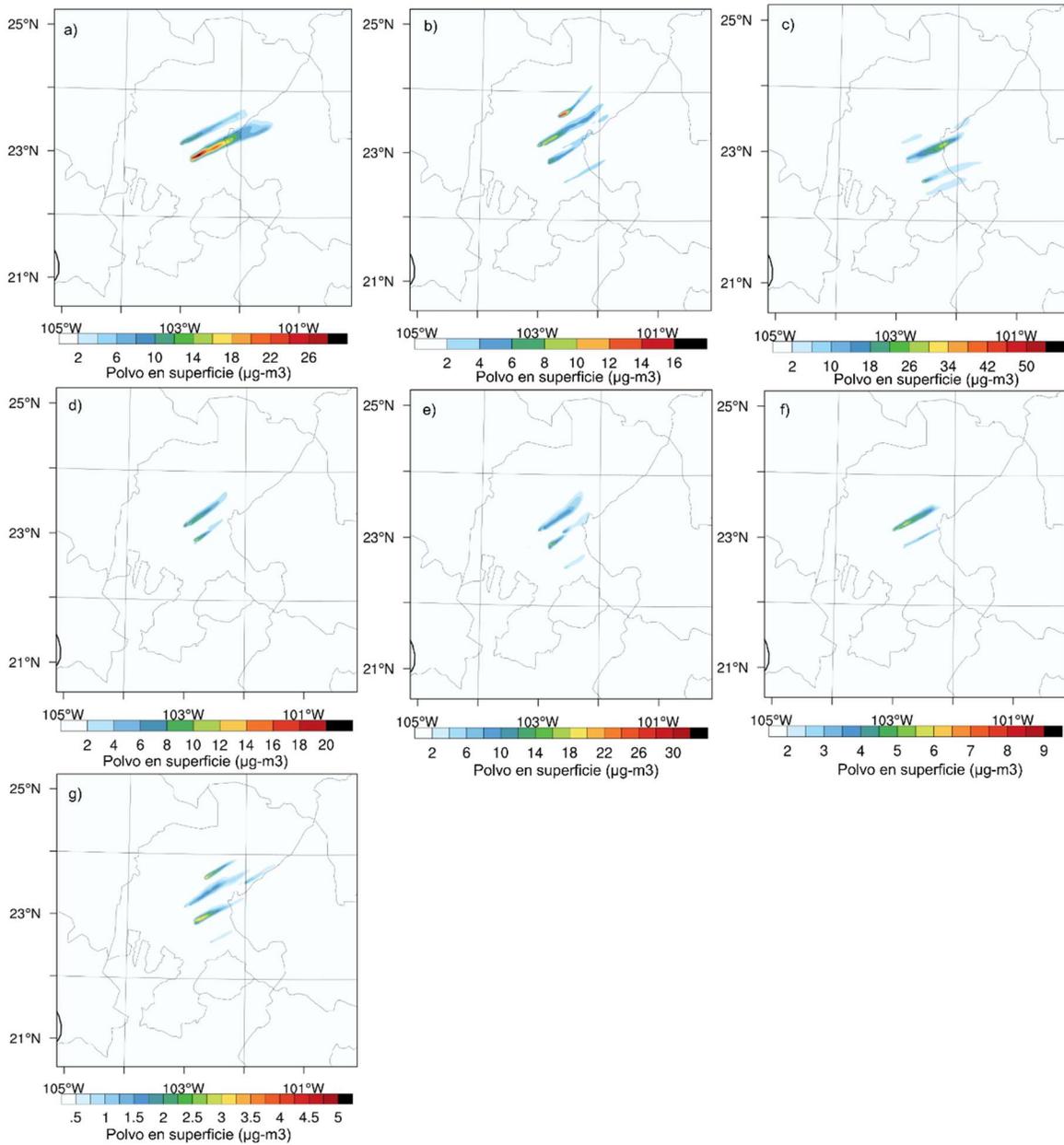


Figura 6.6 Tormentas de polvo en las siguientes fechas: a) 14 de febrero de 2007, b) 16 de febrero de 2008, c) 10 de marzo de 2010, d) 20 de marzo de 2012, e) 21 de febrero de 2013, f) 14 de febrero de 2017 y g) 7 de diciembre de 2017.

6.2 Tormentas de polvo de intensidad media

6.2.1 Condiciones sinópticas de las tormentas de polvo de intensidad media

En la categoría de tormentas con intensidad media de emisión de polvo se tienen cuatro tormentas, en la figura 6.7 se presentan las cartas sinópticas correspondientes a estos eventos, en a) el 1 de diciembre de 2009 a las 18:00 Z se puede observar de forma clara el frente frío posicionado en el centro-norte de México en una dirección de avance de noroeste – sureste en este se localiza en una zona de baja de 1005 hPa, en el Golfo de México se presentó un frente estacionario.

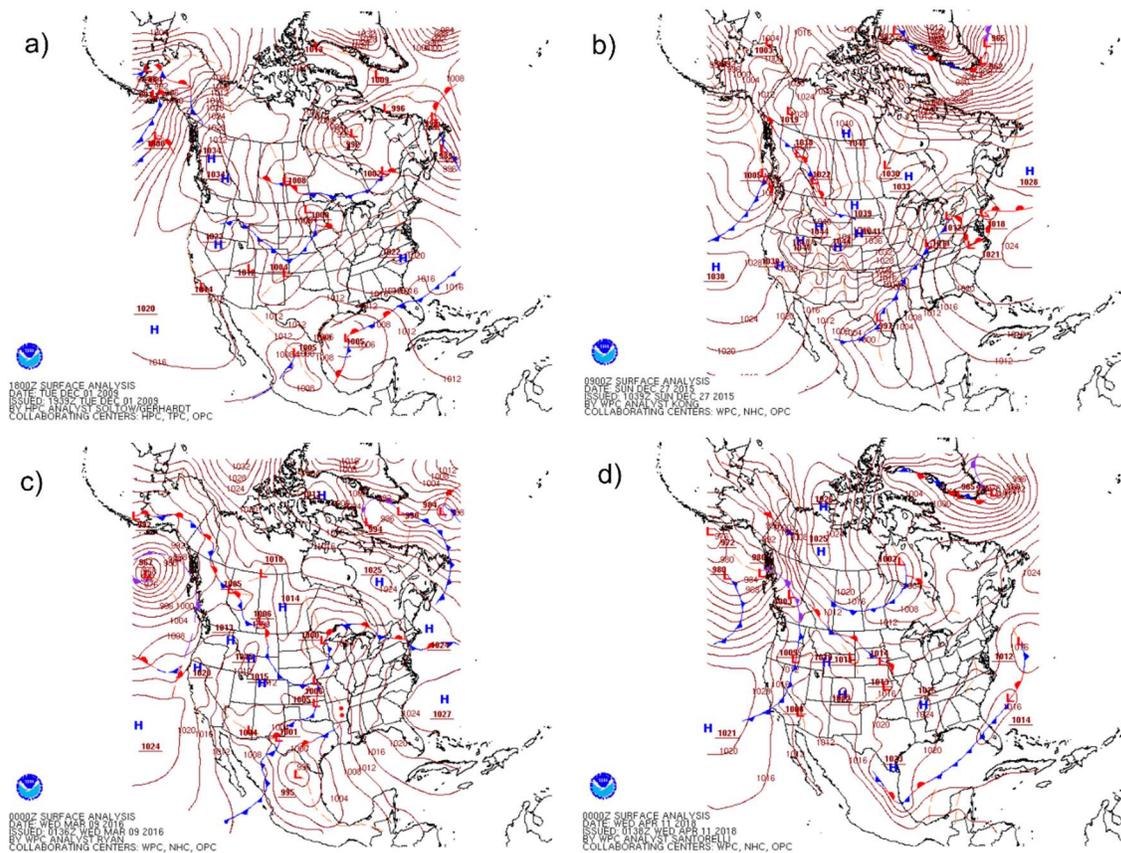


Figura 6.7 Condiciones sinópticas en superficie en las siguientes fechas y horas: a) 1 de diciembre de 2009 a las 18:00 Z, b) 27 de diciembre de 2015 a las 09:00 Z, c) 9 de marzo de 2016 a las 00:00 Z y d) 10 de abril de 2018 a las 00:00.

En b), la línea de frente cubre un área mayor, al noroeste de la línea de frente se presentan diversas zonas de alta presión, el frente tiene un desplazamiento de noroeste a sureste posicionándose entre diferentes líneas de baja presión en el norte de México con un valor de

1000 hPa y en la parte del noreste de EU con valores de presión de 1012 hPa. En c, la línea de frente abarca un área mayor que los otros dos casos presentados en este apartado, el frente se desplaza en una dirección de noroeste-sureste, al noroeste del frente se presentan diferentes áreas de alta presión, el frente avanza hacia las zonas de baja presión, se presenta una con valores de 995 hPa en el noreste de México. En d, la carta sinóptica que corresponde al 11 de abril de 2018 a las 00:00 Z, un frente estacionario sobre el noreste de México, que sigue por el Golfo de México como un frente frío. En el norte del frente se tiene una zona de alta presión de 1023 hPa, en la parte oeste del frente estacionario la presión es menor de 1016 hPa y 1012 hPa. En el suroeste de EU se observa un frente frío con dirección de noroeste-sureste.

6.2.2 Temperatura y velocidad de viento de las tormentas de polvo de intensidad media

Las condiciones de temperatura de los cuatro casos considerado con intensidad media se presentan en la figura 6.8. En a) que corresponde a la tormenta de diciembre de 2009, la temperatura es templada en la mayor parte de dominio con 15 °C, se mantiene dos zonas con temperatura más cálida de entre 20-25 °C la del suroeste y en la parte este del dominio. En b) se presenta el 27 de diciembre de 2015, se puede observar que al igual que en el caso anterior la temperatura es templada en la mayor parte del área de dominio, pero con una zona con una temperatura más fría en el norte del dominio con 5 °C, la zona con esta temperatura tiene una temperatura semicircular, la temperatura más cálida en este caso presentado se mantiene en el este del dominio al igual que en el suroeste. El 8 de marzo de 2016 en c), el dominio presenta una temperatura más elevada que abarca la mitad y está entre los 20-25 °C, la zona con la temperatura más baja se presenta del centro al noroeste del dominio, quedando del centro con 15 °C y disminuye en dirección al noroeste donde queda con un valor a 5 °C. En d) para abril de 2018, la temperatura en toda la porción suroeste es la más cálida en de los cuatro casos presentados con 35 °C, en el norte y sureste se presentan zonas con temperaturas calidad y se observa la entrada de temperatura fría del noreste con dirección hacia el sureste que cubre hasta la parte central del área de estudio.

Para realizar una comparación entre los cambios en la temperatura durante las modelaciones, la figura 6.9 presenta los cambios en cambios en 24 horas del 27 y 28 de diciembre de 2015

ambas a las 17:30 UTC. El 27 de diciembre se puede observar en la parte norte del dominio una zona con temperatura más fría de 5 °C que se asocia a la entrada del frente frío, la parte del centro al oeste mantiene una temperatura de 15 °C, mientras que el este y sur del dominio la temperatura es más cálida con 20 °C y pequeñas zonas con 25 °C. El día siguiente en el mismo horario en la mayor parte del área del dominio se observa que la temperatura ha disminuido a una temperatura de 15 °C, de la misma forma un área partiendo del centro del

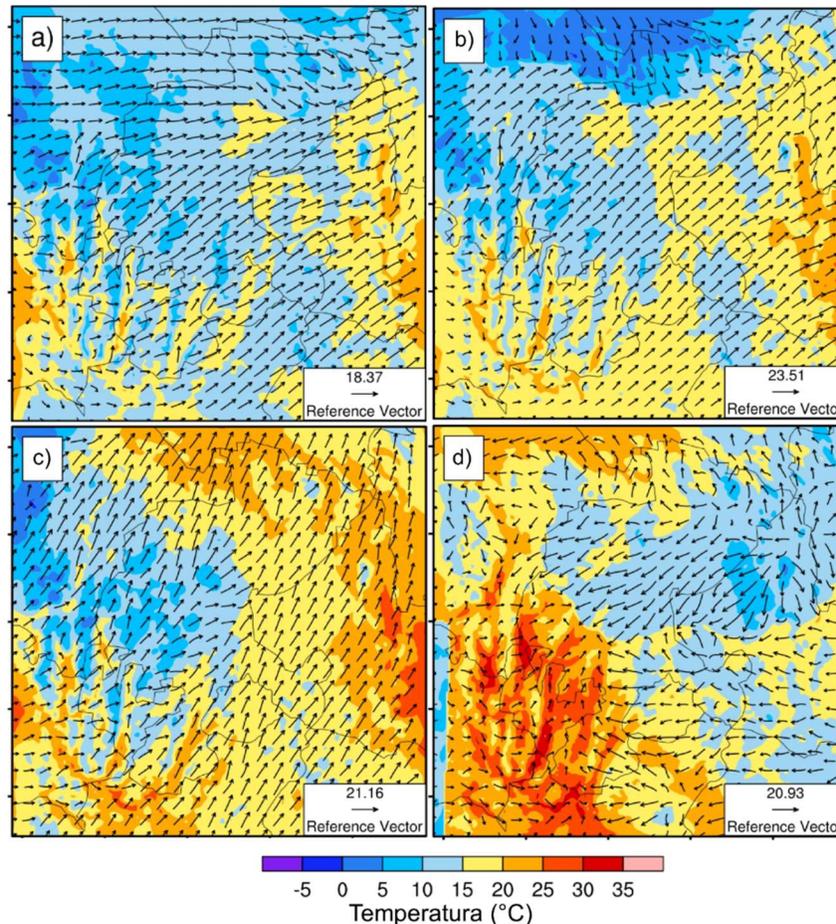


Figura 6.8 Temperatura y velocidad de viento (m/s) en las siguientes fechas: a) 1 de diciembre de 2009, b) 27 de diciembre de 2015, c) 8 de marzo de 2016 y d) 10 de abril de 2018.

dominio hacia el norte y noreste la temperatura es de 10 °C, la zona del norte con la temperatura de 0°C se mantiene. Sin embargo, la zona con temperatura cálida del suroeste del dominio mantiene la temperatura de 20 °C, pero se incrementan las franjas dentro de estas que tiene una temperatura de 25 °C. Los cambios de temperatura en 24 horas presentados,

oscila entre 5 y 10 °C de diferencia, lo cual permite evidenciar el posicionamiento del frente frío sobre el área de estudio.

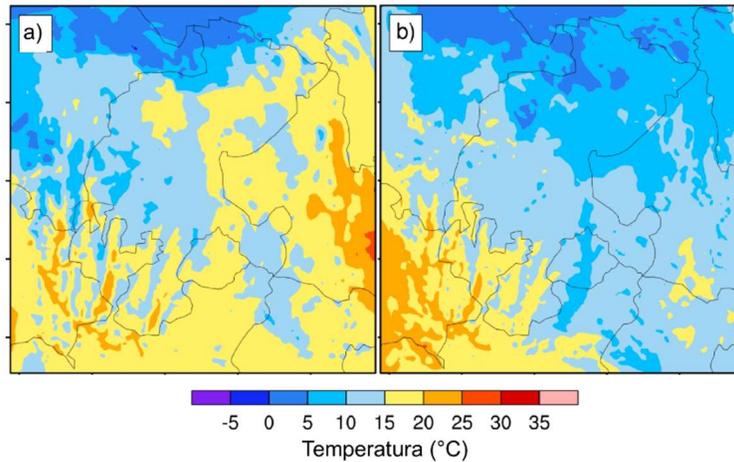


Figura 6.9 Temperatura en diciembre los días: a) 27 y b) 28 a las 17:30 UTC

La velocidad y dirección del viento se muestra en la figura 6.8, en a) en la tormenta de diciembre de 2009 la velocidad máxima de viento es de 18.37 m/s siendo esta la menor de los cuatro casos. Se puede observar que los viento tienen una velocidad máxima en el norte donde la dirección es de oeste-este, se mantiene en el mayor parte del dominio una dirección de suroeste-noreste, que corresponde a la circulación que sigue el viento hacia la zona de baja presión localizada al noreste de la línea frontal.

