



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL – AIRE**

**“IDENTIFICACIÓN DE REGIONES DE PROCEDENCIA DE  
PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA EN EL ESTADO DE  
VERACRUZ PARA EL ESTABLECIMIENTO DE ESTRATEGIAS  
DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL”**

**TESIS**  
**PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA**  
**LIC. ANAYLI ALONSO SARANOVA**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM**

**COMITÉ TUTORAL**  
**Dr. Armando Aguilar Márquez, Facultad de Estudios Superiores, Cuautitlán, UNAM**  
**M. C. Vicente Fuentes Gea, Facultad de Ingeniería, UNAM**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

Enero 2018

**Esta versión sustituye a la enviada el día 14 de  
noviembre de 2017**

**JURADO ASIGNADO**

Presidente: M. C. Vicente Fuentes Gea

Secretario: Dra. Georgina Fernández Villagómez

1<sup>er</sup> Vocal: Dr. Víctor O. Magaña Rueda

2<sup>do</sup> Vocal: Dr. Armando Aguilar Márquez

3<sup>er</sup> Vocal: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

**Lugar donde se realizó la tesis:**

Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera,  
Universidad Nacional Autónoma de México

**TUTOR DE TESIS**

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

-----  
FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A la memoria del Dr. Juan Humberto Bravo Álvarez<sup>†</sup> por permitir integrarme a su equipo de trabajo, así como su orientación y atenciones concedidas en todo instante para la elaboración de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la oportunidad de brindarme la educación a nivel profesional, junto con los conocimientos adquiridos de sus docentes en el Posgrado de Ingeniería. Al Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, por integrarme a su grupo de trabajo y darme la oportunidad de crecer.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA-UNAM, mediante el proyecto titulado “Evaluación del Depósito Atmosférico Húmedo y Seco en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en la Costa del Golfo de México para la prevención del deterioro ambiental significativo” (IN116215) y al proyecto “Establecimiento de la Red Nacional de Depósito Atmosférico” (IN112318).

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por sus conocimientos transmitidos, consejos, experiencias y el tiempo dedicado en todo momento a lo largo del desarrollo de este proyecto en la Sección de Contaminación Ambiental (SCA).

A los miembros de la SCA de la UNAM: el Dr. Gilberto Fuentes García y a la M. I. Ana Luisa Alarcón Jiménez, por su aportación de conocimientos, recomendaciones y constante asesoría en el presente trabajo, a la M.I. Ana Luisa Alarcón Jiménez y Q. F. B. María del Carmen Torres Barrera por el análisis químico de las muestras del depósito atmosférico por medio de Cromatografía Iónica, al Biól. Pablo Sánchez Álvarez y al Dr. Elías Granados Hernández, quienes me brindaron continuamente importantes observaciones y comentarios en mi experiencia profesional.

Al M. C. Vicente Fuentes Gea y al Dr. Armando Aguilar Márquez, quienes me guiaron en este transcurso tan importante de mi vida, gracias por sus observaciones, consejos y aportaciones transmitidos.

Al Dr. Víctor O. Magaña Rueda y a la Dra. Georgina Fernández Villagómez, por su tiempo y aportación en la revisión de esta tesis.

Al Dr. Valter Armando Barrera por toda su ayuda y asesoría brindada en la elaboración de este trabajo.

Al Instituto de Ecología (INECOL A.C), al Dr. Jorge López Portillo, el Sr. Enrique López B. y al Sr. Enrique López M, quienes colaboraron en la proporción de datos de las precipitaciones y meteorológicos para la elaboración de este estudio.

A la National Atmospheric Deposition Program (NADP), al Dr. David Gay y al Dr. Christopher Lehmann, por toda su ayuda brindada.



A la World Meteorological Organization (WMO), al Sr. Van Wowersox y al Sr. Richard Artz.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, cuyo amor, confianza y apoyo me han ayudado a crecer como persona. Mami, gracias por estar siempre ahí, con los brazos abiertos cuando más te necesito, eres mi sostén. Papi, gracias por tu amor y apoyo incondicional.

A mi esposo Giraldo, por ser mi guía, gracias por tu amor, paciencia y apoyo absoluto en todos estos años juntos.

A la memoria de mis queridos e inolvidables abuelos Fara y José, por ser parte inseparable de mi vida y por toda la ayuda y consejos brindados.

A mis tíos-papas Marialexis y Lázaro, por toda su ayuda, amor y apoyo en estos dos años. Gracias tía por ser mi soporte en todo, por ayudarme en la revisión de esta tesis y por tu amor incondicional.

A mis tíos Anayma y Pedro, por su cariño ilimitado, su ayuda y la preocupación constante. Tía, eres más que una hermana para mí, gracias por tus consejos, el escucharme, estar para mí, eres muy especial para mí.

A toda la familia y ahí incluyo a todos los brujitos, por el cariño y el apoyo que han tenido de cada uno de ustedes para lograr mis objetivos.

A mis amigas Dalina y Arisleidis, por la ayuda, la compañía y por la travesía juntas en estos dos años juntas, gracias por los buenos momentos que compartimos.

A mi cuñi Herlys, por todos estos años de amistad, te agradezco por todo lo que hemos compartido, el contar contigo sin límite de tiempo, tu apoyo y cariño brindado en todos estos años.

A mis compañeros de la Sección de Contaminación Ambiental, por su colaboración en mis jornadas de trabajo durante el análisis de muestras.

A todos muchas gracias

## **CONTENIDO**

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	I
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	III
<b>ABREVIATURAS</b> .....	IV
<b>RESUMEN</b> .....	VI
<b>ABSTRACT</b> .....	VIII
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1 -
1.1. OBJETIVO GENERAL. ....	4 -
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	4 -
<b>CAPÍTULO II. ANTECEDENTES</b> .....	6 -
2.1. DEFINICIÓN DE LLUVIA ÁCIDA. ....	7 -
2.2. PRECURSORES DE LA PRECIPITACION ÁCIDA. ....	8 -
2.3. FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA. ....	9 -
2.4. EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA. ....	10 -
2.5. LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO. ....	11 -
2.6. EMISIONES DE PRECURSORES. ....	13 -
2.7. EXPERIENCIA INTERNACIONAL. ....	14 -
<b>CAPÍTULO III ZONA DE ESTUDIO</b> .....	17 -
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	18 -
3.1.1. <i>EL MORRO DE LA MANCHA</i> . ....	18 -
3.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL GOLFO DE MÉXICO. ....	20 -
3.2.1. <i>OSCILACIÓN ANUAL DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES</i> . ....	21 -
3.2.2. <i>TEMPERATURA</i> . ....	22 -
3.2.3. <i>PRECIPITACIÓN</i> . ....	23 -
3.2.4. <i>CLIMAS</i> . ....	24 -
3.3. RÉGIMEN DE LOS PATRONES SINÓPTICOS. ....	26 -
3.3.1. <i>CARACTERÍSTICAS CLIMATICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO (2014-2015)</i> . ....	30 -
<b>CAPITULO IV METODOLOGÍA</b> .....	36 -
4.1. SELECCIÓN DEL SITIO. ....	37 -
4.1.1. <i>CRITERIOS DE UBICACIÓN DEL COLECTOR Y EL PLUVIÓMETRO</i> . ....	37 -
4.1.1.1. <i>REQUERIMIENTOS REGIONALES</i> . ....	37 -
4.1.1.2. <i>REQUERIMIENTOS LOCALES</i> . ....	38 -
4.2. MUESTREO. ....	39 -
4.2.1. <i>PROCEDIMIENTO DE LA TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO</i> . ....	41 -
4.3. PROTOCOLO DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS. ....	42 -
4.3.1. <i>MEDICIÓN DE pH (ACIDEZ Y ALCALINIDAD)</i> . ....	43 -
4.3.2. <i>MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD</i> . ....	44 -
4.3.3. <i>DETERMINACIÓN DE IONES INORGÁNICOS</i> . ....	44 -
4.4. MODELOS DE TRAYECTORIAS DE RETROCESO. ....	45 -
4.4.1. <i>HYSPLIT</i> . ....	46 -
4.5. APLICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ESTUDIOS ANTERIORES DE LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO. ....	47 -
4.6. APLICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES. ....	49 -
4.6.1. <i>IMÁGENES INFRARROJAS</i> . ....	49 -

<b>CAPITULO V RESULTADOS .....</b>	<b>- 51 -</b>
5.1. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO .....	- 52 -
5.2. ANÁLISIS DEL PH Y CONDUCTIVIDAD EN EL AGUA DE LLUVIA.....	- 52 -
5.3. ANÁLISIS DE ANIONES Y CATIONES .....	- 59 -
5.3.1. <i>CONCENTRACIÓN DE ANIONES Y CATIONES EN EL AGUA DE LLUVIA.....</i>	<i>- 59 -</i>
5.4. TRAYECTORIAS E IMÁGENES SATELITALES APLICADAS.....	- 64 -
5.5. FUENTES POTENCIALES DE PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA.....	- 77 -
<b>CAPITULO VI MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL .....</b>	<b>- 81 -</b>
6.1. MÉTODOS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES DE SO <sub>2</sub> ....	- 82 -
6.2. MÉTODOS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES DE NO <sub>x</sub> ....	- 85 -
<b>CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>- 88 -</b>
7.1. CONCLUSIONES.....	- 89 -
7.2. RECOMENDACIONES.....	- 90 -
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>- 96 -</b>
ANEXO I. SITUACIONES SINÓPTICAS (TSS) PRINCIPALES, DESCRITA POR (LAPINEL, 1988).....	- 96 -
ANEXO II. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE SITUACIONES SINÓPTICAS Y LOS SUBTIPOS DEFINIDAS POR BRAULIO LAPINEL.....	- 98 -
ANEXO III. VALORES DE PH, CONDUCTIVIDAD, ANIONES Y CATIONES PARA LA ESTACIÓN DE LA MANCHA EN LOS AÑOS 2014-2015. ....	- 99 -
ANEXO IV. TRAYECTORIAS DE RETROCESOS REALIZADAS E IMÁGENES INFRARROJAS PARA LOS EVENTOS DE LLUVIA EN LOS INTERVALOS DE LLUVIA ÁCIDA Y LLUVIA ÁCIDA BAJA PARA LOS AÑOS 2014-2015. ....	- 101 -

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

FIGURA 2. 1.- FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA POR ARRASTRE. FUENTE: HTTP://WWW.PORQUECOMOYDONDE.NET/2012/07/QUE-ES-LA-LLUVIA-ACIDA.HTML .....	- 9 -
FIGURA 2. 2.- GRÁFICA DE CAJA PARA LOS VALORES PROMEDIOS DE PH PONDERADOS ANUALES (2003-2013) EN LA MANCHA. ....	- 12 -

### Capítulo 3

FIGURA 3. 1.- LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO. ....	- 18 -
FIGURA 3. 2.- CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS LA MANCHA (CICOLMA), VERACRUZ. ....	- 19 -
FIGURA 3. 3.- RELIEVE DE LA REGIÓN GOLFO DE MÉXICO.....	- 21 -
FIGURA 3. 4.- ESTRUCTURA HORIZONTAL DE UNA ONDA DEL ESTE. ....	- 29 -
FIGURA 3. 5.- PROMEDIOS MENSUALES DE LA TEMPERATURA (°C) EN LA MANCHA, VERACRUZ.....	- 31 -
FIGURA 3. 6.- PROMEDIO MENSUAL DE LA PRESIÓN (MB) EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 32 -
FIGURA 3. 7.- PROMEDIO MENSUAL DE LA HUMEDAD (%) EN LA MANCHA, VERACRUZ.....	- 32 -
FIGURA 3. 8.- PROMEDIO MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN (MM) EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 33 -
FIGURA 3. 9.- ROSA DEL VIENTO ANUAL PARA EL AÑO 2014 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 33 -
FIGURA 3. 10.- ROSAS DE LOS VIENTOS MENSUALES DEL 2014 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 35 -

### Capítulo 4

FIGURA 4. 1.- CRITERIOS DEL NADP DE UBICACIÓN DEL COLECTOR Y PLUVIÓMETRO, CON RESPECTO A OBJETOS Y ESTRUCTURAS. ....	- 39 -
FIGURA 4. 2.- PROTOCOLO DE MUESTREO DEL DEPÓSITO HÚMEDO Y SECO. ....	- 40 -
FIGURA 4. 3.- SISTEMA DE MUESTREO DEL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO, MARCA AEROCHEM METRICS, MODELO 301. ....	- 41 -
FIGURA 4. 4.- PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE MUESTRAS DE DEPÓSITO ATMOSFÉRICO HÚMEDO. ....	- 43 -

### Capítulo 5

FIGURA 5. 1.- MUESTRAS COLECTADAS DE DEPÓSITO HÚMEDO ATMOSFÉRICO (20014-20015) EN LA MANCHA, VERACRUZ.....	- 53 -
FIGURA 5. 2.- GRÁFICO DE CAJAS DE LOS VALORES DE PH PARA LA MANCHA, VERACRUZ.....	- 53 -
FIGURA 5. 3.- PROMEDIO PONDERADO ANUAL DE PH DEL 2014-2015.....	- 54 -
FIGURA 5. 4.- PROMEDIOS PONDERADOS ANUALES DE PH PARA LOS AÑOS 2014 Y 2015 EN EL GOLFO DE MÉXICO. ....	- 55 -
FIGURA 5. 5.- PROMEDIOS PONDERADOS ANUALES DE PH Y PRECIPITACIÓN PARA EL PERÍODO 2003-2015 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 56 -
FIGURA 5. 6.- PROMEDIOS PONDERADOS MENSUALES DE PH Y PRECIPITACIÓN PARA EL PERÍODO 2003-2015 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 57 -
FIGURA 5. 7.- PROMEDIOS PONDERADOS MENSUALES DE PH Y PRECIPITACIÓN MENSUAL PARA EL AÑO 2014. ....	- 58 -
FIGURA 5. 8.- PROMEDIOS PONDERADOS MENSUALES DE PH Y PRECIPITACIÓN MENSUAL PARA EL AÑO 2015. ....	- 58 -
FIGURA 5. 9.- PROMEDIO PONDERADO ANUAL DE CONDUCTIVIDAD (2014-2015) EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 59 -
FIGURA 5. 10.- PONDERADOS MENSUALES DE LOS ANIONES Y CATIONES PARA EL 2014 EN LA MANCHA. ....	- 61 -
FIGURA 5. 11.- PONDERADOS MENSUALES DE LOS ANIONES Y CATIONES PARA EL 2015 EN LA MANCHA. ....	- 61 -
FIGURA 5. 12.- RELACIÓN SULFATOS/NITRATOS (2014-2015). ....	- 62 -

FIGURA 5. 13.- TRAYECTORIAS E IMÁGENES INFRARROJAS DE LOS DÍAS DE LLUVIA ÁCIDA FUERTE, LA MANCHA, 2014.....	- 68 -
FIGURA 5. 14.- TRAYECTORIAS E IMÁGENES INFRARROJAS DE LOS DÍAS DE LLUVIA ÁCIDA FUERTE, LA MANCHA, 2015.....	- 71 -
FIGURA 5. 15.- DÍAS CON ALTA RELACIÓN $SO_4^{2-} / NO_3^-$ .....	- 75 -
FIGURA 5. 16.- DÍAS MÁS ALCALINOS PARA EL AÑO 2014 Y 2015. ....	- 76 -
FIGURA 5. 17.- LOCALIZACIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS DE PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	- 80 -

**Anexos**

FIGURA I. 1.- SITUACIONES SINÓPTICAS (TSS) PARA EL PERÍODO 1980-2010.....	- 96 -
FIGURA IV. 1.- TRAYECTORIAS DE RETROCESOS REALIZADAS E IMÁGENES INFRARROJAS PARA LOS EVENTOS DE LLUVIA ÁCIDA ( $5.0 < PH < 4.5$ ), PARA EL AÑO 2014. ....	- 101 -
FIGURA IV. 2.- TRAYECTORIAS DE RETROCESOS REALIZADAS E IMÁGENES INFRARROJAS PARA LOS EVENTOS DE LLUVIA ÁCIDA ( $5.0 < PH < 4.5$ ), PARA EL AÑO 2015.....	- 108 -
FIGURA IV. 3.- TRAYECTORIAS DE RETROCESOS REALIZADAS E IMÁGENES INFRARROJAS PARA LOS EVENTOS DE LLUVIA ÁCIDA BAJA ( $5.6 < PH < 5.0$ ), PARA EL AÑO 2014.....	- 111 -
FIGURA IV. 4.- TRAYECTORIAS DE RETROCESOS REALIZADAS E IMÁGENES INFRARROJAS PARA LOS EVENTOS DE LLUVIA ÁCIDA ( $5.0 < PH < 4.5$ ), PARA EL AÑO 2015.....	- 118 -

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 3

TABLA 3. 1.- COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LA MANCHA. ....	- 19 -
TABLA 3. 2.- TEMPERATURAS PROMEDIO DE CADA MES PARA EL ESTADO DE VERACRUZ. FUENTE: CONAGUA, 2016. ....	- 22 -
TABLA 3. 3.- PROMEDIO ANUAL DE ALGUNAS VARIABLES METEOROLÓGICAS DE LA MANCHA. ....	- 31 -

### Capítulo 5

TABLA 5. 1.- RESUMEN DE LA CANTIDAD DE MUESTRAS ANALIZADAS Y VALIDADAS EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 52 -
TABLA 5. 2.- RESUMEN DE LA CANTIDAD DE MUESTRAS ANALIZADAS Y VALIDADAS PARA EL PERÍODO 2003-2015 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 55 -
TABLA 5. 3.- RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN PONDERADA ANUAL DE ANIONES Y CATIONES EN LA MANCHA (2014-2015). ....	- 59 -
TABLA 5. 4.- RELACIÓN SULFATO/NITRATO PARA LOS AÑOS 2014 Y 2015 EN EL GOLFO DE MÉXICO.-	- 62 -
TABLA 5. 5.- DÍAS CON RELACIÓN $SO_4^{2-} / NO_3^-$ ALTO PARA EL AÑO 2015 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 62 -
TABLA 5. 6.- CORRELACIÓN ENTRE LOS IONES PARA EL AÑO 2014 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 63 -
TABLA 5. 7.- CORRELACIÓN ENTRE LOS IONES PARA EL AÑO 2015 EN LA MANCHA, VERACRUZ. ....	- 63 -
TABLA 5. 8.- DÍAS MÁS ÁCIDOS DEL AÑO 2014. ....	- 65 -
TABLA 5. 9.- DÍAS MÁS ÁCIDOS DEL AÑO 2015. ....	- 68 -
TABLA 5. 10.- CASOS DE LLUVIA ÁCIDA (PH ENTRE 5.0-4.5) PARA EL AÑO 2014. ....	- 72 -
TABLA 5. 11.- CASOS DE LLUVIA ÁCIDA (PH ENTRE 5.0-4.5) PARA EL AÑO 2015. ....	- 72 -
TABLA 5. 12.- CASOS DE LLUVIA ÁCIDA BAJA (PH ENTRE 5.6-5.0) PARA EL AÑO 2014. ....	- 73 -
TABLA 5. 13.- CASOS DE LLUVIA ÁCIDA BAJA (PH ENTRE 5.6-5.0) PARA EL AÑO 2015. ....	- 74 -
TABLA 5. 14.- EMISIONES E ÍNDICE DE EMISIONES DE $SO_2$ Y $NO_x$ PARA ALGUNAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS EN MÉXICO. ....	- 78 -
TABLA 5. 15.- EMISIONES E ÍNDICE DE EMISIONES DE $SO_2$ Y $NO_x$ PARA ALGUNAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS EN ESTADOS UNIDOS. ....	- 79 -

### Anexos

TABLA II. 1.- CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE SITUACIONES SINÓPTICAS Y LOS SUBTIPOS DEFINIDAS POR BRAULIO LAPINEL. ....	- 98 -
Tabla III. 1.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2014. ....	- 99 -
TABLA III. 2.- VALORES DE PH, CONDUCTIVIDAD, VOLUMEN DE LLUVIA Y CONCENTRACIÓN DE IONES (PPM) POR EVENTO PARA LA MANCHA 2015. ....	- 100 -

## **ABREVIATURAS**

CAA	“Clean Air Act”
CI	Cromatografía Iónica
CICOLMA	Centro de Investigaciones Costeras La Mancha
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CDMX	Ciudad de México
DSI	“Dry Sorbent Injection”
GOES	“Geostationary Operational Environmental Satellite”
HYSPLIT	“Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model”
INAH	Instituto Nacional de Antropología e Historia
INE	Instituto Nacional de Ecología
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INECOL	Instituto de Ecología, A.C.
INEM	Inventario Nacional de Emisiones
INSMET	Instituto de Meteorología de Cuba
IR	Infrarrojo
kg	Kilogramo
mb	Milibares
MWh	Mega Watt hora
NADP	“National Atmospheric Deposition Program”
NIST	“National Institute of Standard Technology”
NOAA	“National Oceanic and Atmospheric Administration”
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
LSFO	“Limestone Forced Oxidation”
O <sub>3</sub>	Ozono
PEMEX	Petróleos Mexicanos
FGD	“Combustion Gas Desulfurization”
PM <sub>10</sub>	Partículas suspendidas con diámetros aerodinámicos menores de 10 µm
PM <sub>2.5</sub>	Partículas suspendidas con diámetros aerodinámicos menores de 2.5 µm
ppm	Partes por millón
SCA-CCA-UNAM	Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera – UNAM
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales



SIG	Sistema de Información Geográfica
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
TSS	Tipos de Situaciones Sinópticas
UNECE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
US-EPA	“United States Environmental Protection Agency”
VIS	Visibles
WGA	“Western Governors Association”
WV	Imágenes de vapor de agua
µg/m <sup>3</sup>	Microgramos por metro cúbico
µeq/L	Microequivalente por litro
µm	Micrómetros

## **RESUMEN**

La lluvia ácida, es una forma de contaminación atmosférica, que hace referencia a la presencia de ácidos en la atmósfera a través de lluvia, niebla y nieve (también conocido como depósito húmedo). Este fenómeno se presenta cuando el agua de lluvia tiene un pH inferior a 5.6.

Según el Inventario Nacional de Emisiones de México 1999, el Estado de Veracruz se ubica en el segundo lugar a nivel nacional con respecto a las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y en el tercero con respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) (principales precursores de lluvia ácida), de ahí el interés de poner atención al estudio del comportamiento del fenómeno de la lluvia ácida en esta región. Debido a la propagación de la contaminación también se analizaron fuentes potenciales de precursores aun fuera de los límites de dicho estado y del país.

Desde el año 2002 la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA-CCA-UNAM), viene llevando a cabo la evaluación de depósito atmosférico en colaboración con el Instituto de Ecología A. C. (INECOL) en la estación del Centro de Investigaciones Costeras “La Mancha” (CICOLMA), en Veracruz, este sitio fue seleccionado para el desarrollo del proyecto, ya que contaba con la infraestructura adecuada, además de seguir un programa de aseguramiento y control de calidad para la evaluación del depósito atmosférico. El estudio comprendió un período de dos años (2014-2015).

En esta investigación se determinó y evaluó la composición química del depósito húmedo, determinando parámetros como: pH, conductividad y la composición iónica (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>), mediante la técnica analítica de Cromatografía de intercambio iónico (CI). De los resultados obtenidos más del 50% de los eventos de precipitación mostraron características ácidas, con un promedio de pH ponderado para el año 2014 de 5.02 y para el 2015 de 5.22. Dicha acidéz se presentó con más frecuencia en la temporada lluviosa que en la de seca.

La concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (µeq/L) determinada en las muestras de lluvia, presentaron las mayores concentraciones en el período invernal, con los máximos en marzo de 2014 y enero de 2015. De la relación SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, indicador de la reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, se encontró para la

zona de estudio un valor de 4.90 para el año 2015, siendo el valor más alto comparado con otros sitios de muestreo de depósito atmosférico, localizados en los Estados Unidos en la costa del Golfo de México y cuyos valores estuvieron entre 1.03 y 1.95. Por lo tanto, es importante considerar las fuentes de emisión (locales y fronterizas) de dióxido de azufre en México.

Se aplicó el modelo “Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model” (HYSPLIT), utilizando trayectorias de retroceso de las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia ácida registrados en la estación de muestreo de La Mancha. El objetivo fue observar la aportación local y el transporte de largo alcance de los precursores e identificar las fuentes de emisión. Las trayectorias mostraron un importante transporte al sitio de muestreo desde el Este durante la temporada de lluvias y del Norte en la temporada seca. Estas muestran que la mayoría de los eventos provienen del Golfo de México, atraviesan los Estados de Yucatán, Campeche, Tabasco y por otro lado el Estado de Tamaulipas y el municipio de Texas en Estados Unidos; las trayectorias ayudan a comprender la incorporación de precursores emitidos por la Sonda de Campeche, las centrales termoeléctricas de Mérida y Valladolid, así como la contribución de precursores generados al Norte de la zona de estudio.

Además, fueron utilizadas imágenes satelitales en el espectro infrarrojo con el objetivo de verificar los eventos de lluvia, las características de las mismas, su procedencia y a qué situación sinóptica estaba asociada, corroborando la mayor procedencia del Este.

Del análisis de trayectorias e imágenes satelitales se aprecia que las fuentes localizadas al Este de La Mancha como la Sonda de Campeche, las termoeléctricas de: Mérida, Lerma y Valladolid son las que aportan una mayor cantidad de precursores a los eventos muestreados. En todo el golfo existen diversas fuentes que también inciden en la zona de estudio.

Asimismo, se propusieron medidas de prevención, minimización y control para los precursores de lluvia ácida, las cuales de aplicarse podrían mitigar el problema que se presenta en el sitio de muestreo, y con ello reducir el impacto que se tiene tanto en el patrimonio cultural como en los ecosistemas.

## **ABSTRACT**

Acid rain is a form of atmospheric pollution, which refers to the presence of acids in the atmosphere through rain, fog, and snow (also known as wet deposit). This phenomenon occurs when the rainwater has a pH lower than 5.6. According to the National Emissions Inventory of Mexico 1999, the State of Veracruz ranks second in the national level with respect to sulfur dioxide emissions ( $\text{SO}_2$ ) and in the third place with respect to nitrogen oxides emissions ( $\text{NO}_x$ ) (main precursors of acid rain), hence the interest to pay attention to the study of the behavior of the acid rain phenomenon in this region. Due to the spread of contamination, potential sources of precursors were also analyzed even outside the limits of that state and the country.

Since 2002, the Environmental Pollution Section of the Center of Atmospheric Sciences of the UNAM (SCA-CCA-UNAM) has been carrying out the evaluation of the atmospheric deposit in collaboration with the Institute of Ecology A.C. (INECOL) at the station of the Coastal Research Center "La Mancha" (CICOLMA), in Veracruz, this site was selected for the development of the project, since it had the adequate infrastructure, in addition to following a program of assurance and quality control for the evaluation of the deposit atmospheric. The study comprised a period of two years (2014-2015).

In this investigation, the chemical composition of the wet deposit was determined and evaluated, determining parameters such as pH, conductivity and the ionic composition ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ), by the analytical technique of Chromatography of Ion exchange (CI). From results obtained, more than 50% of the precipitation events showed acid characteristics, with a weighted average pH of 5.02 and 5.22 for the years 2014 and 2015, respectively. This acidity occurred more frequently in the rainy season than in the dry season.

The concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^-$  ( $\mu\text{eq/L}$ ) determined in the rain samples, showed the highest concentrations in the winter period, with the maxima in March 2014 and January 2015. Of the relation  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ , indicator of the reduction of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions, for the study area was found a value of 4.90 for 2015, being the highest value compared with other atmospheric deposit sampling sites, located in the United States in the coast of the Mexico Gulf and

whose values were between 1.03 and 1.95. Therefore, it is important to consider the emission sources (local and border) of sulfur dioxide in Mexico.

The HYSPLIT was applied, using retracement trajectories of the air parcels that gave rise to the acid rain events recorded in the La Mancha sampling station. The objective was to observe the local contribution and the long-range transport of the precursors and identify the emission sources. The trajectories showed an important transport to the sampling site from the East during the rainy season and from the North in the dry season. These show that most of the events come from the Mexico Gulf, cross the States of Yucatan, Campeche, Tabasco and on the other hand the State of Tamaulipas and the municipality of Texas in the United States; the trajectories help to understand the incorporation of precursors emitted by the Sonda de Campeche, the Merida and Valladolid thermoelectric power plants, as well as the contribution of precursors generated to the North of the study area.

In addition, satellite images were used in the infrared spectrum in order to verify the rain events, the characteristics of the same, their origin and what synoptic situation were associated, corroborating the greater origin of the East.

From the analysis of trajectories and satellite images, it can be seen that the sources located in the East of La Mancha, such as the Sonda de Campeche, the thermoelectric plants of Mérida, Lerma and Valladolid are the ones that contribute a greater amount of precursors to the sampled events. Throughout the Gulf, there are several sources that also affect the study area.

Likewise, prevention, minimization and control measures for acid rain precursors were proposed, which if applied, could mitigate the problem that arises in the sampling site, and thereby reduce the impact that is had both on cultural heritage and in ecosystems.



# **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.**

La lluvia ácida, es una forma de contaminación atmosférica, que hace referencia a la presencia de ácidos en la atmósfera a través de lluvia, niebla y nieve (también conocido como depósito húmedo) (NADP, 2014). El fenómeno se presenta cuando el agua de lluvia tiene un pH inferior a 5.6.

Su estudio debería extenderse a todo el país con la meta de determinar los efectos potenciales que genera a nivel local y regional, e identificar las fuentes precursoras del mismo para adoptar las medidas de prevención y control que ayuden en la mitigación de dicho fenómeno.

La contaminación atmosférica es la causa primordial de este fenómeno, a través de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) (principales precursores), estos llegan a la atmósfera por distintas fuentes, tanto naturales como antropogénicas y al reaccionar con el agua de la atmósfera forman ácido nítrico y ácido sulfúrico, respectivamente. El lugar donde se emiten los precursores no es necesariamente donde se presenta el fenómeno de lluvia ácida debido al transporte atmosférico de los mismos.

El Estado de Veracruz posee diferentes industrias entre las que destacan complejos petroquímicos, centrales termoeléctricas, ingenios azucareros, así como varias fábricas, todos emiten diariamente sustancias contaminantes a la atmósfera.

De acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones de México 1999 (SEMARNAT, 2006), el Estado de Veracruz emite una cantidad de 342,391.8 ton/año de  $\text{SO}_2$  y 110,519.8 ton/año de  $\text{NO}_x$ , que lo ubica en el segundo lugar a nivel nacional con respecto a  $\text{SO}_2$  y en el tercero con respecto a  $\text{NO}_x$ , de ahí el interés de poner atención a este problema. La contaminación atmosférica no reconoce fronteras, por lo cual también se analizarán fuentes potenciales de precursores aun fuera de los límites del estado y el país.

Lo anterior plantea la necesidad de reducir las emisiones para evitar las afectaciones en el Estado, tanto a los ecosistemas como a las construcciones, especialmente al patrimonio cultural (Bravo, 2006).



Debido a la importancia de la conservación del patrimonio natural y cultural de los mexicanos, y considerando que gran parte de las construcciones prehispánicas son de material calizo, un material vulnerable al deterioro por lluvia ácida, es necesario fomentar estudios para entender y prevenir dicho deterioro, que es influenciado por distintos factores ambientales, y en especial, por los productos de las actividades humanas.

La SCA-CCA-UNAM, en el año 2003 puso en operación una red de cuatro estaciones para el estudio del depósito húmedo y seco en el Estado de Veracruz (Bravo et al. 2005).

A partir de la información sobre eventos de lluvia ácida y su composición química generada, se aplicarán modelos de trayectorias de retroceso para identificar las regiones y fuentes potenciales de precursores que pudieron influir en los eventos registrados. Una vez identificadas las fuentes potenciales más importantes se establecerán las medidas de prevención y control necesarias para minimizar su impacto, de esta manera la presente investigación considerará e integrará aspectos fundamentales de la Ingeniería Ambiental, como la evaluación, prevención y control de la contaminación atmosférica, a fin de proponer soluciones al problema de la lluvia ácida en el Estado de Veracruz.

El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto: “Evaluación del depósito atmosférico húmedo y seco en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en la costa del Golfo de México con fines de prevenir el deterioro ambiental significativo”, a cargo de la SCA-CCA-UNAM, bajo la responsabilidad del Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, donde además participan las siguientes instituciones:

- Universidad Veracruzana
- Instituto de Ecología de Veracruz

Las actividades para llevar a cabo este proyecto son:

- Colección de muestras
- Transporte de muestras
- Análisis químico del depósito atmosférico

A partir de la información generada de muestreo de lluvia ácida en el Estado de Veracruz (La Mancha), se analizó la información del período 2014 – 2015. Las actividades efectuadas con la información generada incluyen:

- Revisión y validación de datos del depósito atmosférico.
- Capacitación sobre la técnica de CI y de muestreo.
- Análisis estadístico de las muestras.
- Evaluación de la información mediante pruebas estadísticas no paramétricas.
- Elaboración de trayectorias de retroceso mediante el modelo HYSPLIT.
- Identificación de fuentes y regiones de procedencia de precursores de lluvia ácida.
- Emisiones a la atmósfera.
- Uso de Imágenes Satelitales.
- Propuesta de medidas de prevención y control para las fuentes localizadas.