En b) se tiene la velocidad más alta de viento con un máximo de 23.51 m/s, en la mayor parte del dominio prevalece esta condición de velocidad, de la misma forma que de dirección de viento abarcando la dirección de suroeste-noreste la mayor parte de la zona de estudio. En la zona norte se puede observar la formación de una zona de convergencia donde se encuentran las dos zonas con diferente temperatura. En la zona norte el viento tiene una dirección de norte-sur. Tanto la zona de convergencia como el viento con dirección suroeste-noreste siguen la línea de baja presión ubicada en el sureste de EU y noreste de México (Figura 6.8). Para el evento de marzo de 2016 la velocidad máxima de viento es de 21.15 m/s, a diferencia de los dos casos presentados con anterioridad, la dirección del viento en el dominio tiene una menor inclinación hacia noreste, quedando casi paralela con dirección al norte, en la mayor parte de la zona de estudio la velocidad alcanza la velocidad de 21 m/s, excepto en el sureste del dominio donde el viento tiene una velocidad menor una dirección de oeste-este. La

dirección del viento al igual que en los casos anteriores sigue hacia zona de baja presión localizada en el norte, es por eso que el viento está más inclinado hacia el norte que en los casos mostrados con anterioridad.

En abril de 2018 en d), la dirección del viento contraria a todos los eventos presentados hasta este punto, se observa de forma clara la entrada de aire más frío del noreste y con este los vientos de hasta 20.9 m/s, sólo la zona cálida de sureste mantiene la dirección de oeste-este, en el sureste la dirección del viento es de este-oeste. La dirección del viento sigue las líneas de baja presión en este caso el frente se ubica en una línea de presión de 1016 hPa y avanza al sureste hacia una zona con una línea de menor presión de 1012 hPa. Lo que da como resultado una dirección de viento anticiclónica en este evento.

6.2.3 Humedad relativa en las tormentas de polvo de intensidad media

Las condiciones de humedad relativa se muestran en la figura 6.10, en primera instancia se pueden observar que las condiciones de humedad relativa para estos cuatro casos de tormentas de intensidad media son mayores que los presentados con anterioridad. En a) se observa de forma clara la división entre dos zonas con diferente porcentaje de humedad en el norte- noroeste con 50 y en el sur, sureste y noreste con 70%, además el corte entre estos dos porcentajes de humedad al igual que la dirección del viento nos indica la línea del frente frío.

En b. c y d las zonas con una menor temperatura corresponden con las que presentan un mayor porcentaje de humedad relativa, en los casos de b) y d) la entrada del frente puede estar acompañada de nubosidad y lluvia en la zona de estudio. Sin embargo, en abril de 2018 (d) la zona del suroeste del área de estudio presenta un bajo contenido de humedad para la hora en la que se desarrolló la tormenta de polvo.

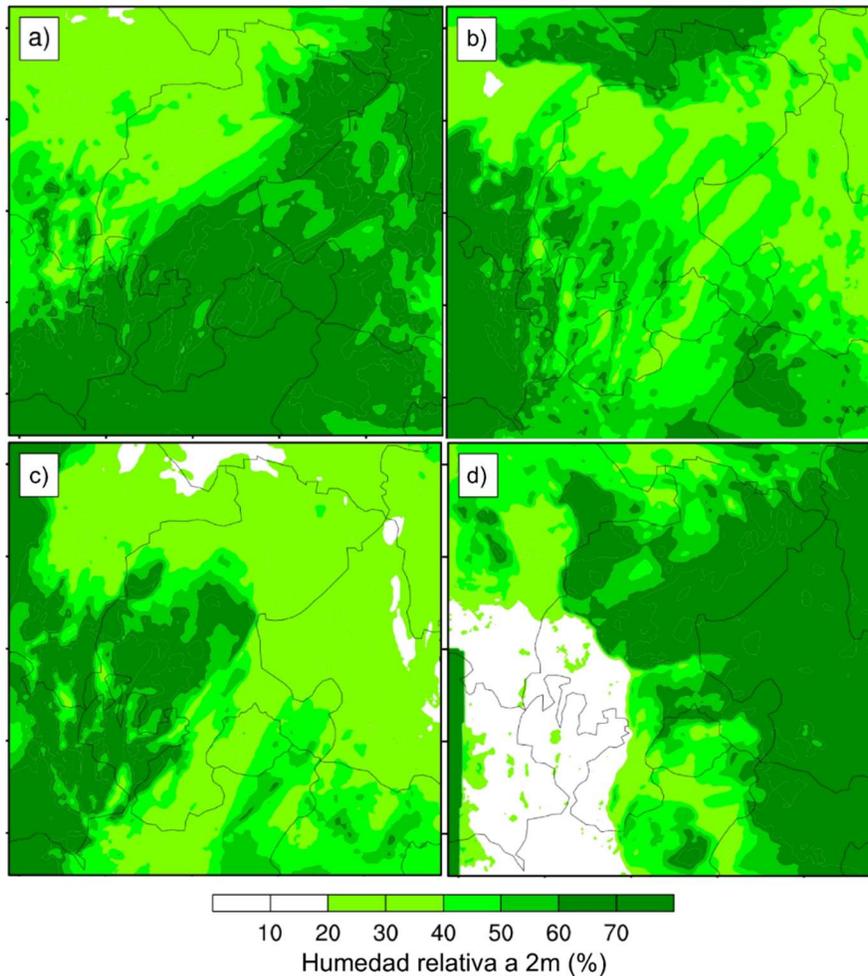


Figura 6.10 Humedad relativa en las siguientes fechas: a) 1 de diciembre de 2009, b) 27 de diciembre de 2015, c) 8 de marzo de 2016 y d) 10 de abril de 2018

6.2.4 Desarrollo de las tormentas de polvo de intensidad media

Las emisiones de polvo de los cuatro casos de esta clasificación se presentan en la figura 6.11, el rango de emisión de polvo es de 60-120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$. La tormenta que presentó una menor cantidad de emisión de polvo fue la tormenta de abril de 2018 (d), es esta se tienen tres zonas de emisión en la parte central de Zacatecas, alcanzando un máximo de 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ a las 00.30 UTC del 11 de abril, la totalidad de las estelas de polvo en esta tormenta siguen la dirección del viento en este caso es de noreste-suroeste, y la zona del norte del dominio mantiene la dirección hacia el norte.

La tormenta de diciembre de 2009 (a) alcanza un máximo de emisión de polvo a las 18:00 UTC con concentraciones de hasta $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$, en dos estelas de polvo localizadas en la parte central de Zacatecas, ambas estelas mantienen la dirección del viento de suroeste-noreste.

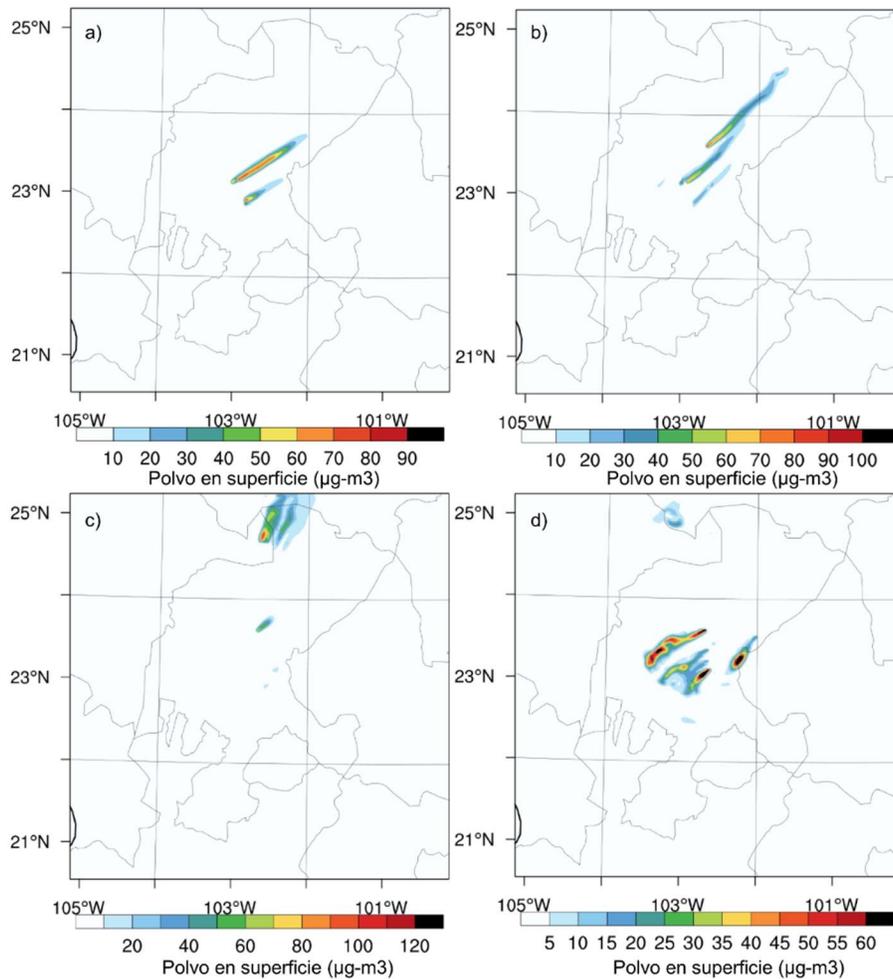


Figura 6.11 Tormenta de polvo en las siguientes fechas: a) 1 de diciembre de 2009, b) 27 de diciembre de 2015, c) 8 de marzo de 2016 y d) 10 de abril de 2018

En b) se observan tres estelas en la parte central de la zona de estudio, las estelas presentan un máximo de concentración de polvo a las 17:30 UTC, al igual que en el caso anterior la dirección de las estelas de polvo es de suroeste a noreste. En c) se tiene la tormenta con la mayor cantidad de emisión de polvo de los cuatro casos presentados en esta sección, para este caso de marzo del 2016 la emisión de polvo se dio en la parte norte del dominio y sólo una pequeña estela se presentó en la zona cercana al centro. La mayor cantidad de emisión de polvo se da a las 22:30 UTC con un valor de $110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ en la estela de polvo ubicada al norte.

6.3 Tormentas de polvo de intensidad alta

6.3.1 Condiciones sinópticas de las tormentas de polvo de intensidad alta.

Las cartas sinópticas de la clasificación de tormentas de polvo de intensidad alta se presentan en la figura 6.12. En a), el 29 de diciembre de 2006 a las 18:00 Z, la línea de frente frío se ubica desde el centro-norte de México hasta el sur de EU donde el frente frío se une a un frente cálido formando ambos un frente ocluido, por encima de este se ubica un frente estacionario. El frente frío sobre el territorio de México está sobre una zona de baja presión de 1012 hPa.

En b se observa un frente estacionario localizado entre el noreste y este de México, este frente está en una línea de presión de 1010 hPa. En el norte del Golfo de México se presenta un frente cálido con dirección sureste-norte. En c, se observa un frente frío que sigue la línea de costa del sureste y este de UE, en el norte de México se presenta un frente cálido que forma un frente ocluido al converger con un frente frío de menor tamaño que se desplaza en dirección noroeste-sureste.

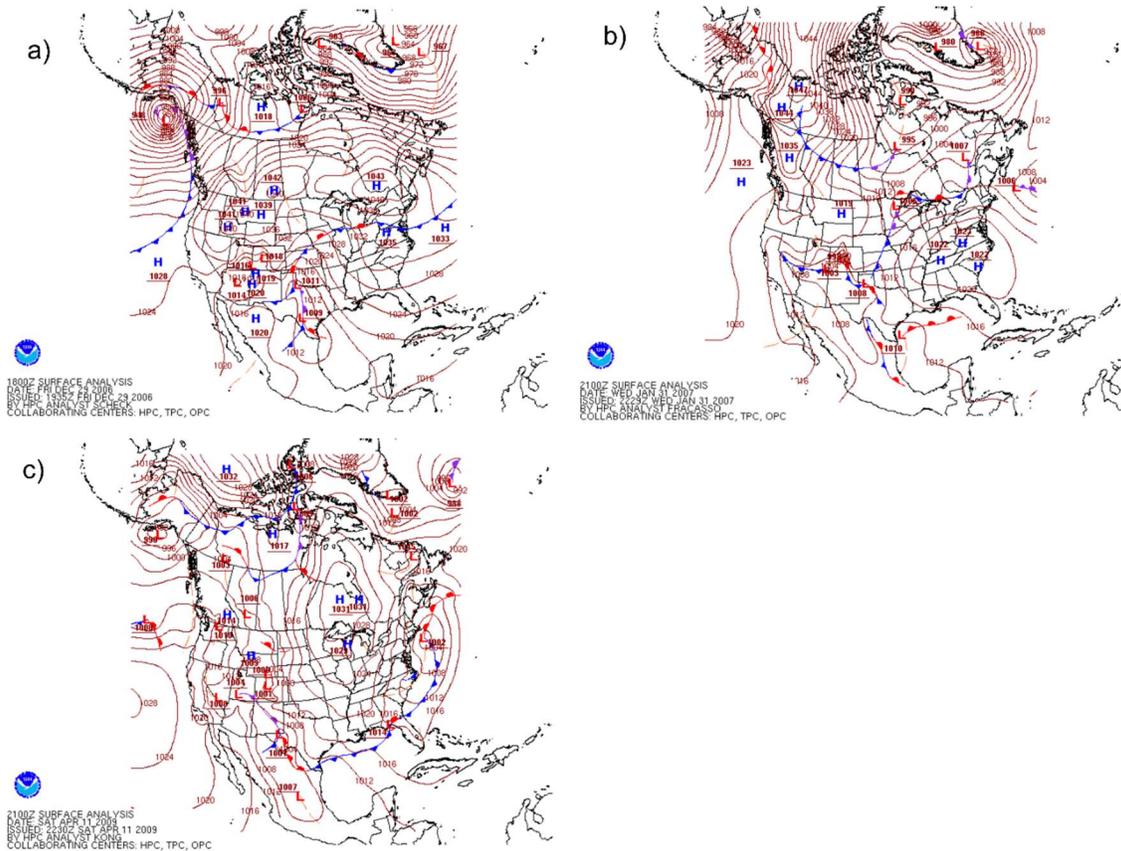


Figura 6.12 Condiciones sinópticas en superficie en las siguientes fechas y horas: a) 29 de diciembre de 2006 a las 18:00 Z, a las 21:00 Z b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

6.3.2 Temperatura y velocidad de viento de las tormentas de polvo de intensidad alta

Las condiciones de temperatura para estos casos clasificados como de intensidad alta son presentados en la figura 6.13, en a) la tormenta de diciembre de 2009, en este caso el dominio tiene la temperatura más baja de los tres presentados, el aire frío cubre una zona de mayor tamaño que parte del dominio desde el centro hasta noroeste. La temperatura más cálida se mantiene en el suroeste y en el este del dominio, estas zonas mantienen las temperaturas mayores en estos tres casos en abril de 2011 tienen una temperatura de 35°C. Como es de esperarse durante el mes de abril las temperaturas en la zona de estudio son más elevadas al estar en el inicio de la primavera.

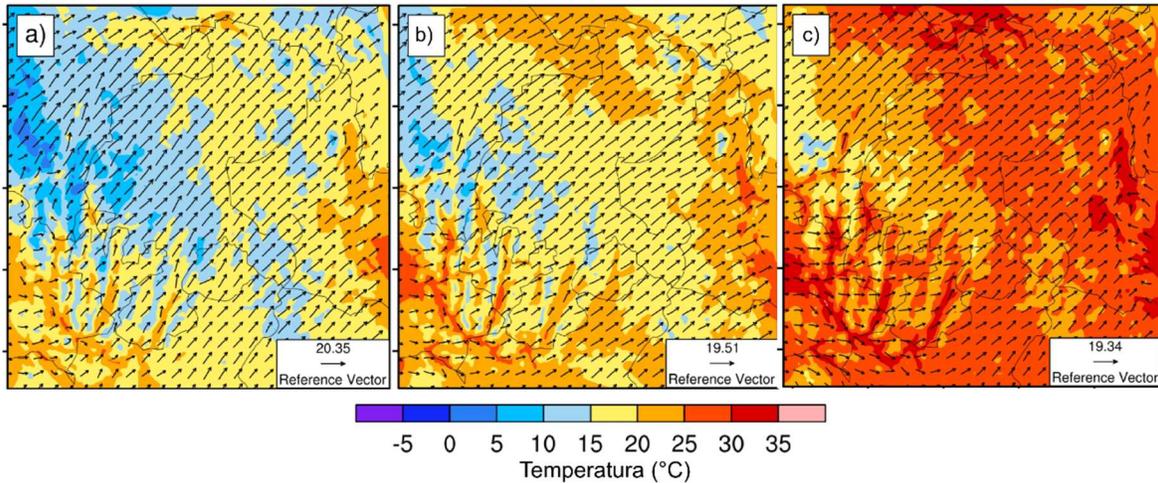


Figura 6.13 Temperatura y velocidad de viento (m/s): a) 29 de diciembre de 2006, b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

La diferencia de temperatura para enero de 2007 se observa en la figura 6.14, ambas imágenes a las 15:30 hora local, en a) la temperatura es de 20°C, con tres zonas con una mayor temperatura una ubicada al norte, otra al este y la suroeste en esta la temperatura es de 25 °C, la zona en el noroeste se muestran franjas con temperaturas aún más elevadas. La temperatura en b) disminuye en el lapso de 24, el cambio se nota principalmente que las áreas con temperatura de 25 °C disminuyeron a 20°C, la zona con menor temperatura sólo incrementa un poco en la parte del oeste hacia la parte central de la zona de estudio. Por consecuencia se puede observar que la disminución de temperatura para este caso fue de 5 °C en 24 horas.

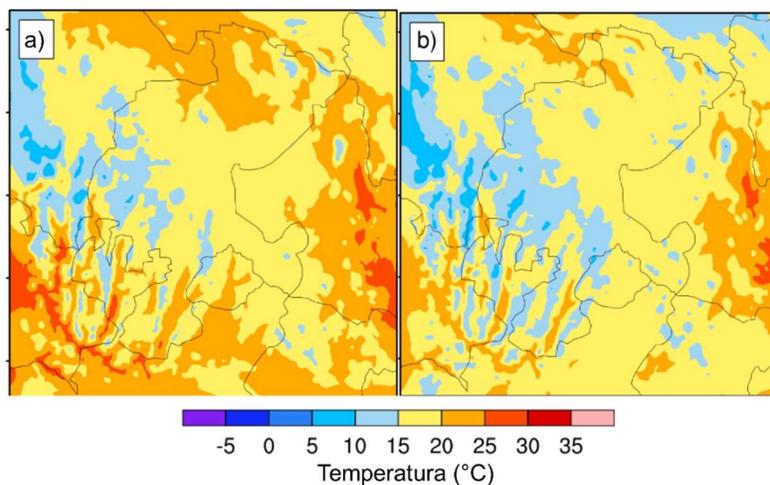


Figura 6.14 Temperatura: a) 31 de enero de 2007 y b) 1 de febrero de 2007.

El viento en el desarrollo de las tormentas de alta intensidad, se asocia principalmente a la posición de la zona de baja presión en la línea de frente, en los tres casos presentados en la figura 6.13 los rangos de velocidad de viento están entre 19.3-20.3 m/s. La dirección del viento es de suroeste-noreste, las mayores velocidades se presentan de la parte central del dominio con dirección el noreste.

6.3.3 Humedad relativa de las tormentas de polvo de intensidad alta

Las condiciones de humedad relativa son indicadas en la figura 6.15, al exponerse tres meses diferentes se observa de forma clara las diferencias entre estos. En a) que corresponde al mes de diciembre, las condiciones de humedad son mayores principalmente en el oeste de la zona de estudio, mientras que para el mes de enero la cantidad de humedad disminuye justamente en esta porción, sólo quedan algunas pequeñas franjas con humedad del 60 %. Por otro lado, en c) que corresponde al mes de abril, las condiciones de humedad son mucho menores, sólo el oeste del dominio mantiene una humedad del 40 % mientras que el resto del dominio es menor a 20%.

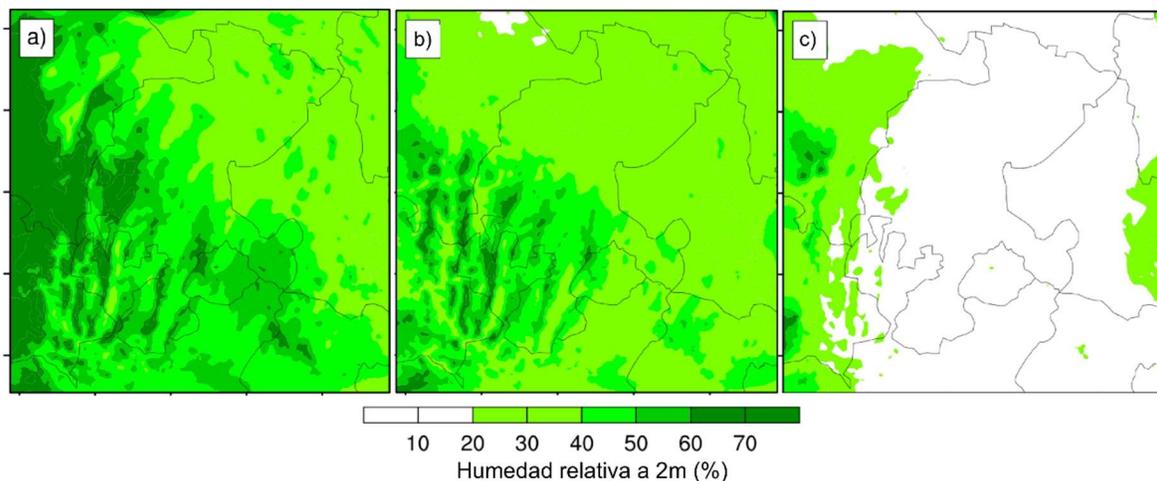


Figura 6.15 Humedad relativa en las siguientes fechas: a) 29 de diciembre de 2006, b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

6.3.4 Desarrollo de las tormentas de polvo de intensidad alta

Los tres casos de tormentas de polvo considerados de intensidad alta tienen diferentes cantidades de emisión de polvo, los resultados se presentan en la figura 6.16. La tormenta de

enero de 2007 es la que tiene una menor cantidad de emisión en el tiempo que se muestra en c) a las 20:30 se observan en la parte central cuatro estelas de polvo, la de mayor longitud es también la que tiene la mayor concentración de polvo de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$.

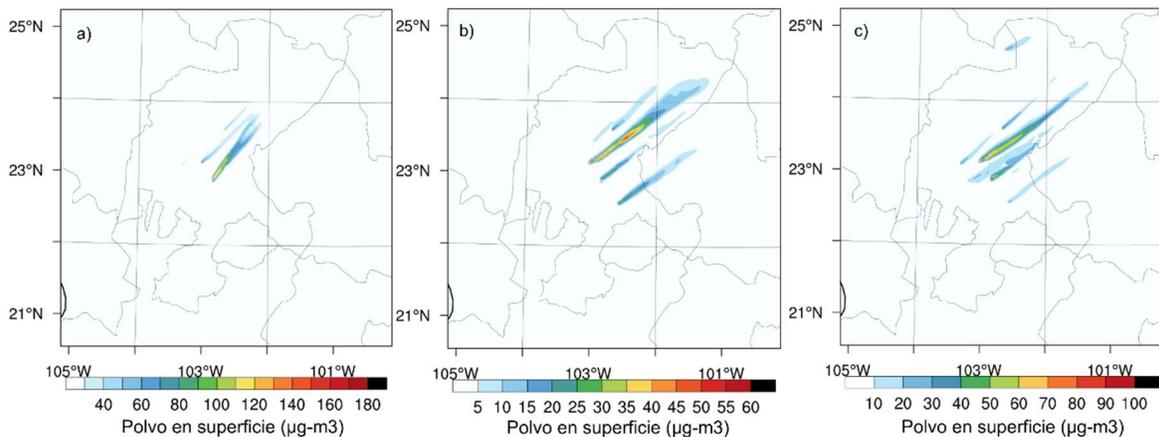


Figura 6.16 Tormentas de polvo en las siguientes fechas: a) 29 de diciembre de 2006, b) 31 de enero de 2007 y c) 11 de abril de 2009.

La tormenta de abril de 2009 (c) tiene el mayor número de estelas y de zonas de emisión de polvo, todas estas dentro de la zona central del Estado de Zacatecas, sólo dos de estas estelas tienen la mayor concentración de polvo con valores máximos de $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$. La tormenta que tiene una mayor cantidad de emisión de polvo es esta clasificación es la que corresponde a diciembre de 2009, aunque sólo se tienen tres zonas de emisión, lo la que se encuentra hacia el sur es la que tiene una mayor cantidad de emisión con $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$, este valor es cercano a la zona de emisión de polvo.

6.3.4.1 Tormenta de polvo extrema

La tormenta de polvo que se presentó en febrero de 2011 tuvo una alta cantidad de emisión de polvo considerándose extrema, a continuación, se presentan las condiciones meteorológicas presentes durante el desarrollo de esta.

En la figura 6.17 se observan las condiciones atmosféricas del 3 de febrero de 2011, sobre la zona de estudio se ubica una zona de baja presión cercana a la hora del evento, sobre el golfo de México se aprecia la presencia de un frente estacionario, cabe destacar que las condiciones previas a las que se presentan, la zona de estudio estaba entre dos frentes estacionarios el que

se encuentra localizado en el golfo y otro en la parte central del país abarcando desde el norte hasta el sur.

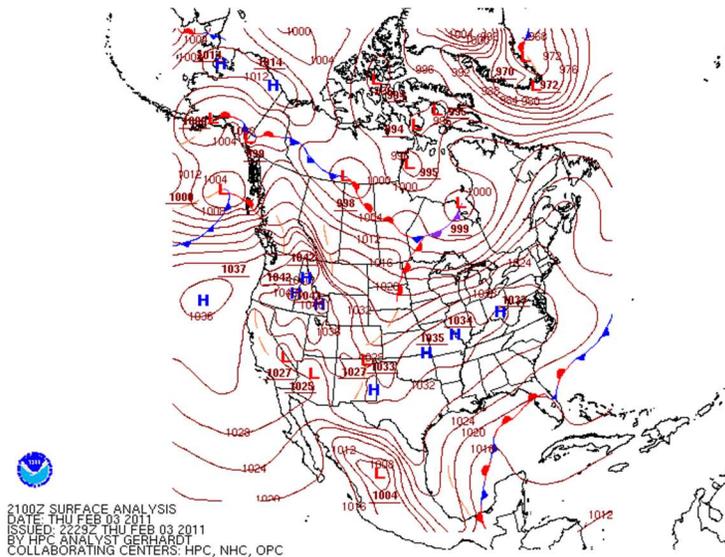


Figura 6.17 Condiciones sinópticas en superficie del día 03 de febrero de 2011 a las 18:00 Z.

Las condiciones de temperatura durante el desarrollo de la tormenta de polvo se presentan en la figura 6.18, en a se presenta para el día de máxima emisión a las 20:00 UTC, donde al norte y este se observa la entrada de aire con una menor temperatura que la presente en el resto del dominio, esta entrada de aire frío forma dos zonas de convergencia una norte a sur donde el viento se desplaza en esa misma dirección y otra en el este del dominio, en donde el viento lleva una dirección de sur a norte. En la parte con una temperatura más cálida de 20 °C el viento presenta las velocidades de viento más alta de 20 m/s, el viento sigue la dirección de la zona de baja presión en dirección ciclónica. Por otra parte, la humedad relativa en la zona de estudio en la misma hora, es mayor en la zona de convergencia que se ubica en el este de la zona de estudio con un 70 %, el resto de la zona de tiene una humedad del 50 %, en el suroeste se presentan unas franjas con un mayor contenido de humedad.

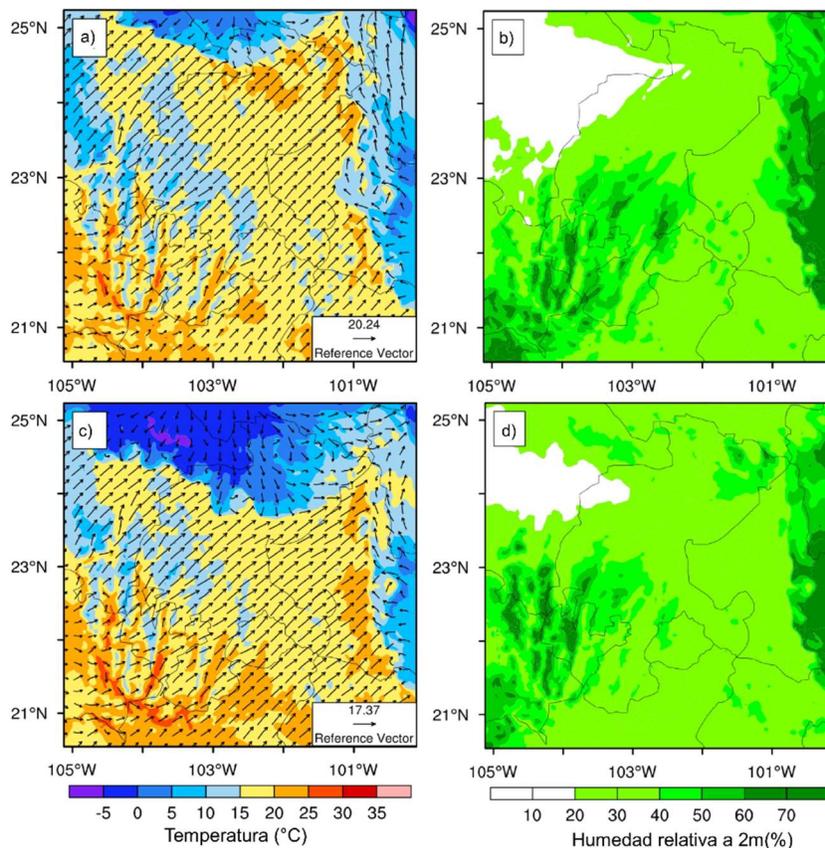


Figura 6.18 Temperatura: a) 3 de febrero y c) 4 de febrero; humedad relativa: b) 3 de febrero y d) 4 de febrero.