El presente trabajo de investigación tuvo como base los siguientes objetivos:

#### **1.1. OBJETIVO GENERAL.**

- Llevar a cabo la identificación de regiones de procedencia de precursores de lluvia ácida en el Estado de Veracruz mediante las trayectorias de retroceso, para el establecimiento de estrategias de prevención, minimización y control.

#### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Identificar la presencia de lluvia ácida en La Mancha, (Veracruz) con base en la caracterización del depósito atmosférico húmedo.
- Aplicar el modelo de trayectoria de retroceso (HYSPLIT) para la identificación de las regiones y fuentes de donde proceden los precursores que dan lugar al problema de lluvia ácida en, La Mancha, (Veracruz).
- Emplear las imágenes satelitales (GOES) para la identificación de los eventos de lluvia ácida.

- Proponer medidas de prevención, minimización y control en las fuentes de precursores de lluvia ácida, considerando los resultados de este estudio.

# **CAPÍTULO II. ANTECEDENTES**

## **CAPÍTULO II: ANTECEDENTES.**

Con la revolución científico-técnica y el progreso de la era moderna la protección del medio ambiente ha acaparado la atención de las diversas ramas de la civilización. Al igual que el papel que han desempeñado las actividades humanas en el detrimento de la calidad de la atmósfera, lo cual ha establecido uno de los enigmas globales de la contemporaneidad.

Un indicador de niveles de contaminación ambiental que aporta datos valiosos acerca de entradas de nutrientes y compuestos tóxicos a los sistemas terrestres y acuáticos, es la lluvia. (Parungo et al., 1990). Este sistema natural de limpieza de la atmósfera, tiene propiedades de acarreo únicas, remueve gases atmosféricos, partículas y todos los compuestos que han sido introducidos a la atmósfera por diferentes fuentes de emisión naturales o antropogénicas.

La presencia de precipitación ácida (deposito ácido atmosférico), se ha acentuado en la zona de estudio (La Mancha, Veracruz) y constituye actualmente uno de los principales problemas ambientales asociado a la contaminación atmosférica (Sosa et al., 2014).

### **2.1. DEFINICIÓN DE LLUVIA ÁCIDA.**

La lluvia ácida se define como una precipitación en forma de lluvia, nieve, granizo, rocío o niebla que transporta los compuestos de azufre y nitrógeno de la alta atmósfera hasta el suelo, cuya precipitación presenta un  $\text{pH} < 5.6$  (NADP, 2014). Este fenómeno fue identificado por primera vez en 1872 en Suecia y estudios acerca de la misma comenzaron en los inicios de la década de 1950 en Estados Unidos (Smith, 1872).

Esta acidez se debe a la presencia del  $\text{CO}_2$  que se encuentra normalmente en la atmósfera, de tal forma que al combinarse con el agua reacciona para formar ácido carbónico, que es un ácido débil. Obteniendo el logaritmo negativo de la concentración de iones hidronio, que es la definición de pH, se tiene un valor de 5.6.

De acuerdo a los criterios de la US-EPA, la lluvia ácida se presenta cuando el pH es inferior a 5.6. El agua de lluvia ácida baja tiene un pH entre 5.6-5.0 y el agua de lluvia ácida entre 5.0-4.5. Por otro lado, el agua de lluvia ácida fuerte oscila entre 4.5-3.5, y muy ácido < 3.5 (Bashkin, 2016).

## **2.2. PRECURSORES DE LA PRECIPITACION ÁCIDA.**

Constantemente se emiten a la atmósfera, contaminantes que son precursores de lluvia ácida y que provienen de diversas actividades humanas. Estos precursores de lluvia ácida, son compuestos de nitrógeno y azufre generados en mayor medida por el uso de combustibles fósiles (Bravo et al., 1964).

Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) son compuestos de nitrógeno y oxígeno que se forman en la combustión a altas temperaturas. El término óxido de nitrógeno agrupa al óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) y al dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ).

Mientras que el  $\text{NO}_2$  es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitratos ( $\text{PM}_{2.5}$ ) en el aire ambiente. (Seinfeld, 2006).

Según Seinfeld (2006) los  $\text{NO}_x$  tienen fuentes antropogénicas, como lo son la quema de combustibles fósiles, ya sea para la generación de energía eléctrica o bien por motores de combustión interna.

Los óxidos de azufre, son gases incoloros de un característico olor asfixiante. Se consideran como óxidos de azufre, tanto el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) como el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) (EEA, 2016). La vida media en la atmósfera del  $\text{SO}_2$  llega a ser de 50 a 120 horas (Seinfeld, 1986).

Según la US-EPA (2010), los combustibles fósiles como el petróleo, gas natural, carbón, combustóleo, etc., contienen cantidades importantes de azufre, que, al que al quemarse se emitirá como  $\text{SO}_2$ . Uno de los procesos que genera mayores emisiones de  $\text{SO}_x$  es la generación de electricidad en las termoeléctricas. Estas emisiones, producto de la actividad humana, no se limitan únicamente a la combustión de energéticos, sino que además se emiten en los procesos de extracción y procesamiento de los mismos.

### 2.3. FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA.

Una vez emitidos los precursores de la lluvia ácida, reaccionan en la atmósfera y generan iones nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) que, conjuntamente con la humedad, darán lugar al ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). (Seinfeld, 1986). Existen diferentes términos para nombrar el depósito húmedo, incluyendo precipitación de arrastre y lavado (Legge y Krupa, 1990).

El proceso de arrastre se lleva a cabo en el interior de las nubes, donde se encuentran los precursores que al interactuar con el agua reaccionan y se disuelven (Hutchinson y Havas, 2012) (Figura 2.1).

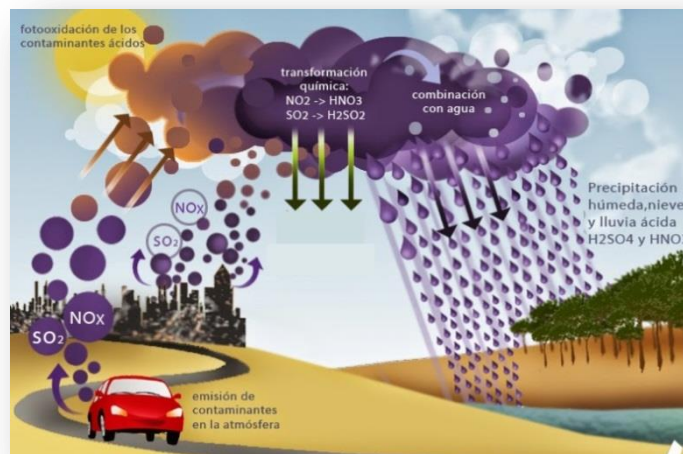


Figura 2. 1.- Formación de lluvia ácida por arrastre. Fuente: <http://www.porquecomoydonde.net/2012/07/que-es-la-lluvia-acida.html>

Una vez que se han formado las nubes, estas pueden viajar varios kilómetros de su origen y causar el depósito lejos de donde fueron emitidos los precursores (Legge and Krupa, 1990).

El proceso de lavado se da al inicio de la lluvia, al caer las gotas de la nube, estas tienden a evaporarse hasta alcanzar una humedad del 100% y seguidamente precipita.

Al existir por debajo de la nube  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ , se mezclarán con las gotas y precipitarán acidificando la lluvia. De esta forma la lluvia "lava" al aire que contenía a los precursores (Martin, 1984).

Mediante este proceso, los precursores no viajan grandes distancias de tal modo que los contaminantes emitidos pueden impactar cerca de las fuentes de emisión.

#### **2.4. EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA.**

El depósito ácido causa una gran variedad de efectos nocivos tanto en ecosistemas como en diversos materiales usados en construcciones. Esta puede aumentar la acidez del agua de ríos y lagos y ocasionar daños en la vida acuática, tanto animal como vegetal. También, la acidez de los suelos se puede incrementar, provocando cambios en su composición, propiciando la lixiviación de nutrientes para las plantas y la transferencia de metales tóxicos a cuerpos de agua (Noyes et al., 2009).

Esto afecta primordialmente a los cuerpos de agua sensibles, situados en cuencas cuyos suelos tienen una capacidad limitada para neutralizar compuestos ácidos (EPA, 2010).

Schmidt en 1989 planteó que la vegetación expuesta directamente a la lluvia ácida no sólo sufre las consecuencias del deterioro del suelo, sino un daño directo que puede llegar a ocasionar incluso la muerte de muchas especies. El aluminio presente en las rocas, suelo y sedimentos de los ríos y lagos, al disminuir el pH comienza a disolverse, este metal es tóxico para los peces aún en bajas concentraciones.

El daño, que ocasiona la lluvia ácida a ciertos materiales de construcción, es más evidente, ya que día con día los monumentos, estatuas, edificios y muy en especial los sitios arqueológicos sufren un desgaste debido al intemperismo. Se agrava con la presencia de este tipo de lluvia. Así mismo, contribuye al deterioro de las pinturas, revestimientos de automóviles y corrosión de los metales (Bravo et al., 2006).



## **2.5. LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO.**

A continuación se describirán de manera cronológica las principales investigaciones que se han realizado en México.

En los años 80, inician los estudios sobre lluvia ácida de manera continua, siendo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) una de las que más datos tienen disponibles acerca de este fenómeno (Aguilar, 1981).

En el año 2002 en colaboración con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, cuatro cruceros de investigación realizaron en conjunto con la SCA-CCA-UNAM en el Golfo de México, con el fin de evaluar la calidad del aire en la región. Estos revelaron que la mayor parte de los eventos de precipitación presentan características ácidas dando un promedio ponderado de pH de 4.94 (Bravo et al. 2006).

En este mismo año se puso en operación una red de cuatro estaciones de monitoreo en el Estado de Veracruz, para cada uno de los sitios se determinó el pH de las muestras de lluvia, determinándose la presencia de la lluvia ácida. Encontrándose para el período de estudio de 2003 al 2005, un porcentaje de muestras ácidas en orden decreciente de 91% para la estación Tajín, 89% para la estación Mocambo, 88% para La Mancha y 66% para San Juan de Ulúa (Bravo et al., 2005).

En la Ciudad de México, en el año de 1985, el Gobierno del Distrito Federal a través de la Dirección de Prevención y Control de la Contaminación inició el estudio sobre la acidez del depósito atmosférico total, a través de una red de muestreo conformada por 10 estaciones, la cual ha ido evolucionando y actualmente cuenta con 16 estaciones, las cuales operan bajo supervisión de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), cabe mencionar que a partir del año 2003, dicho muestreo y análisis se realiza en colaboración con la SCA-CCA-UNAM, quien realiza el análisis de las muestras (Alarcón, 2012).

Otros estudios referentes al muestreo del depósito atmosférico en la costa y sitios marítimos de México, fueron desarrollados por la Universidad Autónoma

del Carmen. Dichos estudios iniciaron en 1999 en los sitios de Puerto Morelos, San Antonio Cárdenas, Cancún y el Océano Pacífico. Estos estudios mostraron valores de pH en el intervalo de 4.15-6.15 destacando los valores de pH de Puerto Morelos cuyo pH mínimo fue de 3.48 y altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  (4.51 mg/L).

En la actualidad sólo está en operación la estación ubicada en el centro de Ecología Costera de El Morro de La Mancha del Instituto de Ecología A.C., en el Estado de Veracruz. En ella existen registros de lluvia ácida desde el 2003 hasta nuestros días. En la figura 2.2 se muestra la gráfica de caja para los valores promedios de pH ponderados anuales para el período comprendido del 2003 al 2013.

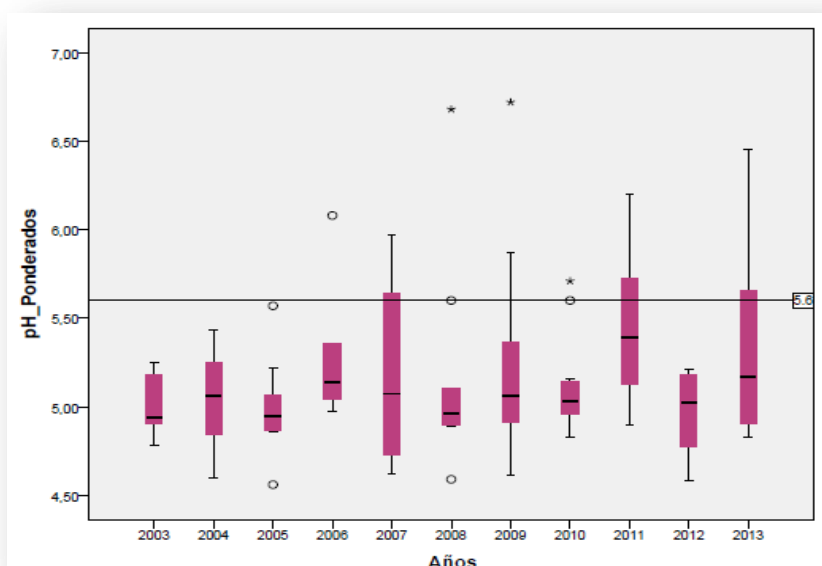


Figura 2. 2.- Gráfica de caja para los valores promedios de pH ponderados anuales (2003-2013) en La Mancha.

Como consecuencia de las investigaciones, que se han venido realizando, el Laboratorio de la SCA-CCA-UNAM forma parte del programa de Estudios intercomparativos entre laboratorios a nivel mundial, bajo el programa “Global Atmosphere Watch Precipitation Chemistry Program” y del “National Atmospheric Deposition Program”.

## **2.6. EMISIONES DE PRECURSORES.**

En el año 1995, comenzó el Programa del Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) (SEMARNAT, 2006), en el mismo participaron el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) y la Asociación de Gobernadores del Oeste de Estados Unidos (Western Governors' Association, WGA), el cual contiene las estimaciones de emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , correspondientes a 1999, donde precisamente fue el año base.

En el mismo las emisiones se dividen en cinco tipos de fuentes de emisión:

**Fuentes fijas:** Son los establecimientos industriales estacionarios, regulados por las autoridades ambientales estatales o municipales correspondientes. Fueron establecidos umbrales de emisión para determinar si las emisiones de un establecimiento dado se considerarían dentro del inventario de fuentes fijas.

**Fuentes de área:** Los pequeños establecimientos industriales, donde realizan actividades dispersas como, el lavado en seco y el uso comercial y doméstico de solventes y fuentes fugitivas de gases o partículas, por ejemplo, las actividades de agricultura y ganadería, los vehículos que circulan en caminos no pavimentados y el polvo transportado por el viento. Dentro de este grupo también se incluyen vehículos como aeronaves, locomotoras y embarcaciones marítimas comerciales.

**Fuentes de línea:** Las emisiones de escape de los vehículos automotores como por ejemplo, automóviles particulares, motocicletas, taxis, microbuses, autobuses y camiones de carga pesada que utilizan diésel o gasolina.

**Fuentes naturales:** Las emisiones naturales de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) generadas por la vegetación, de  $\text{NO}_x$  provenientes de los suelos,  $\text{SO}_2$  y partículas producidas por la actividad volcánica.

Además, están las fuentes móviles que no circulan por carreteras, estas corresponden a las emisiones de maquinaria agrícola y de construcción.

El Estado de Veracruz emite la cantidad de 110,519.8 toneladas de NO<sub>x</sub> anualmente aproximadamente. Esta cantidad representa el 7.76 % de las emisiones de todo el país, correspondiente al tercer lugar a nivel nacional, después de Coahuila y el Estado de México, según el INEM.

En dicho Estado presenta una gran actividad petrolera, que involucra procesos de extracción y refinación petroquímica, así como la generación de energía mediante termoeléctricas y la actividad industrial; ubicándolo en el segundo lugar a nivel nacional en la emisión de SO<sub>x</sub>, generando cada año un total de 342,391.8 toneladas aproximadamente, de acuerdo con el INEM.

Debido a la producción de una gran cantidad de precursores en dicho Estado, surge la necesidad de prestar atención a este problema.

## **2.7. EXPERIENCIA INTERNACIONAL.**

En esta sección se describe brevemente la Red de Deposito Atmosférico más importante de Norte América y de las más completas a nivel mundial, que es la operada por NADP en los Estados Unidos.

En los Estados Unidos, NADP ha medido las concentraciones de contaminantes en muestras de precipitación desde 1978 para caracterizar las tendencias temporales y espaciales (NADP, 2016).

La importancia de esta red y la comparación de sus resultados con los obtenido en la región de estudio de La Mancha consiste en que se tiene evaluada toda la costa del Golfo de México que incluye los Estados de Texas, Lousiana y Florida.

En relación a las medidas para controlar y reducir la lluvia ácida se tiene:

En el 2004 es llevado a cabo por el gobierno de Estados Unidos, la sección de Control del Depósito Ácido en el Clean Air Act (US-EPA, 2004). EL Clean Air Act es una ley que regula la calidad del aire en Estados Unidos, abordando el problema del depósito ácido. Plantea una serie de medidas para la prevención de este problema, entre ellas: limitar la emisión de SO<sub>2</sub> en las principales fuentes, como las termoeléctricas; elaborar un Inventario de Emisiones;

implementar un programa de reducción de emisiones a la atmósfera a largo plazo; incentivar fiscalmente a industrias que reduzcan emisiones; multar a las empresas que excedan las emisiones establecidas; promover el uso de combustibles menos contaminantes en la generación de energía eléctrica y estimular la investigación de tecnologías que minimicen las emisiones.

Por otro lado, también se han venido tomando medidas para la reducción de emisiones de precursores de lluvia ácida en Europa. Pero no fue hasta 1985 que se firmó el Protocolo de Reducción de Emisiones de Azufre, y se fijó como meta la reducción de un 30% de las emisiones para 1993 (UNECE, 2010).

En 1988, el Protocolo de Sofía fue firmado por varios países dentro de la Unión Europea con el objetivo de la reducción de  $\text{NO}_x$ , siendo fallido en algunos de ellos debido al aumento de vehículos de combustión interna.

En 1990, el Congreso de los Estados Unidos enmendó la Ley de Aire Limpio (CAA) para reducir la degradación del ecosistema a escala regional de las emisiones de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$  que han sido responsables del depósito ácido en regiones como las Montañas Adirondack del estado de Nueva York. El Instituto Darwin de Agua Dulce llevó a cabo un proyecto de evaluación del ecosistema de 1994 a 2012 para determinar el efecto de estas políticas de reducción de emisiones en los sistemas acuáticos (Michelena et al., 2016).

El Programa de Lluvia Ácida dirigido por la Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, ha reducido significativamente el depósito de ácidos en los Estados Unidos al controlar las emisiones de  $\text{SO}_2$  y los  $\text{NO}_x$  para las plantas energéticas, conforme al informe anual del programa. El informe del Programa de Lluvia Ácida del 2004 describe los avances ambientales y de salud pública, la tecnología y las mejoras basadas en el mercado alcanzadas por el programa. Ampliamente reconocido como uno de los programas más exitosos en la historia de Estados Unidos, el programa sirve como un modelo para una nueva generación de programas sobre el control de contaminación atmosférica, tales como la Regla para el Aire Limpio Interestatal.

En el 2004, las fuentes que generaron energía eléctrica redujeron sus emisiones anuales de SO<sub>2</sub> en un 34% un recorte de sobre 5 millones de toneladas en comparación con los niveles del 1990. En comparación con los niveles del 1980, las emisiones de SO<sub>2</sub> provenientes de las plantas energéticas disminuyeron por 7 millones de toneladas, o sea, más del 40 %. Las emisiones de NOx mermaron en 3 millones de toneladas desde 1990 y bajaron a cerca de la mitad del nivel anticipado sin el Programa de Lluvia Ácida.

El Programa de Lluvia Ácida ha provisto los datos sobre emisiones más completos y precisos jamás desarrollados por un programa federal para el control de contaminación atmosférica. El programa también ha puesto esta información a la disposición de agencias, investigadores, fuentes afectadas y del público al utilizar métodos y herramientas electrónicas globales basadas en la red informática. El programa es reconocido como un modelo para proporcionar información gubernamental electrónica, en la automatización de procesos administrativos, la reducción en el uso de papel y al brindar sistemas cibernéticos para trabajar con la US-EPA.

En 2011, el NADP formó el Comité Científico del Depósito Total para mejorar las estimaciones del depósito atmosférico a través de la integración del depósito húmedo, seco y total de azufre, nitrógeno y otras especies (por ejemplo, mercurio) (Lehman et al., 2015).

# **CAPÍTULO III. ZONA DE ESTUDIO**

## CAPÍTULO III: ZONA DE ESTUDIO.

### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La red de estaciones de lluvia ácida de la SCA-CCA-UNAM en el Estado de Veracruz, ha tenido operando 4 estaciones, de las cuales hasta la fecha la única que se encuentra en operación es La Estación de Ecología Costera “El Morro de La Mancha” del Instituto de Ecología A.C.

La selección del lugar está basada en los criterios establecidos por la US-EPA para un sitio de muestreo de precipitación de tipo regional, (US-EPA, 1994). Además, el sitio cuenta con personal e infraestructura adecuada, lo cual ofrece seguridad y una constante vigilancia de la operación adecuada del equipo de muestreo y de la toma de muestra. En la figura 3.1 se muestra la ubicación del sitio del muestreo.



Figura 3. 1.- Localización del sitio de muestreo.

#### 3.1.1. EL MORRO DE LA MANCHA.

El INECOL tiene a su cargo el Centro de Investigaciones Costeras llamado también CICOLMA, el cual está situado en el municipio de Actopan.



Las coordenadas geográficas del sitio se muestran a continuación en la tabla 3.1:

Tabla 3. 1.- Coordenadas geográficas de La Mancha.

<b>Latitud</b>	19°35'21.06"N
<b>Longitud</b>	96°22'49.7"W
<b>Altura</b>	2 msnm

La región cuenta con un clima de tipo Aw1, cálido subhúmedo con un porcentaje de lluvia invernal entre el 5 y 10.2% del total anual (García, 2004).

El CICOLMA promueve la investigación multidisciplinaria en zonas costeras, tanto básica como aplicada, con un especial énfasis sobre la relación entre ecosistemas terrestres y costeros. Cuenta con una superficie de 70 hectáreas.

Según el INECOL, desde el punto de vista geomorfológico, la zona de La Mancha corresponde a una sección de la planicie costera Sur del Golfo de México. La llanura litoral actual incluye: A) una depresión prelitoral con laguna y pantanos, B) dunas transversales C) una costa mixta de forma irregular que se alterna con playas estrechas de poco oleaje y acantilados.



Figura 3. 2.- Centro de Investigaciones Costeras La Mancha (CICOLMA), Veracruz.

Se presentan tres ambientes contrastantes: mar, laguna costera y comunidades terrestres. El manglar ocupa un área aproximada de 190 hectáreas, las dunas costeras son ejemplos de sistemas médanos del centro de Veracruz. CICOLMA está situado en el límite de la provincia Biótica Veracruzana. Tiene una importancia zoogeográfica. Las especies de vertebrados registrados son: anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Las aves

migratorias provienen de Alaska, Canadá y Estados Unidos de Norteamérica. Tiene una zona de arrecifes donde la especie importante es el pulpo (INECOL). En el año de 1977, fue decretada zona de reserva. Aquí se estudia la descomposición y flujo de nutrientes, la vegetación interacción planta animal, organismos del suelo y reciclaje de desechos, entre otros.

### **3.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL GOLFO DE MÉXICO.**

El Golfo de México es una cuenca oceánica que se ubica al Sureste de América del Norte. Mide aproximadamente 1,600 kilómetros de este a oeste, 900 kilómetros de norte a sur y tiene un área de superficie de 1.550.000 km<sup>2</sup>. La costa marina de Cape Sable, Florida a la punta de la península de Yucatán se extiende en 5700 kilómetros, con otros 380 kilómetros de costa en la punta noroeste de Cuba. Si se incluyen bahías y otras aguas tierra adentro, la costa total aumenta a poco más de 27,000 kilómetros en tan solo los Estados Unidos. Su profundidad máxima exacta es controversial y los informes de diferentes autores indican profundidades máximas que varían entre 3,750 m y 4,384 m (Fosa de Sigsbee) (Clima, 2016).

La región Golfo de México comprende la vertiente este de la Sierra Madre Oriental, al sur de la Sierra de Tamaulipas, la llanura costera del Golfo de México y la vertiente boreal de las montañas del Norte de Chiapas (figura 3.3). Abarca el sur del estado de Tamaulipas, los estados de Veracruz y Tabasco, el suroeste de Campeche, las porciones orientales de San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo, una pequeña región de Puebla, el noreste de Oaxaca y el norte de Chiapas, y se extiende del paralelo 16<sup>0</sup> al 23<sup>0</sup>N, quedando íntegramente dentro de la zona tropical (Clima, 2016).

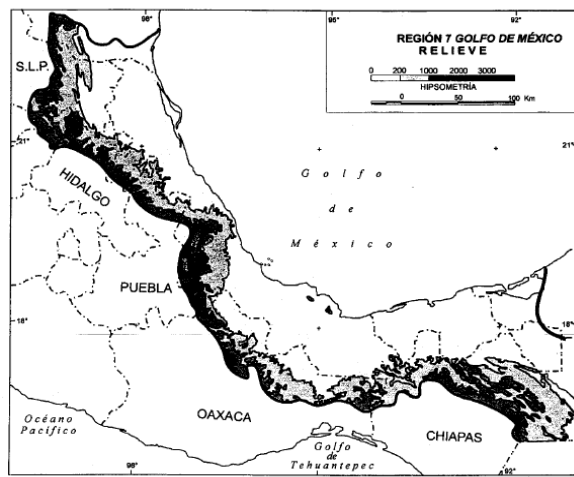


Figura 3. 3.- Relieve de la Región Golfo de México.  
Fuente: Clima, 2016.

La Sierra Madre Oriental se extiende de noroeste a sureste, entre los paralelos  $23^{\circ}$  y  $20^{\circ}$ N. En este paralelo forma una saliente hacia el Golfo de México una especie de espolón. Es muy importante desde el punto de vista climático, ya que actúa como barrera al paso de los vientos del Norte, Noreste y Este, dominantes de la región. Hacia el Sur, ya en Veracruz, se encuentra la Sierra de Tantima u Otontepec que queda en las inmediaciones del paralelo  $21^{\circ}$ N y la Sierra de los Tuxtlas que se localiza al Norte del paralelo  $18^{\circ}$ N (Clima, 2016).

### 3.2.1. OSCILACIÓN ANUAL DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES.

La diferencia en temperatura entre el mes más frío y el más cálido tiende a ser alta en las áreas más directamente expuestas a la influencia de los “nortes”, los lugares situados al Norte de la saliente que en el paralelo  $20^{\circ}$ N forma la Sierra Madre Oriental, son extremos, es decir, presentan oscilaciones anuales entre  $6^{\circ}$  y  $14^{\circ}$ C (CONAGUA, 2016).

Como es de interés el Estado de Veracruz, a continuación, se muestran las temperaturas promedio de cada mes.

Tabla 3. 2.- Temperaturas promedio de cada mes para el Estado de Veracruz.  
Fuente: CONAGUA, 2016.

Temperaturas (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Mín. promedio mensual	13.7	14.3	16.2	18.3	20.1	20.3	19.6	19.6	19.5	18.2	16.1	14.4	17.5
Máx. promedio mensual	24.4	25.7	28.6	31.0	32.4	31.4	30.2	30.3	29.6	28.4	26.6	24.8	28.6
Promedio mensual	19.0	20.0	22.4	24.6	26.3	25.8	24.9	24.9	24.6	23.3	21.4	19.6	23.1

Según CONAGUA (2016), junio es el mes más caliente en toda la porción situada al Norte de las sierras de Teziutlán y Zacapoaxtla, y mayo en los lugares localizados al sur, por tanto, aquí la marcha de la temperatura es tipo ganges (con su máximo antes del solsticio de verano y de la estación lluviosa).

### 3.2.2. TEMPERATURA.

La distribución anual de la temperatura muestra que, desde el nivel del mar hasta los 1000 m de altitud, los climas son cálidos (con temperatura media anual mayor de 22 °C) y dentro de estas áreas las temperaturas pueden ser muy cálidas (mayores a 26 °C). Las laderas de las sierras, de altitud comprendida entre 1000 y 2000 m, son semicálidas (con temperaturas media anual entre 18 y 22°C); de 3000 a 4000 m son semifrías (con temperaturas entre 5 y 12°C), y en el pico de Orizaba, a más de 4000 m, son frías y muy frías (con temperaturas medias anuales menores de 5°C) (CONAGUA, 2016).

CONAGUA en 2016 planteó, que durante los meses de marzo a octubre, toda el área descrita como cálida, se mantiene con estas características y alcanza condiciones más extremas de mayo a septiembre, época en que toda la llanura costera registra temperaturas superiores a 26°C. En las áreas semicálidas y templadas se reducen considerablemente.

A partir de noviembre, las condiciones semicálidas se representan a menor altitud, y para enero abarcan casi toda la llanura, excepto la llanura tabasqueña que se mantiene cálida todo el año. Diciembre y febrero son similares en su distribución de temperaturas, y enero es el mes más frío del año, en el cual al

Norte del paralelo 20<sup>0</sup>N predominan temperaturas inferiores a 18<sup>0</sup>C desde los 150 m de altitud (CONAGUA, 2016).

### **3.2.3. PRECIPITACIÓN.**

La región se localiza de dominio de los vientos alisios del noreste que tienen su origen en el borde sur de la celda anticiclónica del Atlántico septentrional o celda Azores-Bermudas, y al atravesar el océano recogen gran contenido de humedad.

Según García (2004), durante el verano, con el desplazamiento hacia el Norte de dicha celda, los vientos alisios soplan con una dirección general de noreste a suroeste en superficie, o de este a oeste en las alturas, e incrementan su contenido de humedad al recorrer una gran distancia sobre las aguas calientes del océano. Al encontrarse con las laderas montañosas, que se inclinan al Golfo de México, se ven obligados a ascender, se enfrían adiabáticamente y depositan en forma de lluvia su abundante humedad.

Por otra parte, las perturbaciones ciclónicas, que tienen su origen en el Mar de las Antillas y Golfo de México, y que son más frecuentes hacia fines del verano y principios de otoño, introducen abundante humedad en la troposfera media. Su influencia se pone de manifiesto en el aumento de la cantidad de lluvia de los meses de septiembre y octubre (CONAGUA, 2016).

Durante la mitad fría del año la influencia de los alisios queda relegada a algunas áreas bajas del sur. La zona subtropical de alta presión se encuentra desplazada hacia este punto, y con ella la faja de los alisios. Esto provoca una disminución de la precipitación que ocasionan estos vientos. No obstante, durante el invierno, los “nortes”, que se originan por el desplazamiento hacia el sur de masas de aire polar procedentes del norte de Estados Unidos y sur de Canadá, al pasar por las aguas relativamente calientes del Golfo de México, se cargan de humedad y modifican sus condiciones térmicas (CONAGUA, 2016). Al llegar a la región producen precipitaciones que se hacen más abundantes sobre las laderas orientales de las sierras.

El máximo de precipitación en la zona no se presenta en el litoral, ni en la parte más alta de las montañas, sino, en general, en un área de altitud comprendida entre 100 y 600 m, donde se reciben más de 2000 mm anuales, hay lugares que registran 5000 mm (García, 2004).

Según García (2004), la precipitación varía de moderada a abundante. De junio a octubre es abundante en toda la región (de 60 a 800 mm), lo que significa que existe una temporada lluviosa bien definida para el verano y principios del otoño. Por otra parte, hay áreas que reciben abundante precipitación todo el año, como las laderas altas de la Sierra Madre Oriental y las montañas del Norte de Chipas. Los meses de menos precipitaciones son marzo y abril, en que solo las montañas antes mencionadas se conservan húmedas (con precipitación del orden de 60 a 200 mm).

#### **3.2.4. CLIMAS.**

En la región Golfo de México predominan los climas húmedos y subhúmedos, que en la llanura costera son cálidos, en los declives de las sierras se transforman en semicálidos y en las partes más elevadas en templados, semifríos y fríos (García, 2004).

##### **1. Grupo de climas cálidos húmedos y subhúmedos.**

Las características más importantes son las de poseer una temperatura elevada durante todos los meses del año (el mes más frío con temperatura media mayor de 18<sup>0</sup>C) y una precipitación que excede a la evaporación. El límite de climas húmedos y secos se establece mediante la utilización de fórmulas que consideran el régimen de lluvias de cada sitio de observación (García, 2004).

Se clasifican como climas húmedos aquellos en que la precipitación pluvial anual es muy alta, además de suficiente para mantener el terreno húmedo durante todo el año. Son los climas de mayor humedad en el país localizados solamente en dos de las once regiones climáticas: las del Golfo y del Sureste. Los climas subhúmedos son aquellos en que la precipitación también es muy alta, pero presentan una temporada seca bien definida.

Este grupo se divide en tres tipos principales: cálido húmedo, caliente húmedo y los cálidos subhúmedos.

## 2. Subgrupo de climas semicálidos húmedos y subhúmedos.

Este subgrupo climático es transición entre el grupo de climas cálidos y el de los templados. Sus características principales son: registrar una temperatura media anual comprendida entre 18 y 22<sup>0</sup>C y una precipitación que excede a la evaporación. Como en los climas cálidos, el límite con los secos se establece mediante fórmulas (García, 2004).

En cuanto al grado de humedad son húmedos y subhúmedos, con varios subtipos dentro de cada uno.

Climas semicálidos húmedos: por su régimen de lluvias semicálidos húmedos de la región Golfo de México se subdividen en dos subtipos: los que reciben lluvias abundantes durante todo el año y los que las presentan en verano.

## 3. Grupo de climas templados húmedos.

La característica principal de este grupo es la de poseer temperatura media anual comprendida entre 12 y 18<sup>0</sup>C. La única región que posee este tipo de clima es el Golfo de México (los climas templados que se presentan en otras regiones son subhúmedos). Se localizan en las laderas de la Sierra Madre Oriental de altitud comprendida entre 1300 y 2400 m, que se encuentran mejor expuestas a los vientos húmedos del noreste.

Por su régimen de lluvias los templados húmedos se dividen en dos subtipos: climas templados húmedos con lluvia todo el año y los climas templados húmedos con lluvias en verano.

## 4. Subgrupo de climas semifríos húmedos y subhúmedos.

Este grupo es exclusivo de las laderas del Cofre de Perote y Pico de Orizaba de altitud comprendida entre 2400 y 4000 m. Como característica principal poseen una temperatura media anual entre 5 y 12<sup>0</sup>C. Existe una diferencia, presenta verano largo fresco, con temperatura media del mes más caliente menos a 22<sup>0</sup>C y un verano corto fresco (menos de cuatro meses con

temperatura mayor de 10<sup>0</sup>C), este es transición hacia los climas fríos y se localiza a mayor altitud.

#### 5. Grupo de climas fríos y muy fríos.

Las características esenciales de los climas fríos de México son: poseer temperatura media del mes más caliente comprendida entre 0 y 6.5 <sup>0</sup>C, y la media anual entre -2 y 5 <sup>0</sup>C. Se localizan a altitudes mayores de 4000 m.

Mientras que los climas muy fríos se encuentran a altitudes mayores a 5000 m, en la cima del Pico de Orizaba, donde existen nieves perpetuas. En estos se ve una escasa oscilación anual de la temperatura (menor de 5<sup>0</sup>C) (García, 2004).

### **3.3. RÉGIMEN DE LOS PATRONES SINÓPTICOS.**

En la actualidad uno de los problemas esenciales para la clasificación de las configuraciones sinópticas lo resuelve el método empleado. Las clasificaciones manuales o subjetivas están fundamentadas en la apreciación cualitativa del especialista. Desde el punto de vista práctico su aplicación es compleja. El nivel de incertidumbre creado en el procedimiento de clasificación surge como un aspecto polémico y superable solamente en aquellas clasificaciones manuales, que no realizan una subdivisión detallada de los procesos circulatorios (Fernández y Díaz, 2005).

Al tener en consideración el grado de incertidumbre causado al realizar una subdivisión detallada de los procesos atmosféricos de veinte tipos de situaciones sinópticas resultantes, la presente investigación se limitará al análisis de la incidencia de los nueve Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) principales, descrita por (Lapinel, 1988), para el período 1980-2010.

Los tipos de situaciones sinópticas, según la clasificación utilizada por Lapinel (1988), fueron acometidos por especialistas del Departamento de Climatología del Instituto de Meteorología de Cuba. Esta clasificación representa un sistema de carácter general, utilizado como sucesos condicionantes de la precipitación. Las características sinópticas morfológicas de los principales sistemas sinópticos son (vorticiales, ondulatorios y lineales). Fueron agrupados



siguiendo un criterio genético, de tal modo que la influencia anticiclónica y continental quedarán bien definidas. Los sistemas ciclónicos distinguirán su origen tropical o extratropical y de otras perturbaciones acompañadas de fuertes áreas de convergencia. Se agruparán en atención a su procedencia u origen. En el Anexo II se muestra una tabla, con las diferentes clasificaciones y subtipos de situaciones sinópticas propuesta por Lapinel (1988).

Procedimiento utilizado en la clasificación de los TSS.

Este estudio tomó como base la clasificación de los TSS realizada en conjunto por especialistas del Centro del Clima y del Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), en la escala diaria. Para su completamiento, se consultaron los estados generales del tiempo (EGT), obtenidos del Centro de Pronóstico del Instituto de Meteorología de Cuba y los mapas de superficie y a diferentes alturas geopotenciales del período 1980- 2010.

Al estar la zona de interés muy cerca de donde se realizó este análisis y en el mismo paralelo, se considerará que será afectada por similares o iguales patrones sinópticos.

A continuación, se realiza una breve síntesis de los tipos de situaciones sinópticas (TSS) para una mejor comprensión de los resultados:

1) Cercana influencia del Anticiclón del Atlántico (AA).

TSS I. Referido a la cercana influencia del anticiclón del atlántico o de las Azores-Bermudas, el cual constituye el principal centro de acción de nuestra Área y es sin duda, el sistema sinóptico que con mayor frecuencia influye sobre Cuba. Se considera este tipo; cuando el anticiclón penetra en forma de cuña sobre Cuba, llegando a cubrir el Golfo de México y el Sureste de los Estados Unidos (Anexo I.1). El viento predominante asociado al sistema puede ser del primero o del segundo cuadrante, lo que da origen a los subtipos "Ia" y "Ib".

2) Flujo extendido (AE).

TSS II. Se corresponden con aquellas configuraciones del campo bórico, que tienen lugar cuando la región central del anticiclón del Atlántico se aleja

sensiblemente de las áreas, y permite una mayor modificación de sus características iniciales, producto de una más prolongada interacción Océano-Atmósfera (flujo extendido) (Anexo I.2). Se consideran dos subtipos: Ila flujo extendido no perturbado y el IIb que corresponde a la influencia del sector de divergencia de las ondas u hondonadas.

3) Débil gradiente barométrico (GD).

TSS III. Esta situación sinóptica se relaciona con las configuraciones del campo bórico, que expresan una débil influencia anticiclónica o la existencia de hondonadas, vaguadas o sistemas de bajas en regiones adyacentes a las áreas en estudio cercanas, por lo que las isóbaras se muestran de una manera espaciada y predomina un débil gradiente barométrico (Anexo I.3).

4) Situaciones ciclónicas (SC).

TSS IV. Se relaciona con el desplazamiento cercano o sobre nuestro territorio de situaciones ciclónicas, tales como depresiones, perturbaciones o huracanes (Anexo I.4).

5) Zonas de convergencia en el flujo horizontal (ZC).

TSS V. En este tipo de situaciones sinópticas se agrupan las perturbaciones ondulatorias en el flujo básico de superficie, que influyen con sus áreas de convergencia asociadas sobre Cuba y zonas adyacentes (Anexo I.5). Existen dos subtipos: El "Va" que comprende ondas y hondonadas, que se generan y propagan en el flujo del este, y "Vb" que consideran extensiones meridionales de vaguadas de latitudes medias, líneas de cizalladura entre dos altas, bajas frías.

"Va": Ondas del Este: Las ondas del este se desplazan de este a oeste en el flujo de los alisios en el flanco sur de las altas presiones subtropicales, con una velocidad de 20 km/h y unas dimensiones de hasta 500 km de longitud. La explicación teórica de este fenómeno, ofrecida por el meteorólogo americano Herbert Riehl en su magistral Tropical Meteorology (1954); el mismo argumenta que, el aire que se encuentra detrás de la vaguada de baja presión y que se dirige hacia ella se desplaza hacia el Polo (Fuerza de Coriolis) al tiempo la curvatura se vuelve cada vez más ciclónica de manera que la altura

de la columna debe aumentar, es decir, el aire se contrae para poder mantener presión constante. La expansión vertical del aire se traduce en una convergencia en el flujo del aire, mientras en la parte delantera de la onda se observa divergencia, reaparece la inversión térmica del Alisios en altitud y la curvatura se vuelve anticiclónica tal y como se observa en la figura 3.4 (Riehl, 1954).

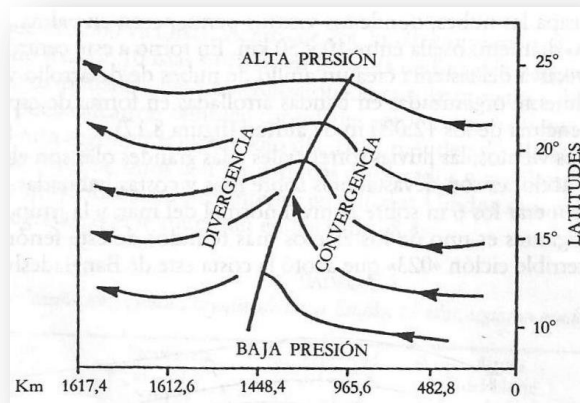


Figura 3. 4.- Estructura horizontal de una onda del Este.

#### 6) Bajas extratropicales (BE).

TSS VI. Se incluyen en este tipo las bajas extratropicales, que por regla general se originan en zonas troposféricas de intensa baroclinidad (frentes Ártico y Polar), resultantes de ondas de grandes dimensiones. Ocasionalmente tienen su origen en el Golfo de México o regiones cercanas a Cuba. Existen cuatro subtipos según la forma de influencia sobre nuestro territorio (Anexo I.6).

#### 7) Zonas frontales (ZF).

TSS VII. El frente o zona frontal es una región formada por una zona de discontinuidad o transición entre dos masas de aire diferentes. En ellas se produce un mezclamiento. Además de las temperaturas en un frente ocurre una rápida transición de la presión, los vientos y el contenido de humedad del aire. Se relaciona con los frentes fríos (Anexo I.7). A los efectos de la clasificación y en consideración con la estructura de los frentes. Se clasifican o dividen en cuatro subtipos: El frente frío clásico (VIIa), el frente frío reversino (VIIb), el frente casi estacionario (VIIc), y el frente disipándose (VIIId).

8) Anticiclones continentales migratorios (AM).

TSS VIII. Se asocia al anticiclón continental polar de poco espesor, y consideran su profundidad en el orden de 1,5 a 3,0 km, aunque en ocasiones puede ser superior (Anexo I.8). Se establecen tres subtipos: Cuando el centro del anticiclón continental se encuentra en la parte central del continente (VIIIa). El centro anticiclón se encuentra al sur de los Estados Unidos y el Golfo de México (VIIIb) y cuando se encuentra sobre el Océano Atlántico al este de los Estados Unidos (VIIIc).

9) Otras situaciones (indeterminadas)

TSS IX. No es posible su identificación.

### **3.3.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO (2014-2015).**

En la estación de monitoreo ubicada en La Mancha, Veracruz, además del monitoreo del depósito húmedo, monitorean las condiciones meteorológicas, la cual nos permite saber las características climáticas de la región.

La información recibida de la estación fue analizada y algunos resultados se muestran a continuación. Destacar que la información no se tiene completa para los dos años de estudio, debido a algunas fallas (ruptura de los sensores ocasionada por intemperismo en el ambiente marino e incluso eventos meteorológicos extremos que ocasionaron en más de una ocasión la inhabilitación completa de la estación con la pérdida de la información).

En la tabla 3.3 se muestran los valores promedios anuales obtenidos; en cuanto a la temperatura se manifiestan elevadas durante todo el año, los niveles de humedad igual son elevados. Mientras que la presión se encuentra alrededor de los niveles de atmosfera estándar (1013 mb), por otro lado, la precipitación supera los 900 mm, estas condiciones son debidas precisamente por las características del lugar.

Tabla 3. 3.- Promedio anual de algunas variables meteorológicas de La Mancha.

T. media (°C)	T. mín. media (°C)	T. máx. media (°C)	Humedad (%)	Presión (mb)	Precipitación (mm)
26.9	21.4	29.4	73.2	1013.3	942.0

En la figura 3.5 se muestra la marcha anual de la temperatura mínima, media y máxima. Presentándose en los meses de diciembre hasta marzo los promedios mínimos de temperatura, mientras que los valores promedios más alto se presentaron en el mes de junio.

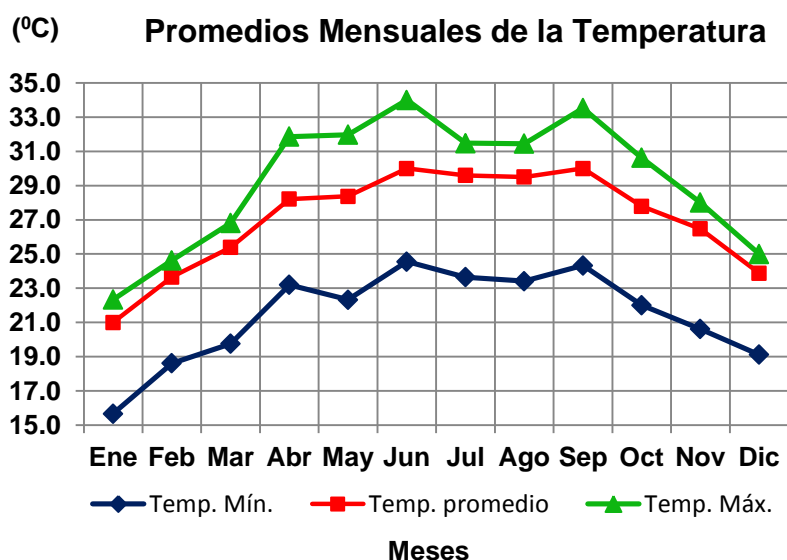


Figura 3. 5.- Promedios mensuales de la temperatura (°C) en La Mancha, Veracruz.

Por otro lado, el comportamiento de la presión atmosférica (figura 3.6), se presenta mayor en el período invernal con un máximo en enero, esto es debido a la entrada de los sistemas frontales y el traslado al Sur de las masas anticiclónicas continentales migratorias. Mientras que en la temporada de verano esta se encuentra más baja debido a la llegada de ondas del Este, así como, perturbaciones ciclónicas; con un mínimo en el mes de agosto.

El comportamiento de la humedad se mantiene elevado en casi todos los meses, presentando un mínimo en el mes de enero y un máximo en el mes de julio, (figura 3.7); correspondiendo este último a la temporada lluviosa.

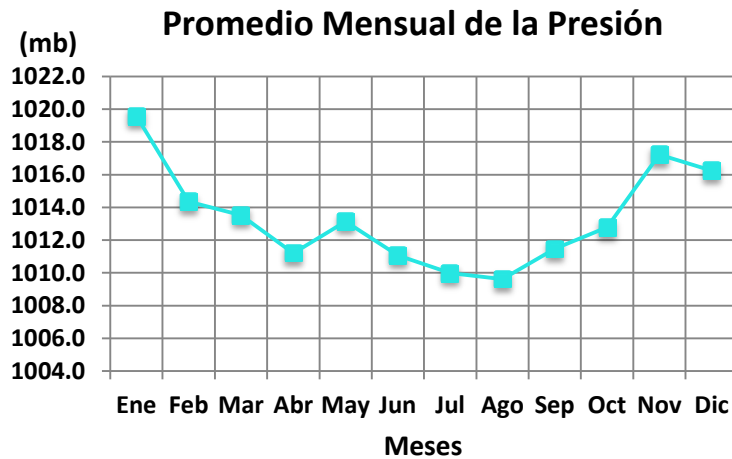


Figura 3. 6.- Promedio mensual de la presión (mb) en La Mancha, Veracruz.

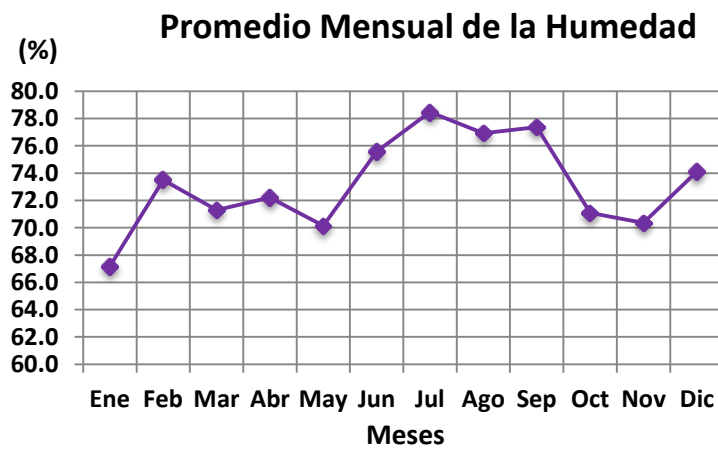


Figura 3. 7.- Promedio mensual de la humedad (%) en La Mancha, Veracruz.

Por otro lado, en la figura 3.8 muestra la marcha anual de la precipitación, en la cual se observa que en los meses de enero a abril y noviembre – diciembre se presentaron los valores más bajos de precipitación, ya para mayo hubo un incremento de las lluvias, precisamente en este mes comienzo de la temporada lluviosa hasta el mes de octubre, exhibiéndose en el mes de junio el volumen máximo.

El viento en la zona (figura 3.9 y 3.10) mantiene una dirección predominante del tercer cuadrante, con un promedio anual de componente Sureste, alcanzando velocidades superiores a 11 m/s y con un porcentaje de calmas del 44.05. El comportamiento en el primer trimestre del año es muy similar, donde para el mes de abril comienza a trasladarse el rumbo más para el Este, debido a la entrada de las Ondas del Este y las perturbaciones ciclónicas, ya para el

mes de septiembre comienza a incorporarse a su rumbo más predominante. En todos los meses se presenta alto porcentaje de calmas. Respecto a las velocidades del viento, desde marzo a agosto, se presentaron un poco más débiles comparado con el resto del año.

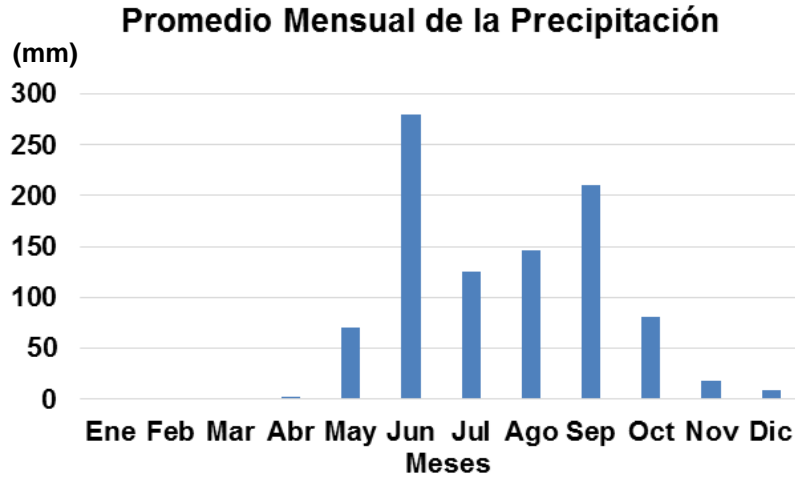


Figura 3. 8.- Promedio mensual de la precipitación (mm) en La Mancha, Veracruz.

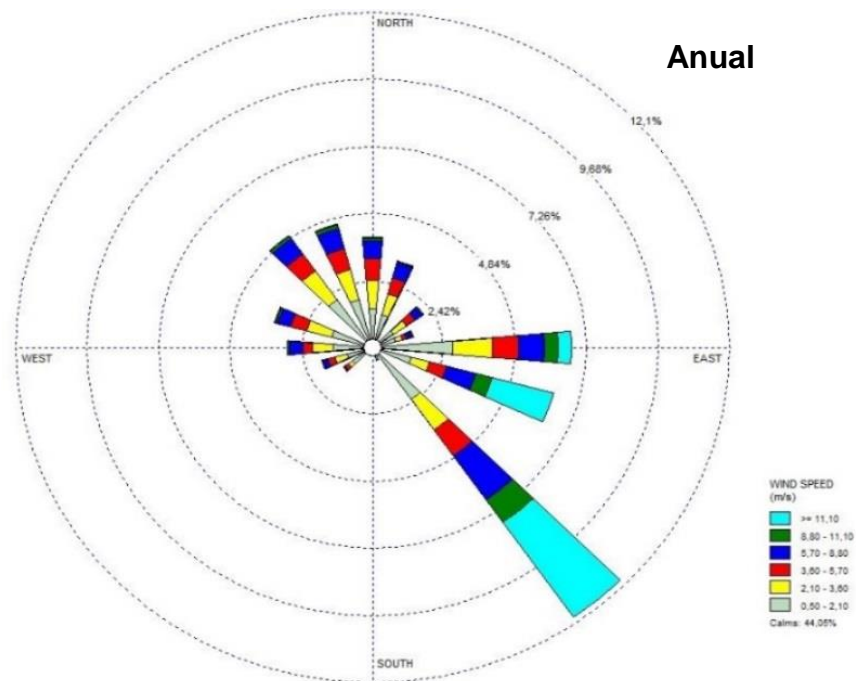
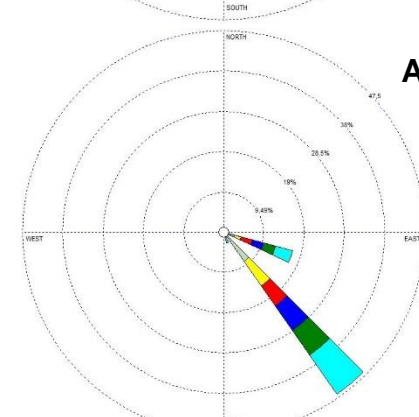
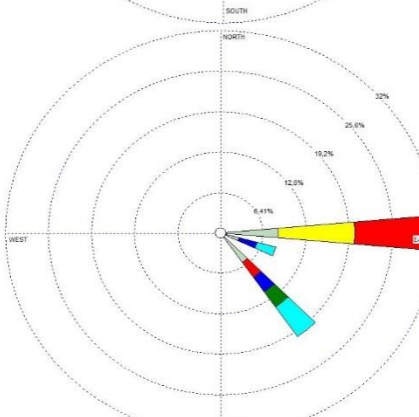
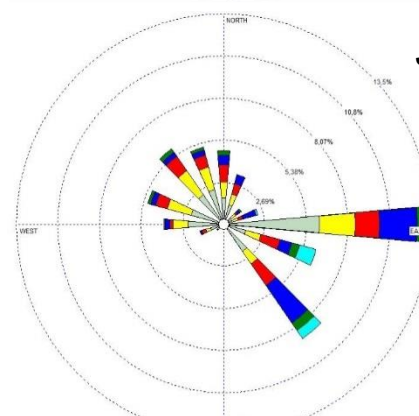
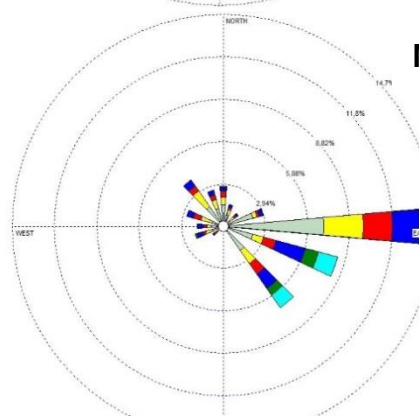
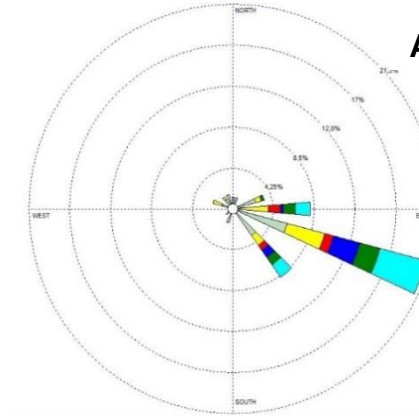
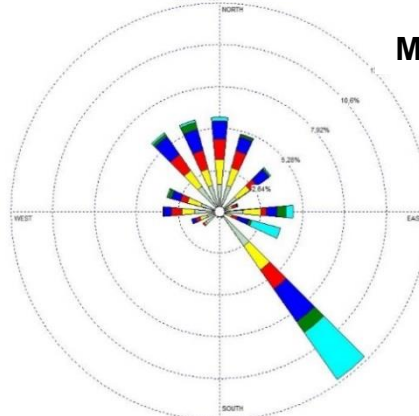
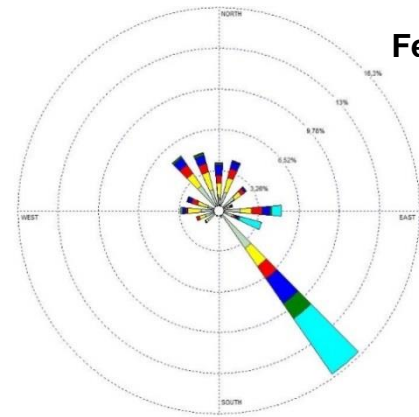
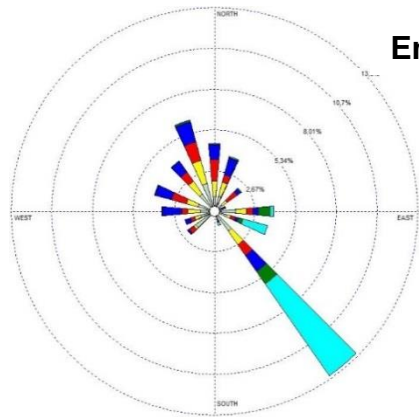


Figura 3. 9.- Rosa del viento anual para el año 2014 en La Mancha, Veracruz.





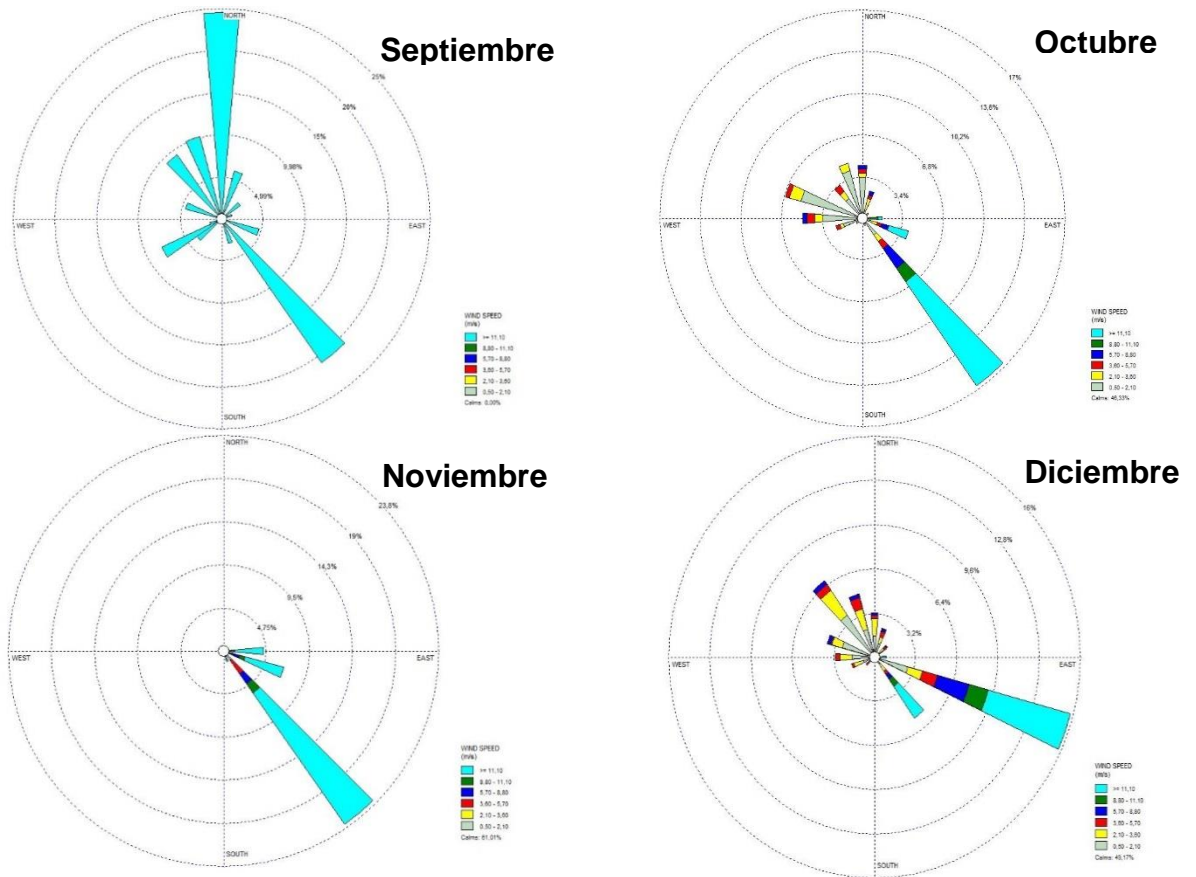


Figura 3. 10.- Rosas de los vientos mensuales del 2014 en La Mancha, Veracruz.

# **CAPITULO IV. METODOLOGÍA**

## **CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.**

Para llevar a cabo la selección del sitio hay que tener en cuenta los criterios de ubicación del colector y el pluviómetro, además de los requerimientos regionales y locales. Por otro lado, tener presente la logística del muestreo y la toma de muestras en campo (NADP, 2014).

### **4.1. SELECCIÓN DEL SITIO.**

Los lugares de control de las redes de muestreo suelen ser seleccionados para representar áreas fisiográficas principales, la agricultura, zonas acuáticas y forestales, región o eco región. Siempre que sea posible, los sitios de colección deben incluir locaciones donde existan cuerpos de agua en zonas marinas y costeras, así como otras regiones hidrológicas importantes, que puedan estar experimentando los efectos de la contaminación atmosférica.

Una consideración adicional está dada sobre la base del conocimiento disponible de las fuentes de emisión, formas prevalecientes del depósito, la frecuencia de las precipitaciones y otros procesos meteorológicos y atmosféricos que influyen en el depósito de sustancias en cada área.

Esta información de fondo permite la interpretación significativa de las variaciones espaciales y temporales en la química del depósito atmosférico tanto a nivel nacional como regional.

#### **4.1.1. CRITERIOS DE UBICACIÓN DEL COLECTOR Y EL PLUVIÓMETRO.**

##### **4.1.1.1. REQUERIMIENTOS REGIONALES.**

El colector debe estar ubicado en una zona que tipifique una región y donde el impacto de las fuentes puntuales o de área sea mínimo. El sitio elegido debe proporcionar una representación satisfactoria de las fuentes de depósito. Las fuentes específicas consideradas deben incluir operaciones industriales, así como áreas urbanas y sub-urbanas relacionadas con esas fuentes.

El sitio debe estar al menos a 10 km de distancia de plantas de energía eléctrica e industrias de manufactura. Si se tienen fuentes de emisión viento arriba del sitio la distancia se debe incrementar a 20 km. Este mismo criterio

aplica para áreas urbanas y sub-urbanas, cuya población es de alrededor de 10,000 habitantes. Para centros de población mayores de 75,000 habitantes, que se encuentran viento arriba del sitio de monitoreo, la distancia debe ser de mínimo 40 km (NADP, 2014).

#### **4.1.1.2. REQUERIMIENTOS LOCALES.**

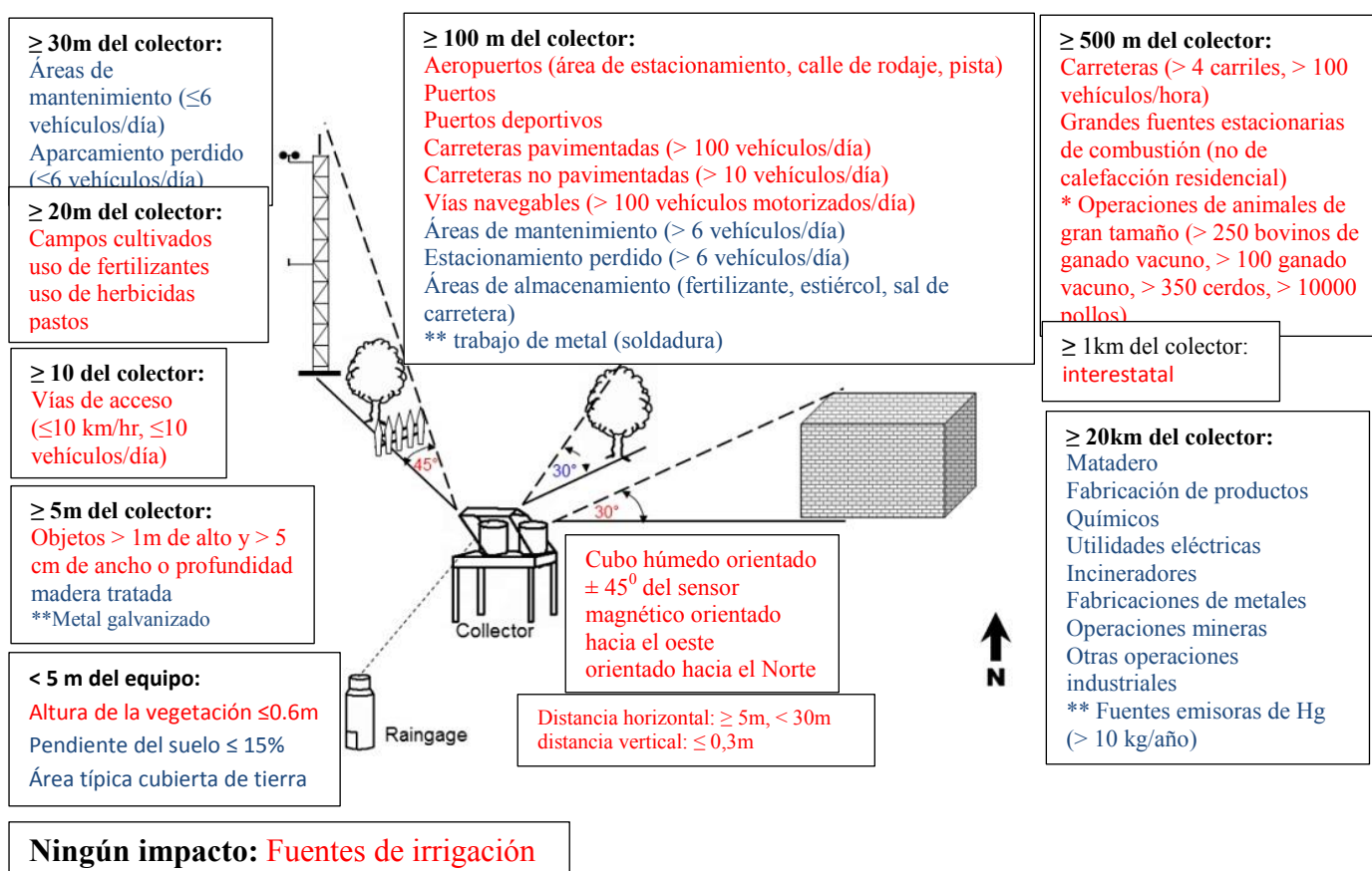
Las fuentes relacionadas con el transporte, operaciones agrícolas y almacenamiento de ciertos tipos de productos constituyen fuentes que dificultan la identificación y cuantificación, una vez que se ha cumplido con los requerimientos regionales. No deben de existir fuentes móviles tales como autopistas, caminos de terracería o ríos navegables dentro de una periferia de 100 m alrededor del sitio elegido para la ubicación de la estación de monitoreo. El tráfico local alrededor del sitio puede ser un problema, de modo que la densidad de tráfico vehicular y el tipo de vehículos que circulen en la zona, determinará si el sitio es recomendable o no para ser usado como estación. En caso de sitios rurales, la presencia de granjas debe estar al menos a 500 m de distancia de la estación, y animales de pastura o refugios de aves deben de estar al menos a 20 m de distancia del sitio (US-EPA, 1994).