En un lapso de 24 horas las condiciones temperatura cambian la zona de aire frío del norte se expande y baja aún más la temperatura, aunque en esta zona el viento tiene una velocidad menor a la del resto del dominio este sigue su avance de norte hacia el sur, la parte de convergencia que se situaba al este también disminuye la velocidad del viento, aunque se mantiene la misma temperatura, el suroeste la temperatura cálida se mantiene. Las condiciones de humedad relativa son más parecidas en esta fecha, la zona con baja humedad es menor de la misma forma que la de mayor humedad localizada al este.

En el desarrollo de la tormenta de polvo que tuvo lugar en febrero de 2011, al ser la tormenta mayor cantidad de polvo emitido (Figura 6.19) durante todo su desarrollo, las condiciones que se concatenaron para que esta tormenta fuera extrema son: en primer lugar, la sequía se presentó durante el 2011 (Márquez, 2010) y las condiciones propias de viento intenso asociada a la entrada del frente frío en la zona de estudio.

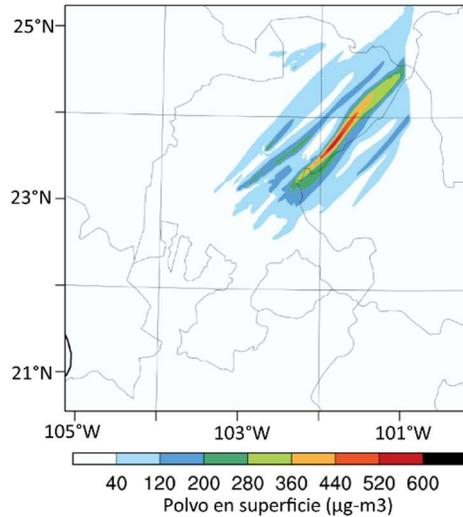


Figura 6.19 Tormenta de polvo el 3 de febrero de 2011 a las 22:00 UTC.

En la tabla 6.1 se resumen los principales aspectos meteorológicos modelados y la cantidad de polvo emitido por tormenta, lo que permite evidenciar como la velocidad del viento es un factor importante en la entrada del frente frío, y que puede alcanzar diferentes rangos de velocidad, no siempre la velocidad de viento se encuentra directamente asociada a la cantidad de polvo emitido, como es el caso de abril de 2018 que a pesar de tener la máxima velocidad de viento en las quince simulaciones tiene una emisión de $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$. Por otro lado, la tormenta de febrero de 2011 que tiene la mayor cantidad de emisión de polvo tiene una velocidad de viento de 17.8 m/s .

La humedad relativa también varía de acuerdo principalmente de acuerdo al mes en el que se presentan las tormentas, los eventos con mayor contenido de humedad corresponden a los meses de diciembre y enero, la humedad disminuye a partir del mes de febrero, siendo los eventos en el mes de abril los que tienen una menos cantidad de humedad.

Las temperaturas oscilan en un rango entre los $9 \text{ }^\circ\text{C}$ y $17 \text{ }^\circ\text{C}$, presentando las temperaturas más cálidas en los eventos ocurridos durante el mes de abril y las más frías durante los eventos ocurridos en el mes de diciembre.

Fecha	Temperatura Promedio (°C)	HR (%)	Velocidad Máxima de viento (m/s)	PM10 (µg/m ³)
Dec 29, 2006	5.0	40.8	15.8	8.6
Jan 31, 2007	10.3	59.6	18.2	13.2
Feb 14, 2007	12.0	26.5	14.3	24.9
Feb 16, 2008	13.9	30.7	12.3	12.2
Apr 11, 2009	16.9	25.1	17.0	114.2
Dec 01, 2009	9.1	53.9	19.7	41.0
Mar 09, 2010	11.6	24.6	17.4	24.7
Feb 3, 2011	9.9	64.1	17.8	134.1
Mar 20, 2012	11.8	32.7	12.5	16.9
Feb 21, 2013	12.4	39.2	12.4	20.9
Dec 27, 2015	10.1	48.6	17.9	10.3
Mar 9, 2016	10.5	49.0	18.2	23.4
Feb 13, 2017	14.1	30.6	10.9	5.2
Dec 7, 2017	9.1	46.5	12.2	2.8
Apr 10, 2018	16.2	38.8	30.8	15.7

Tabla 6.1 Resumen de eventos de polvo simulados por WRF-Chem. Los datos corresponden al punto central de la D1 en WRF-Chem. La temperatura y la humedad relativa son el promedio de 24 horas para el día del evento. El viento representa el valor máximo alcanzado durante el evento. La concentración de polvo representa el promedio de PM10 para la velocidad máxima del viento.

Se puede concluir de forma general, que la circulación del viento asociada a la entrada del frente en la zona de estudio es en dirección hacia la zona de baja presión, que en la mayoría de los casos es una circulación ciclónica (Calderón, 2017). Una vez posicionado el frente frío sobre la zona de estudio la temperatura desciende, relacionándose con estudios anteriores, donde se reporta un cambio de 2 a 15 °C de descenso en un lapso de 24 horas (Luna, 2016). Se pueden identificar casos donde el aire es frío y seco porque se presenta un descenso en el contenido de humedad relativa en la zona de estudio desde la entrada del frente. Por otro lado, principalmente durante el mes de diciembre se presentan masas de aire frío y húmedo que aumentan la humedad relativa en la zona de estudio.

Capítulo 7

Discusión

La problemática planteada en esta investigación integra dos aspectos que de forma conjunta crean un impacto en el centro-norte de México. En primer lugar, los cambios en el uso de suelo, que surgen a raíz de los del cambio en las políticas de la tenencia de la tierra ocurridas en México a partir de 1992 con la privatización de las tierras ejidales. En la figura 7.1 se presenta el resultado del BI durante 1993, no existe evidencia en los cambios en los niveles de deterioro de suelo entre la temporada seca y la húmeda, indicando que los cambios por dicha ley aún no se hacen presentes. De manera muy notoria las áreas que corresponden a la categoría muy deteriorada son exactamente las mismas en ambas temporadas. Añadiendo a esto que la categoría en buenas condiciones de acuerdo a la clasificación de uso de suelo y vegetación del INEGI (1992) corresponde con pastizales, mientras que las áreas en proceso de deterioro corresponden a zonas de agricultura de riego.

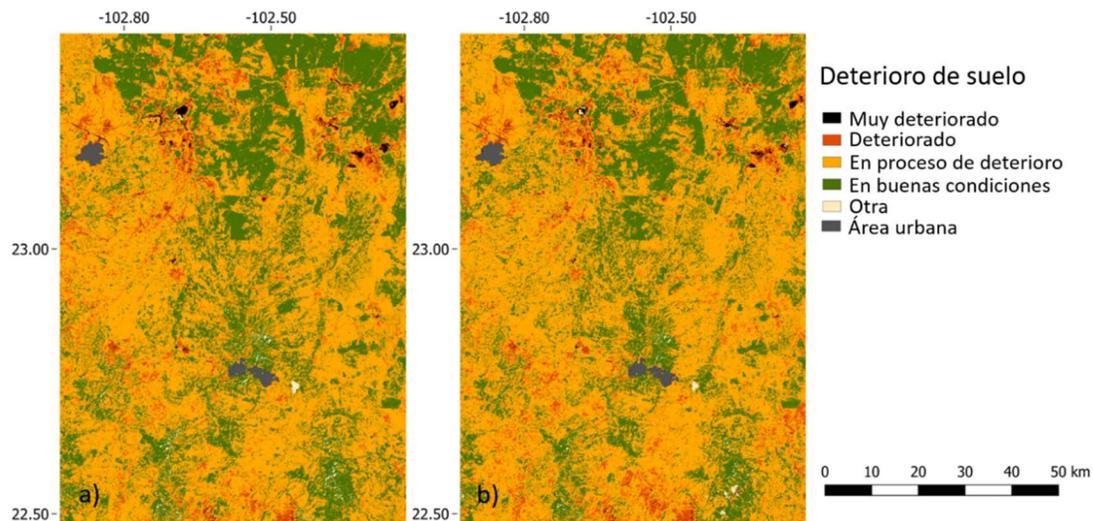


Figura 7.1 Clasificación de áreas deterioradas basado en el índice de brillo de suelo (BI). No se observan cambios significativos entre a) febrero y b) octubre de 1993.

Los cambios de uso suelo se presentan posteriores a este año, incrementando la cantidad de área que fueron modificadas a partir de 1992, lo resultados se presentaron en el capítulo 4.

En ese capítulo se discutieron en detalle los procesos de deterioro detectados efectuando un análisis de imágenes satelitales para un periodo aproximado de 20 años que abarca el estudio. Se presentan cambios considerables en el deterioro del suelo, principalmente de la categoría de suelo en proceso de deterioro y en buenas condiciones hacia suelo deteriorado y muy deteriorado en el 2016. Los cambios en áreas deterioradas se presentaron en el capítulo 4, muestran que las zonas en deterioro van en aumento principalmente para el mes de febrero (en tiempo de sequía que es cuando se observa mejor el deterioro), realizando una diferencia entre el cambio entre 1996 y 2016 se puede estimar el aumento en la categoría de muy deteriorado de 415 km², en la categoría de deteriorado 1657.78 km², en proceso de deterioro un cambio de 543.4 km² dentro de esta clasificación presentando un cambio mayor la categoría en deterioro, de igual forma existe una reducción en el área estimada de en buenas condiciones pasando de 4658.71 km² en 1996 a 1993.4 km² en 2016 con una diferencia de 2665.3 km² las cuales se pueden considerar como un pérdida para el suelo que presentaba buenas condiciones en 1996.

A las actividades agrícolas y pecuarias que se presentan en la zona se le suma la acción de los vientos que se presentan en la zona de estudio durante el invierno, como resultado del avance de los frentes fríos sobre el territorio estudiado se produce en algunas zonas erosión. Cuando los vientos son severos se ha demostrado que ocurren tormentas de polvo con gran pérdida de suelo. Los vientos en la zona de estudio son resultado de la interacción de los frentes fríos con masa de aire más calientes ocasionando por efecto geostrófico viento de oeste a este. Cuando los vientos exceden velocidades ≥ 9 m/s ocurre la erosión de suelos. Los datos de vientos obtenidos de los registros del INIFAP en el estado de Zacatecas en el periodo de 2005 a 2018 de las ocho estaciones consideradas en la presente investigación, se estimó que en promedio se presentan 9 eventos al año que exceden la velocidad de 9 m/s, que están afectando el suelo en la zona de estudio. En la figura 7.2 se presenta el ejemplo de los datos de velocidad de viento registrados en el año 2011 en la estación de Ábrego.

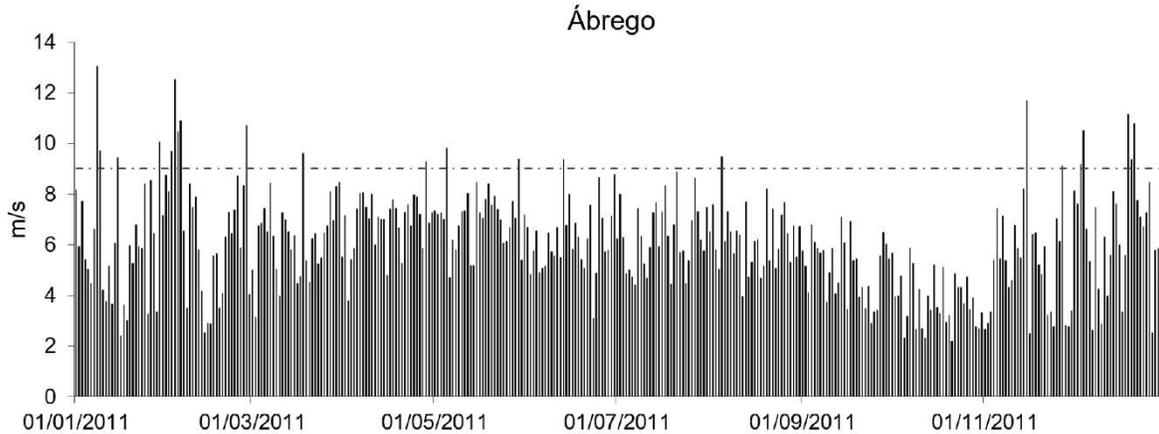


Figura 7.2. Velocidad máxima de viento en la estación de Ábrego en el año 2011.

En la figura se puede observar que se tienen diferentes días en los que la velocidad máxima del viento rebasa la velocidad de 9 m/s, esto durante los meses en los que se presentan los frentes fríos, en el caso particular de este año en la estación de Ábrego se contabilizaron 22 eventos, de los cuales 16 ocurrieron dentro de la temporada de frentes fríos determinada por la CNA, el resto de los eventos corresponde principalmente a la estación de verano en la zona de estudio. El resto de las estaciones tiene un comportamiento similar en la distribución de las velocidades máximas en los años considerados.

En la tabla 7.1 se muestra el total de días que las estaciones registraron velocidades de viento mayores a 9 m/s desde el año 2005 hasta el 2017. En la tabla se puede observar que la estación de Mesa de Fuentes es la estación que registra la mayor cantidad de días con altas velocidades de viento, con un promedio anual para el periodo presentado de 14.3 eventos por año. Le siguen las estaciones de Ábrego y Emancipación con el número de registros, teniendo un promedio de 11.6 eventos por año. La estación de Rancho Grande tiene un promedio anual de 9.3 y Las Arcinas con 7 eventos con vientos fuertes. Las estaciones con un menor promedio de eventos de viento anuales son U.A. Agronomía con 5.3, COABEZ con 5.2 y Santa Rita con 3.2. El año en que se registra la mayor cantidad de eventos en seis estaciones corresponde al año de 2010. En la tabla también se presentan los promedios anuales considerando los registros de las estaciones, se puede observar que en promedio el año de 2010 es de 21.4 eventos, por otro lado, durante el año 2014 las velocidades de viento registradas fueron menores a los 9 m/s. Las estaciones de Santa Rita y U.A. Agronomía son las que registran menor cantidad de eventos con vientos fuertes durante el tiempo presentado.

Estación	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ábrego	4	13	20	17	16	27	13	16	9	0	4	2	10
COBAEZ	0	10	6	13	5	27	5	0	2	0	0	0	0
Emancipación	4	11	19	21	17	22	17	18	8	0	3	2	8
Las Arcinas	0	8	11	16	11	24	8	9	3	0	1	0	1
Mesa de Fuentes	1	13	24	22	23	32	22	25	9	0	4	3	8
Rancho Grande	0	8	23	11	10	13	16	17	9	0	4	2	8
Santa Rita	1	6	6	0	2	7	5	9	3	0	1	1	1
U.A. Agronomía	0	10	9	14	6	19	0	0	0	0	0	3	9
Promedio	1.25	9.875	14.75	14.3	11.25	21.4	10.75	11.8	5.38	0	2.13	1.625	5.63

Tabla 7.1 Días con vientos mayores a 9 m/s por estación en el periodo 2005-2017.

La Figura 7.3 describe los datos de viento en la estación meteorológica de Ábrego y la curva de tendencia anual asociada a estos datos. Se puede observar en la curva de tendencia que los máximos ocurren en los meses de febrero y marzo y los mínimos en el mes de septiembre. Posterior a la identificación de un ciclo anual de la velocidad de viento, se relacionó la curva de tendencia con la presencia del fenómeno del Niño. La figura 7.3 corresponde al año de 2015 con los datos de velocidad máxima de viento de la estación de Ábrego, en la figura se puede observar que, al menos para el año 2005, el Índice del Niño (ENSO Index) y la curva de tendencia de la intensidad del viento en la estación Ábrego están negativamente correlacionados.