Las fuentes locales, ya sean puntuales, lineales o de área influyen en la selección del sitio a elegir como representativo de una región a largo plazo. Se debe considerar también el cambio de uso de suelo en el futuro, por lo que es recomendable tener sitios alternos que puedan ser usados cuando las estaciones actuales en un futuro pierdan su representatividad en una región. EL sitio debe ser accesible durante todo el año, y en condiciones climáticas normales. Debe ser seguro contra el vandalismo y de animales, tanto salvajes como domésticos (por ejemplo, vacas).

Además, deberá cumplir en la medida de lo posible con lo siguiente:

- El colector debe ser instalado sobre tierras despejadas a nivel de 1 m de altura, en una base de aluminio. Si el lugar cuenta con vegetación natural, el colector debe situarse a una distancia libre mayor a 5 m del pluviómetro, pero menor de 30 m y con pendiente de  $\pm 15\%$ . Los cambios repentinos en la pendiente dentro de los 30 m del colector también deben ser evitados.

- La vegetación en el sitio debe ser mantenida a menos de 2 metros de altura. A fin de evitar la acumulación de polvo en las hojas y ramas.
- No debe existir ningún objeto o estructura sobre el colector. Se recomienda ubicar el colector a una distancia equivalente a dos veces la altura del objeto para que forme un ángulo de 30° o 45° con respecto a la horizontal y la altura del objeto.



**REGLAS  
 DIRECTRICES**

Figura 4. 1.- Criterios del NADP de ubicación del colector y pluviómetro, con respecto a objetos y estructuras.

Fuente: NADP, 2014.

**4.2. MUESTREO.**

Las técnicas de muestreo y la medición de parámetros fisicoquímicos, se realizan de acuerdo al NADP de los EUA. La figura 4.1 muestra el protocolo seguido para la colección de las muestras, cadena de custodia y envío al laboratorio central para su análisis.

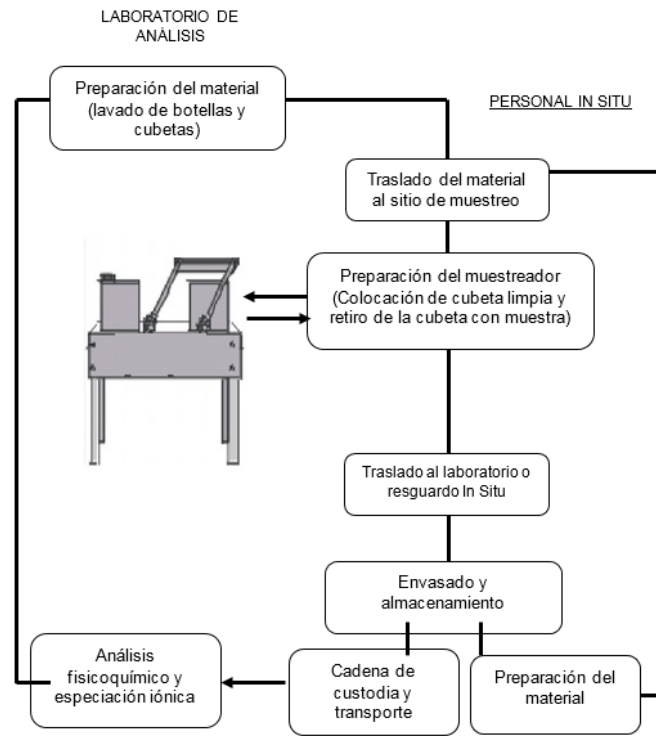


Figura 4. 2.- Protocolo de muestreo del depósito húmedo y seco.

La estación de muestreo está equipada con un pluviómetro de acuerdo con las especificaciones de la WMO (Allan, 2004) para obtener el volumen diario de la muestra.

El periodo de muestreo del depósito atmosférico húmedo se lleva a cabo diariamente durante todo el año, tanto en temporada de lluvia (junio a noviembre) como en temporada de seca (octubre a mayo).

El programa de muestreo se adoptó de la experiencia y de las recomendaciones indicadas en la literatura especializada para este tipo de estudios (US-EPA, 1994).

El sistema de muestreo del depósito húmedo y seco recomendado por la NADP, consiste en un dispositivo de dos cubetas, en las que se separa el depósito húmedo del seco (figura 4.3).



Figura 4. 3.- Sistema de muestreo del depósito atmosférico, marca Aerochem Metrics, Modelo 301.

Este sistema cuenta con un mecanismo automático de tapado y destapado de cada uno de las cubetas, para evitar el mezclado de las partículas con la lluvia. El activador de este dispositivo es un sensor que, al detectar la ocurrencia de lluvia, envía una señal, desplazando la tapa de la cubeta de colección del depósito húmedo, quedando en posición abierta; mientras que la cubeta de colección de depósito seco, permanece cerrada. Al finalizar el evento de lluvia, el sensor envía nuevamente otra señal a este mecanismo, para que ahora cubra la cubeta de depósito húmedo y se destape la cubeta de depósito seco, de tal forma que ahora ésta última quede en posición de muestreo de polvos.

#### **4.2.1. PROCEDIMIENTO DE LA TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO.**

Los recipientes de colección utilizados (botellas y cubetas) son fabricados con polietileno de alta densidad (Nalgene), material inerte a la composición química de la muestra, lo que evita contaminación durante el almacenamiento y permite su reuso. Para su acondicionamiento, tanto las botellas como las cubetas son perfectamente lavadas y enjuagadas con agua desionizada, para asegurar su limpieza, las botellas son llenadas con 200 mL de agua desionizada y se verifica su limpieza con la medición de la conductividad del agua contenida (menor a  $1.5 \mu\text{s}/\text{cm}$ ) (Allan, 2004). Posteriormente se embolsan, se transportan y almacenan en un sitio limpio y seco, preferentemente bajo refrigeración, hasta su utilización en el muestreo.

Para la colección de las muestras del depósito húmedo, se retira la cubeta, se registra el volumen de lluvia que marca el pluviómetro, la muestra en la cubeta se tapa, se cubre en bolsa y posteriormente se trasvasa en una botella previamente acondicionada, se etiqueta y se almacena en refrigeración a 4°C hasta su envío al laboratorio de la SCA-CCA-UNAM.

Una vez almacenada la muestra, el operador en campo lava la cubeta, usando guantes de nitrilo (sin talco) y agua desionizada en abundancia, sólo en caso que se requiera el uso de jabón (extran neutro) está permitido. Posteriormente, el exceso de agua se elimina por sacudimiento y la cubeta es colocada nuevamente en el muestreador.

Tanto en el muestreo en campo como en el laboratorio se lleva a cabo una cadena de custodia, que permiten realizar reportes escritos, donde se indica: fecha del evento, volumen de lluvia, fecha de inicio y final del muestreo, temperatura de la muestra, hora de colección de la muestra, enumeración de cada muestra, incluyendo número de muestras entregadas, así como observaciones (condiciones meteorológicas, o de algún evento extraordinario), con nombre y firma del responsable del muestreo.

La cadena de custodia comienza cuando se reciben los envases para las muestras, antes de su salida a campo y termina cuando se entregan las muestras colectadas al laboratorio de análisis de la SCA-CCA-UNAM. Dicho reporte es entregado por triplicado y firmado de recibido, por los operadores de campo, los responsables de transporte de la muestra y el encargado de laboratorio de la SCA-CCA-UNAM.

Con la finalidad de tener un registro secuencial de todos los muestreos también se lleva una bitácora de muestreo para el sitio.

#### **4.3. PROTOCOLO DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS.**

Una vez recibidas las muestras en el laboratorio y firmada la cadena de custodia se procede a filtrarlas y posteriormente realizar el análisis fisicoquímico.

La Figura 4.4 muestra el protocolo seguido por el laboratorio del SCA-CCA-UNAM para el análisis del depósito húmedo.



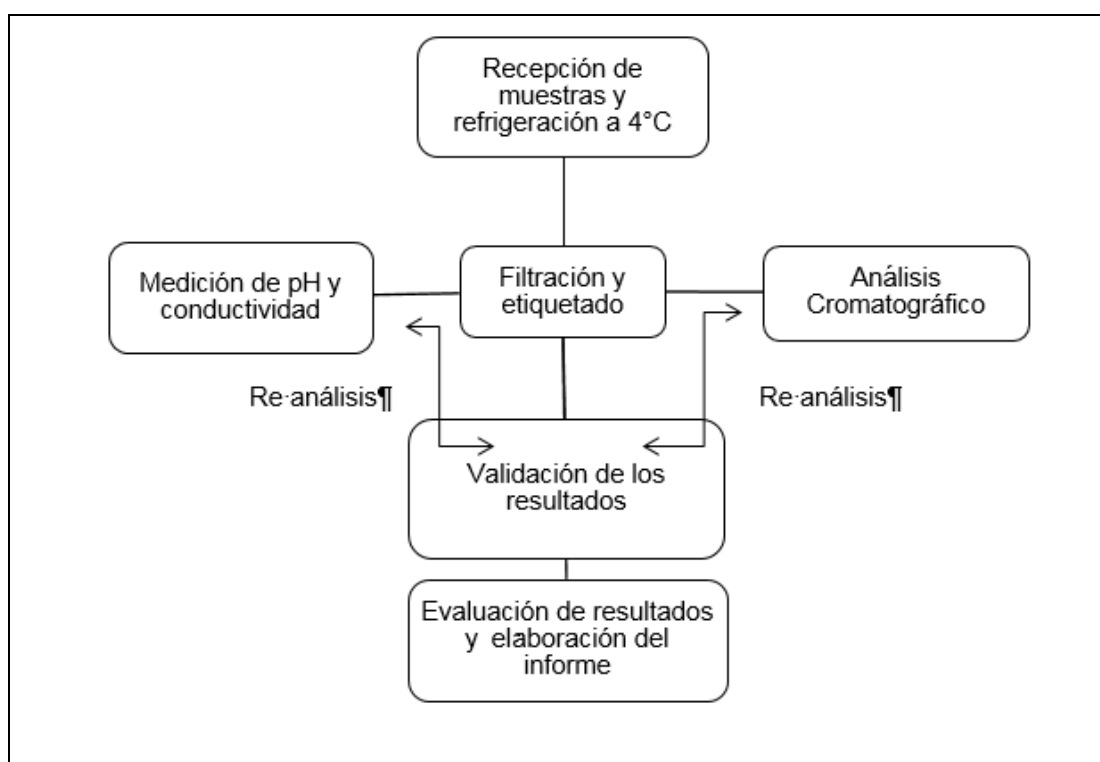


Figura 4. 4.- Protocolo para el análisis de muestras de depósito atmosférico húmedo.

Las muestras se filtran con membranas de 0.22  $\mu\text{m}$  de poro en un sistema de filtración al vacío, en un plazo no mayor a 9 días a partir de su colección, así como no mayor de un mes para su análisis (Krupa, 2002).

#### 4.3.1. MEDICIÓN DE pH (ACIDEZ Y ALCALINIDAD).

La medición de pH, se realiza a temperatura de 25  $^{\circ}\text{C}$ , con equipos previamente calibrados con disoluciones buffer de pH 4, 7 y 10, certificados y trazables por el National Institute of Standard and Technology (NIST). La incertidumbre asociada a esta medición es de  $\pm 0.02$  unidades de pH.

La determinación de alcalinidad es expresada en concentración de bicarbonato ( $\mu\text{eq/L}$  de  $\text{HCO}_3^-$ ), se realiza mediante el método de titulación de Gran; el cual permite determinar el punto de equivalencia de la valoración de un ácido débil con un ácido fuerte, considerando el volumen de dilución por el ácido agregado (Stumm and Morgan 1981, Gran 1950 y Gran 1952).

#### **4.3.2. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD.**

Para la determinación de conductividad los equipos se calibran con una disolución de KCl 700 y 23.8 certificada y trazable a NIST; todas las mediciones se realizan a 25°C. La incertidumbre asociada a esta medición es de  $\pm 1\%$   $\mu\text{s/cm}$ .

Para casos donde la muestra es menor a 60 ml, se recomienda hacer esta medición antes de la determinación de pH, ya que se puede usar la alícuota utilizada en conductividad para la determinación de pH, sin interferencia.

#### **4.3.3. DETERMINACIÓN DE IONES INORGÁNICOS.**

La técnica analítica instrumental para la identificación y cuantificación de los iones está basada en el Método EPA 300.1 (Hautman et. al, 1997), el cual utiliza como método de separación la Cromatografía de Intercambio Iónico (CI). El análisis de iones: cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) se realiza en equipos adaptados con detectores de conductividad y columnas de intercambio iónico.

Cada analito es identificado con base a su tiempo de retención y cuantificado mediante interpolación en una relación de estándar externo. Todos los estándares utilizados en la calibración son certificados y trazables a NIST ("National Institute of Standard Technology"), de alta pureza.

Los límites de detección en  $\mu\text{eq/L}$  son: 2.26, 1.77, 2.29, 1.74, 2.22, 1.28, 4.12 y 2.50 para  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , respectivamente.

Como parte del aseguramiento de calidad, se trabaja con curva estándar de mínimo cinco puntos y con coeficiente de correlación  $r^2=0.9977$ . Uno o más estándares de referencia se analizan posterior a la calibración para verificar el óptimo funcionamiento del equipo, adicionalmente, se analizan blancos de campo y de laboratorio para garantizar la limpieza del material y asegurar la no contaminación por manipulación, así como el análisis en réplica para determinar la precisión y exactitud de la medición.

#### 4.4. MODELOS DE TRAYECTORIAS DE RETROCESO.

Los modelos de trayectoria inversa o de retroceso son herramientas importantes para el estudio del transporte de contaminantes en la atmósfera. Los modelos atmosféricos simulan los procesos físicos y químicos de los contaminantes en el aire, que se emiten y reaccionan en la atmósfera. Se aplican regularmente para establecer la relación entre las regiones donde se localizan fuentes de emisión de contaminantes y las zonas receptoras de interés.

Por el método de integración del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, los modelos se clasifican como eulerianos y lagrangianos (INECC). Estos últimos, integran la posición de una partícula a partir de campos de viento mediante la resolución de la ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dX}{dt} = V(X(t), t) \quad (4.1)$$

Donde V es el vector de la velocidad, X corresponde a la posición y se realiza la simulación en un intervalo de tiempo (t) sobre una región delimitada por un par de puntos definidos, dados por latitudes y longitudes, a un delta de presión ( $\Delta P$ ) y ciertas condiciones meteorológicas dadas.

Los modelos lagrangianos se dividen en modelos de trayectoria y modelos gaussianos, de acuerdo con la geometría del sistema de modelación, siendo el primero de ellos el que se acopla a las necesidades de este trabajo (Stohl et al., 2005).

Los modelos lagrangianos estudian el transporte de una parcela de aire desde su origen hasta el lugar en que se deposita. Estos modelos toman en cuenta además de las emisiones, el depósito seco, las transformaciones químicas y el depósito húmedo. Estas últimas dos características son representadas mediante una razón de cambio de primer orden, es decir, las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de este tipo de modelos son lineales. Esto en particular constituye el punto débil de estos modelos, ya que en la realidad, el transporte en la atmósfera se da de manera no lineal (The NAPAP Office of the Director, 1990).

Con estos modelos se observa el desplazamiento de las masas de aire, el cual tiene como fin un uso en meteorología. Puede extrapolarse al campo de contaminación ambiental si se supone que dentro de esas masas de aire también se transportan los contaminantes de interés emitidos por las actividades humanas. Un ejemplo de este modelo es el Hysplit (Draxler, 2010).

#### **4.4.1. HYSPLIT.**

El modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT trayectoria integrada lagrangiano de partícula única híbrida) es un servicio de Air Resources Laboratory (ARL, Laboratorio de Recursos Atmosféricos) de la National Atmospheric and Oceanic Administration (NOAA, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos). El mismo modela trayectorias progresivas o regresivas de parcelas de aire simples y hasta simulaciones complejas de depósito y dispersión, ya sea de una partícula o de una masa de aire.

El modelo usa datos meteorológicos registrados en una base de datos, obtenidos de la National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos (NOAA). Este modelo tiene una resolución de 1° x 1° en la horizontal a escala global.

Los cálculos de trayectoria muestran la dirección general, pero no son los suficientemente precisos para identificar fuentes específicas puntuales. La razón de dispersión se calcula a partir del perfil de difusión vertical, la cizalladura y la deformación horizontal del campo de viento.

El cálculo de una trayectoria particular se obtiene cuando se estima la posición a partir de la velocidad media ( $v$ ) en la posición inicial ( $X_0$ ) y la posición ( $X$ ) luego de cierto tiempo ( $t$ ) y con cierta aceleración ( $a$ ):

$$X = X_0 + v(t) + 1/2at^2 \quad (4.2)$$

El HYSPLIT puede ser usado libremente desde la red, y los resultados se obtienen en tres dimensiones. La escala vertical puede ser mostrada en milibares o en metros.

Como casi todos los datos que se necesitan están archivados por la NOAA, el uso de este modelo es simple, y es actualizado constantemente (Draxler, 2010). La información requerida es básicamente del sitio como la latitud, longitud, altitud y fecha y hora del evento y así como determinar si la trayectoria es hacia adelante o hacia atrás.

Las características del modelo lo hacen apropiado para la zona de estudio, ya que no se cuenta con una topografía accidentada como lo sería la parte central de la República Mexicana.

La incertidumbre, que proporciona el modelo es la distancia recorrida por lo cual, a distancias mayores, mayor es la incertidumbre que se tiene.

#### **4.5. APLICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ESTUDIOS ANTERIORES DE LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO.**

La incorporación de trayectorias de retroceso a la evaluación de la lluvia ácida se llevó a cabo en un estudio realizado en la SCA-CCA-UNAM donde se determinaron las consecuencias que el depósito ácido causaba al material de construcción de las pirámides de la zona arqueológica de El Tajín (Bravo et al., 2006; Kahl, 2006). El modelo utilizado para la realización de las trayectorias fue el HYSPLIT. Se clasificaron las trayectorias en dos tipos de eventos, aquellos que presentaron valores de pH mayores a 5.6 y menor a dicho valor, prevaleciendo la cantidad de eventos ácidos.

Una vez examinadas las trayectorias de las parcelas, que dieron origen a esos eventos, se observó que no hay una tendencia definida respecto al origen de los precursores. Esto nos lleva a suponer, que las fuentes regionales podrían ejercer una mayor atribución en la acidificación de la lluvia.

Más adelante en un estudio más detallado para determinar las características del transporte atmosférico hacia El Tajín (Kahl et al., 2007), se empleó una

gran cantidad de fuentes de información meteorológica. Incluyeron campos globales de re-análisis, análisis de trayectorias y mediciones de viento local. Como en el caso anterior el modelo utilizado en este estudio fue el HYSPLIT a un tiempo de recorrido de 120 horas. Donde se concluyó que en la zona predominan vientos de componente Este y Norte, aunque no se encontró una relación directa entre las rutas de transporte de la lluvia y su acidez.

Además, este modelo se ha utilizado para obtener las trayectorias del aire durante los meses que correspondieron a las temporadas de lluvia en los años 1997, 1998 y 1999. De esta forma se analizó la relación de la procedencia del aire con la composición química del agua de lluvia presentes en dos estaciones una localizada en una zona urbana y la otra en una zona rural ambas dentro del Estado de México. En los años 2001 y 2002, se estudiaron diferentes especies químicas presentes en el agua de lluvia de una zona rural, utilizando nuevamente el modelo HYSPLIT para determinar la procedencia de los elementos encontrados (Báez et al., 1997).

Una vez más en las que se ha recurrido al análisis de trayectorias, fue en la parte sur del Golfo de México en el año 2003, en el cuarto crucero de investigación (Bravo et al., 2006). Este estudio se llevó a cabo del 3 de Septiembre al 5 de Octubre en el buque oceanográfico "Justo Sierra", por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM y la SCA-CCA-UNAM.

La SCA-CCA-UNAM, fue responsable de la evaluación de la calidad del aire, y la evaluación del depósito húmedo asociado a la contaminación atmosférica el Golfo de México, para lo cual se colectaron 12 muestras de lluvia de las cuales se obtuvo su trayectoria a través del modelo a un tiempo de 72 horas antes del evento. Estas trayectorias fueron utilizadas para determinar la ruta del transporte de los contaminantes e identificar las fuentes potenciales de estas sustancias. Se utilizaron tres niveles de referencia, 500, 1000 y 1500 m, correspondientes a las altitudes a las que las nubes precipitan normalmente. Cabe expresar que una trayectoria es representativa si la tendencia es la misma en los tres niveles. Si difieren mucho entre sí la confianza que se puede tener en ellas disminuye. Para este estudio en particular, la dirección

predominante de las trayectorias fue del Este, ya que durante la temporada que se realizó el estudio imperaban los vientos alisios.

Otra aplicación fue para determinar la ruta seguida por las masas de aire que dieron origen al evento de lluvia ácida en El Tajín y en la Estación de Ecología Costera El Morro de La Mancha (Marín, 2009). Se identificaron las fuentes más probables causantes de la acidificación del agua de lluvia muestreada en los sitios de estudio. Las fuentes identificadas se ubicaron en la región de Altamira-Cd. Madero, en Tamaulipas; la zona Poza Rica-Tuxpan, en el Estado de Veracruz; y la Sonda de Campeche, en el Golfo de México.

#### **4.6. APLICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES.**

Una imagen satelital es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los satélites de observación de la Tierra obtienen datos en el menor tiempo posible para dar seguimiento a la evolución de un fenómeno (Carretero et al., 2001).

Los nuevos satélites comerciales ofrecen características como resolución (tamaño cuadrado representado por un pixel), precisión posicional (la variación entre la posición de un objeto en la imagen y su posición verdadera) y tiempo de entrega revolucionaria. Esto aumenta la variedad de posibles aplicaciones en meteorología, que permite realizar el seguimiento de contaminantes en la atmósfera, tormentas y demás efectos de tipo climático.

Los satélites de observación de la Tierra obtienen datos en el menor tiempo posible para dar seguimiento a la evolución de un fenómeno. Nunca antes se tuvo tanta información acerca de la evolución de la superficie terrestre. Lo más sorprendente es la relativa rapidez para recibir los datos en tiempo real, en un centro de control, en la oficina o incluso en la casa (Carretero et al., 2001).

##### **4.6.1. IMÁGENES INFRARROJAS.**

Según Carretero et al., (2001), una imagen infrarroja (IR) es aquella que toma un satélite en el llamado canal o banda infrarroja. Las longitudes de onda IR, a

las cuales son sensibles los sensores u "ojos" del satélite, son del orden de los 10-12 micrómetros. En dicha zona del espectro electromagnético el "ojo" IR del satélite está detectando estructuras nubosas, terrestres o marítimas que emiten señales en dichas longitudes de onda.

El canal IR se basa en un principio básico de la física nos dice que:

"Todo cuerpo que se encuentre a una temperatura determinada emite una radiación electromagnética que depende de dicha temperatura de emisión. A esta temperatura se le denomina temperatura de brillo del cuerpo emisor,  $T_b$ ."

"A mayor  $T_b$ , mayor es la energía emitida por el cuerpo emisor y mayor es el intervalo de longitudes de onda de emisión" (Carretero et al., 2001).

La banda IR más común para los satélites meteorológicos está ubicada en la ventana de los 10 - 12.5  $\mu\text{m}$ . En esta ventana la atmósfera terrestre es relativamente transparente a la radiación emitida por la superficie del planeta. Las imágenes IR indican la temperatura de las superficies radiantes. Las nubes aparecen en general, más blancas que la superficie del planeta debido a su menor temperatura (Carretero et al., 2001).

Según Velasco et al., (2001), si se supone que la temperatura en la tropósfera decrece a medida que nos elevamos tendremos que: las nubes más altas (cirros y tormentas bien desarrolladas) poseerán topes más fríos que las nubes más bajas (estratos y nieblas). De aquí se saca otra consecuencia importantísima:

Las imágenes en IR dan indirectamente una estimación de la altura relativa de las estructuras nubosas.

Las nubes más blancas estarán más altas que las nubes más grises y éstas, a su vez, más altas que las superficies emisoras más cálidas y oscuras.



# **CAPITULO V. RESULTADOS**

## **CAPÍTULO V: RESULTADOS.**

### **5.1. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO.**

Cada una de las etapas realizadas como, la selección del sitio de muestreo, el acondicionamiento de los equipos de medición, la recolección de muestras, medición de parámetros y validación de la información se desarrollaron conforme a los lineamientos establecidos en el Programa de Aseguramiento y Control de Calidad, de la US-EPA (US-EPA 1994) y el National Atmospheric Deposition Program (NADP, 2004).

En la tabla 5.1 se muestran la cantidad total de muestras colectadas, analizadas y validadas. Constituyendo un total de 130 muestras para la estación en los dos años de muestreo.

Tabla 5. 1.- Resumen de la cantidad de muestras analizadas y validadas en La Mancha, Veracruz.

<b>Sitio</b>	<b>Año</b>	<b>Muestras recibidas</b>	<b>Muestras analizadas</b>	<b>Muestras validadas</b>	<b>pH&lt;5.6</b>	<b>pH&gt;5.6</b>
<b>La Mancha</b>	2014	65	65	65	46	19
	2015	65	65	62	32	30
<b>Total</b>	<b>2014-2015</b>	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>127</b>	<b>78 (61.4 %)</b>	<b>49 (38.6 %)</b>

### **5.2. ANÁLISIS DEL pH Y CONDUCTIVIDAD EN EL AGUA DE LLUVIA.**

En la figura 5.1 se muestran los eventos de lluvia en los dos años de estudio, en la misma se presenta el pH para cada muestra colectada (65 casos para el año 2014 y 62 para el 2015), donde se puede apreciar los eventos de lluvia ácida ocurridos, que no son más que los que se encuentran por debajo de la línea con valor de 5.6.

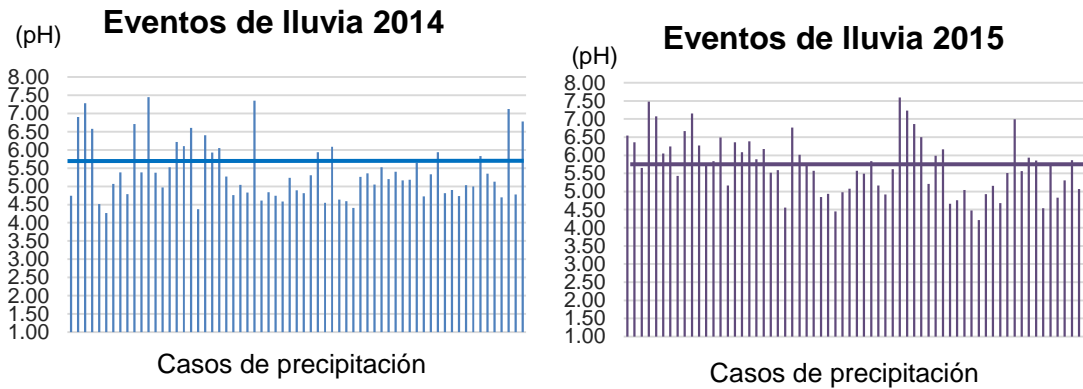


Figura 5. 1.- Muestras colectadas de depósito húmedo atmosférico (20014-20015) en La Mancha, Veracruz.

La diferencia que existe entre la lluvia ácida a la no ácida es sin duda su pH. En la tabla 5.1 se observa que más del 50% de los eventos de precipitación tienen un pH por debajo de 5.6; lo cual da una idea de la acidez del total de las muestras. Además, en la figura 5.2 se observa el gráfico de caja donde para La Mancha en el año 2014 cerca del 70% de los datos se encontraron por debajo del valor de 5; mientras que en el 2015 cerca del 49%.

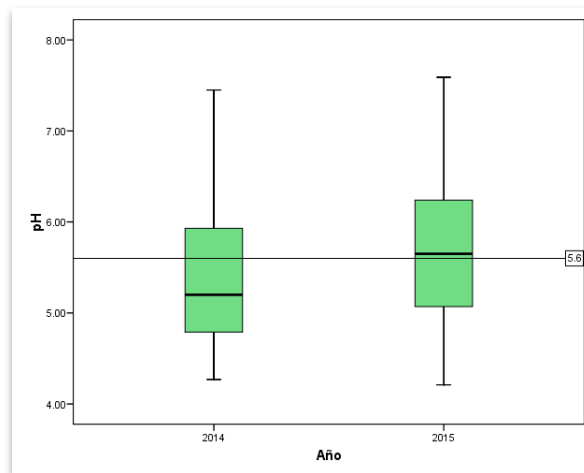


Figura 5. 2.- Gráfico de cajas de los valores de pH para La Mancha, Veracruz.

Los valores de pH, así como de conductividad, aniones y cationes, de cada una de las muestras se describen en el Anexo III.

De los valores individuales de pH se obtuvieron los promedios ponderados tanto mensuales como anuales. Esta ponderación se realizó con los valores de precipitación de cada uno de los eventos.

En la figura 5.3 se observan los promedios anuales ponderados de pH para los años de estudio. El promedio más bajo corresponde al año 2014, con un valor de 5.02, mientras que para el año 2015 se presentó un valor de 5.22 unidades.

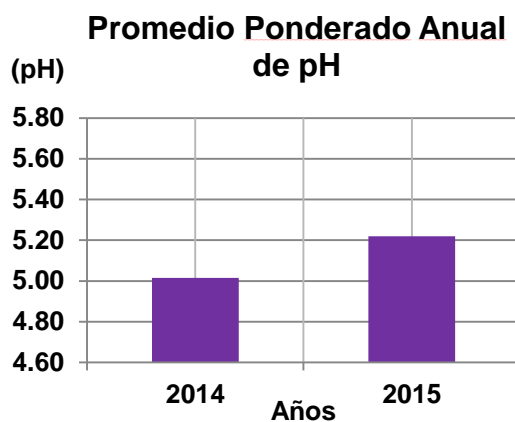


Figura 5. 3.- Promedio ponderado anual de pH en 2014-2015 en La Mancha, Veracruz.

Con la obtención de los promedios ponderados anuales para la zona de estudio se pudo hacer una comparación con algunas estaciones localizadas en los Estados Unidos en la costa del Golfo de México (figura 5.4), dichas estaciones pertenecen a la red de monitoreo del NADP, donde se muestra una semejanza entre los valores de pH.

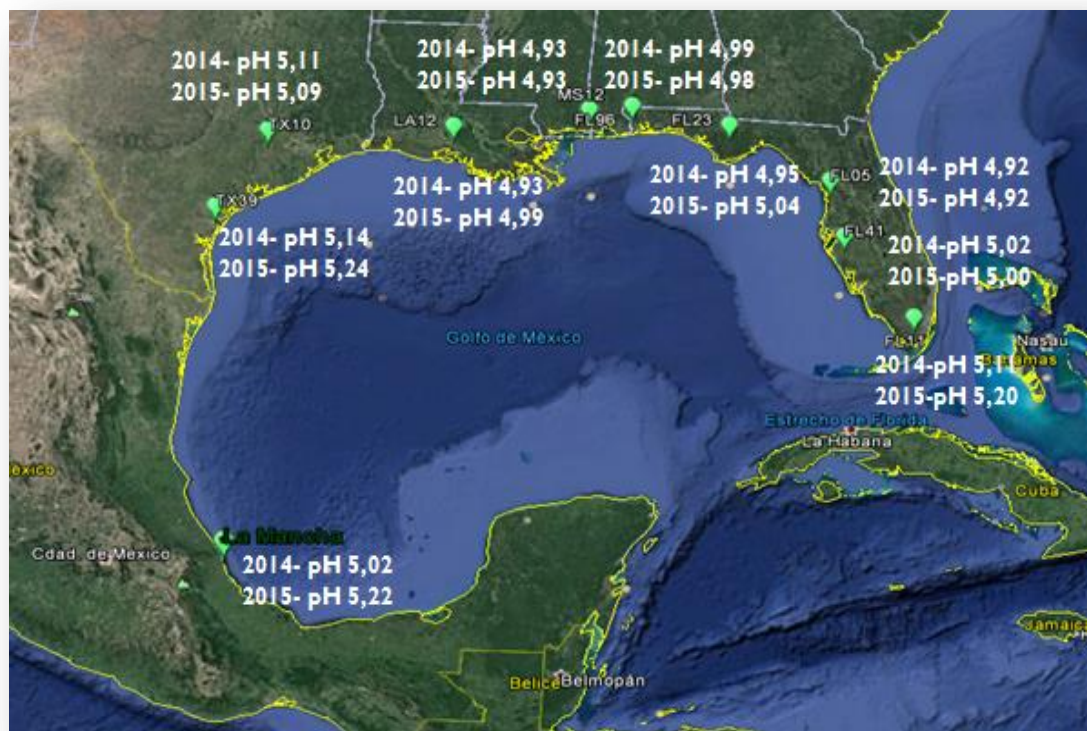


Figura 5. 4.- Promedios ponderados anuales de pH para los años 2014 y 2015 en el Golfo de México.

En el período 2003-2015 el valor más bajo ponderado de pH correspondió al año 2007, con valores de 4.78. Los resultados de las muestras de año 2011 no se presentaron por insuficiencia de datos (figura 5.5). En la tabla 5.2 se muestran la cantidad total de muestras recibidas y validadas en todos estos años.

Tabla 5. 2.- Resumen de la cantidad de muestras analizadas y validadas para el período 2003-2015 en La Mancha, Veracruz.

Sitio	Año	Muestras recibidas	Muestras validadas	pH<5.6	% muestras ácidas
La Mancha	2003	72	57	60	89.47
	2004	57	37	47	94.59
	2005	74	64	68	93.75
	2006	55	51	45	84.31
	2007	64	45	44	73.33
	2008	83	64	70	92.19
	2009	71	55	61	85.45
	2010	75	63	55	87.30
	2012	67	54	54	90.74
	2013	75	65	46	66.15
	2014	65	65	46	73.58
	2015	65	62	32	61.40

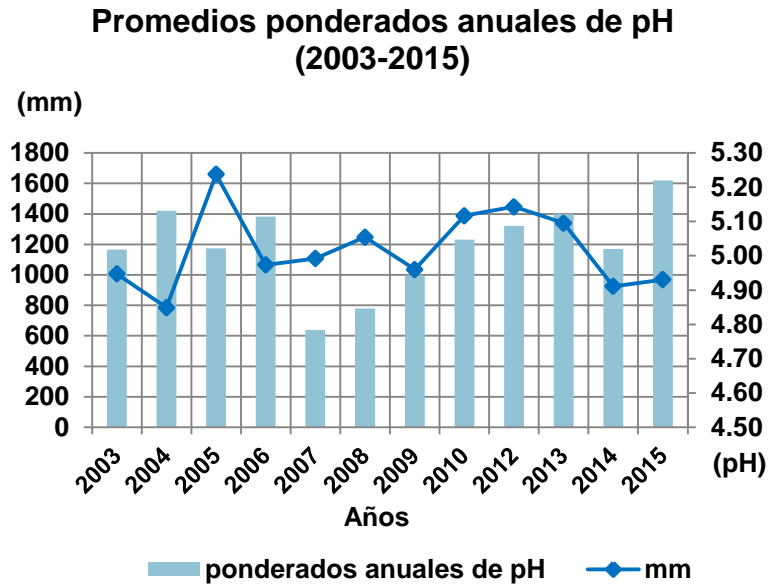


Figura 5. 5.- Promedios ponderados anuales de pH y precipitación para el período 2003-2015 en La Mancha, Veracruz.

El bajo valor de pH para el año 2007 pudo estar relacionado con el incremento de la cosecha de la zafra de caña, en ese año también se realizó la pavimentación de la carretera de acceso al sitio.

Con el objetivo de hacer un análisis del comportamiento a lo largo del tiempo, en el cual se ha estado monitoreando el sitio de estudio. Se recurrió a utilizar los promedios ponderados mensuales de los años 2003-2015. De esta forma se pudo apreciar cómo ha variado la acidez del agua de lluvia y se corroboró la existencia de períodos en los cuales el valor de pH aumenta o disminuye de manera apreciable.

En la figura 5.6 se tienen los promedios ponderados mensuales de pH para el periodo 2003-2015 en La Mancha, en esta se puede observar que en la mayoría de los casos los valores de pH son mayores en el período seco que en el período lluvioso, presentándose el valor más bajo para el mes de octubre con un valor de 4.9. Alrededor de este mes comienza los cambios de transición de un período a otro.

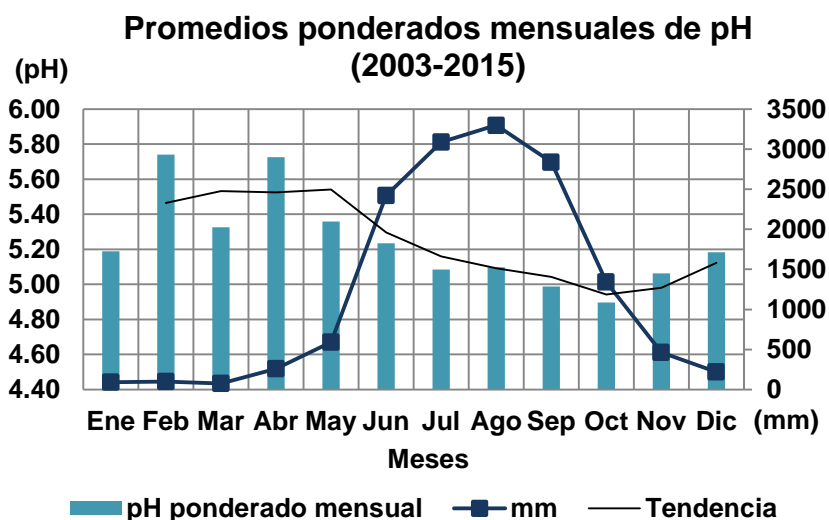


Figura 5. 6.- Promedios ponderados mensuales de pH y precipitación para el período 2003-2015 en La Mancha, Veracruz.

Se puede afirmar con base en esta figura, que el valor promedio ponderados mensuales se encuentra en los 5.24.

Para los años 2014 y 2015 se confeccionó el mismo gráfico, pero en conjunto con la precipitación mensual mostrados en las figuras 5.7 y 5.8. Como se exhibe para el año 2014 los mm de precipitación no jugaron un papel importante en la existencia de lluvia ácida, ya que en casi todos los meses se presentó este evento con grandes o pocos volúmenes de precipitación, presentándose el mes de mayo de menor ponderación mensual de pH con un valor de 4.69. Mientras que para el año 2015 en el período lluvioso en el mes que se presentó menor precipitación fue en octubre y el menor promedio de pH correspondió a septiembre, con un valor de 4.71.

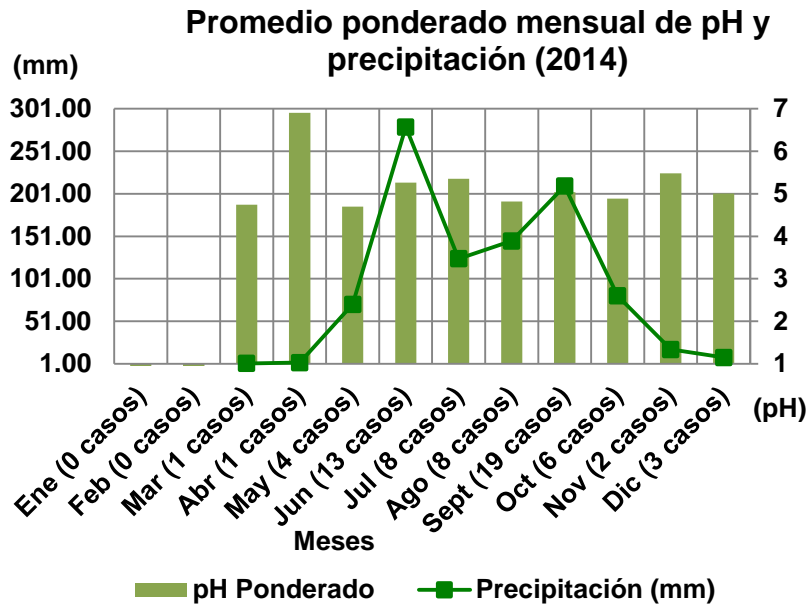


Figura 5. 7.- Promedios ponderados mensuales de pH y precipitación mensual para el año 2014 en La Mancha, Veracruz.

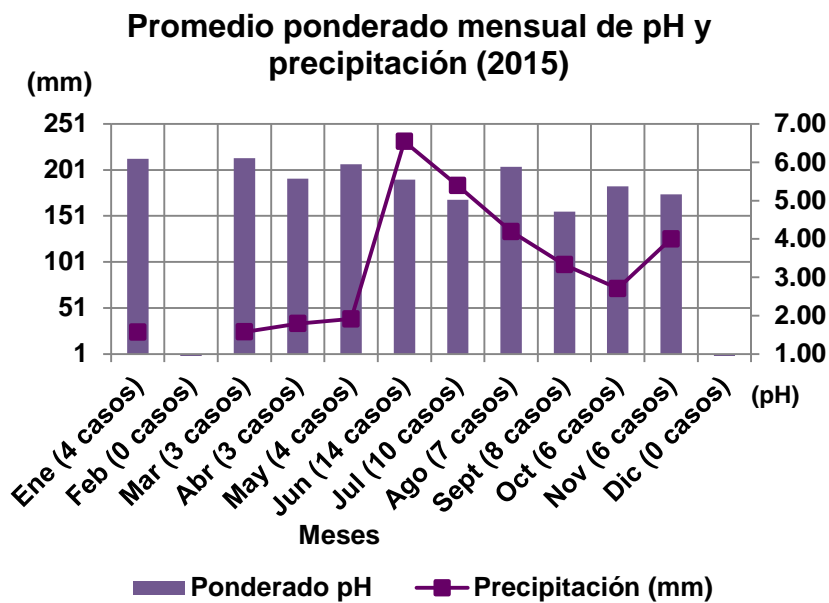


Figura 5. 8.- Promedios ponderados mensuales de pH y precipitación mensual para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.

En lo que se refiere a conductividad, en la figura 5.9 se muestra los promedios ponderados anuales de conductividad para los años 2014 y 2015. No se presentaron grandes variaciones de un año a otro, pero así y todo el valor más alto corresponde para el año 2014, con una cifra de 16.03  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .



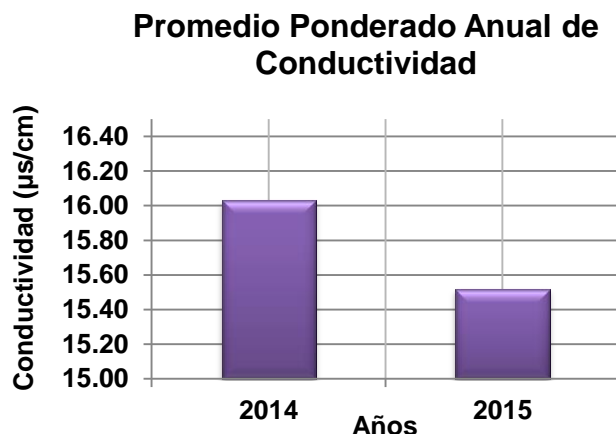


Figura 5. 9.- Promedio ponderado anual de conductividad (2014-2015) en La Mancha, Veracruz.

### 5.3. ANÁLISIS DE ANIONES Y CATIONES.

Los cationes analizados en el presente trabajo fueron: sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio; mientras los aniones fueron: cloruro, nitrato y sulfato. A continuación, se muestra el análisis del contenido de estos iones en el agua de lluvia obtenida en el sitio de estudio.

#### 5.3.1. CONCENTRACIÓN DE ANIONES Y CATIONES EN EL AGUA DE LLUVIA.

Se realizó un análisis químico a cada una de las muestras, y se obtuvo un ponderado anual de la concentración de aniones y cationes (tabla 5.3). Esto nos permite observar las especies presentes en el agua de lluvia, siendo de principal interés los iones nitratos y sulfatos, por ser los responsables de la lluvia ácida.

Tabla 5. 3.- Resultados de la concentración ponderada anual de aniones y cationes en La Mancha (2014-2015).

Años	Aniones (µeq/L)			Cationes (µeq/L)				
	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
<b>2014</b>	61.91	3.32	3.65	58.09	7.91	6.05	19.53	33.57
<b>2015</b>	66.45	8.83	3.48	63.71	7.26	4.24	16.23	30.50

Un aspecto importante de tomar en cuenta, es la precipitación total anual, donde el año con mayor volumen de precipitación fue el 2015, con 968,50 mm.

Los aniones que aportan mayor acidéz al depósito atmosférico húmedo, son sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Este último anión proviene en su mayoría del mar, cuya composición química está predominada por cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), aunque puede ser emitido por fuentes antropogénicas en forma de  $\text{HCl}$  en ciertos procesos de combustión. Generalmente en condiciones continentales se puede despreciar. Sin embargo, La Mancha tiene un gran aporte de  $\text{Cl}^-$ , acarreado por los vientos provenientes del Este.

Por otro lado, la formación de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) se debe primordialmente a la oxidación del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) proveniente de fuentes antropogénicas. Este aerosol constituye la mayor fuente de acidez durante la precipitación. Además, el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puede ser formado en la atmósfera cuando se oxida el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), proveniente de la degradación de compuestos orgánicos que contienen azufre desde el océano, las costas o los suelos (Saiz et al., 2007).

Como se esperaba, debido a los datos de pH obtenidos, la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  disminuyen en los años, presentándose el ión nitrato con los menores valores mientras que el ión cloruro con los mayores valores.

Además, se le realizó el ponderado mensual a los iones para tener una mejor interpretación de los mismos, en las figuras 5.10 y 5.11 se muestran las mismas.

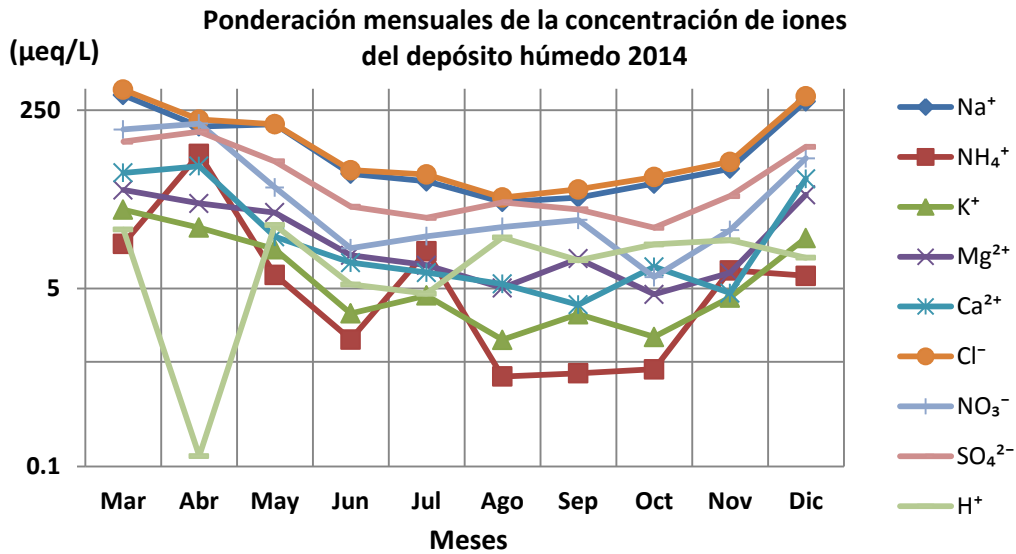


Figura 5. 10.- Ponderados mensuales de los aniones y cationes para el 2014 en La Mancha.

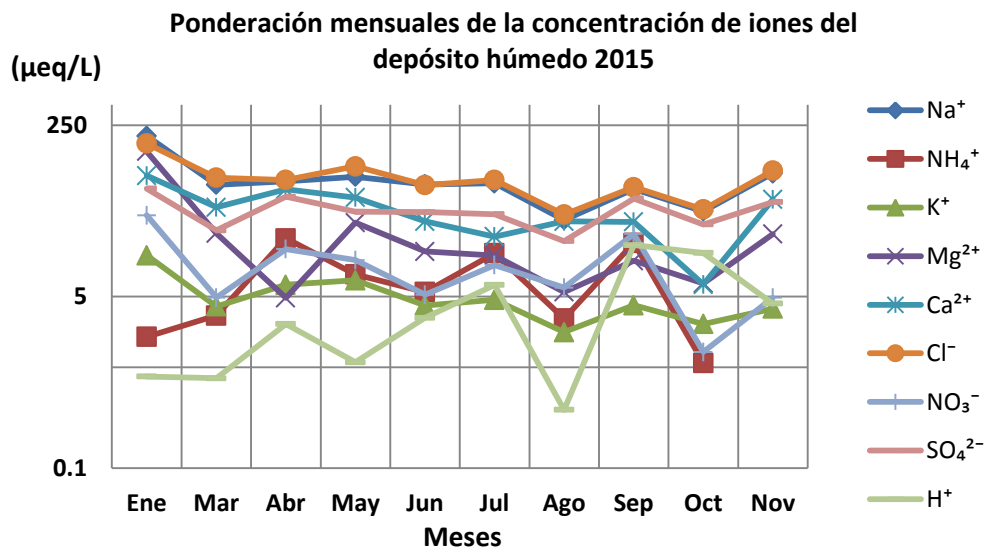


Figura 5. 11.- Ponderados mensuales de los aniones y cationes para el 2015 en La Mancha.

En los dos años de estudio las concentraciones más elevadas correspondieron al ión cloruro, seguido del sodio y el sulfato. Las mayores concentraciones se presentaron en el período invernal, con los máximos en el mes de marzo de 2014 y enero de 2015. Los valores para el año 2015 son más pequeños respecto al 2014. En los dos años se mostró una buena relación entre el cloruro y el sodio, mientras el comportamiento del sulfato y nitrato resulta bastante similar.

Asimismo, se realizó la relación  $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$  (figura 5.12), la misma es un indicador de la eficiencia de la reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . Esta proporción se presenta en la tabla 5.4 para el sitio de muestreo y algunas estaciones seleccionadas de la NADP en Estados Unidos a lo largo de la costa del Golfo de México.

Tabla 5. 4.- Relación sulfato/nitrato para los años 2014 y 2015 en el Golfo de México.

Años	Estaciones								
	FL23	FL05	FL41	FL11	FL96	TX10	MS12	LA12	LM
2014	1.61	1.30	1.14	1.31	1.31	1.63	1.46	1.23	4.46
2015	1.29	1.17	1.03	1.48	1.16	1.95	1.08	1.41	4.90

El valor de la relación  $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$  encontrado para la zona de estudio fue de 4.90 para el año 2015, lo que indica la importancia de las fuentes de emisión de  $\text{SO}_x$ , siendo el valor más alto respecto a los otros sitios de muestreo del NADP en el Golfo de México cuyas relaciones estuvieron entre 1.03 y 1.95.

Para La Mancha prevalecieron dos casos en el año 2015; uno de ellos presenta lluvia ácida y el otro no. Para el año 2014 el promedio anual fue de 1.89 y en el 2015 de 4.88, en la tabla 5.5 se pueden observar sus características.

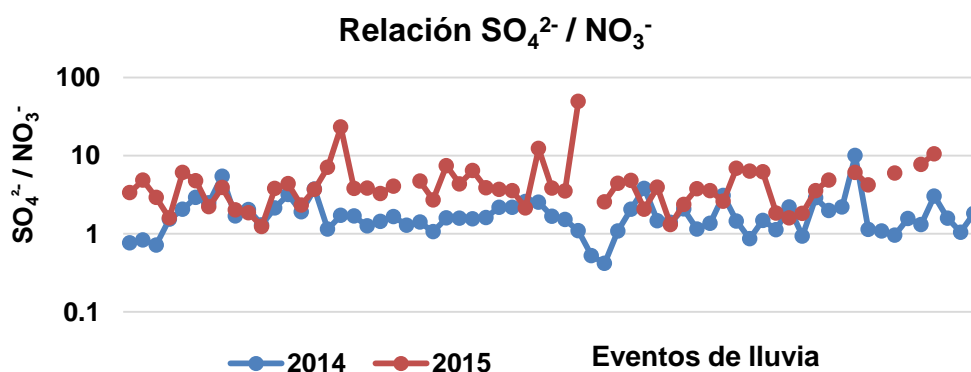


Figura 5. 12.- Relación sulfatos/nitratos (2014-2015) en La Mancha, Veracruz.

Tabla 5. 5.- Días con relación  $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$  alto para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.

Fecha del evento	Precipitación (mm)	pH	$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{eq/L}$ )	$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\mu\text{eq/L}$ )	Relación $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$	Dirección del viento	Condiciones Meteorológica
17/07/2015	34	5.17	0.304	15.114	49.58	SE	Zona de tormenta
13/06/2015	47	6.08	1.439	33.596	23.35	S	Vaguada, Surada

Además, se realizó la correlación por el método de Spearman entre cada uno de los iones. En la tabla 5.6 se muestra la del año 2014, donde se observa que los iones presentan la buena correlación entre ellos. Los más significativos son entre el cloruro con el sodio, precisamente por la cercanía a la costa, el magnesio con el cloruro, con el nitrato y con el sulfato y además el sulfato con el sodio, cloruro y nitrato, estos últimos corrobora la llegada de la lluvia ácida en la zona de estudio. Por otro lado, el hidruro presenta una relación inversa no tan significativa con el amonio, el potasio, el magnesio, el calcio y el cloruro.

Tabla 5. 6.- Correlación entre los iones para el año 2014 en La Mancha, Veracruz.

Rho de Speaman	Sodio	Amonio	Potasio	Magnesio	Calcio	Cloruro	Nitrato	Sulfato	Hidronio
<b>Sodio</b>	1.000								
<b>Amonio</b>	0.551	1.000							
<b>Potasio</b>	0.713	0.609	1.000						
<b>Magnesio</b>	0.789	0.623	0.785	1.000					
<b>Calcio</b>	0.644	0.578	0.652	0.784	1.000				
<b>Cloruro</b>	0.972	0.569	0.723	0.829	0.672	1.000			
<b>Nitrato</b>	0.646	0.669	0.773	0.804	0.676	0.657	1.000		
<b>Sulfato</b>	0.812	0.623	0.749	0.822	0.699	0.805	0.871	1.000	
<b>Hidronio</b>	0.014	-0.263	-0.153	-0.183	-0.259	-0.001	0.062	0.153	1.000

Para el año 2015 (tabla 5.7) se obtuvieron correlaciones similares al 2014, sobresaliendo una buena correlación entre el cloruro con el sodio, el magnesio con el cloruro, el sodio con el magnesio. Además, el sulfato presenta una buena correlación con el sodio, el magnesio, el cloruro y nitrato. Por otro lado, el hidruro muestra una correlación negativa no significativa con casi todos los iones menos con el nitrato y sulfato.

Tabla 5. 7.- Correlación entre los iones para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.

Rho de Speaman	Sodio	Amonio	Potasio	Magnesio	Calcio	Cloruro	Nitrato	Sulfato	Hidronio
<b>Sodio</b>	1.000								
<b>Amonio</b>	0.304	1.000							
<b>Potasio</b>	0.797	0.464	1.000						
<b>Magnesio</b>	0.916	0.327	0.787	1.000					
<b>Calcio</b>	0.700	0.301	0.672	0.739	1.000				
<b>Cloruro</b>	0.990	0.293	0.790	0.915	0.684	1.000			
<b>Nitrato</b>	0.645	0.586	0.579	0.611	0.592	0.642	1.000		
<b>Sulfato</b>	0.748	0.383	0.604	0.715	0.589	0.753	0.797	1.000	
<b>Hidronio</b>	-0.168	-0.124	-0.341	-0.246	-0.494	-0.129	0.006	0.209	1.000

#### **5.4. TRAYECTORIAS E IMÁGENES SATELITALES APLICADAS.**

Para el presente trabajo se elaboraron trayectorias de retroceso de las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia registrados en las estaciones de muestreo. Estas trayectorias se elaboraron a 24 horas. El objetivo fue observar la aportación local y el transporte de largo alcance de los precursores, para lo cual 24 horas es un tiempo adecuado (Celle-Jeanton et al., 2009).

Además, fueron utilizadas imágenes satelitales en el espectro infrarrojo con el objetivo de verificar los eventos de lluvia, las características de las mismas, su procedencia y a qué situación sinóptica estaba asociada.

Las trayectorias realizadas muestran básicamente dos patrones relacionados a la temporada del año en la que se dan los eventos de lluvia: del Norte y del Este. Las trayectorias provenientes del Norte se dan en invierno, y las provenientes del Este en el verano; en los meses de primavera y otoño hay una transición entre las condiciones meteorológicas por lo que en estos meses se tienen eventos de ambas direcciones.

En ambos años la mayor parte de los eventos se tienen en los meses de verano, acorde con la temporada de lluvias. La dirección predominante es del Este para los dos años, ya que, como se mencionó, los vientos alisios dominan la mayor parte de año.

Los eventos de lluvia ácida se dividieron en tres grupos (Wilson et al. 2004): con un  $\text{pH} < 3.5$  se clasifica como lluvia muy ácida,  $\text{pH}$  entre 4.5-3.5 como lluvia ácida fuerte,  $\text{pH}$  entre 5.0-4.5 como lluvia ácida y cuando el  $\text{pH}$  esta entre 5.6-5.0 se cataloga como lluvia ácida baja. Las trayectorias realizadas de los dos últimos intervalos se encuentran en el Anexo IV.

Primeramente, al no presentarse casos de lluvia muy ácidas ( $\text{pH} < 3.5$ ), fueron seleccionados los días que se presentaron lluvia ácida fuerte ( $\text{pH}$  entre 4.5-3.5), en ambos años. A estos días se les realizaron las trayectorias de retroceso y fueron analizadas las imágenes satelitales infrarrojo del evento de

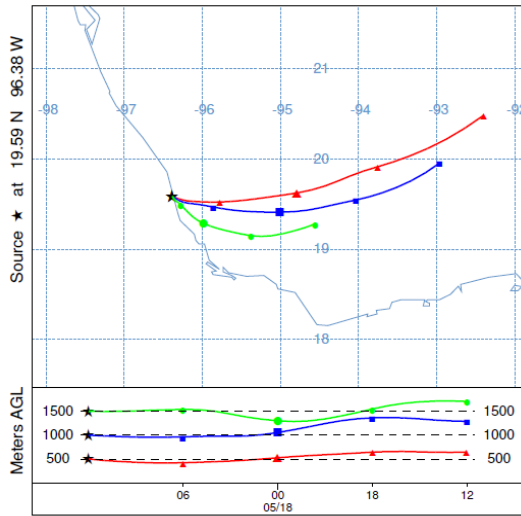
lluvia. En la tabla 5.8 se muestran para el año 2014 los cinco días con estas condiciones, los cuales representan el 10.87%, presentándose el valor mínimo de 4.27, el 23 de mayo, correspondiendo al mes de menor promedio ponderado mensual para este año.

Tabla 5. 8.- Días más ácidos del año 2014 en La Mancha, Veracruz.

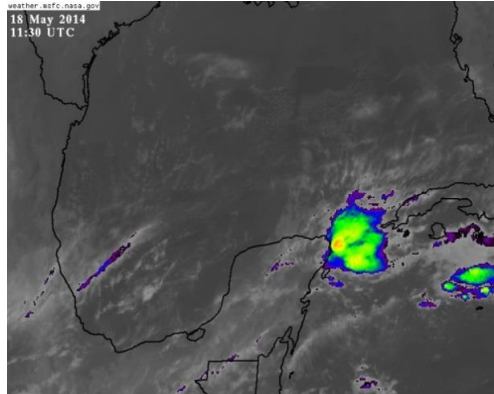
<b>Fecha del evento</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>pH</b>
18-05-14 (1)	18.00	4.51
23-05-14 (2)	16.00	4.27
30-06-14 (3)	1.50	4.37
03-09-14 (4)	1.00	4.55
07-09-14 (5)	11.00	4.41

Como se observa estos eventos se presentaron en el período lluvioso. En la figura 5.13 se muestran las trayectorias para estos días y la imagen infrarroja. En dos casos (2 y 5) estuvo influenciado por Ondas del Este, donde el rumbo predominante del viento es del Noreste con velocidades entre 5 y 25 km/h. Las precipitaciones fueron convectivas y en otros dos casos de ellos se asociaron a una perturbación ciclónica (3 y 4), con dirección del viento proveniente del Sur y Sur-sureste respectivamente. Las velocidades oscilaban entre 5 y 15 km/h y el 18 de mayo a un frente frío estacionario, en disipación en el Mar Caribe, con rumbo Noreste y una velocidad del viento aproximadamente de 15 a 25 km/h, con precipitación de tipo estratiforme.