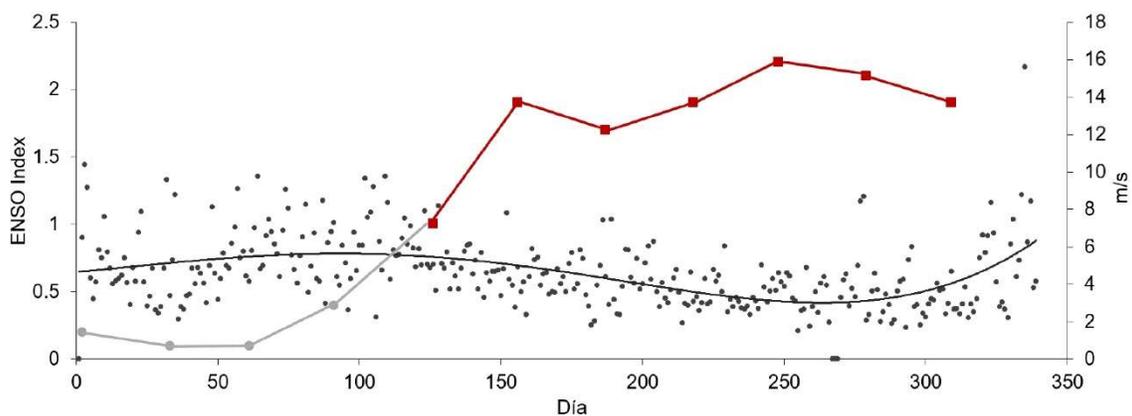


Figura 7.3 ENSO Index y velocidad máxima de viento durante el año de 2015 en la estación de Abrego (Fuente <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>).

Para la temporada del invierno de 2015-2016, se observa la presencia de la fase positiva del Niño donde mantiene valores entre 1.5 y 2. Como se observa en la figura 7.4 durante el año 2016, la fase positiva del Niño tiene una menor duración que en el año 2015. Durante el 2016, se observa que el fenómeno pasa de una fase positiva a una fase negativa en la segunda mitad del año, la cual aumenta su valor negativo conforme se acerca a los meses del invierno. En este periodo la curva de tendencia y Índice del Niño están correlacionados por una coincidencia de valores bajos.

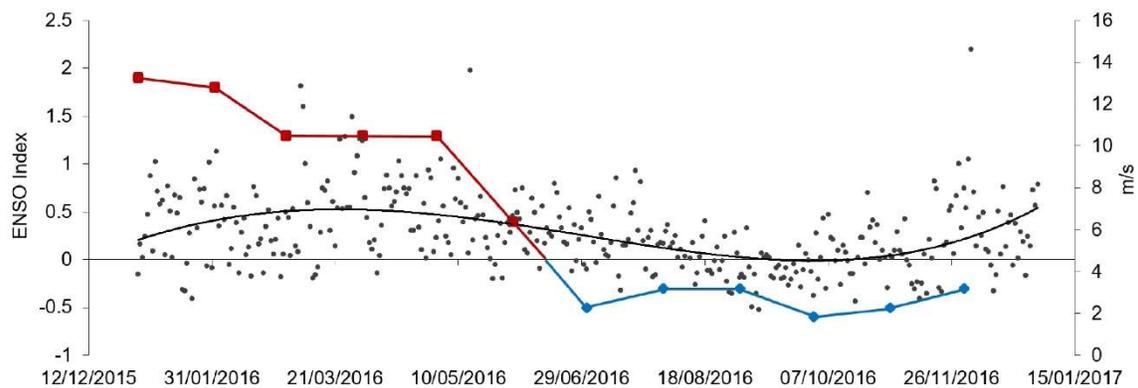


Figura 7.4 ENSO Index y velocidad máxima de viento durante el año de 2016 en la estación de U.A. Agronomía (Fuente <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>).

La dirección del viento en la zona de estudio es otro factor que se debe considerar, como se mostró en los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas en el capítulo seis, se puede observar que durante los eventos descritos con anterioridad la dirección del viento es de suroeste-noreste (e.g. Figura 6.35), que es la dirección de viento que prevalece en 14 de los 15 casos presentados. Al realizar las gráficas con la dirección del viento medida por las estaciones, se observa que la dirección de viento que muestran las simulaciones y las medidas es la misma.

La figura 7.5a muestra la distribución de la dirección del viento durante el año 2015 en la estación de Mesa de Fuentes. Se observa que durante el año 2015 los días con dirección de viento suroeste-noreste son dominantes, alcanzando los vientos velocidades mayores a 11 m/s, las velocidades del viento en esta dirección están entre los rangos de 5.7-8.8 m/s. En la figura 7.5b se presentan las direcciones de viento medidas que corresponden a la estación de U.A. Agronomía para el mismo año 2015. En esta rosa de viento se observa que en esta

estación la dirección del viento tiene mayor variabilidad para este año, de la misma forma los valores en las velocidades de viento son menores comparados con la estación de Mesa de Fuentes. En la estación de U.A. Agronomía las velocidades se encuentran en un rango principalmente ente 3.6-5.7 m/s (en rojo) y 5.7-8.8 (en azul). Por lo que disminuye el porcentaje de días con velocidades mayores a los 9 m/s, los vientos con velocidades en los rangos de 8.8-11.1 (en verde) y ≥ 11.1 (en turquesa) mantienen la dirección de viento suroeste-noreste.

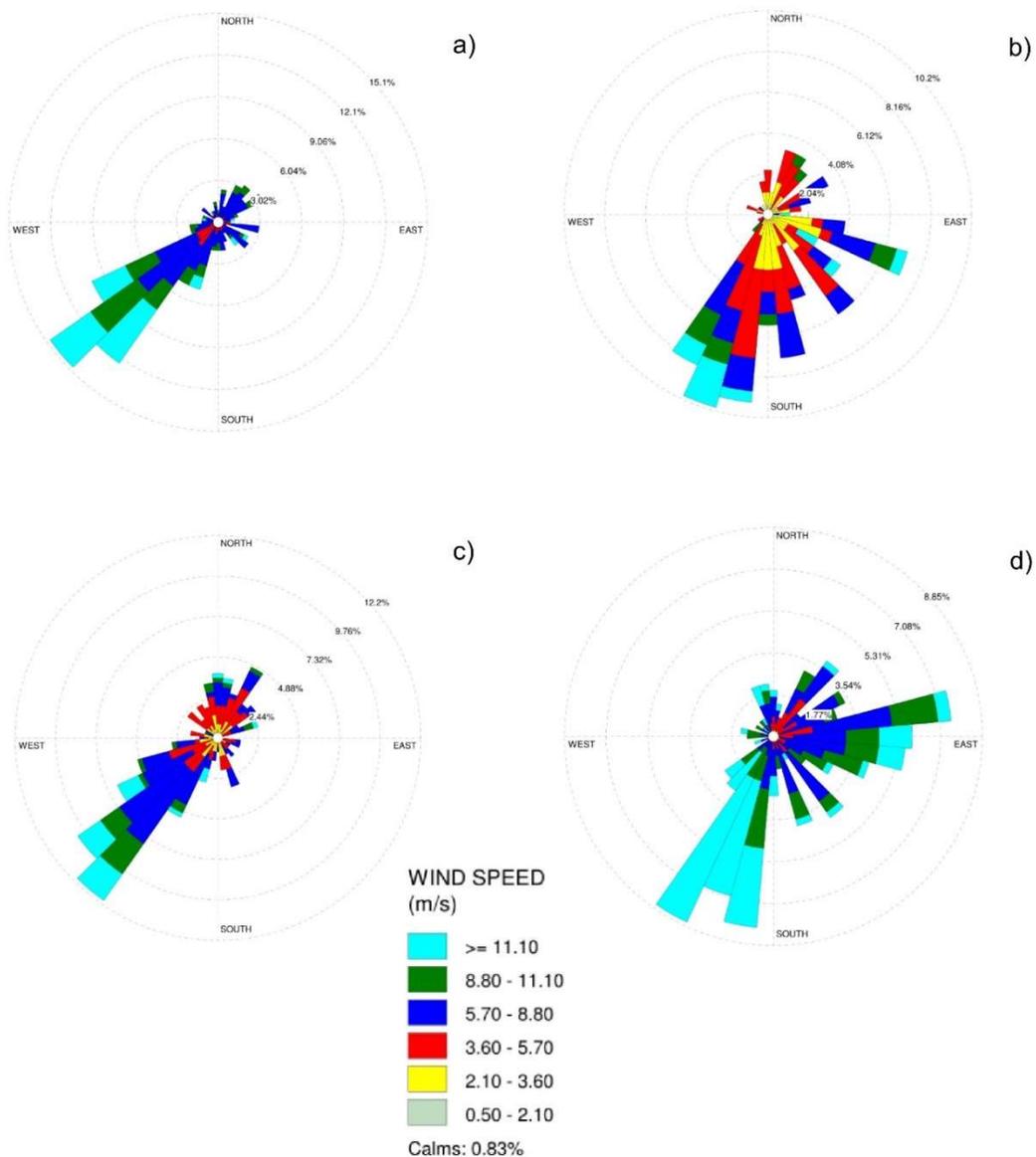


Figura 7.5 Rosa de vientos de los años de 2015: a) Mesa de Fuentes, b) U.A. Agronomía y 2016: c) Ábrego d) Rancho Grande.

La rosa de viento presentada en la figura 7.5c corresponde a la estación de Ábrego en el año de 2016, esta rosa de viento tiene una forma similar a la de Mesa de Fuentes de 2015. En c) se puede observar que el mayor porcentaje de la velocidad de viento se encuentra en el rango de 5.7-8.8 m/s (en azul) estos ocupan también el mayor porcentaje en la dirección suroeste-noreste. En esta misma dirección se presenta también el porcentaje con días con velocidades en los rangos de 8.8-11 m/s y los ≥ 11.1 . En la estación de Rancho Grande para el mismo año se puede observar en la rosa de vientos en la figura 7.5d que los vientos tienen velocidades mayores a los 8.8 m/s. El porcentaje de días con las velocidades ≥ 11.1 m/s tienen una dirección suroeste-noreste. Por otro lado, se puede observar que el porcentaje de días con velocidades de viento ≤ 3.6 m/s se reducen de forma considerable, esta misma distribución se puede observar en el inciso a.

Los vientos con velocidades ≥ 9 m/s en la zona de estudio son una consecuencia concatenada de las actividades agrícolas, cuya consecuencia principal son las tormentas de polvo de las cuales se tiene evidencia captada por sensores remotos. En la figura 7.6 se muestra una tormenta de polvo captada en marzo del 2008, una de las principales características son las estelas de polvo rojizo, el polvo presenta esta coloración debido al color de los suelos en el estado de Zacatecas, la fecha de la imagen está dentro de los meses en la que se registran una mayor cantidad de frentes fríos. Evidencias de los fuertes vientos en la zona de estudio quedan plasmados en los diferentes registros discutidos anteriormente. Se tiene evidencia que el viento puede tener velocidades de 110 km/h (30.5 m/s) en el evento del 18 de marzo de 2008. En abril de 2009 se registró una velocidad de 36 km/h (10 m/s) (Rubio, 2009), en abril del 2017 los registros de velocidad estaban entre el rango de 50-70 km/h (13.8-19.4 m/s) (Mejía y Rodríguez, 2017).

Otras evidencias de las tormentas de polvo en el estado de Zacatecas son registradas en medios de información, en estos medios se presentan algunas consecuencias a las que se enfrenta la población y el ambiente cuando ocurren este tipo de eventos. Una consecuencia es durante el tiempo en el que se desarrolla la tormenta de polvo, la zona se ve oscurecida, por el transporte de polvo que se presenta (Vega, 2018). Los centros de población afectados son diversos dentro de los que destacan la ciudad de Zacatecas y Fresnillos, así como los municipios de Loreto, Calera, Villa de Cos y Guadalupe.

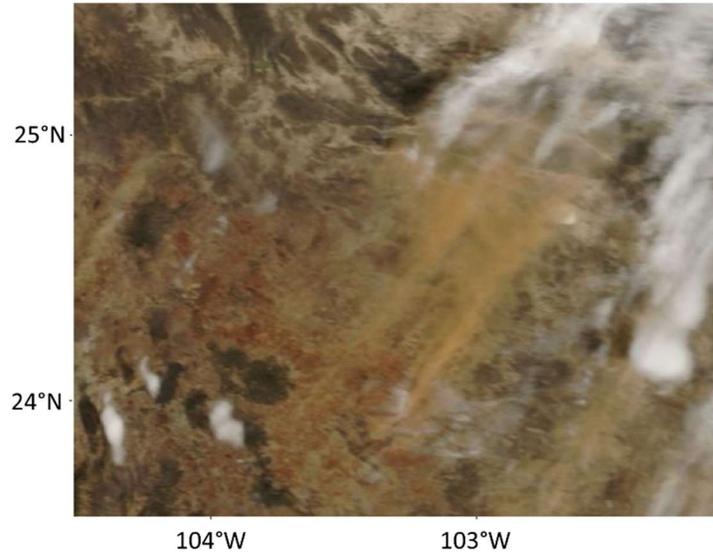


Figura 7.6 Estela de polvo rojo. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) imagen, adquirida por el satélite de la NASA MODIS-Aqua con fecha de toma 17 de marzo de 2008.

Subsecuente al cambio de uso de suelo ocurre el proceso de deterioro. El cual fue cuantificado aplicando imágenes satelitales. Posteriormente se ha discutido una climatología de vientos en la zona de estudio. El viento es responsable de la erosión, principalmente en la estación de frentes fríos. Ahora se procede a discutir sobre los mecanismos de cuantificación de masa de polvo emitido en las tormentas de arena. Se modelaron 15 tormentas de polvo, identificadas por los altos valores de la velocidad del viento en las 8 estaciones meteorológicas. Las modelaciones realizadas permitieron cuantificar la pérdida de material del suelo a causa de las tormentas de polvo en el área de estudio. En la figura 7.7 se presenta la cantidad de polvo emitido durante las tormentas de polvo y el área de emisión, se observa que se pueden agrupar en cinco categorías diferentes.

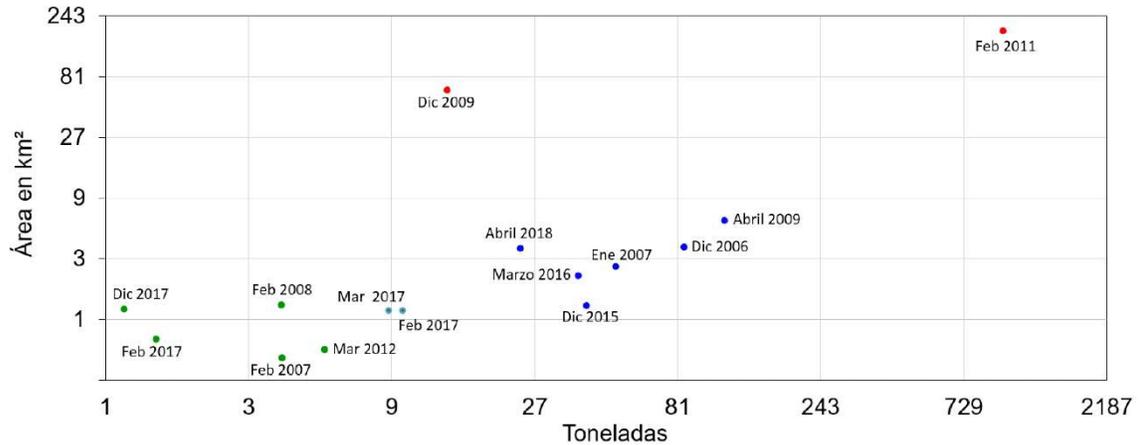


Figura 7.7 Distribución de la cantidad de polvo emitido (t) en relación con el área de emisión (km²).