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 18 May 14  
 GDAS Meteorological Data

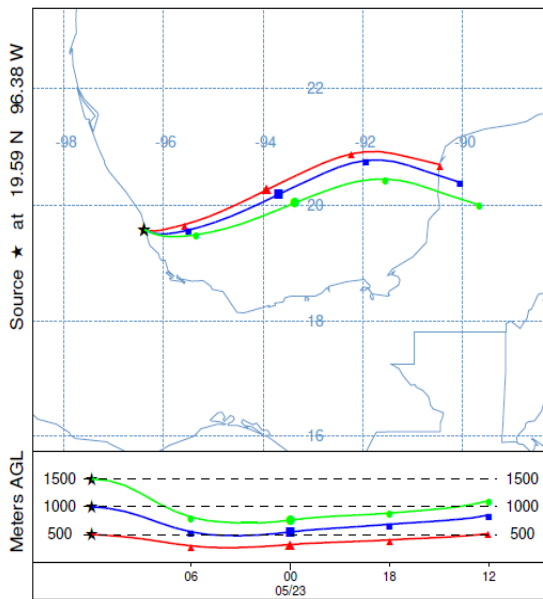


PEMEX, 2016

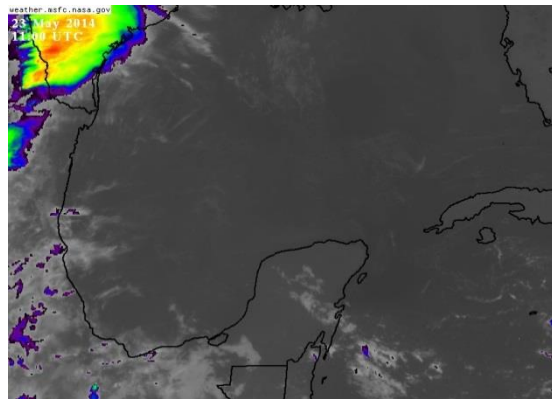


(1)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 23 May 14  
 GDAS Meteorological Data



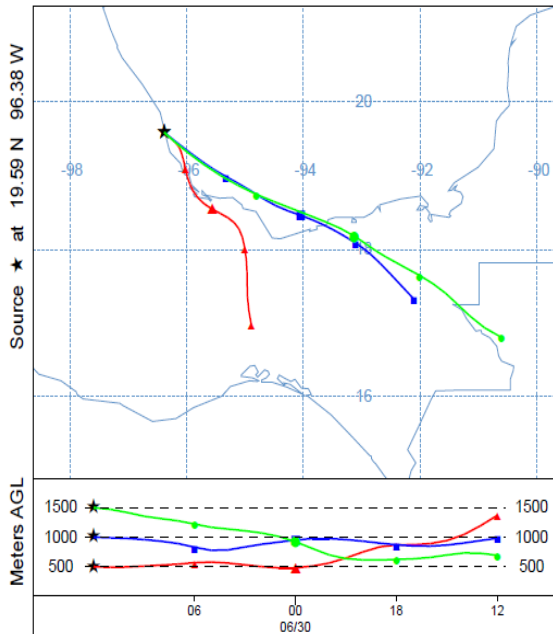
PEMEX, 2016



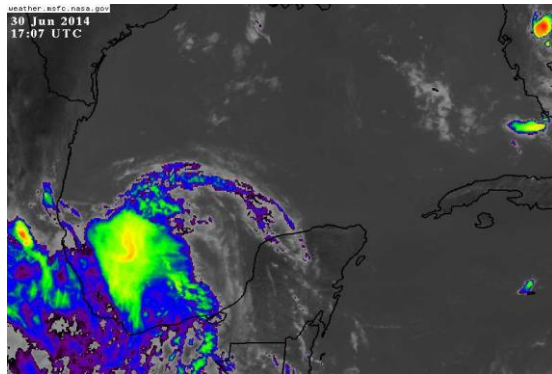
(2)



NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 30 Jun 14  
 GDAS Meteorological Data

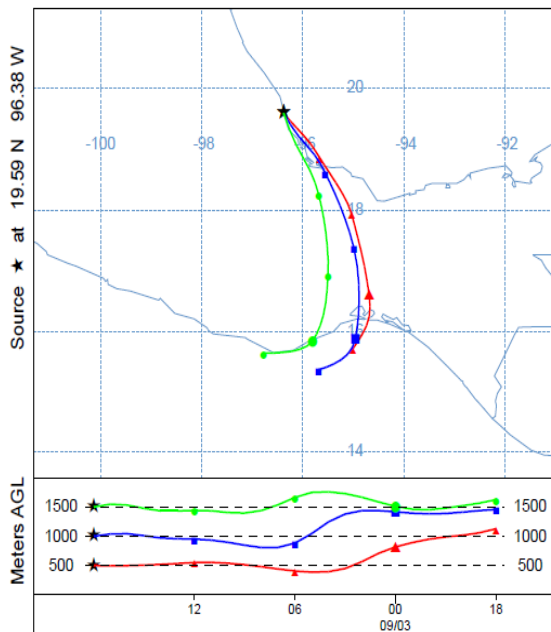


PEMEX, 2016

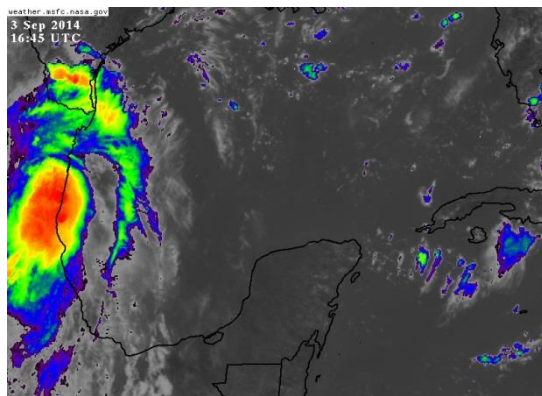


(3)

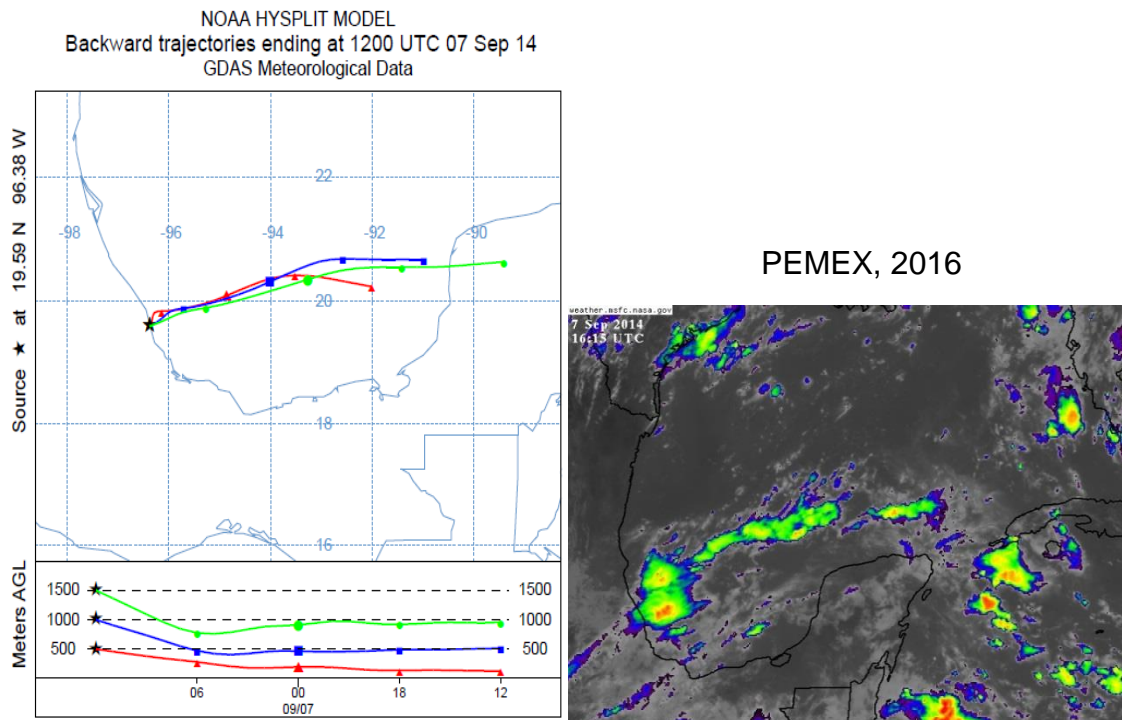
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 03 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



PEMEX, 2016



(4)



(5)

Figura 5. 13.- Trayectorias e imágenes infrarrojas de los días de lluvia ácida fuerte, La Mancha, 2014.

Para el año 2015 del mismo modo se presentaron cinco casos, los cuales representan el 16.13%, en la tabla 5.9 se muestran esos días. Presentándose el día más ácido el 9 de septiembre con un valor de 4.21, correspondiendo al mes de menor promedio ponderado mensual para este año como sucedió el año anterior.

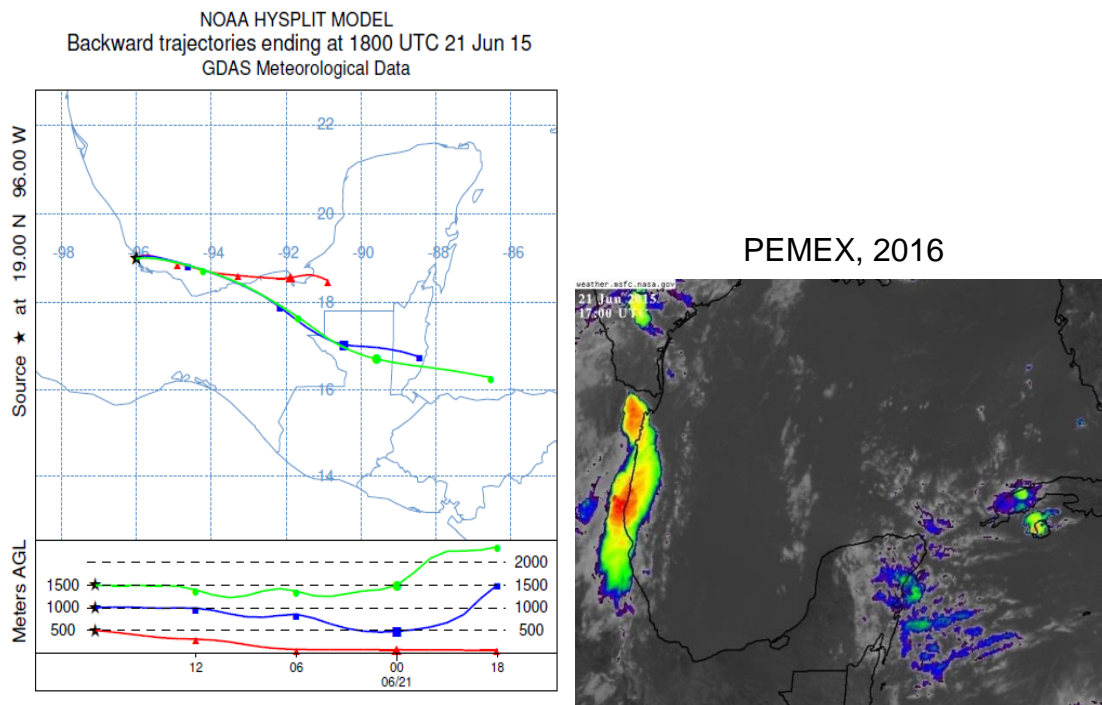
Tabla 5. 9.- Días más ácidos del año 2015 en La Mancha, Veracruz.

Fecha del evento	Precipitación (mm)	pH
21-06-15 (1)	4.00	4.56
04-07-15 (2)	16.00	4.45
06-09-15 (3)	6.00	4.48
09-09-15 (4)	8.00	4.21
23-10-15 (5)	7.00	4.54

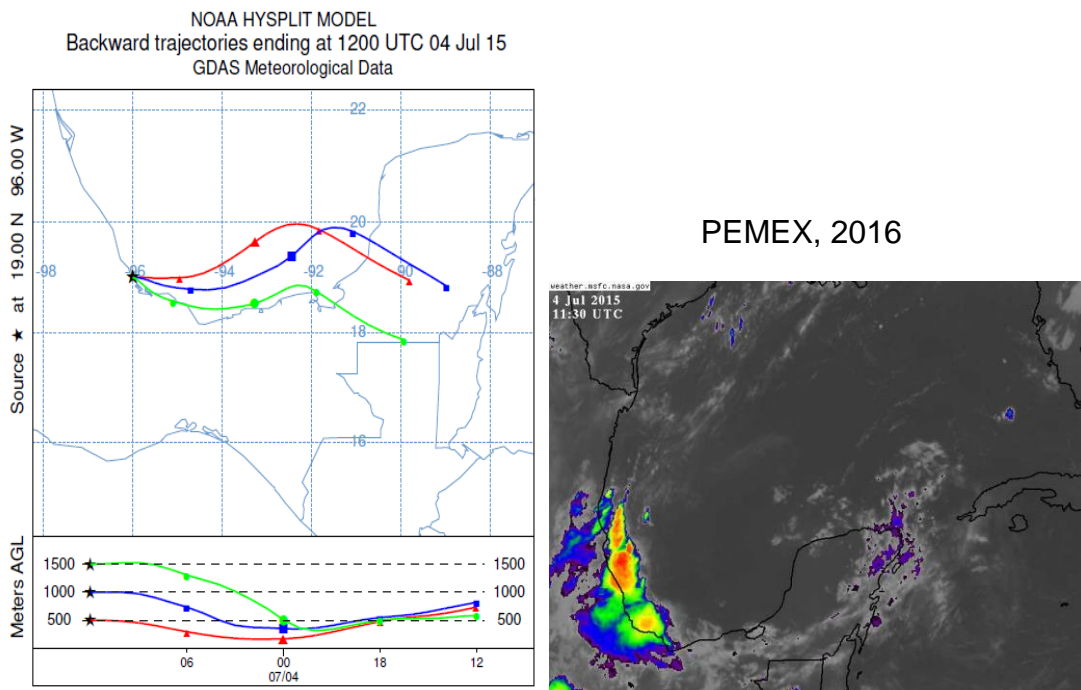
Estos casos estuvieron asociados a Ondas del Este en su totalidad, correspondiente a una dirección del viento proveniente del Este, con

velocidades entre 5 y 20 km/h, en todos los casos estuvieron asociadas a lluvias convectivas.

En la figura 5.14 se muestran las trayectorias de retroceso e imágenes infrarrojas de los días más ácidos para el año 2015.

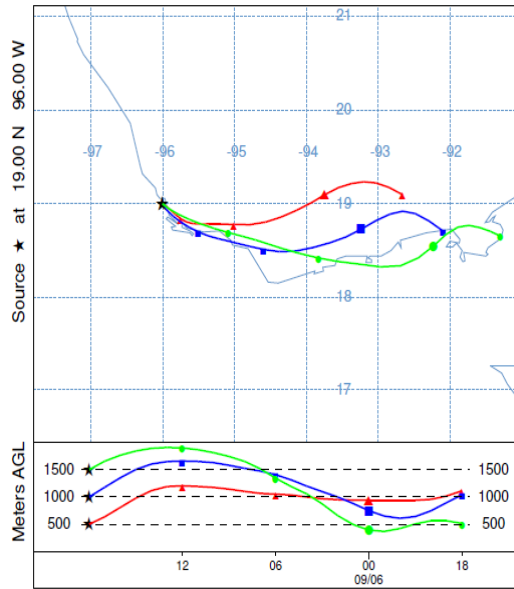


(1)

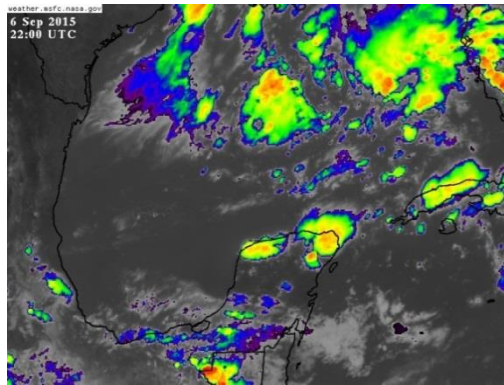


(2)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 06 Sep 15  
 GDAS Meteorological Data

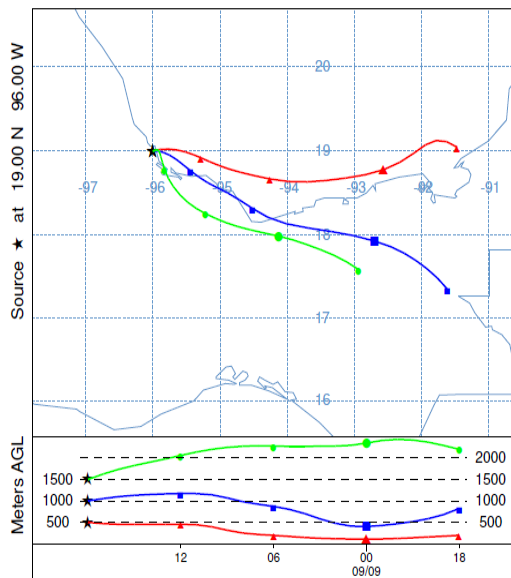


PEMEX, 2016

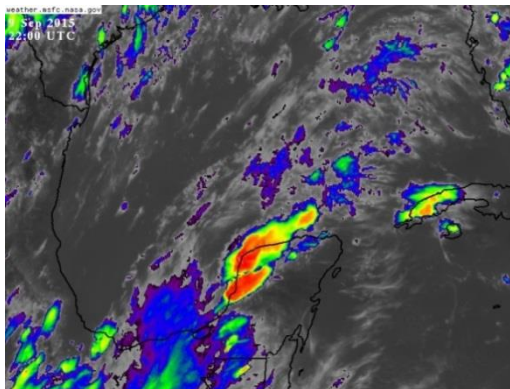


(3)

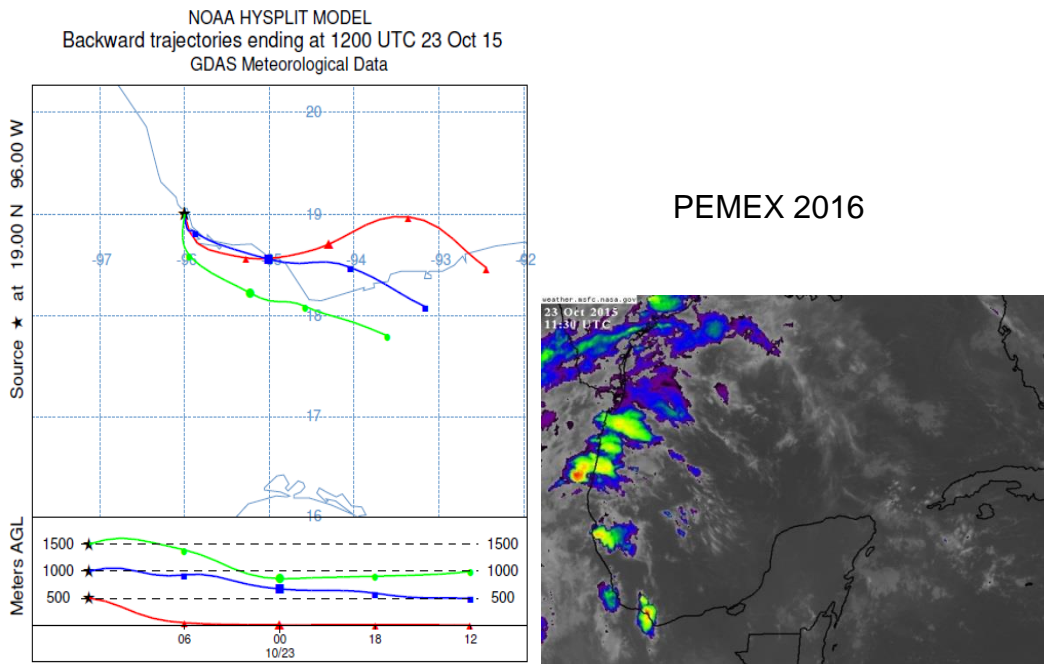
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 09 Sep 15  
 GDAS Meteorological Data



PEMEX, 2016



(4)



(5)

Figura 5. 14.- Trayectorias e imágenes infrarrojas de los días de lluvia ácida fuerte, La Mancha, 2015.

A su vez se le hizo el mismo análisis a los casos que se encontraban en el intervalo con pH entre 5.0-4.5 denominada como lluvia ácida. En la tabla 5.10 se muestran los casos de lluvia ácida para el año 2014, con un 43.48% para el año 2014 y un 32.26% para el 2015. Como se muestra en este intervalo se encuentra gran parte de los casos, para el año 2014. Las trayectorias e imágenes satelitales de cada uno de estos eventos se muestran en el anexo IV, figura IV.1.

Estos eventos se presentaron tanto en la temporada seca como en la lluviosa, pero con más frecuencia en la lluviosa. Estuvieron asociadas tanto a frentes fríos como a ondas del este, con rumbos provenientes del Norte, del Este y del Sur-sureste respectivamente, con velocidades del viento entre 5 y 35 km/h.

Tabla 5. 10.- Casos de lluvia ácida (pH entre 5.0-4.5) para el año 2014 en La Mancha, Veracruz.

<b>Fecha del evento</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>pH</b>
10-03-14 (6)	1.50	4.74
08-06-14 (7)	10.00	4.79
19-06-14 (8)	21.00	4.97
11-07-14 (9)	6.00	4.76
24-07-14 (10)	10.00	4.83
11-08-14 (11)	50.00	4.61
16-08-14 (12)	9.00	4.84
18-08-14 (13)	1.50	4.74
19-08-14 (14)	1.00	4.58
22-08-14 (15)	30.00	4.89
30-08-14 (16)	13.00	4.81
05-09-14 (17)	3.00	4.64
06-09-14 (18)	11.00	4.59
22-09-14 (19)	11.00	4.72
27-09-14 (20)	3.00	4.81
08-10-14 (21)	4.00	4.90
09-10-14 (22)	48.00	4.73
12-10-14 (23)	2.00	5.00
07-11-14 (24)	10.00	4.70
17-12-14 (25)	5.00	4.78

Los casos para el año 2015 de lluvia ácida (pH entre 5.0-4.5) se muestran en la tabla 5.11. Las trayectorias e imágenes satelitales de cada uno de estos eventos se muestran en el anexo IV, figura IV.2.

Tabla 5. 11.- Casos de lluvia ácida (pH entre 5.0-4.5) para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.

<b>Fecha del evento</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>pH</b>
30-06-15 (6)	9.00	4.85
02-07-15 (7)	3.00	4.94
05-07-15 (8)	19.00	4.98
18-07-15 (9)	44.00	4.92
02-09-15 (10)	21.00	4.66
04-09-15 (11)	10.00	4.76
14-09-15 (12)	34.00	4.93
17-09-15 (13)	2.00	4.68
13-11-15 (14)	45.00	4.83
30-11-15 (15)	2.00	4.82

En este intervalo para el año 2015, la mayoría de los casos se presentaron en el período lluvioso con excepción de dos casos en el mes de noviembre (14 y 15). El 60% de los casos estuvieron asociados a Ondas del Este y el 40% a



Frentes Fríos con rumbos provenientes del Este y del Norte y Sur-sureste respectivamente y velocidades del viento entre 5 y 25 km/h.

Para el intervalo de lluvia ácida baja (pH entre 5.6-5.0) se presentaron 21 (45.65%) y 16 (51.61%) casos para el año 2014 y 2015 respectivamente. En este último año se presentaron más de la mitad de los casos. Los casos para este intervalo se muestran para el año 2014 en la tabla 5.12.

Estos eventos se presentaron casi en su totalidad en la temporada lluviosa con excepción de un evento presentado el 01 de noviembre. Correspondieron a Ondas del Este y Frentes Fríos, con rumbos provenientes del Este, Nordeste y del Norte, y con velocidades del viento entre 5 y 50 km/h. Las trayectorias e imágenes satelitales de cada uno de los eventos se muestran en el anexo IV, figura IV.3.

Tabla 5. 12.- Casos de lluvia ácida baja (pH entre 5,6-5,0) para el año 2014 en La Mancha, Veracruz.

<b>Fecha del evento</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>pH</b>
06-06-14 (26)	40.00	5.07
07-06-14 (27)	110.00	5.38
11-06-14 (28)	22.00	5.38
18-06-14 (29)	20.00	5.37
20-06-14 (30)	29.00	5.52
10-07-14 (31)	10.00	5.27
13-07-14 (32)	19.00	5.04
21-08-14 (33)	16.00	5.23
31-08-14 (34)	25.00	5.30
08-09-14 (35)	12.00	5.26
09-09-14 (36)	10.00	5.36
11-09-14 (37)	14.00	5.05
12-09-14 (38)	6.00	5.52
14-09-14 (39)	15.00	5.20
15-09-14 (40)	8.00	5.40
16-09-14 (41)	51.00	5.16
17-09-14 (42)	4.00	5.18
24-09-14 (43)	20.00	5.33
10-10-14 (44)	2.00	5.03
21-10-14 (45)	15.00	5.35
01-11-14 (46)	8.00	5.13

Los casos para el año 2015 en este intervalo se muestran en la tabla 5.13. Las trayectorias e imágenes satelitales de cada uno de los eventos se muestran en el anexo IV, figura IV.4.

Tabla 5. 13.- Casos de lluvia ácida baja (pH entre 5.6-5.0) para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.

<b>Fecha del evento</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>pH</b>
15-04-15 (16)	24.00	5.43
06-06-15 (17)	4.00	5.17
19-06-15 (18)	22.00	5.52
20-06-15 (19)	74.00	5.59
28-06-15 (20)	4.00	5.57
09-07-15 (21)	2.00	5.08
10-07-15 (22)	29.00	5.57
11-07-15 (23)	16.00	5.49
17-07-15 (24)	34.00	5.17
26-08-15 (25)	22.00	5.21
05-09-15 (26)	3.00	5.04
16-09-15 (27)	14.00	5.16
06-10-15 (28)	2.00	5.51
16-10-15 (29)	8.00	5.56
14-11-15 (30)	7.00	5.31
29-11-15 (31)	3.00	5.07

Para este año, la mayoría de los casos acontecieron en la temporada lluviosa, aunque hubo algunos en la temporada seca. Se presentaron Ondas del Este y Frentes Fríos, con rumbos del Este, Noroeste y Norte respectivamente. La velocidad del viento osciló entre 5 y 60 km/h.

Para los casos en que se presentaron lluvia ácida en general en el 2014 el 45.6% correspondieron a la dirección de viento del Este, el 23.9% al Noreste, el 15.2% al Norte, el 13.04% al Sureste y el 2.1% al Sur-sureste. Este último corresponde al evento del 3 de septiembre asociado a una perturbación ciclónica. En el caso del 2015 el 45.1% corresponde al Este, y predominó este rumbo en los dos años, el 22.5% al Sureste, el 19.3% al Noreste y el 12.9% al Norte.

Para el año 2014 el 60 % de los eventos precedieron de tierra y el 40% del mar, y para el 2015 el 67.7% de tierra y el 32.3% al mar. Los dos años de estudio la mayor contribución proveniente de tierra.



En el análisis de la relación sulfatos/nitratos en el año 2015 sobresalieron dos casos, a los que se les realizó trayectorias de retroceso y análisis con imágenes infrarrojas (figura 5.15).

Los dos casos se asociaron a una precipitación convectivas. El primer caso; una vaguada sobre el golfo de México dando vientos del Sur-sureste, con velocidades entre 5 y 10 m/s. El segundo estuvo asociado a una zona de tormentas en la periferia del anticiclón del Atlántico con vientos de componente sur, con velocidades entre 5 y 15 m/s.

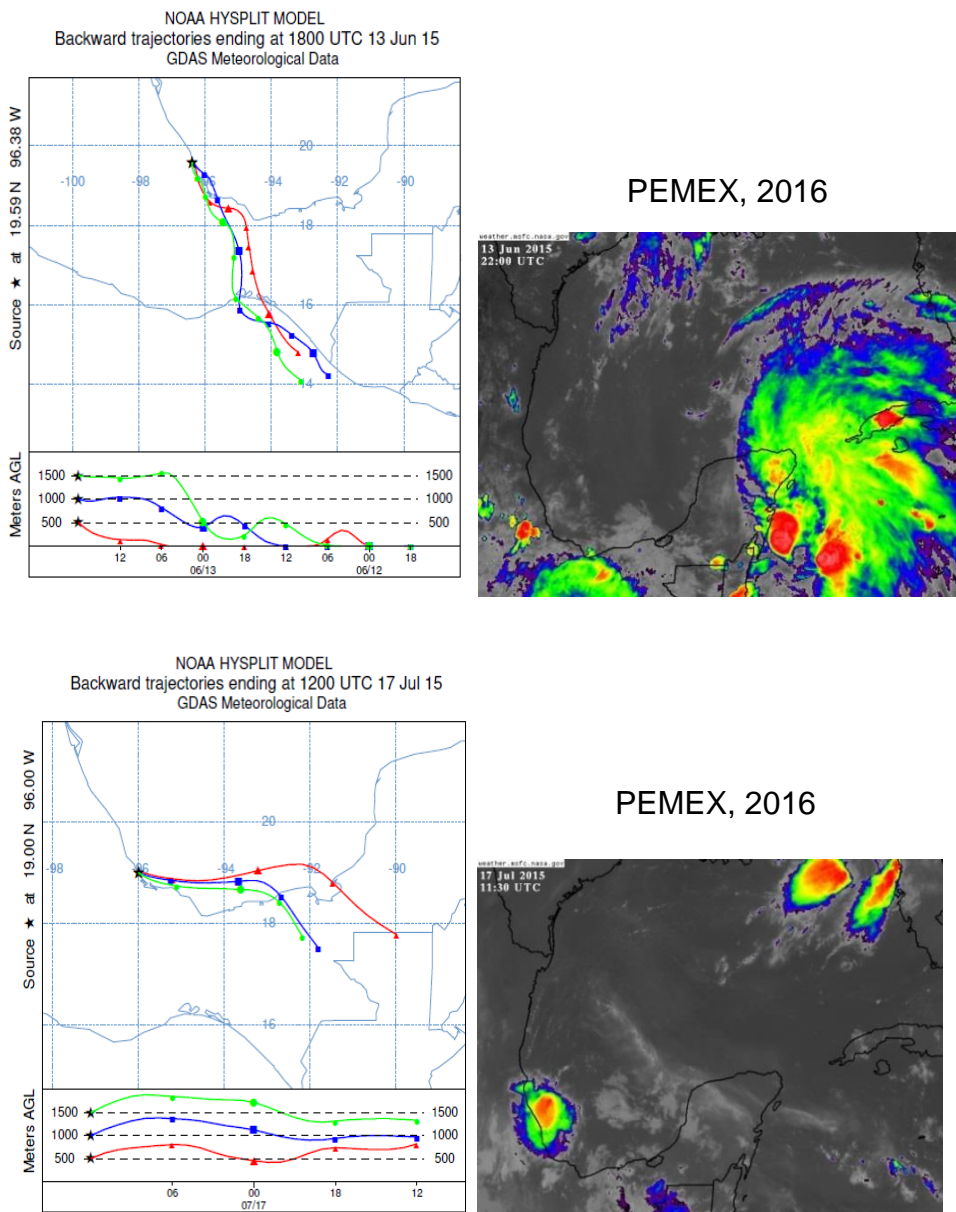


Figura 5. 15.- Días con alta relación  $SO_4^{2-} / NO_3^-$ .

Por otro lado, fueron seleccionados los días más alcalinos para los dos años de estudio, para la realización de las trayectorias de retroceso, donde se seleccionó un caso en la temporada seca y otro en la lluviosa para cada año. Las trayectorias resultaron muy similares a los casos en que se presenta lluvia ácida. En la figura 5.16 se muestran las mismas, dando en la temporada lluviosa trayectorias provenientes del Este y en la temporada seca trayectorias provenientes del Norte.

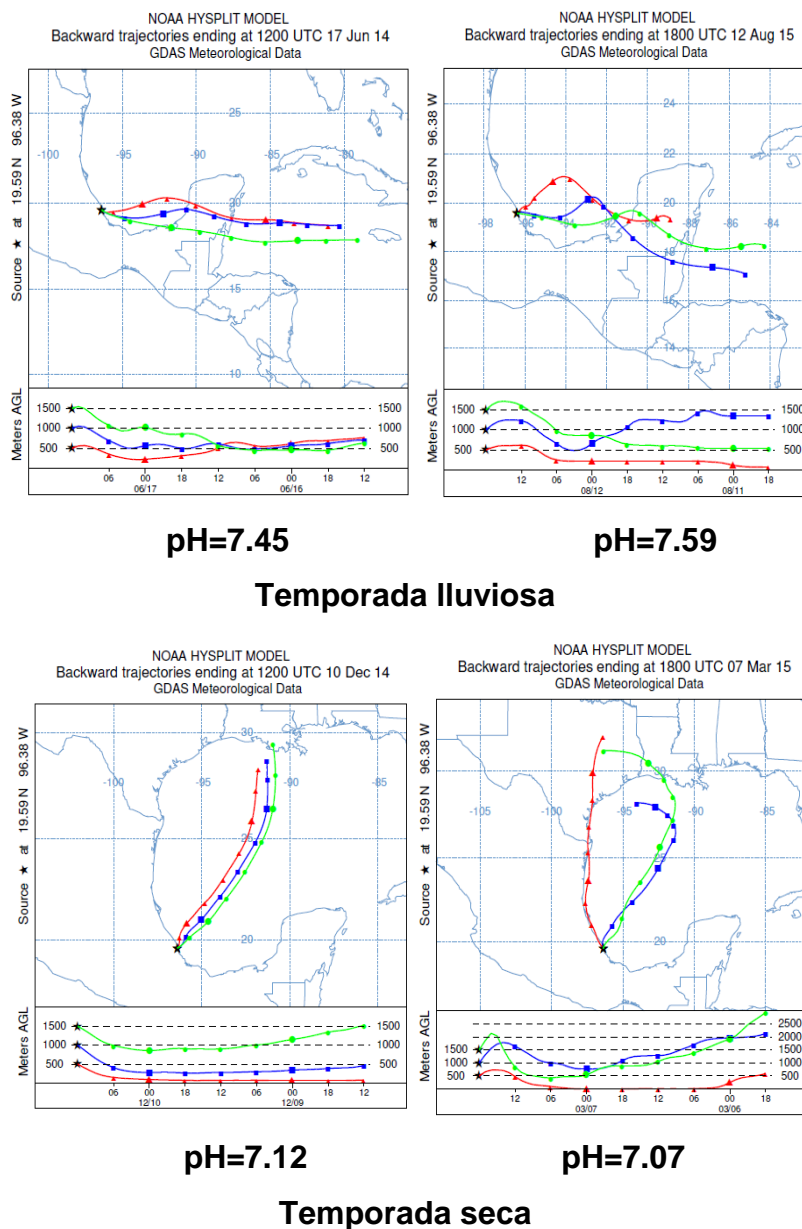


Figura 5. 16.- Días más alcalinos para el año 2014 y 2015 en La Mancha, Veracruz.

## **5.5. FUENTES POTENCIALES DE PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA.**

Como se ha reflejado anteriormente, el objetivo principal de este estudio es la determinación de fuentes de precursores de la lluvia ácida en la zona de estudio.

De los resultados anteriores se conoció que el depósito húmedo en La Mancha tiene un valor de pH bajo. De los resultados de aniones y cationes sobresalieron las concentraciones de sulfuros y nitratos. Las trayectorias de retroceso muestran que los precursores de esta lluvia ácida y otros contaminantes atmosféricos, son transportados desde el Este, Este-sureste y Norte de esta zona fundamentalmente. Lo que lleva a ubicar las posibles fuentes en estas direcciones, entre las que se encuentran centrales termoeléctricas, complejos petroquímicos, complejos procesadores de gas y refinerías, cabe mencionar que en la zona predomina la actividad petrolera, y que forma parte esencial de la economía de estos estados (Clark et al., 1986, Clark et al., 1989).

Unas de las fuentes emisoras principales que se encontrarían en la región serían las instalaciones petroleras en la zona marina y costera, de la Bahía de Campeche, la planta eléctrica de Tuxpan; las ciudades industriales de Tampico, Monterrey y Brownsville/ Matamoros, las refinerías de Poza Rica y el Puerto de Veracruz (Kahl et al., 2007).

En lo que respecta a las plataformas localizadas en la Sonda de Campeche aquellas que contienen quemadores, emiten cerca del 80% de contaminantes a causa de la extracción de crudo (Villasenor et al., 2003).

Además, se encuentran la Central Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateo en Tuxpan, Veracruz que presenta la mayor capacidad efectiva instalada de 2.100 MW y además la que presentó mayor emisión de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> en masa de contaminante por año (SEMARNAT, 2006). Tienen gran contribución las centrales termoeléctricas de Valladolid y la de Mérida en Yucatán, en

Campeche, Lerma, así como Altamira en Tamaulipas, entre otras (Marín, 2009).

Las centrales termoeléctricas mencionadas usan combustóleo para la producción de energía, lo cual genera gran cantidad de óxidos de azufre más que de óxidos de nitrógeno, consistente con los resultados de las muestras de agua de lluvia. Estos compuestos son originados directamente en la quema del combustóleo al oxidarse el azufre contenido.

En la tabla 5.14 se muestran las emisiones e índices de emisiones correspondientes al 2002 de las centrales termoeléctricas mencionadas anteriormente (Adaptado de Paul y Miller, 2004).

Tabla 5. 14.- Emisiones e índice de emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> para algunas centrales termoeléctricas en México.

Fuente: Adaptado de Paul y Miller, 2004.

Fuentes	Generación (MWh)	Emisiones de SO <sub>2</sub> (Mg)	Índice de emisiones de SO <sub>2</sub> (kg/MWh)	Emisiones de NO <sub>x</sub> (Mg)	Índice de emisiones de NO <sub>x</sub> (kg/MWh)
<b>Tuxpan (Adolfo López Mateos)</b>	15,030,690	253,430	16,86	15,899	1.06
<b>Altamira</b>	4,655,850	86,451	18,47	6,899	1.48
<b>Dos Bocas</b>	2,428,890	7,000	0,00	3,712	1.53
<b>Mérida</b>	1,099,710	17,497	15,91	1,151	1.05
<b>Lerma</b>	812,720	17,742	21,83	1,005	1.24
<b>Poza Rica</b>	654,040	12,768	19,52	1,124	1.72
<b>Valladolid</b>	414,970	8,409	20,27	709	1.71

La central termoeléctrica Pdte. Adolfo López Mateos, localizada en Tuxpan, Veracruz presentó la mayor emisión de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en masa de contaminante para este año, mientras que el índice de emisión de SO<sub>2</sub> se presentó mayor en la termoeléctrica de Lerma, Campeche y para el caso de NO<sub>x</sub> la de Poza Rica, Veracruz.

Además, se encontraron otras fuentes precursoras de lluvia ácida en los Estados de Texas, Mississippi y Florida, Estados Unidos, tanto generadoras de gas como de combustóleo, entre las que están Manatee, Anclote, Port Everglades, Martin, en Florida; Decordova, Sabine, Tradinghouse, AES

Deepwater, Inc., en Texas y Baxter Wilson, Mississippi. En los complejos procesadores de gas, las emisiones de azufre se tienen principalmente en el proceso de recuperación de azufre. En la tabla 5.15 se muestran algunas de estas centrales termoeléctricas, sus emisiones e índices de emisiones (Adaptado de Paul y Miller 2004).

Tabla 5. 15.- Emisiones e índice de emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> para algunas centrales termoeléctricas en Estados Unidos.

Fuente: Adaptado de Paul and Miller, 2004.

<b>Fuentes</b>	<b>Generación (MWh)</b>	<b>Emisiones de SO<sub>2</sub> (Mg)</b>	<b>Índice de emisiones de SO<sub>2</sub> (kg/MWh)</b>	<b>Emisiones de NO<sub>x</sub> (Mg)</b>	<b>Índice de emisiones de NO<sub>x</sub> (kg/MWh)</b>
<b>Martin, Florida</b>	12,834,607	13,890	1.08	6,637	0.5
<b>Sabine, Texas</b>	7,087,729	-	-	4,871	0.7
<b>Manatee, Florida</b>	6,116,586	29,667	4.85	7,485	1.2
<b>Port Everglades, Florida</b>	4,497,763	17,089	3.80	8,527	1.9
<b>Anclote, Florida</b>	4,133,979	27,933	6.76	7,643	1.8
<b>Decordova, Texas</b>	3,042,636	-	-	5,108	1.7
<b>Tradinghouse, Texas</b>	3,007,375	-	-	4,851	1.6
<b>Baxter Wilson, Mississippi</b>	2,551,638	-	-	5,784	2.3
<b>AES Deepwater, Inc., Texas</b>	1,287,524	2,530	1.97	2,152	1.7



**Legenda:**




1-Decordova	11-Termoelectrica Tuxpan	 Fuentes de gas
2-Tradinghouse	12-Poza Rica	 Fuentes de combustóleo
3-AES Deepwater, Inc.	13-Dos Bocas	 La Mancha
4-Sabine	14-Sonda de Campeche	
5-Baxter Wilson, Mississippi	15-Termoelectrica Lerma	
6-Manatee	16-Mérida	
7-Anclote	17-Valladolid	
8-Martin	18-Zona de Centrales Azucareros	
9-Port Everglades	19-Termoelectrica de Santa Cruz, Cuba	
10-Termoelectrica Altamira	20-Termoelectrica Antonio Guiteras, Matanzas, Cuba	
	21-Termoelectrica de Tallapiedra, La Habana, Cuba	

Figura 5. 17.- Localización de las fuentes emisoras de precursores de lluvia ácida para la zona de estudio.

# **CAPITULO VI. MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL**

## **CAPÍTULO VI: MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL.**

Para la toma de medidas de prevención, minimización y control hay que situarse fundamentalmente en las fuentes que generan el problema de los precursores de lluvia ácida. Entre menos emisiones a la atmósfera se tenga el problema deberá disminuir. No obstante, las medidas no son establecidas en todas y cada una de las fuentes solo porque éstas se encuentran emitiendo, sino aquellas que estén relacionadas con el problema que se estudia.

Como se mencionó anteriormente las principales fuentes a tener en consideración para la reducción de emisiones de los precursores de lluvia ácida que afecta la zona de estudio fueron la Sonda de Campeche, las termoeléctricas de Mérida, Lerma, Tuxpan y Valladolid, por lo que, las medidas son encaminadas hacia estas fuentes.

Hay una amplia gama de tecnologías disponibles para controlar las emisiones de contaminación del aire de las centrales eléctricas. La combinación más apropiada de tecnologías de control variará de una planta a otra, dependiendo del tipo y tamaño de la unidad generadora eléctrica, la edad, las características del combustible y el diseño de la caldera. En muchos casos, las tecnologías diseñadas para controlar un contaminante también controlarán a otros. Como resultado, en algunos casos, puede ser necesario agregar tecnologías de control separadas para algunos contaminantes (James, 2011).

### **6.1. MÉTODOS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub>.**

Cambiar a combustibles de bajo contenido de azufre:

Antes de la combustión, utilizando los combustibles con menor cantidad de azufre (consiste en cambiar el combustible por uno que genere menos contaminantes, por ejemplo, el cambio de combustóleo por gas natural). Aplicando este procedimiento las emisiones de SO<sub>x</sub> son mínimas, además puede reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>. La desventaja es que para realizar esta acción no solo basta cambiar el combustible, sino que debe hacerse una reconfiguración total de la planta para instalar quemadores apropiados al nuevo



combustible y reduciendo el azufre de los combustibles mediante procesos físicos o químicos (para lo cual se requiere que el proceso en las refinerías cambie) (Marín, 2009).

Al producir una combustión más limpia y sin compuestos corrosivos de azufre, resulta ser un combustible menos agresivo a la caldera, lo cual puede verse reflejado en menores costos por mantenimiento (Arroyo, 2005).

Desulfuración de gases de combustión (FGD) o depuradores:

Los controles FGD permiten que el operador de la planta utilice una variedad más amplia de carbones mientras mantiene bajas emisiones de  $\text{SO}_2$ . Hay dos formas básicas de FGD: húmedo y seco.

Depuradores húmedos:

Los depuradores húmedos son capaces de altas tasas de eliminación de  $\text{SO}_2$ . Los sistemas FGD húmedos pueden usar cal o piedra caliza. Una suspensión de cal o de caliza reacciona con el  $\text{SO}_2$  en el gas de combustión dentro de un gran recipiente absorbente para capturar el  $\text{SO}_2$ . La cal es más reactiva y ofrece el potencial de mayores reducciones, sin embargo, la cal es también el reactivo más caro. Como resultado, la tecnología de lavado en húmedo por oxidación forzada de piedra caliza (LSFO) es la forma más utilizada de FGD en húmedo y es más ampliamente utilizada en centrales eléctricas de carbón que cualquier otra forma de FGD combinada. Los sistemas LSFO de última generación son capaces de proporcionar niveles muy altos de eliminación de  $\text{SO}_2$ , del orden del 98 por ciento o más. La caliza reaccionada y el  $\text{SO}_2$  forman un subproducto de yeso que a menudo se vende para la fabricación de tableros de pared (James E., 2011).

Según la US-EPA las renovaciones de los depuradores húmedos son intensivas en capital debido a la cantidad de equipo necesario. La US-EPA estima un costo de capital de aproximadamente \$500 para un depurador húmedo (oxidación forzada de piedra caliza) en una unidad de carbón de 500 MW. Sin embargo, puede haber una variación significativa en los costos dependiendo del tamaño de la unidad y de los aspectos específicos del sitio.

Debido a los altos costos de capital de la tecnología, los depuradores húmedos generalmente sólo se instalan en plantas de energía donde el propietario espera operar la planta por un número extendido de años.

Las principales variables que afectan al costo de capital son el tamaño de la unidad y el contenido de  $\text{SO}_2$  del combustible, siendo este último el que tiene mayor impacto en las instalaciones de manejo de reactivos y de desechos. Además, la tasa de calor afecta a la cantidad de gas de combustión producida y por consiguiente al tamaño de cada uno de los módulos (US-EPA, 2010).

Depuradores Secos:

La tecnología de depuración en seco (FGD seco) inyecta cal hidratada y agua (ya sea por separado o conjuntamente como una suspensión) en un recipiente grande para reaccionar con el  $\text{SO}_2$  en el gas de combustión.

El término "seco" se refiere al hecho de que, aunque se añade agua al gas de combustión, la cantidad de agua añadida es sólo lo suficiente para mantener el gas por encima de la temperatura de saturación (punto de rocío). En la mayoría de los casos, los productos de reacción y cualquier cal que no haya reaccionado procedente del proceso de FGD seco se capturan en un filtro de tela aguas abajo (bolsa), lo que ayuda a proporcionar una captura adicional de  $\text{SO}_2$ . Los sistemas secos modernos de FGD suelen proporcionar tasas de captura de  $\text{SO}_2$  del 90 por ciento o más (James, 2011).

Según la EPA históricamente, los FGDs secos se han utilizado principalmente en carbones de bajo contenido de azufre debido a que el reactivo, la cal, es más caro que los reactivos usados en sistemas FGD húmedos. Además, debido a que los sistemas están diseñados para mantener las temperaturas de los gases de combustión por encima del punto de rocío, esto limita la cantidad de  $\text{SO}_2$  que puede tratarse mediante un secador por pulverización. Otra forma de FGD seca, son los sistemas de lavado en seco circulante (CDS), inyectan el agua y la cal por separado, y se ha demostrado que alcanzan altas tasas de eliminación de  $\text{SO}_2$  en más del 95 por ciento en carbones de azufre más altos.

La cal es más costosa que la piedra caliza, el reactivo más comúnmente usado para los sistemas de lavado en húmedo.

Inyección de Sorbente Seco (DSI):

DSI es la inyección de reactivos sorbentes secos que reaccionan con  $\text{SO}_2$  y otros gases ácidos, con un dispositivo de control de partículas para capturar los productos de reacción.

El reactivo DSI más común en uso es Trona, una mezcla natural de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio. También se han utilizado otros reactivos, tales como bicarbonato de sodio y cal hidratada. El bicarbonato de sodio es capaz de obtener mayores eficiencias de eliminación de  $\text{SO}_2$  que Trona porque es más reactivo (James, 2011). DSI es relativamente simple y barato cuando se compara con un depurador. A diferencia de los depuradores que requieren cámaras de reacción adicionales para ser instalados.

La US-EPA en el 2010 planteó que el costo de capital de un sistema DSI será sustancialmente menor que el de un depurador húmedo o seco completo, que puede costar tan alto como \$400/kW. Los reactivos utilizados en DSI son más costosos que los utilizados en depuradores húmedos o secos, y el reactivo no es tan eficientemente utilizado, lo que puede contribuir a un mayor costo de control en términos de dólares por tonelada de  $\text{SO}_2$  reducido.

La inyección de Trona o bicarbonato de sodio también puede eliminar  $\text{NO}_x$  en el rango de 10-20 por ciento, aunque la eliminación de  $\text{NO}_x$  no es generalmente un objetivo principal de DSI.

## **6.2. MÉTODOS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES DE $\text{NO}_x$ .**

El control de las emisiones de  $\text{NO}_x$  se logra controlando su formación a través de controles de combustión o reduciendo  $\text{NO}_x$  después de que se haya formado a través de los controles posteriores a la combustión. Los controles de combustión reducen las emisiones de  $\text{NO}_x$  durante el proceso de combustión regulando las características de las llamas, tales como la temperatura y la mezcla de aire y combustible. Los controles postcombustión operan aguas

abajo del proceso de combustión y eliminan las emisiones de NO<sub>x</sub> de los gases de combustión (US-EPA, 2010).

Controles de combustión:

Los controles de combustión minimizan la formación de NO<sub>x</sub> dentro del horno y son con frecuencia la primera opción para el control de NO<sub>x</sub> porque generalmente tienen menor costo que los controles posteriores a la combustión. Para la mayoría de las formas de control de la combustión, una vez instalado hay poco costo continuo porque no hay reactivos ni catalizadores para comprar. Los controles de combustión residen dentro del propio horno, no en la corriente de gases de escape, e incluyen métodos tales como quemadores de bajo NO<sub>x</sub> (LNB), aire de sobre-fuego (OFA) y aire de soplado separado (SOFA). La tecnología de reacondicionamiento es otra opción de control de la combustión, pero reduce químicamente los NO<sub>x</sub> formados en la zona de combustión primaria. La tecnología de reacondicionamiento también puede utilizar gas natural (James, 2011).

El costo de capital según la US-EPA (2010) es generalmente mucho menor que el de las opciones de control post-combustión más costosas, como la Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Los costos de capital de los controles de combustión podrían ser desde \$ 10/kW, pero generalmente caen por debajo de \$ 50/kW.

Controles de NO<sub>x</sub> después de la combustión:

Existen límites al nivel de control de NO<sub>x</sub> que puede lograrse solo con los controles de combustión. Por lo tanto, los controles posteriores a la combustión son necesarios para lograr muy bajas emisiones de NO<sub>x</sub>.

Reducción catalítica selectiva (SCR):

SCR utiliza amoníaco como un reactivo que reacciona con NO<sub>x</sub> en la superficie de un catalizador. El reactor de catalizador SCR se instala en un punto en el que la temperatura está en el intervalo de aproximadamente 316 °C-371 °C, colocándolo normalmente después del economizador y antes del precalentador de aire de la caldera. El catalizador SCR debe ser reemplazado

periódicamente. Normalmente, las empresas reemplazarán una capa de catalizador cada dos o tres años. Se utilizan capas múltiples de catalizadores para aumentar la superficie de reacción y controlar la eficiencia (James, 2011).

Los costos de capital del SCR variarán en un amplio rango dependiendo de la dificultad de la retroadaptación. Se ha informado que algunas retroadaptaciones cuestan menos de \$100/kW, mientras que otros han costado más de \$200/kW. Los costos de operación incluyen reactivo de amoníaco, reemplazo periódico del catalizador y costos fijos de operación (US-EPA, 2010).

Reducción no catalítica selectiva (SNCR):

Según la US-EPA (2010), SNCR es otra tecnología de control de NO<sub>x</sub> post-combustión. Típicamente alcanza un rango de reducción de NO<sub>x</sub> del 25-30 por ciento en unidades equipadas con quemadores de bajo NO<sub>x</sub>. SNCR reduce el NO<sub>x</sub> al hacer reaccionar urea o amoníaco con el NO<sub>x</sub> a temperaturas alrededor de 982 °C-1093 °C. Por lo tanto, la urea o el amoníaco se inyectan en la propia zona de post-combustión del horno y, al igual que SCR, reducen los NO<sub>x</sub> a nitrógeno y agua.

El costo de capital de SNCR es típicamente mucho menor que el de SCR, que cae en el rango de \$10- \$20/KW, o alrededor de \$ 4 millones o menos para una planta de 200 MW. El costo de operación de SNCR es principalmente el costo del reactivo de amoníaco o urea (US-EPA, 2010).

Con la aplicación de medidas de prevención, minimización y control, es posible que las emisiones de precursores sean reducidas en la región de estudio, lo que conllevaría a reducir la lluvia ácida en la región, que es lo que se quiere para que haya un menor impacto ya sea en el patrimonio cultural, ecosistemas, entre otros.

# **CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **7.1. CONCLUSIONES.**

1. El fenómeno de la lluvia ácida ha estado presente por más de una década en La Mancha (Veracruz), encontrándose para los dos años estudiados (2014 y 2015) un promedio ponderado anual de pH de agua de lluvia menor a 5.6, por lo cual deduce su presencia. Esta acidez indica la existencia de precursores incorporándose al agua de lluvia e incidiendo en la región de estudio.
2. Las trayectorias de retroceso mostraron dos patrones básicos de transporte de masas de aire: del Norte y del Este; presentándose estos en la temporada seca y lluviosa, respectivamente. Lo que conlleva que las principales fuentes precursoras son de estas regiones.
3. Del análisis de las imágenes satelitales se corroboró la existencia, la procedencia y el tipo de nubosidad que estaba asociado el evento. En la temporada seca estuvo asociado principalmente a sistemas frontales (Frentes Fríos), con nubosidad estratiforme, mientras que en la temporada lluviosa se asoció a Ondas del Este y perturbaciones ciclónicas, con nubosidad mayormente convectiva.
4. Del análisis de trayectorias e imágenes satelitales se aprecia que las fuentes localizadas al Este de La Mancha como la Sonda de Campeche, las termoeléctricas de Mérida, Lerma y Valladolid son las que pueden aportar una mayor cantidad de precursores a los eventos muestreados. En todo el Golfo existen diversas fuentes que también inciden en la zona de estudio, pero a menor escala.
5. Las medidas a tener en cuenta para la prevención, minimización y control en las fuentes de precursores de lluvia ácida serían el cambio a combustibles de bajo contenido de azufre, cambio de combustóleo a gas natural, así como, la instalación de equipos de control para la desulfuración de gases.

6. Finalmente se llevó a cabo la identificación de regiones de procedencia de precursores de lluvia ácida en el Estado de Veracruz y fueron establecidas las medidas estratégicas de prevención, minimización y control.

## **7.2. RECOMENDACIONES.**

De manera complementaria se sugiere ampliar los sitios de muestreo en México. Además de incorporar sitios de muestreo en otros países como, por ejemplo: Cuba, para cubrir todo el Golfo de México. Además de seguir manteniendo en operación el sitio de muestreo La Mancha.

La aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes en las fuentes mencionadas ayudaría a corroborar el depósito de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  en el agua de lluvia.

La creación de un Programa para la Prevención del Deterioro Significativo en la región del Morro de La Mancha, para la preservación del patrimonio cultural y natural.

La actualización del Inventario de Emisiones de precursores de lluvia ácida en la región de estudio.



## BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, S., Magaña, R., Saavedra, M., Torres, R. (1981). "Lluvia ácida en la cuenca del Valle de Mexico". Memorias de resúmenes de la reunión 1981 de la Union Geofísica Mexicana. Manzanillo, Colima. Mayo 6-9.

Alarcón (2012). "Lluvia ácida en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Evaluación y Trascendencia". México.

Arroyo, C. V. (2005). "Beneficios de la conversión a gas natural en calderas de vapor". Peru, Lima. Consultado el 27 de junio de 2017 en: <http://www.cinydesac.com>

Báez, A., R. Belmont, R. García, M. Torres and H. Padilla (2006). "Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico." *Atmospheric Research* 80(1): 67-85.

Báez, A., H. Padilla, J. Cervantes, D. Pereyra and R. Belmont (1997). "Rainwater chemistry at the eastern flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, Mexico." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102(D19): 23329-23336.

Bashkin, V. N. (2016). "Environmental Chemistry, Asian Lessons"; Chapter 4: Acid Deposition. <http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-48020-4>.

Bravo, H., R. Soto, R. Sosa and P. Sánchez (2003). "Efecto de la lluvia ácida en el material constructivo de los monumentos mayas mexicanos." *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 4: 195-205.

Bravo, H., R. Soto, R. Sosa, P. Sánchez, A. Alarcón and J. Ruíz (2004). Effects of Wet Acidic Deposition on Stony Material at the "Tajin" Archaeological Site in Veracruz, Mexico. Proceedings of the 97th Annual Conference of the Air & Waste Management Association, Indianapolis, IN, Paper.

Bravo, H., R. S. Echeverría, P. S. Álvarez, R. S. Ayala and A. A. Jiménez (2005). "Precipitación ácida en la costa del Golfo de México." *Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*: 535-552.

Bravo, A. H., Soto A. R., Sosa E. R., Sanchez A. P., Alarcón J. A. L., Kahl J., Ruiz B. J. (2006). "Effect of acid rain on building material of the El Tajin archaeological zone in Veracruz, Mexico." *Environmental Pollution* 144(2): 655-660.

Bravo, H. S., R.; Kahl, J.; Sánchez, P.; Alarcón, A.; Soto, R. (2006). "Acid Deposition Events during the Autumn of 2003 in a research cruise over the Gulf of México". 99th Air and Waste Management Association Annual Meeting, New Orleans, LO, June. AWMA-06A-430.

Carretero O., Elizaga, F. (2001). Interpretación de imágenes de satélite. Recuperado el 12 de octubre de 2016: <http://www.inm.es/> apartado de " La

Ciencia Meteorológica " --> Divulgación --> Interpretación de productos de Teledetección.

Celle-Jeanton, H., Y. Travi, M.-D. Loÿe-Pilot, F. Huneau and G. Bertrand (2009). "Rainwater chemistry at a Mediterranean inland station (Avignon, France): local contribution versus long-range supply". *Atmospheric Research* 91(1): 118-126.

Clark, T. L., R. L. Dennis, S. Seilkop, E. Voldner and M. Alvo (1986). International sulfur deposition model evaluation, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC (USA). Atmospheric Sciences Research Lab.

Clark, T. L., E. C. Voldner, R. L. Dennis, S. K. Seilkop, M. Alvo and M. P. Olson (1989). "The evaluation of long-term sulfur deposition models". *Atmospheric Environment* (1967) 23(10): 2267-2288.

Clima, M. A. (2016). Clima, Medio Ambiente y Tecnología. Recuperado el 06 de Abril de 2016: <http://elclima-enelmundo.blogspot.mx/2013/11/golfo-de-mexico-clima.html>

Conagua (2016). Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. Comisión Nacional del Agua. Servicio Meteorológico Nacional. Reporte del Clima en México. Mayo 2016. Año 6, Número 5.

Draxler, R. (2010). "HYSPLIT (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) model access via NOAA ARL ready website". <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

EEA. European Environment Agency. Recuperado el 21 de noviembre de 2016, de EEA: [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

Fernández, A. and Y. Díaz (2005). "Catálogo de procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el período 1979-1993." INSMET, Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos.

García, E. (2004). "Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen". Instituto de Geografía, UNAM México.

Hutchinson, T. C. and M. Havas (2012). "Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems", Springer Science & Business Media.

INECC (2016). "Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático". Recuperado el 1 de noviembre 2016, de INECC: <https://www.gob.mx/inecc>

INECOL (Instituto de Ecología, A.C.) Recuperado el 27 de octubre de 2016: [www.inecol.edu.mx](http://www.inecol.edu.mx)

James E. Staudt (2011). "Control Technologies to Reduce Conventional and Hazardous Air Pollutants from Coal-Fired Power Plants". Andover Technology Partners, March 31.

Kahl, J. D., H. Bravo, R. Sosa, P. Sanchez, A. Alarcon and R. Soto (2007). "Characterization of atmospheric transport to the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México". *Atmósfera* 20(4): 359-371.

Lapinel, B. (1988). "La circulación atmosférica y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba". Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias Geográficas, Universidad de la Habana, Cuba.

Legge, A. H. and S. V. Krupa (1990). "Acidic Deposition: Sulphur and Nitrogen Oxides". Lewis Publishers INC. Michigan, USA.

Lehman, C., B. Kershner and D. A. Gay (2015). "Impact of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions reductions on acidic deposition in the United States". *EM Magazine*: 6-11.

Marín, A. (2009). "Evaluación, prevención y control de precursores de lluvia acida en el estado de Veracruz". Tesis de maestría, Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Martin, A. (1984). "Estimated washout coefficients for sulphur dioxide, nitric oxide, nitrogen dioxide and ozone". *Atmospheric Environment* (1967) 18(9): 1955-1961.

Michelena, T. M., J. L. Farrell, D. A. Winkler, C. A. Goodrich, C. W. Boylen, J. W. Sutherland and S. A. Nierzwicki (2016). "Aluminum toxicity risk reduction as a result of reduced acid deposition in Adirondack lakes and ponds". *Environmental monitoring and assessment* 188(11): 636.

NADP. (2004). "National Atmospheric Deposition Program/National trends Network".

NADP. (2014). "NADP Site Selection and Installation Manual." Recuperado el 7 de noviembre 2016, de NADP: <http://nadp.sws.uiuc.edu/NADP/>

NADP (2016). See <http://nadp.isws.illinois.edu/data/sites/list/?net=NTN>. Recuperado November 2016.

Noyes, P. D., M. K. McElwee, H. D. Miller, B. W. Clark, L. A. Van Tiem, K. C. Walcott, K. N. Erwin and E. D. Levin (2009). "The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world". *Environment international* 35(6): 971-986.

Parungo, F., C. Nagamoto, S. Hoyt and A. H. Bravo (1990). "The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of Mexico. "Atmospheric Environment. Part A. General Topics", 24(1): 109-123.

Paul, C. and J. Miller (2004). "North American power plant air emissions." Commission for Environment Cooperation of North America, Montreal, Quebec, Canada.

PEMEX. (2016). "Exploración y Producción,." Recuperado el 06 de Abril del 2016, de PEMEX: <http://www3.pemex.com:6015/Logistica/v4/meteorologia/>

Ramírez, E., R. Miranda Guardiola, Y. Gracia Vásquez, I. Balderas Rentería, H. Bravo Álvarez, R. Sosa Echeverría, P. Sánchez Álvarez, A. Alarcón Jiménez, M. Torres and J. Kahl (2010). "Chemical composition of rainwater in northeastern México." *Atmósfera* 23(3): 213-224.

Riehl, H. (1954). *Tropical Meteorology*. McGraw-Hill, New York, 392 p.

Saiz-Lopez, A., A. Notario, J. Albaladejo and G. McFiggans (2007). "Seasonal variation of NO<sub>x</sub> loss processes coupled to the HNO<sub>3</sub> formation in a daytime urban atmosphere: A model study." *Water, air, and soil pollution* 182(1-4): 197-206.

Schmidt, W. (1989). *Ecosystem Research (Ecological Botany)*. Progress in Botany, Springer: 350-374.

Schnelle, K. B. and C. A. Brown (2002). "Air pollution control technology handbook", CRC press Boca Raton, FL.

Seinfeld, J. (1986). "Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. USA", John Wiley and Sons.

Seinfeld, J. P., S. (2006). "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change". New Jersey, J. Wiley & Sons. 2nd Ed.

SEMARNAT (2006). *Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999*. México.

Smith, R. A. (1872). *Air and Rain -the Beginning of a Chemical Climatology* Longmans and Green, London, p. 600.

Sosa, R., H. Bravo, A. L. Alarcón, M. C. Torres, P. Sánchez, y C. Herrera (2014). "Evaluación de la deposición húmeda atmosférica ácida en la costa del Golfo de México", p. 675-692. En: A. V. Botello, J. Rendón von Osten, J. A. Benítez y G. Gold-Bouchot (eds.). *Golfo de México. Contaminación e Impacto ambiental: diagnóstico y tendencia*. UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176 p. ISBN 978-607-7887-71-3.

Stohl, A., C. Forster, A. Frank, P. Seibert and G. Wotawa (2005). "Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2." *Atmospheric Chemistry and Physics* 5(9): 2461-2474.

The NAPAP Office of the Director, W., D.C (1990). Integrated Assessment Report. The US National Acid Precipitation Assessment Program: 520.

Torres, F. R., J.; Chí, E.; Alarcón, A.; Bravo, H.; Sánchez, P (2009). "Neutralización del agua de lluvia en la atmósfera de San Francisco de Campeche". XIV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales., Santa Cruz, Tlaxcala, México.

UNECE (2010). The United Nations Economic Commission for Europe. Recuperado el 24 de noviembre de 2016, de UNECE: [www.unece.org](http://www.unece.org)

US-EPA (1994). "Quality Assurance Handbook for Air pollution Measurement Systems". Vol V. Precipitation Measurement Systems. Epa-600/R-94/038e, U.S. Environmental Protection Agency., Research Triangle Park, NC.

US-EPA (1994). "Quality Assurance Handbook for Air pollution Measurement Systems". Epa-600/R-94/038e.

U.S. EPA (2004). "The Clean Air Act". Epa-600/R-94/038e.

US-EPA Base Case v.4.10 (2010). Using the Integrated Planning Model. Recuperado el 22 de noviembre 2016, de EPA: <http://www.epa.gov>

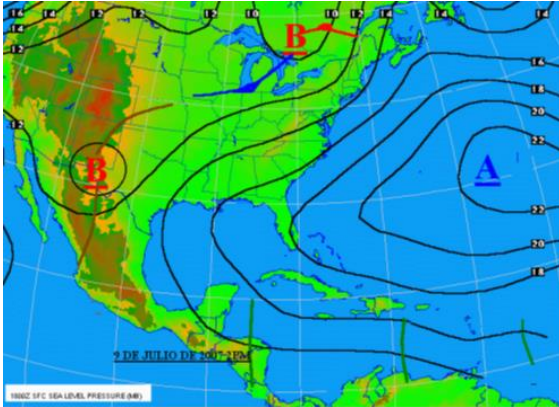
Velasco, I., Di Lorenzo, N. L., Flores, A. L. y Nuñez, J. M. (2001). Interpretación de imágenes de satélites sobre Sudamérica. Grupo SAT-RAD (Grupo Desarrollo de Productos Satélite y Radar). Depto. Ciencias de la Atmósfera, Universidad de Buenos Aires. 1428 Buenos Aires, Argentina.

Villaseñor, R., M. Magdaleno, A. Quintanar, J. Gallardo, M. López, R. Jurado, A. Miranda, M. Aguilar, L. Melgarejo and E. Palmerin (2003). "An air quality emission inventory of offshore operations for the exploration and production of petroleum by the Mexican oil industry." *Atmospheric Environment* 37(26): 3713-3729.

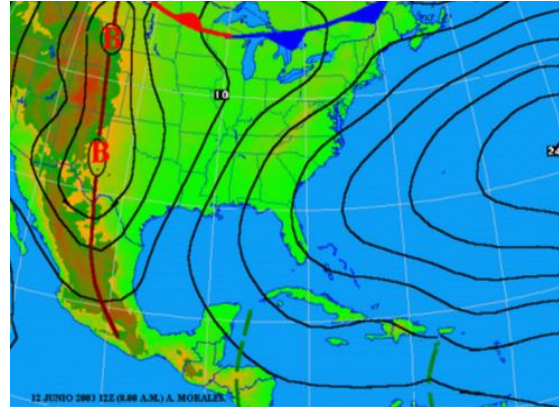
## ANEXOS

### Anexo I. Situaciones sinópticas (TSS) principales, descrita por (Lapinel, 1988).

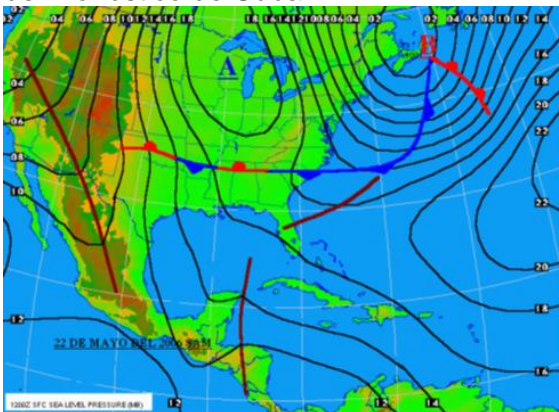
Figura I. 1.- Situaciones sinópticas (TSS) para el período 1980-2010.



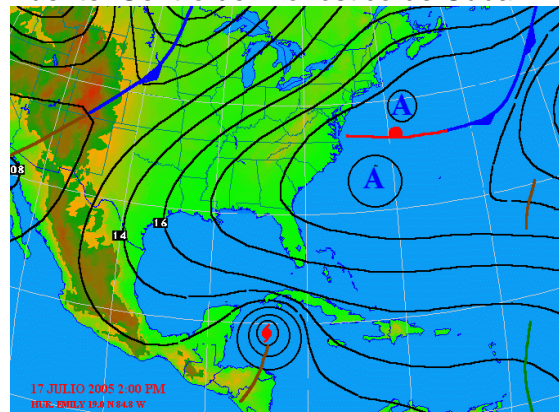
1. Anticiclón oceánico. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.



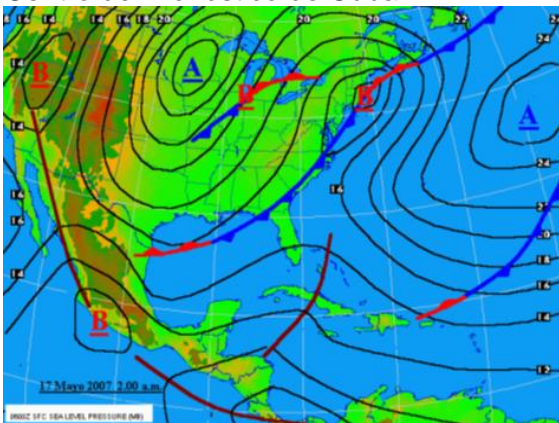
2. Flujo Anticiclónico extendido. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.