En la primera categoría, las tormentas de polvo con un promedio entre 1,15 y 5,3 toneladas, en esta categoría se encuentran las siguientes fechas: 7 de diciembre de 2017 con 1,15 toneladas; 14 de febrero de 2017 con 1.47 toneladas; 17 de febrero de 2007 y 16 de febrero de 2008, ambas 3.8 toneladas, la última fecha en esta categoría es el 20 de marzo de 2012 con 5.38 toneladas emitidas de polvo. En la segunda categoría sólo se clasifican dos eventos, en este caso el 10 de febrero de 2013 y el 10 de marzo de 2010 con 8.7 y 9.7 toneladas respectivamente. En la tercera categoría se tiene un único evento que corresponde al primero de diciembre de 2009 con 13.8 toneladas emitidas. En la cuarta categoría se incluyen seis eventos, el primero el 10 de abril de 2018 con 24.1 toneladas, el 7 de marzo de 2016 con 37.7 toneladas, el 27 de diciembre de 2015 con 40.1 toneladas, el 29 de diciembre de 2006 con 50.3 toneladas, el 31 de enero de 2007 con 84.9 y el 3 de febrero con 115,5 toneladas. En la última categoría se ubicó uno de los eventos que registró un alto nivel de emisión de polvo y abarcó un área considerable, la fecha corresponde al 3 de febrero de 2011 con 987 toneladas emitidas de polvo.

Las quince simulaciones realizadas revelaron que las tormentas de polvo en el área de estudio tienen diferentes zonas de emisión de polvo. En la figura 7.8 se muestra una clasificación de los puntos de emisión. El color claro corresponde a los puntos que emitieron sólo durante un evento y el más oscuro representa a aquellos puntos que emitieron durante los 15 eventos.

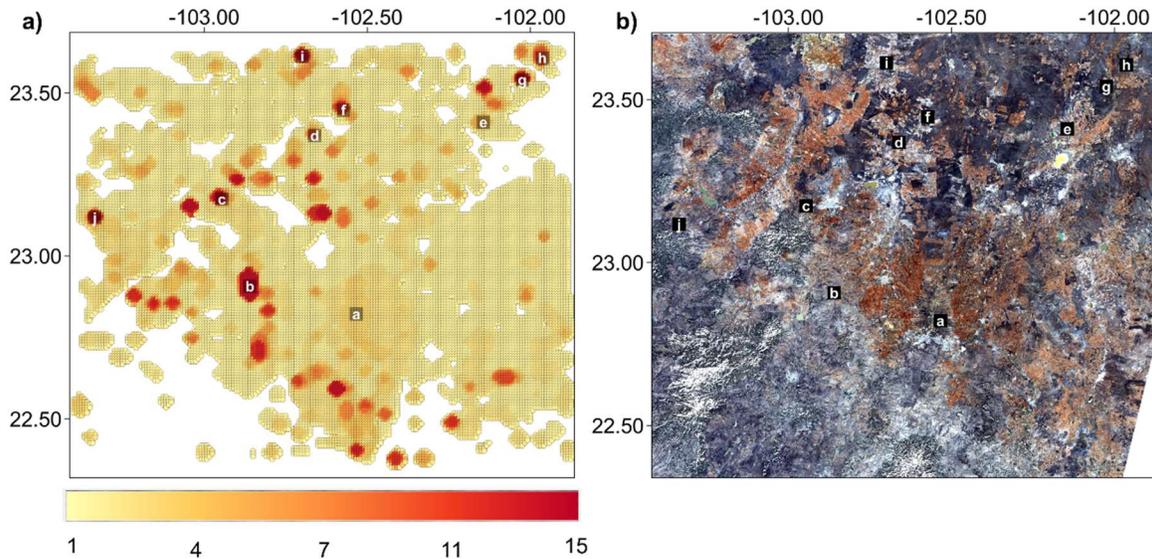


Figura 7.8 Zonas de emisión de polvo: a) Frecuencia de emisión de polvo y b) Imagen en color natural, los números identifican puntos escogidos al azar para ser identificados en la imagen satelital (Imagen Landsat 8, fecha de toma: 11/02/2016).

Los puntos tienen diferentes frecuencias de emisión. Los puntos en la figura 7.8a se observa que la mayor parte del área seleccionada tiene al menos una emisión durante las quince tormentas. Las zonas que tienen una mayor cantidad de emisiones, corresponden a la parte central de la zona de estudio, donde la principal característica son los suelos rojizos, los cuales se aprecian de forma clara en la figura 7.8b. El punto uno corresponde a una zona con cuatro eventos en los que se emitió polvo, el punto dos es una zona que presentó emisiones durante las quince tormentas. Alrededor de este punto se encuentran dos zonas con siete eventos en las que se emitió polvo. El punto tres es una zona que también registró emisiones en los quince eventos. En el punto cuatro corresponde a un área con siete eventos de emisión, en tanto la zona cinco tiene cuatro eventos en los que se emitió polvo. El Punto seis, en la parte central de la misma zona tiene un total de 11 eventos y a hacia el exterior de la zona se presentan puntos con menor cantidad de eventos de emisión de polvo quedando en seis. En la zona identificada con el número siete, los eventos en los que se emitió polvo fueron 13, esta área corresponde a zonas agrícolas al igual que las correspondientes al área identificada con el número ocho, la cual tiene ocho eventos con emisión de polvo. La zona nueve también es un área de transición entre diferentes números de eventos, la parte central donde se ubica el punto corresponde a una zona con 14 eventos con emisión de polvo, en la parte posterior

de esta se presenta un área con siete eventos y otra con cinco eventos con emisiones. El área 10 en el oeste de la zona presentada, tiene un total de 11 eventos de emisión, esta área se localiza en un pequeño valle entre dos zonas montañosas. Las zonas con una emisión corresponden a la tormenta de polvo del 3 de febrero de 2011, el cual es el evento de mayor intensidad dentro de las modelaciones realizadas. Las zonas con diferentes cantidades de emisión se distribuyen en la parte central del dominio presentado en las modelaciones. Las zonas con mayor cantidad de emisión de polvo corresponden a zonas pertenecientes a terrenos de práctica agrícola. Este análisis ha mostrado la gran variabilidad en los procesos de emisión de polvo al paso de intensos frentes fríos con velocidades mayores a 9 m/s. Cada tormenta es diferente y ocasiona erosión en diferentes áreas. A continuación, se profundiza en este aspecto.

En la figura 7.9 se muestran cuatro tormentas. Se pueden observar de forma clara las zonas de emisión ubicadas al centro del dominio. Las cuatro simulaciones presentadas cubren diferentes zonas de emisión polvo. Los eventos presentados tienen diferentes cantidades de emisión de polvo, las mayores cantidades están dentro de las estelas centrales de cada tormenta. Sin embargo, al dispersarse el polvo disminuyen las concentraciones cubriendo un área mayor dentro del área de estudio.

En las figuras 7.9a y 7.9d, el área que cubren las estelas con baja cantidad de polvo es parecida, cubren desde la zona cercana a los 22°N y los 103°30' W, aunque la concentración de polvo es mayor en la figura 7.9d que corresponde al 27 de diciembre de 2017. En la figura 7.9b se presenta la tormenta del 11 de abril de 2009. La cantidad de polvo emitido en esta tormenta es mucho menor que en las otras tres presentadas, pero el área que abarca el polvo en bajas concentraciones de $8 \mu\text{m-m}^3$ es mayor, cubriendo un área mayor de cuatro grados de latitud por dos grados de longitud. El tres de febrero de 2011 (figura 7.9c), al ser un evento considerado como extremo, las concentraciones de polvo en las zonas cercanas a la zona de emisión son las de mayor concentración en el total de las quince simulaciones. Es interesante mencionar que el polvo se distribuye siguiendo las temperaturas más frías (Figura 6.35) en el desarrollo del evento. Las zonas semicirculares del extremo norte y este del dominio tienen esa forma en la temperatura, en la zona de emisión la temperatura es mayor que en los extremos. En el caso particular de esta tormenta de polvo la concentración mínima de polvo queda en $80 \mu\text{m-m}^3$.

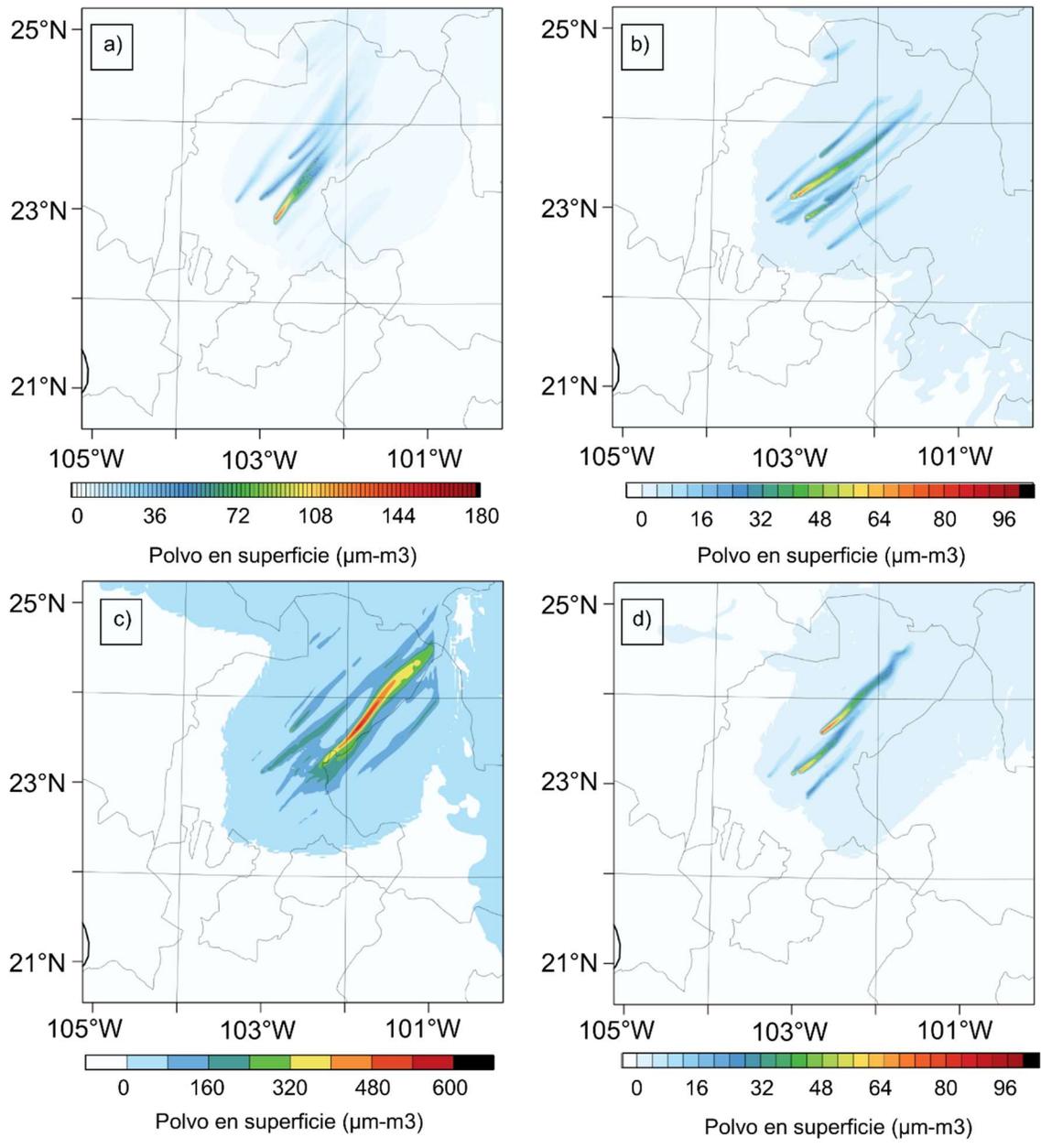


Figura 7.9. Temperatura y velocidad de viento el 3 de febrero de 2011 en los siguientes tiempos: a) 18:00, b) 20:00, c) 22:00 y d) 24:00 UTC.

Las modelaciones realizadas permiten evidenciar el impacto que se está generando sobre el suelo, como resultado de la acción concatenada de la presencia de vientos fuertes que en la zona de estudio y las modificaciones en la cobertura de vegetación para la introducción de actividades agrícolas. En la figura 7.10, se hace una estimación de la cantidad de material que pierde el suelo en la zona de estudio. En total se modelaron 15 tormentas de polvo y se

estimó en cada punto de malla la emisión de polvo en cada tormenta. Posteriormente, se sumaron las emisiones de las 15 tormentas en cada punto de malla, obteniéndose una distribución de las emisiones totales. El último paso fue dividir estas emisiones totales de cada punto de malla entre el número de tormentas (15 tormentas entre 2006 y 2018), obteniendo una distribución de emisiones promedio (o una tormenta promedio). Las zonas centrales del estado de Zacatecas (en rojo) pierden en promedio 11 toneladas de polvo por tormenta. Se presenta una zona cercana a los 20°N y 103°W con una pérdida de suelo entre las 6 y 8 toneladas por tormenta. Los puntos en color azul claro son zonas que han perdido una menor cantidad de 3 toneladas. En la parte norte del Estado de Zacatecas y Durango se presenta una zona con 6 toneladas de suelo que se pierde en promedio, el resto de los puntos presenta 4 toneladas de suelo perdido.

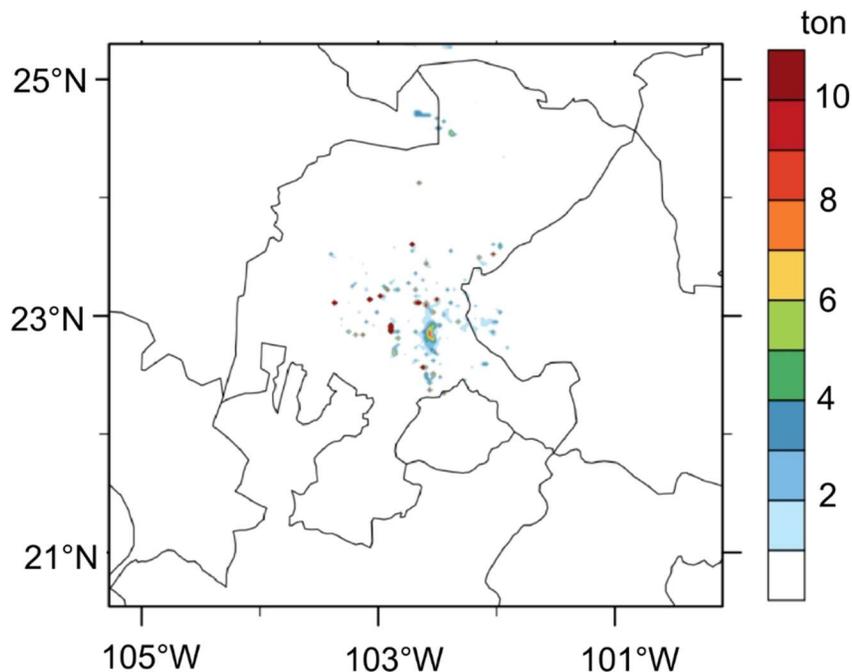


Figura 7.10 Erosión promedio estimada usando las 15 tormentas modeladas en el periodo 2006-2018.

La pérdida de suelo en la zona de estudio es un hecho evidente como resultado de políticas económicas y sociales que se han conducido a un cambio de uso de suelo indiscriminado en el país. En una estimación realizada mediante una extrapolación a 50 años considerando la tormenta promedio estimada y que en promedio ocurren 9 eventos por año obtenidos de los

datos de velocidad de viento, se encontraron valores de erosión mucho más grandes. La estimación se presenta en la figura 7.11 se puede observar que gran parte de la zona central del estado de Zacatecas presenta pérdida de suelo en diferentes cantidades. En la parte central se presentan las zonas con mayor cantidad de pérdida de suelo con valores cercanos a las 15 mil toneladas en 50 años. En esta estimación a 50 años se obtiene una mayor cantidad de zonas con pérdida de suelo en cantidades menores con rango entre 4400 y 5500 toneladas emitidas o erosionadas. Las zonas localizadas al norte del estado presentan una pérdida cercana a las 13 mil toneladas de polvo perdido. El escenario propuesto de la estimación realizada a 50 años, se puede considerar como un escenario que considera los 50 años desde que se realizaron las políticas de cambio de uso de suelo. Es decir, podría considerarse un escenario presente, que muestra las condiciones actuales de los suelos en la zona de estudio dado que en México a partir de la década de 1930 se comenzó con el reparto y redistribución de las tierras agrícolas (Castaño, 2014; Herrera, 2013), lo cual, con la modificación a ley de tenencia de la tierra en 1992, incremento el cambio de uso de suelo.

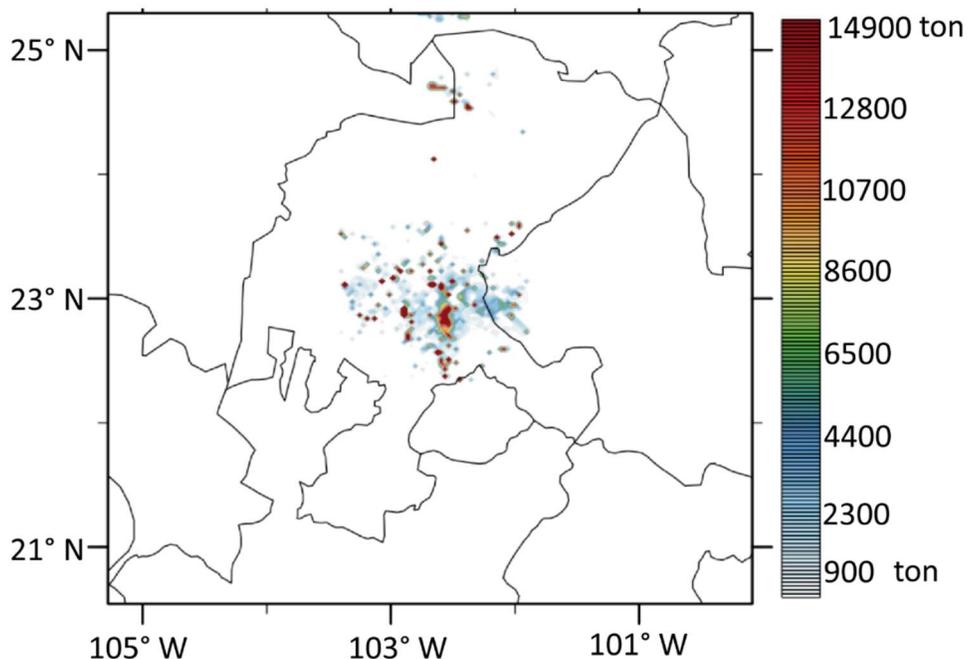


Figura 7.11 Estimación de suelo perdido en los últimos 50 años.

Finalmente, para conocer las condiciones actuales del suelo en la zona de estudio se tomaron muestras de suelo en ocho puntos. Se presentan los porcentajes de las muestras tamizadas en

la figura 7.12. En el primer tamaño que es menor a los 125 μm en color azul claro, las muestras 4 y 5 tienen el menor contenido de este tamaño de partículas con 5 % y 8 %. Las muestras 2 y 7 tienen la mayor cantidad de este material con 20.1 y 17.6 %, el resto de las muestras tienen en promedio 11.1% de $<125 \mu\text{m}$. La distribución del tamaño de partículas de 125 μm en color rojo, es menor en la muestra 3 con 7.6% y la muestra 5 con 7.3 %, la muestra que tiene un mayor contenido de partículas de este tamaño es la 7 con 17.8 %, el resto de las muestras tiene un promedio de 11.7% de este tamaño de partículas.

El porcentaje de las muestras con el tamaño de 180 μm en color gris, la muestra 5 tiene el menor contenido de este tamaño de partículas con 4.1%, las muestras uno y siete tienen un mayor contenido de partículas de este tamaño con 9.9 y 9.8 en porcentaje, el promedio en porcentaje de las demás muestras es 7%. En color amarillo el tamaño de 250 μm la mayor parte de las muestras tienen una cantidad superior al 19% de su contenido, la muestra uno presenta una mayor cantidad con 37.5%, el resto de las muestras tiene un porcentaje promedio de 22.1% de este tamaño de partículas.

En un tamaño de 500 μm las muestras tienen un contenido bajo de material de este tamaño se muestran en color morado, la muestra uno es la que contiene una cantidad mayor con 8.9 %, el resto de las muestras presentan un promedio de 4.5 en porcentaje. Para el tamaño de 600 μm en color verde, las muestras tienden a tener un contenido similar, excepto la muestra siete, que en este tamaño de partículas la cantidad de material es de 7.4%, las demás muestras tienen en promedio 15.1 %. En color azul oscuro se muestra el tamaño que corresponde a 1 mm, en este tamaño las muestras registran valores bajos de porcentaje, la muestra uno tiene el menor porcentaje con 3.2 por otro lado la muestra tres tiene un porcentaje de 8.3, las seis muestras restantes tienen un promedio de 5.1. Las partículas con un tamaño mayor a 2 mm se muestran en color marrón, la muestra uno tiene un porcentaje bajo de contenido de este tamaño de partículas con 4.9%, la muestra cinco tiene un alto porcentaje de contenido de estas partículas con 31.2 %, las seis muestras tienen un porcentaje promedio de 21.1%.

En promedio las muestras presentan una mayor cantidad de porcentaje en el tamaño de 250 μm , seguida por las de un tamaño de partículas mayores a 2 mm y posterior a este las que se encuentran en un tamaño de 600 μm . Las partículas que concentran una menor cantidad de porcentaje a las muestras son las de tamaño de 180 μm y 500 μm ambas bordeando los 250

μm . Las muestras se tomaron en diferentes zonas donde se practica la actividad agrícola, en la zona de la primera muestra se observaron restos de cultivo de frijol de igual forma este tipo de cultivo se presenta en la zona donde se tomaron las muestras dos y tres. El cultivo que corresponde a la zona donde se tomó la muestra de suelo cuatro corresponde a avena. Las muestras cinco y seis corresponden a zonas de emisión de polvo identificadas por el modelo en las simulaciones realizadas, la muestra cinco presenta un bajo contenido de partículas menores a $125 \mu\text{m}$ y contienen un mayor porcentaje de partículas de tamaño mayor a 2 mm , en tanto que la muestra seis tiene el mayor contenido de partículas de tamaño de $250 \mu\text{m}$. La muestra siete el suelo es para el uso de cultivo de frijol y la muestra ocho los cultivos son frijol y cebada. Con este detalle de distribución de tamaños de partículas de polvo o arena se ha demostrado que el contenido de polvo fino y grueso es muy variable indicando un estado de degradación diferente. Esta distribución concuerda con las muy variables emisiones de polvo en tormentas causadas por intensos vientos. Los suelos muestran una gran variabilidad en los tamaños de partículas lo cual refleja los diferentes estados que ha dejado la erosión. En este trabajo se ha confirmado que el cambio de usos de suelo hacia tierras agrícolas de temporal predominantemente, la falta de cobertura vegetal en invierno, la gran cantidad de frentes fríos que impactan la zona de estudio y los intensos vientos asociados a los frentes fríos son los elementos concatenados para causar la erosión de suelos y contribuir con este mecanismo a su deterioro.

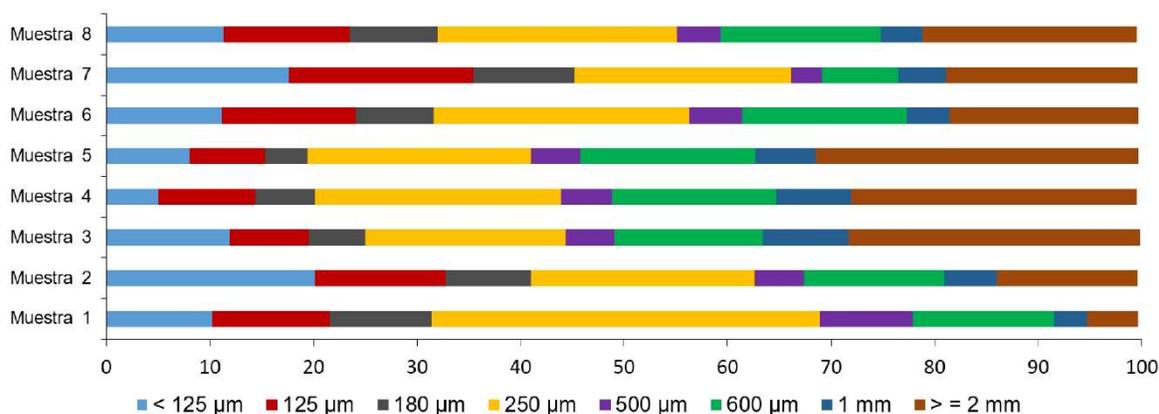


Figura 7.12 Distribución en porcentaje del tamaño de partículas de las muestras de suelo.

Conclusiones

Con los datos de velocidad de viento adquiridos de las estaciones agroclimáticas del INIFAP, se puede establecer el ciclo anual del viento, los días con velocidades altas corresponden a la temporada de frentes fríos, mientras los meses de septiembre y octubre registraron las menores velocidades, dando como resultado un comportamiento sinusoidal.

En la zona de estudio se tiene un porcentaje considerable de días en los que la dirección del viento es de suroeste-norte y este coincide con los días donde se tiene las mayores velocidades de viento

Existe una relación entre días con velocidad mayor a los 9 m/s con la entrada de frentes fríos registrados durante el invierno e inicio de la primavera, mientras que la entrada de frentes fríos durante el otoño en la zona de estudio no se evidencia en los datos de velocidad de viento.

El BI mediante un análisis multi-temporal permitió hacer una cuantificación de áreas con suelo deteriorado y conocer su ubicación espacial. El suelo deteriorado se ha visto incrementado en el norte de la zona de estudio, lo que permite evidenciar la falta de manejo apropiado del suelo durante la temporada seca.

En 1993, la presión sobre los recursos del suelo fue menor que en los últimos años. Sin embargo, el BI es susceptible a la presencia de humedad en el suelo. Es probable que su aplicación durante la estación seca proporcione una imagen más precisa de la degradación del suelo que durante la estación lluviosa y permite determinar áreas de suelo desnudo expuestas a la acción de fuertes vientos que causan deterioro y erosión en el suelo.

El proceso de deterioro del suelo en el área de estudio se está intensificando, en el año de 1996 este proceso avanzó de forma gradual, para el año de 2016, el proceso va de una clasificación en proceso de deterioro a estar muy deteriorado, lo que puede estar relacionado con el manejo que se le está dando al recurso suelo.

Las zonas de emisión obtenidas con el WRF-Chem al ser sobrepuestas en el uso de suelo del INEGI (Serie VI), corresponden a zonas clasificadas como uso agrícola. De la misma forma los puntos estimados con el BI se sobreponen con los puntos de emisión de polvo obtenidos de las simulaciones.

La simulación de 15 eventos permitió identificar la entrada del frente frío sobre la zona de estudio, así como los cambios en temperatura y humedad relativa una vez que el frente se encuentra sobre el área.

Las tormentas de polvo se presentan cada año en la zona de estudio, estas pueden ser de intensidad baja o alta dependiendo del volumen de polvo emitido, este altamente relacionado con cercanía de la zona de baja presión con la zona de estudio, en la mayoría de los eventos la zona de baja presión se ubicó al noreste.

La metodología empelada permitió comprobar que la interacción del cambio de uso de suelo y los vientos fuertes en la zona de estudio están contribuyendo al proceso de desertificación.

REFERENCIAS

- Alvarez, C. (2017). Vientos de Santa Ana y tormentas de polvo en el Noreste de México. IPICYT.
- Álvarez, C.A. & Carbajal, N. (2019). Regions of influence and environmental effects of Santa Ana wind event. *Air Quality, Atmosphere Health*. Springer Nature.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Bagnold, R.A. (1941) en G.S. Okin, D.A. Gillette, J.E. Herrick (2006). Multi-scale controls on and consequences of aelian process in landscape change in arid and semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*. Volume 65. Issue 2.
- Balleza, C., J. y Villaseñor, J.L. (2002). La familia asteraceae en el Estado de Zacatecas (México). *Acta Botánica Mexicana*, 59: 5-69.
- Brandon T. Bestelmeyer, Gregory S. Okin, Michael C. Duniway, Steven R. Archer, Nathan F. Sayre, Jebediah C. Williamson & Jeffrey E. Herrick. (2015). Desertification, land use, and the transformation of global drylands. *Frontiers in Ecology and the Environment*. Volume 13, Issue 1.
- Calderón Bustamante, Oscar (2017). Respuesta dinámica del Golfo de México al paso de un frente frío intenso. Caso del frente frío No. 4 de 2007. Tesis. UNAM-CCA.
- Carta sinóptica de superficie. Obtenido de: <https://www.wpc.ncep.noaa.gov>
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E. y Pineda-Velázquez, A. (1990). 'Provincias Fisiográficas de México'. Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Chander, G., Markham, B.L., & Helder, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM +, and EO-1 ALI sensors.
- Chuvieco, E. (1996) Fundamentos de teledetección espacial. Madrid: Ediciones RIALP 568 pp.
- Comisión Nacional del Agua. Climatología de frentes fríos en México. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/frentes-frios>

- Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero COTECOCA (1980). Memoria para el estado de Zacatecas. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos- Subsecretaria de Ganadería. P. 243.
- Csavina, Janae; Field, Jason; Félix, Omar; Corral-Avitia, Alba Y.; Sáez, A. Eduardo; Betterton, Eric A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. Science of The Total Environment Volume 487. Elsevier. P. 82-90
- Cuevas, M.L.; Garrido, A.; Pérez Damián, J.L. y Iura Gonzáles, D. (2010). Proceso de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. Las cuencas hidrográficas de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Department of Environment and Resource Management (DERM) (2011). Wind Erosion. Disponible en: https://www.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0021/65217/wind-erosion.pdf Consultada el 12/11/2019.
- Domínguez Acosta, M.; E. Gill, T.; Flores Tavizon, E.; Solís, S.S. (2012). Tormentas de arena. Observatorio ambiental. Hoja técnica No. 7. Agosto 2012. El Colegio de Chihuahua.
- Donald Ahrens, C. (2001). Essential of Meteorology: An invitation to the Atmosphere 3er edition. 454 p.
- -E.L. Fredrickson, R.E. Estell, A. Laliberte, D.M. Anderson. (2006). Mesquite recruitment in the Chihuahuan Desert: Historic and prehistoric patterns with log-term impacts. Journal of Arid Environments 64. 285 – 295 p.
- Eric F. Lambina, B.L. Turner, Helmut J. Geista , Samuel B. Agbola , Arild Angelsen, John W. Bruce , Oliver T. Coomes , Rodolfo Dirzo , Gunther Fischer , Carl Folke, P.S. George , Katherine Homewood, Jacques Imbernon, Rik Leemans, Xiubin Li , Emilio F. Moran , Michael Mortimore , P.S. Ramakrishnan , John F. Richards , Helle Skanes , Will Steffent, Glenn D. Stone , Uno Svedin , Tom A. Veldkamp, Coleen Vogel , Jianchu Xu. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. Global Environmental Change 11. Pág. 261-269.
- García, E. (1987). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª edición particular. México, D.F. p. 217.

- García, E. (1998). CONABIO. “Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García)” Escala 1:1000,000. México.
- García Fernández, G.; Belmonte Serrato, F.; Rivera Ortiz, P. (2012). Problemas de erosión eólica en Tamaulipas (México). En Andrade Limas, A.; Belmonte Serato, F. & Romero Diaz, A. (Coord.) Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos. Regiones norte y altiplano de Tamaulipas (México). 9-33 p. Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones.
- Gao X, Xie Y, Liu G et al (2014) Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles. *Soil Tillage Res* 45:126–134
- Gatica-Colima, Ana B. Sin fecha. El desierto chihuahuense ¿Qué sabemos de él? Centro de Estudios Biológicos. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua.
- Granados-Sánchez, Diódoro; Hernández-García, Miguel Á.; Vázquez-Alarcón, Antonio; Ruíz-Puga, Pablo. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Capingo. Series Forestales y del Ambiente*, vol. 19, núm 1, enero-abril, pp. 45-66. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Gibbs HK, Ruesch AS, Achard F, Clayton MK, Holmgren P, Ramantukky N, Foley JA (2010) Tropical forest were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Program on Security and the Environment*, vol 107, no 38. pp 16732–16737.
- Herbert D. Grover and H. Brad Musick. (1990). Shrubland encroachment in south New Mexico, U.S.A.: An analysis of desertification processes in the American southwest. *Climatic Change* 17: 305-330 p.
- Huenneke, Laura F., Anderson, John P., Remmenga Marta, Schlessinger, William P. (2002). Desertification alters patterns of aboveground net primary production in Chihuahuan ecosystems.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI (1981). Síntesis Geográfica de Zacatecas.
- INEGI. (2007). Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1: 250 000 Serie II.
- INEGI. (2014). Anuario Estadístico de Zacatecas, 2014.

- INEGI. (2015). Carta de uso de suelo y vegetación. Datos vectoriales. Escala 1:250 000 serie V.
- INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Zacatecas 2017.
- Liu , Z.; Liu , D.; Huang , J.; Vaughan, M.; Uno, I.; Sugimoto , N.; Kittaka , C.; Trepte, C.; Wang , Z.; Hostetler, C.; Winker, D. (2008). Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations. *Atmospheric, Chemistry and Physics*. 8. P. 5045–5060.
- Luna Niño, Rosa B. (2016). Interacción de los frentes fríos con la Sierra Madre Oriental. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Maris S, Palacin (2000) Identification of desertification/degradation using Radarsat image enhancement in the lands of Santa Maria. *Terra*. Vol 4.
- Márquez Domínguez, Ismael (2017). Análisis de los mecanismos dinámicos que originaron la sequía meteorológica en el periodo 2011-2012 en el Norte de México. Tesis. Universidad Veracruzana.
- McLeman, R.A., Dupre, J., Berrang Ford, L., Ford, J.; Gajewski, K.; Marchildon, G. (2014). What we learned from the Dust Bowl: lessons in science, policy, and adaptation. *Population and Environment*. Volume 35. Issue 4. Pág. 417-440. doi.org/10.1007/s11111-013-0190.
- Meneses, C. (2008) Comportamiento de la deforestación en el país variables antrópicas. México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal.
- Millennium Ecosystem Assessment MEA.: Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis. (2005). World Resource Institute, Washington D.C.
- Moneja López, E.; Pérez Pardo, R.; Ortiz Bultó, P.; Ortega González, A.; Rivero Valencia, A. (2006) Tormentas de polvo del Sahara. Su impacto en el Atlántico, Mar Caribe y el Golfo de México. En Ponvert-Lelisles, D.R & Aldunce, P. (Eds.). *Tecnologías espaciales, desastres y agricultura en Iberoamérica*.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., and Camprubí, A. (2007). Mesa Central of México: Stratigraphy, structure, and Cenozoic tectonic evolution, in Alaniz-Álvarez, S.A., and Nieto-Samaniego, Á.F., eds., *Geology of México*:

Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper 422, p. 41–70, doi: 10.1130/2007.2422(02).

- Nikfal, A., Ranjbar Saadatabadi, A., Sehatkashani, S. (2018). Investigation of dust schemes in the model WRF / CHEM. *Journal of Air Pollution and Health*. 3(1): 1-8.
- Noyola-Medrano, C. & Martínez-Sías, V.A. (2017). Assessing the process of desertification of the southern edge of Chihuahuan Desert: A case study of San Luis Potosí Plateau. *Journal of Geographical Sciences* 27 (3). Pág. 420-438.
- Oldeman, L.R. (1992). Global Extent of Soil Degradation. *ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992*, pp. 19-36.
- Oropeza (2004) Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación. In: Martínez J, Fernández Bremauntz A (eds) *Cambio Climático: Una visión desde México*. SEMARNAT and INE, México, pp 301–311
- Programa de Calidad del Aire del Estado de Zacatecas PCAEZ. 2018-2028. (2018). Secretaría de Agua y Medio Ambiente. ProAire. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Pineda-Martínez, Luis F.; Carbajal, Noel; Campos-Ramos, Arturo; Noyola-Medrano, Cristina; Aragón-Piña, Antonio. (2011). Numerical research of extreme wind-induced dust transport in a semi-arid human-impacted region of Mexico. *Atmospheric Environment* 45. Elsevier. Pág.4652 -4660.
- Prospero, J.M.; Ginoux, P.; Torres, O.; Nicholson, S.E. & Gill, T.E. (2002). Environmental characterization of global source of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Review of Geophysics*. 40 (1). Pp 2-31.
- Quezada, P. (2012). Tamizado de suelos. Recuperada el 1 de junio de 2015. <http://paulina-didactica.blogspot.com/2012/03/tamizado-de-suelos.html>
- Ravi, Sujith; Breshears, David D.; Huxman, Travis E.; D'Odorico Paolo. (2009). Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic–aeolian erosion and vegetation dynamics. *Geomorphology* 116. Elsevier. Pág. 236-245.
- Ravi, S., P. D'Odorico, T. M. Over and T. M.Zobeck. (2004). On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry soils. *Geophys. Res. Lett.*,31, L09501, doi:10.1029/2004GL019485

- Reynolds J.F. & Stafford Smith D.M. (2002) Do humans cause deserts? In: Global Desertification: Do Humans Cause Deserts? (eds, Reynolds J.F. & Stafford Smith D.M.) Dahlem Workshop Report 88, Dahlem University Press, Berlin, pp. 1-21.
- Ríos, A. (2015). Zacatecas pierde suelos por erosión, encima del tope máximo fijado en la FAO. La Jornada Zacatecas. Recuperado: 26 de agosto de 2019. Disponible en: <http://ljz.mx/2015/10/21/zacatecas-pierde-suelos-por-erosion-encima-del-tope-maximo-fijado-en-la-fao/>
- Rivera-Rivera, N.I.; Gill, T.E.; Gebhart K.A.; Hand, J.L.; Bleiweiss, M.P. & Fitzgerald, R.M. (2009). Wind modeling of Chihuahuan Desert dust outbreaks. *Atmospheric-Environment* 43. Elsevier pp. 347-357.
- Rivera-Rivera, N.I.; Gill, T.E.; Gebhart K.A.; Hand, J.L. (2010). Source characteristics of hazardous Chihuahuan Desert dust outbreaks. *Atmospheric-Environment* 44. Elsevier pp. 2457-2468.
- Rizza, U.; Miglietta, M.M.; Mangia, C.; Ielpo, P.; Morichetti, M.; Iachini, C.; Virgili, S.; Passerinni, G. (2018). Sensivity of WRF-Chem model to land surface schemes: Assessment in a severe dust outbreak episode in the Central Mediterranean (Apulia Region). *Atmospheric Research* 201, 168-180.
- Rodríguez, E. (2015). Buscan solución a erosión de suelo en Zacatecas. Recuperado: 26 de agosto de 2019. Disponible en: <https://www.mexicohazalgo.org/2015/11/buscan-solucion-a-erosion-de-suelos-en-zacatecas/>
- Rogers, A.S., Kearney, M.S., (2004). Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic- Mapper scenes using spectral indices, *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2317-2335
- Romero Díaz, A.; Ruiz Sinoga, J.; Espinosa Ramírez, M. (2012). Erosión y degradación de los suelos en el Mundo, México y España. En Andrade Limas, A.; Belmonte Serato, F. & Romero Diaz, A. (Coord.) Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos. Regiones norte y altiplano de Tamaulipas (México). 9-33 p. Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones.
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Limusa. México, D.F. p. 432.

- Schoijet, Mauricio. (2005). Desertificación y tormentas de arena. *Región y Sociedad*. Vol. XVII. No. 32.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Inventario Nacional de Suelos. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos, México.
- SEMARNAT-COLPOS. 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el el homnre en la República Mexicana. Escala 1:250 000. Memoria Nacional. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Colegio de Posgraduados. Montecillo. México.
- Shao, Y. (2004), Simplification of a dust emission scheme and comparison with data, *J. Geophys. Res.*, 109, D10202. doi:10.1029/2003JD004372
- Song, H. and Sohn, B. (2018) An Evaluation of WRF Microphysics for Simulating the Warm-Type Heavy Rain over Korean Peninsula. *Asian Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*.
- Su, L. & J.C.L. Fung. (2015). Sensitivities of WRF-Chem to Dust emission schemes and land Surface properties in simulating Dust cycles durign springtime over East Asia. *J. Geophys. Rest. Atm.* 120, 11, 215- 11- 230. doi:10.1002/2015JD023446
- Thomas, D.S.G. & Middleton, N.J. (1994). *Desertification exploding the myth*. Chichester, England: J. Wiley and Sons.
- Tucker, C.J. (1979) Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2):127-150UNEP. 1992. *World Atlas of Desertification*. Eduard Arnold: Sevenoaks; 69 p.
- Vivó Escoto, Jorge A. en West, Robert C. (Editor) (2014). *Handbook of Middle American Indians, Volume 1: Natural Environment and Early Cultures*. University of Texas Press. 590 pte.
- WRB-IUSS WORKING GROUP. (2006). *World Reference Base for Soil Resources*, 2nd ed. *World Soil Resources Reports Núm. 103*, FAO, Rome.
- Zhao HL, Zhao XY, Zhou RL, Zhang RH, Drake S (2005) Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia. *J Arid Environ* 62:309–319.

ANEXO

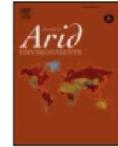
Journal of Arid Environments 176 (2020) 104097



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Arid Environments

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jaridenv



Soil deterioration in the southern Chihuahuan Desert caused by agricultural practices and meteorological events



María de Jesús Guevara Macías^a, Noel Carbajal^a, José Tuxpan Vargas^{b,*}

^a Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. Camino a la Presa San José 2055, CP, 78216, San Luis Potosí S.L.P., Mexico

^b Catedras-CONACYT-Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. Camino a la Presa San José 2055, CP, 78216, San Luis Potosí S.L.P., Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Remote sensing
Land use impact
Desertification
Arid zones

ABSTRACT

In arid and semi-arid regions, unregulated land use changes as a result of poor planning, and the expansion of agricultural and livestock activities increase the risk of desertification and other potentially severe environmental impacts. Several consequences of improper land management practices are soil deterioration and erosion, which may be intensified by meteorological events. This paper presents a historical evaluation of the temporal and spatial evolution of soil deterioration in the southern Chihuahuan Desert in Mexico. A multi-temporal analysis of the study area during the 1995–2016 period was carried out using satellite data (Landsat series). Two seasons were analyzed to determine the influence of external events such as rainfall and wind: dry and rainy. The identification of soil conditions was based on the Brightness Index (BI) considering the complete satellite data set. The soil conditions were classified into five categories according to their reflectance values: highly deteriorated, deteriorated, in the process of being deteriorated, in good condition and other (clouds, water, non-soil). The change detection maps clearly show a growing trend wherein areas of deteriorated and eroded soil increase over time. Agriculture and strong winds are the two main factors involved in the soil deterioration process of the study region.

1. Introduction

Land use change is generally a consequence of the exponential growth of the world's population and the expansion of urban areas. As the population increases, more land is needed to produce food and raw materials. Primary economic activities, including intensive agriculture and livestock activities, have often expanded into new areas without proper planning, modifying large tracts of land and leading to deforestation. Crop expansion has affected different ecosystems, mainly grassland and forest regions. In tropical regions, croplands have expanded mostly at the expense of forest cover over the past 40–50 years (Gibbs et al., 2010).

Several environmental problems resulting from massive land use changes, such as desertification, have been well documented. During the Dust Bowl era in the United States, the cultivation of large crop areas combined with drought created severe dust storms. Inadequate agricultural practices such as the implementation of monocultures and the removal of vegetation cover were the principal causes of this phenomenon (Schojjet, 2005; Ravi et al., 2009). Currently, China is another example of a country experiencing accelerated environmental degradation caused by deforestation, overgrazing, agricultural

overexploitation and the exhaustion and contamination of aquifers. Since 1978, China has initiated economic reform and an open-door policy, leading to rapid land use and land cover changes across most of its territory (Weng, 2002). As a result, the rate of desertification in China has increased. For example, the areas surrounding the Gobi Desert have undergone desertification because of overgrazing (Schojjet, 2005; Ravi, 2009). The impacts of agriculture in north-eastern China have caused the erosion of black soil to a depth of 0.4 m, resulting in a nearly 10% reduction in soybean production (Gao et al., 2014). In Mongolia, wind erosion and heavy grazing are the leading causes of sandy desertification and have triggered further impacts on the vegetation cover in addition to hastening erosion processes, leading to the loss of soil structure and soil deterioration (Zhao et al., 2005). In Argentina, about 80% of the territory is dedicated to agricultural or forestry activities; however, these activities have similarly increased rates of soil erosion and degradation. Hence, the expansion of the agricultural frontier and unplanned deforestation appear to have severely degraded natural resources (Maris, 2000).

In Mexico, more than 80% of agricultural land shows some degree of degradation as a result of monocultures, deforestation or livestock activities. Estimates obtained indicate that around 97% of the land

* Corresponding author.

E-mail addresses: mdejesus.guevara@ipicyt.edu.mx (M. de Jesús Guevara Macías), noelc@ipicyt.edu.mx (N. Carbajal), jose.tuxpan@ipicyt.edu.mx (J.T. Vargas).

<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104097>

Received 19 December 2018; Received in revised form 10 August 2019; Accepted 30 December 2019
0140-1963/ © 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Guevara-Macías, M.J.; Carbajal, N.; Tuxpan, J. (2020). Soil deterioration in the southern Chihuahuan Desert caused by agricultural and meteorological events. *Journal of Arid Environments* 176.