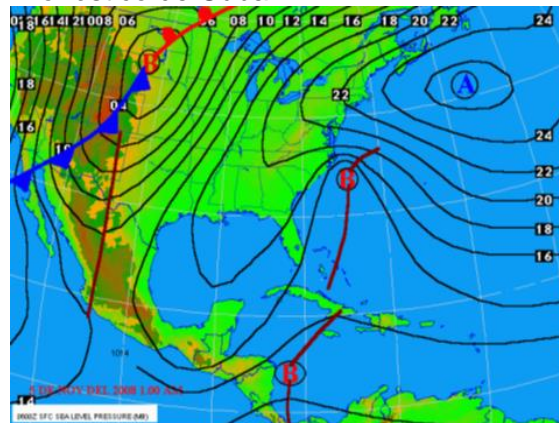
3. Débil gradiente barométrico. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.



4. Ciclón Tropical. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.

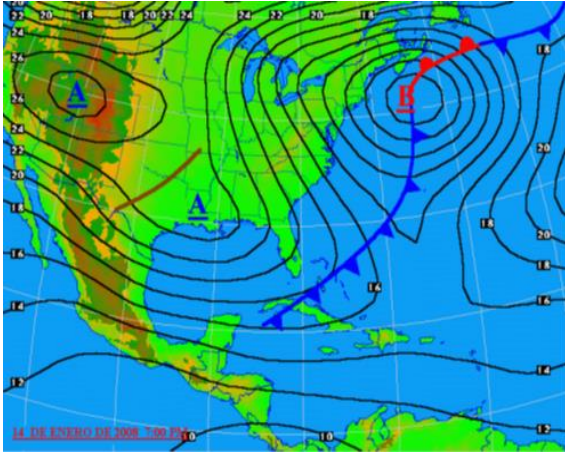


5. Zona de convergencia en el flujo superficial. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.

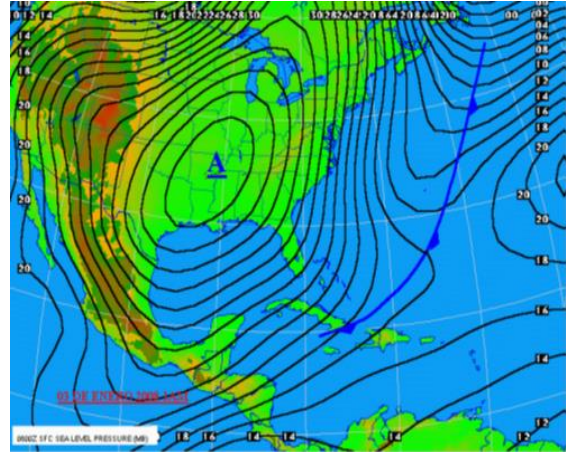


6. Baja extratropical. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.





7. Zonas Frontales de Cuba. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.



8. Anticiclón continental migratorio de Cuba. Fuente: Centro de Pronóstico de Cuba.

## Anexo II. Clasificación de los tipos de situaciones sinópticas y los subtipos definidas por Braulio Lapinel.

Tabla II. 1.- Clasificación de los tipos de situaciones sinópticas y los subtipos definidas por Braulio Lapinel.

Fuente: Lapinel, 1988.

I. ANTICICLÓN DEL ATLÁNTICO	1. Predominio de vientos del primer cuadrante 2. Predominio de vientos del segundo cuadrante
VI. BAJA EXTRATROPICAL	3. Influencia muy cercana o directa de la baja. Sector cálido. 4. Influencia muy cercana o directa de la baja. Sector frío. 5. Zona anterior al frente. Con hondonada prefrontal 6. Zona anterior al frente. Sin hondonada prefrontal
V. ZONAS DE CONVERGENCIA	7. En el flujo del Este 8. Otros
VIII. ANTICICLONES MIGRATORIOS	9. Sobre el continente (incluye overrunning) 10. Al este de los E.U, sobre el océano y en rápida tropicalización. 11. En el golfo de Méjico o sobre Cuba
II. ANTICICLÓN EXTENDIDO	12. Zonas típicas del Anticiclón extendido (sin hondonada) 13. Zonas típicas del Anticiclón extendido (región divergente)
VII. ZONAS FRONTALES	14. Frente frío clásico 15. Frente frío revesino 16. Frente estacionario 17. Frente disipándose
III. GRADIENTE DÉBIL	18. Generalmente asociado a ondas u hondonadas.
IV. SITUACIONES CICLÓNICAS	19. Depresiones ciclónicas, perturbaciones, huracanes.
IX. OTRAS SITUACIONES (indeterminadas)	20. No identificable.



### Anexo III. Valores de pH, conductividad, aniones y cationes para la estación de la Mancha en los años 2014-2015.

Tabla III. 1.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2014.

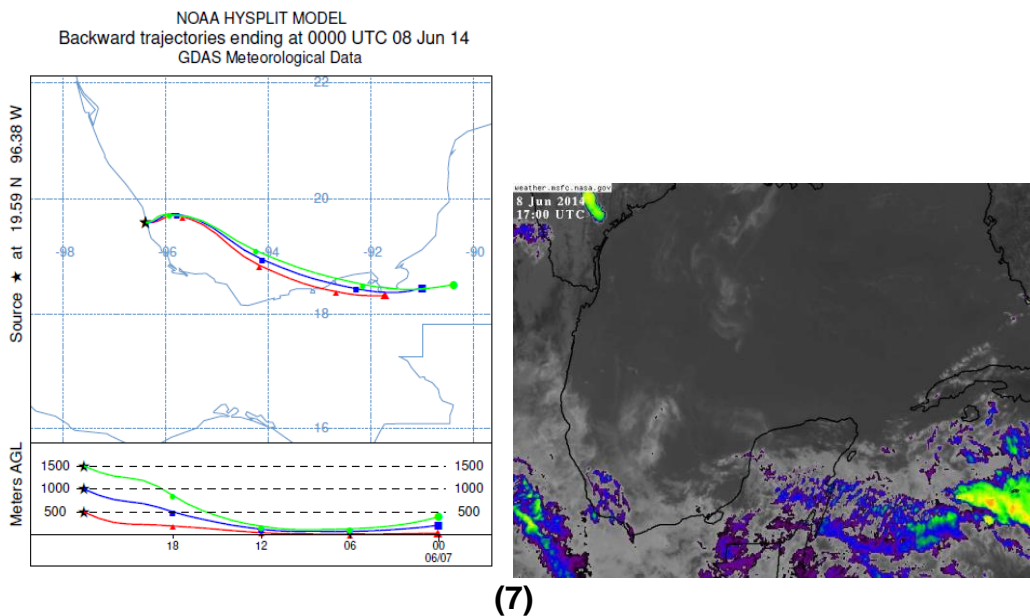
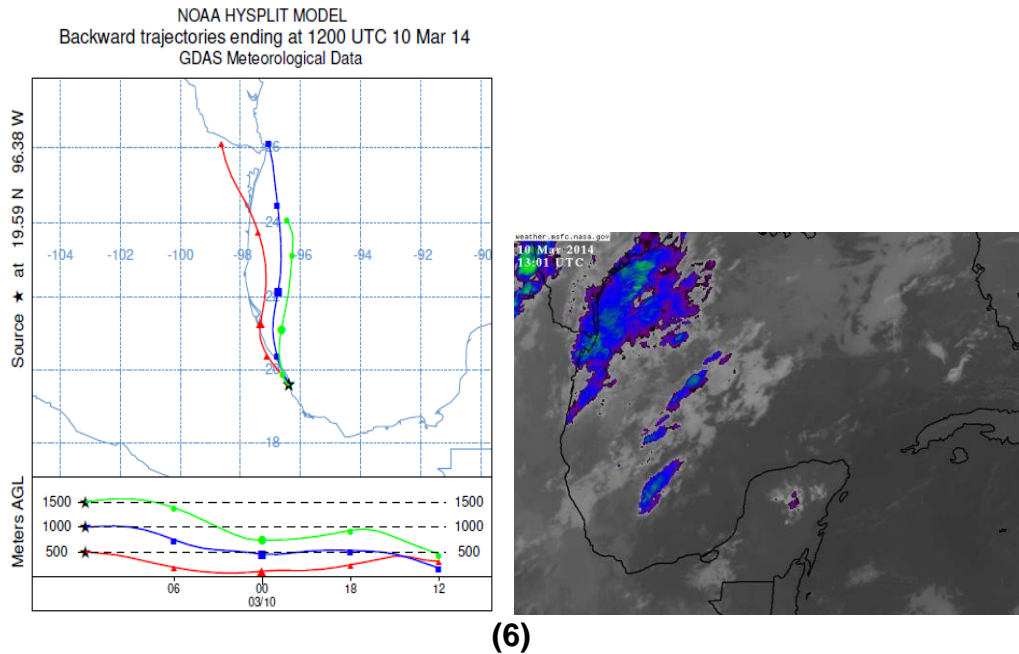
Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental (µs/cm)	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
10/03	1.50	4.74	77.6	8.03	0.24	1.10	1.06	2.53	13.93	3.37	5.01
08/04	2.50	6.90	59.51	4.02	1.72	0.74	0.79	2.94	7.21	3.85	6.24
09/05	1.00	7.28	171.58	17.06	1.72	4.96	2.75	7.08	28.76	9.30	13.01
14/05	36.00	6.58	46.67	6.06	0.12	0.54	0.92	0.83	9.31	0.87	2.60
18/05	18.00	4.51	32.84	2.28	0.15	0.30	0.31	0.35	3.94	0.85	3.41
23/05	16.00	4.27	30.29	1.53	-	0.20	0.26	0.07	1.75	0.69	3.95
06/06	40.00	5.07	14.80	1.56	-	0.17	0.11	0.03	2.27	0.21	1.00
07/06	110.00	5.38	12.06	1.34	-	-	0.16	0.08	2.20	0.08	0.85
08/06	10.00	4.79	25.10	2.29	0.10	0.20	0.27	0.19	4.25	0.56	1.84
09/06	2.00	6.71	24.90	1.94	0.15	0.22	0.57	1.26	2.95	0.51	2.03
11/06	22.00	5.38	9.90	0.94	0.11	0.20	0.30	0.23	2.26	0.53	1.36
17/06	12.00	7.45	54.61	3.24	0.04	0.71	1.70	4.24	5.45	0.72	3.02
18/06	20.00	5.37	10.94	1.07	-	0.08	0.17	0.19	1.74	0.17	1.08
19/06	21.00	4.97	15.20	1.25	0.11	0.09	0.17	0.27	1.95	0.42	1.58
20/06	29.00	5.52	11.86	1.14	-	0.10	0.18	0.35	1.79	0.17	1.22
22/06	5.00	6.22	5.20	0.56	-	0.10	0.15	0.30	0.80	0.23	0.50
25/06	3.00	6.10	28.43	2.92	0.26	0.34	0.55	0.82	5.22	0.83	2.77
26/06	4.00	6.60	16.37	1.09	0.18	0.32	0.44	0.83	3.42	0.62	2.04
30/06	1.50	4.37	47.20	3.16	0.19	0.23	0.46	0.67	5.37	1.46	3.58
04/07	16.00	6.40	10.89	1.18	-	0.13	0.23	0.37	1.92	0.20	0.56
05/07	53.00	5.93	6.38	0.58	-	0.08	0.11	0.22	0.90	0.18	0.58
06/07	7.00	6.05	8.10	1.03	-	0.14	0.19	0.36	1.54	0.28	0.71
10/07	10.00	5.27	8.99	0.38	-	-	0.24	0.26	1.16	0.25	0.70
11/07	6.00	4.76	18.32	1.06	0.09	0.11	0.20	0.37	1.62	0.91	1.88
13/07	19.00	5.04	19.23	2.02	-	0.16	0.24	0.18	3.92	0.38	1.19
24/07	10.00	4.83	30.60	3.37	-	0.32	0.43	0.39	6.02	0.72	2.21
30/07	3.50	7.35	74.13	3.24	7.08	1.95	0.55	0.90	6.74	0.91	2.76
11/08	50.00	4.61	11.61	0.37	-	-	0.08	0.18	0.67	0.46	1.43
16/08	9.00	4.84	28.85	3.18	-	0.32	0.39	0.26	5.70	0.45	1.93
18/08	1.50	4.74	25.93	2.37	-	0.11	0.40	0.56	4.05	0.52	2.21
19/08	1.00	4.58	32.27	3.82	-	0.28	0.52	1.08	8.48	0.64	3.25
21/08	16.00	5.23	8.64	0.54	-	0.05	0.14	0.33	0.92	0.24	1.21
22/08	30.00	4.89	16.48	1.05	0.06	0.11	0.16	0.42	1.71	0.58	1.90
30/08	13.00	4.81	11.58	0.64	-	0.13	0.09	0.10	0.96	0.38	1.13
31/08	25.00	5.30	4.05	0.34	-	-	0.05	-	0.49	0.13	0.27
03/09	4.00	5.94	5.58	0.49	-	0.03	0.14	0.13	0.80	0.40	0.40
04/09	1.00	4.55	-	0.68	0.08	0.34	0.18	0.23	0.99	2.36	1.92
05/09	19.00	6.09	14.06	1.51	0.11	0.22	0.49	0.34	2.31	0.77	1.63
06/09	3.00	4.64	26.09	2.35	0.07	0.03	0.30	0.29	4.01	0.52	2.09
07/09	11.00	4.59	20.87	1.31	-	0.15	0.19	0.14	2.35	0.30	2.20
08/09	11.00	4.41	25.10	1.48	-	0.10	0.19	0.16	2.54	0.78	2.25
09/09	12.00	5.26	8.15	0.82	-	-	0.10	0.02	1.33	0.17	0.46
11/09	10.00	5.36	5.83	0.60	-	0.10	0.10	0.12	0.82	0.23	0.92
12/09	14.00	5.05	8.72	0.49	-	0.10	0.10	0.10	0.66	0.39	0.88
14/09	6.00	5.52	7.92	0.66	-	0.09	0.14	0.28	1.09	0.43	1.14
15/09	15.00	5.20	8.30	0.65	-	0.03	0.05	0.14	1.09	0.11	0.65
16/09	8.00	5.40	7.56	0.82	-	0.09	0.07	0.00	1.34	0.15	0.44
17/09	51.00	5.16	6.16	0.56	-	0.12	0.43	0.03	1.59	0.64	1.07
21/09	4.00	5.18	11.08	1.18	-	0.12	0.13	0.06	2.18	0.24	0.68
22/09	2.00	5.65	15.89	1.10	0.16	0.27	0.38	0.71	1.94	1.02	2.24
24/09	11.00	4.72	15.82	0.98	-	0.09	0.18	0.21	1.80	0.36	1.52
26/09	20.00	5.33	4.56	0.66	-	0.15	0.12	0.29	1.15	0.45	0.83
27/09	5.00	5.94	5.91	0.75	0.05	0.05	0.08	0.01	0.98	0.11	0.62
08/10	4.00	4.90	29.93	3.37	0.15	0.04	0.21	0.23	4.57	0.59	2.54
09/10	48.00	4.73	18.31	1.37	-	0.07	0.10	0.45	2.55	0.04	0.75
10/10	2.00	5.03	23.85	2.42	0.20	0.45	0.38	0.62	4.13	1.10	2.42
12/10	2.00	5.00	15.68	1.46	-	0.08	0.13	0.23	2.37	0.40	0.85
20/10	10.00	5.83	4.46	0.38	0.03	0.08	0.13	0.09	0.75	0.17	0.32
21/10	15.00	5.35	3.83	0.17	-	-	0.04	0.07	0.28	0.12	0.36
01/11	8.00	5.13	18.11	1.76	0.19	0.18	0.19	0.20	3.50	0.45	1.15
07/11	10.00	4.70	18.14	1.46	0.09	0.14	0.16	0.17	2.34	0.31	1.82
10/12	1.50	7.12	109.58	10.05	0.15	1.43	1.51	5.82	19.38	1.58	4.88
17/12	5.00	4.78	42.3	3.68	-	0.26	0.49	1.20	5.89	1.96	4.00
24/12	2.00	6.78	98.40	12.93	0.39	0.79	1.67	2.09	21.89	1.53	5.43

Tabla III. 2.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2015.

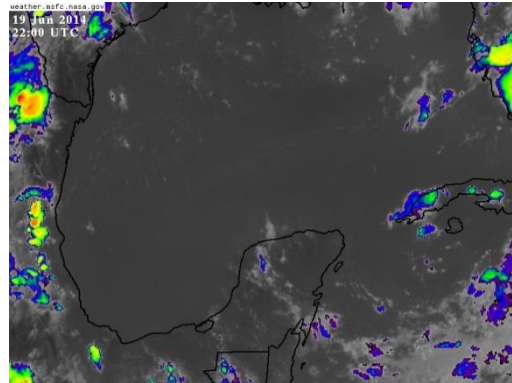
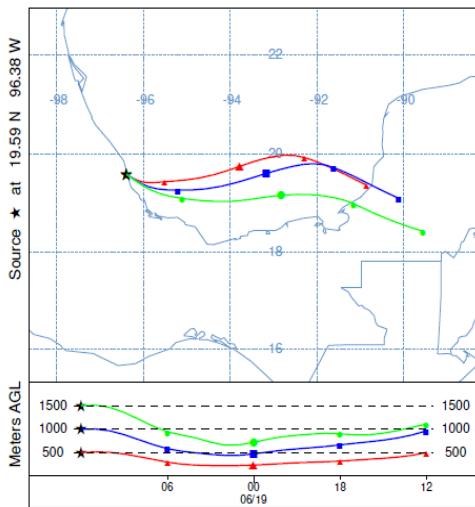
Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
06/01	3.00	6.54	28.8	3.04	0.29	0.28	0.36	0.78	5.58	0.66	1.72
07/01	1.50	6.36	21.80	2.16	-	0.18	0.28	0.92	4.07	0.43	1.63
08/01	8.00	5.65	27.10	3.20	-	0.12	0.37	0.41	5.78	0.59	1.34
10/01	12.00	7.48	70.70	6.05	-	0.86	3.04	2.66	6.18	3.44	4.26
07/03	2.00	7.07	MI	9.11	-	1.08	1.79	3.88	21.02	0.65	3.08
12/03	19.00	6.05	10.25	0.84	0.08	0.08	0.13	0.51	1.08	0.27	1.01
13/03	4.00	6.24	7.43	0.73	-	0.08	0.09	0.44	1.09	0.29	0.50
15/04	24.00	5.43	19.50	1.61	0.35	0.24	-	0.91	2.36	0.88	2.68
29/04	9.00	6.67	24.00	1.53	0.35	0.31	0.20	1.54	2.97	1.00	1.56
30/04	1.00	7.15	MI	2.01	0.04	0.17	0.17	3.71	3.21	1.05	1.51
03/05	3.00	6.27	25.40	1.75	0.41	0.28	0.26	1.45	2.87	2.67	2.57
13/05	12.00	5.76	14.85	1.77	0.04	0.14	0.18	0.50	2.95	0.36	1.07
14/05	12.00	5.84	28.70	2.12	0.08	0.57	0.52	1.48	5.29	0.86	2.92
31/05	12.00	6.49	16.80	1.45	0.27	0.15	0.30	0.78	2.31	0.43	0.77
06/06	4.00	5.17	23.40	1.65	0.27	0.25	0.27	0.74	2.56	0.93	2.68
12/06	5.00	6.36	22.50	1.42	0.40	0.56	0.38	0.81	2.46	0.53	2.89
13/06	47.00	6.08	9.67	0.68	-	0.05	0.07	0.72	0.73	0.09	1.61
14/06	3.50	6.38	19.40	1.61	0.65	0.35	0.22	0.67	2.79	0.65	1.93
16/06	12.00	5.89	13.40	0.96	0.44	0.19	0.17	0.35	1.56	0.52	1.54
18/06	3.50	6.17	45.40	4.87	0.56	0.42	0.61	1.02	8.01	1.41	3.59
19/06	22.00	5.52	12.25	1.22	0.08	0.06	0.12	0.26	1.99	0.28	0.88
20/06	74.00	5.59	10.33	0.96	-	0.15	0.07	0.37	1.27	-	1.03
21/06	4.00	4.56	36.70	2.10	0.18	0.16	0.34	0.72	3.40	1.12	4.09
24/06	3.00	6.76	39.60	3.36	0.76	0.41	0.38	2.09	4.88	1.59	3.34
27/06	31.00	5.74	10.20	1.08	-	0.08	0.08	0.36	1.57	0.16	0.90
28/06	4.00	5.57	25.20	2.66	0.12	0.26	0.33	0.66	4.64	0.59	2.01
30/06	9.00	4.85	37.1	4.11	-	0.25	0.41	0.35	6.28	0.49	2.43
02/07	3.00	4.94	45.1	4.50	0.25	0.24	0.58	1.22	6.95	1.56	4.70
04/07	16.00	4.45	16.13	0.78	0.05	0.05	0.08	0.12	1.72	0.76	2.18
05/07	19.00	4.98	15.50	1.20	0.05	0.11	0.13	0.24	2.02	0.48	1.33
09/07	2.00	5.08	50.10	4.52	0.72	0.55	0.60	1.50	7.32	2.71	4.52
10/07	29.00	5.57	19.13	1.99	0.06	0.17	0.25	0.41	3.79	0.20	1.93
11/07	16.00	5.49	7.55	0.77	0.03	0.09	0.05	0.16	1.40	0.22	0.66
12/07	20.00	5.84	20.00	2.08	0.15	0.15	0.24	0.62	3.43	0.67	1.83
17/07	34.00	5.17	8.30	0.76	-	0.01	0.04	0.16	1.23	0.02	0.73
18/07	44.00	4.92	13.21	0.98	-	0.14	0.10	0.18	1.73	ND	1.00
20/07	1.00	5.62	MI	1.45	0.57	0.23	0.11	0.19	2.31	0.86	1.70
12/08	12.00	7.59	60.20	2.05	1.32	0.41	0.43	6.72	3.10	0.36	1.26
18/08	10.00	6.86	11.48	0.44	-	-	0.10	1.49	0.71	0.23	0.86
25/08	18.00	6.5	14.87	1.26	-	0.21	0.13	0.90	2.47	0.40	0.65
26/08	22.00	5.21	12.42	1.18	0.03	0.08	0.11	0.34	1.95	0.32	0.99
27/08	16.00	5.99	5.02	0.35	0.12	0.02	0.02	0.25	0.53	0.42	0.42
29/08	24.00	6.16	4.88	0.31	0.07	0.04	0.03	0.39	0.40	0.18	0.33
02/09	21.00	4.66	16.92	0.61	0.13	0.05	0.07	0.39	1.04	0.65	1.93
04/09	10.00	4.76	11.60	0.36	0.05	0.09	0.03	0.23	0.54	0.42	1.16
05/09	3.00	5.04	23.10	1.50	0.22	0.22	0.14	0.98	2.52	1.26	2.55
06/09	6.00	4.48	24.10	0.83	0.05	0.07	0.09	0.39	1.58	0.49	2.64
09/09	8.00	4.21	38.60	1.31	0.06	0.07	0.13	0.36	2.24	0.79	3.89
14/09	34.00	4.93	13.10	0.75	-	0.08	0.06	0.35	1.06	0.25	1.21
16/09	14.00	5.16	6.39	0.19	-	0.01	-	0.07	0.32	0.30	0.43
17/09	2.00	4.68	MI	1.15	0.19	0.16	0.13	0.37	1.93	1.37	1.69
06/10	2.00	5.51	37.80	2.94	1.32	0.29	0.33	0.93	4.23	3.02	4.29
16/10	8.00	5.56	7.01	0.64	0.05	0.10	0.01	0.12	1.02	0.16	0.44
18/10	6.00	5.93	3.60	0.26	0.03	0.08	0.02	0.16	0.37	0.11	0.40
19/10	47.00	5.85	14.72	1.68	0.19	0.26	0.16	0.37	2.99	ND	0.63
23/10	7.00	4.54	29.80	1.96	0.12	0.09	0.25	0.38	3.27	0.62	2.94
09/11	37.00	5.71	6.48	0.52	0.01	0.19	0.08	0.25	0.60	0.08	0.25
13/11	45.00	4.83	13.05	0.69	-	0.10	0.07	0.07	1.11	ND	1.27
14/11	7.00	5.31	5.89	0.41	-	0.05	-	0.07	0.69	0.09	0.43
22/11	32.00	5.86	10.53	1.15	-	0.11	0.11	0.59	1.64	ND	0.70
29/11	3.00	5.07	40.80	3.94	-	0.29	0.54	1.82	6.45	0.77	4.61
30/11	2.00	4.82	42.90	3.13	-	0.24	0.55	1.79	6.42	0.50	4.13

**Anexo IV. Trayectorias de retrocesos realizadas e imágenes infrarrojas para los eventos de lluvia en los intervalos de lluvia ácida y lluvia ácida baja para los años 2014-2015 en La Mancha, Veracruz.**

Figura IV. 1.- Trayectorias de retrocesos realizadas e imágenes infrarrojas para los eventos de lluvia ácida ( $5.0 < \text{pH} < 4.5$ ), para el año 2014 en La Mancha, Veracruz.

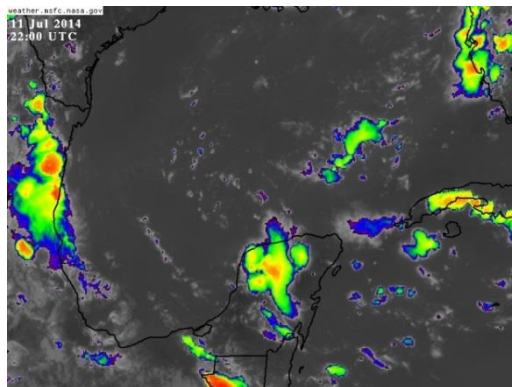
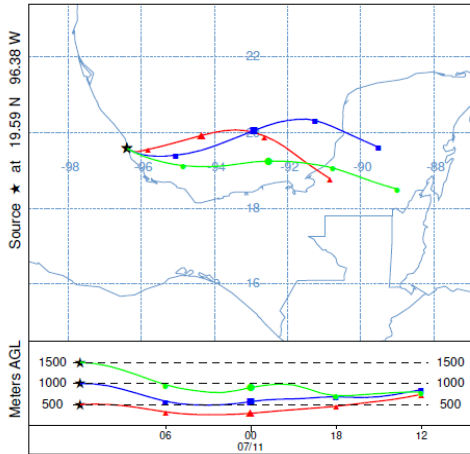


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 19 Jun 14  
 GDAS Meteorological Data



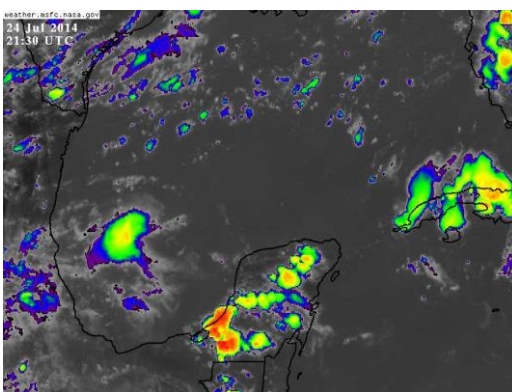
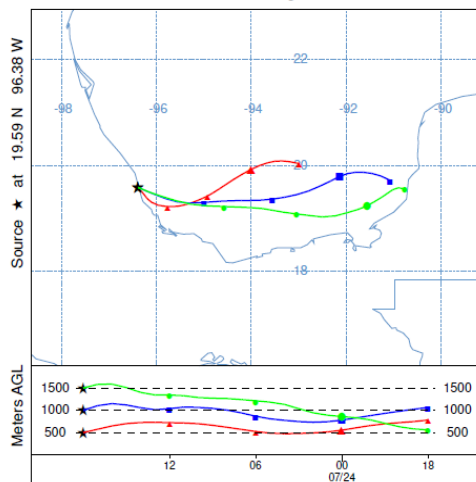
(8)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 11 Jul 14  
 GDAS Meteorological Data

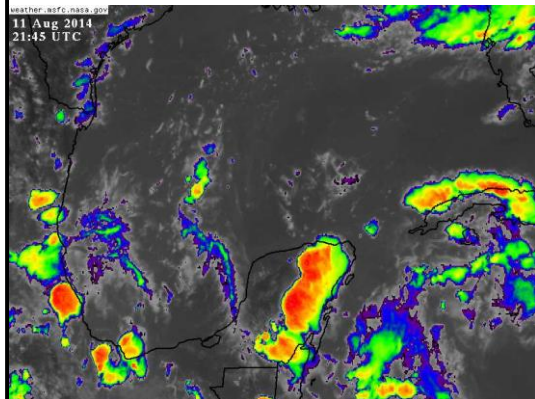
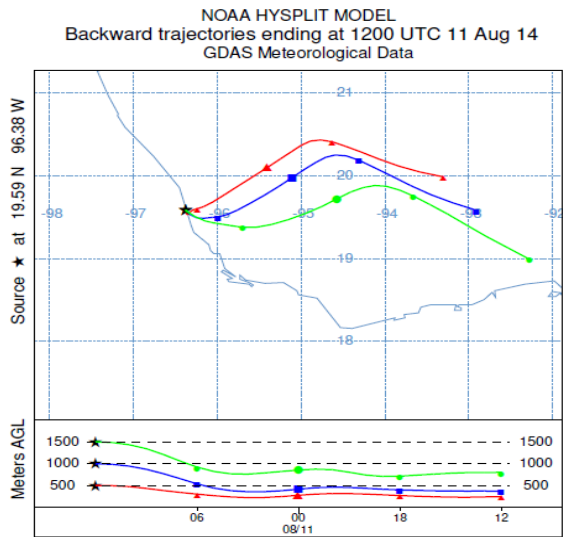


(9)

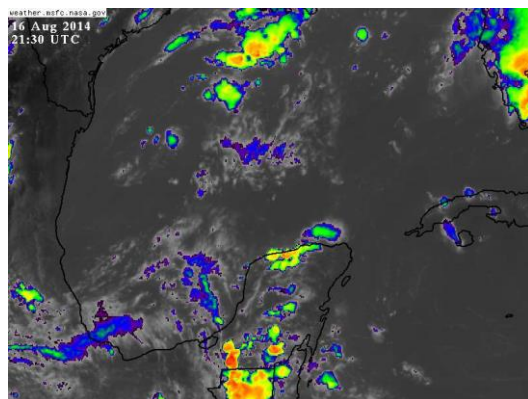
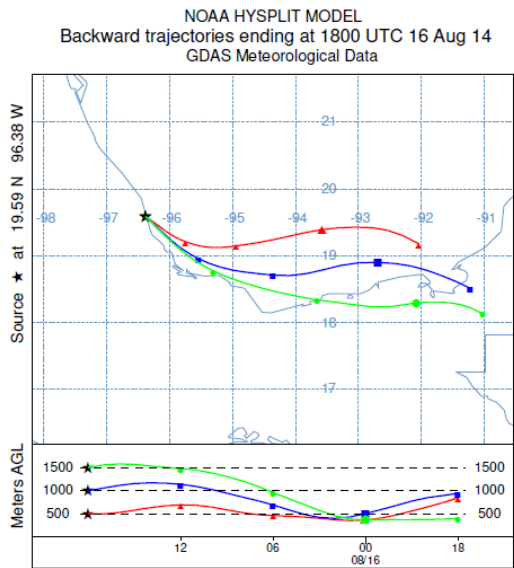
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 24 Jul 14  
 GDAS Meteorological Data



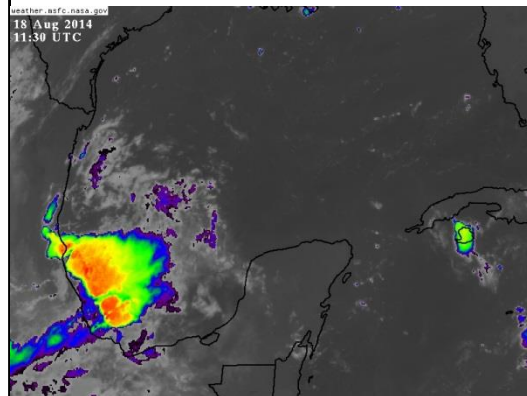
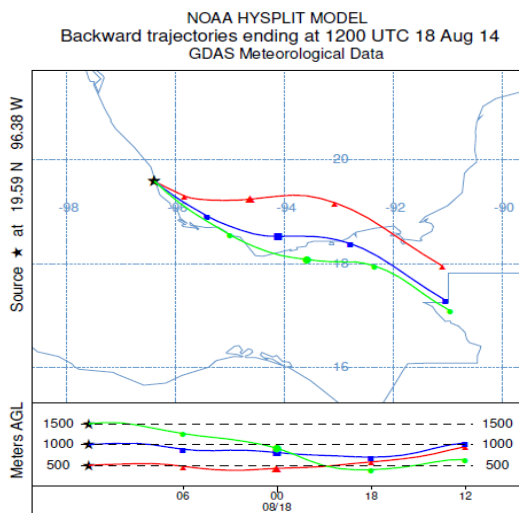
(10)



(11)



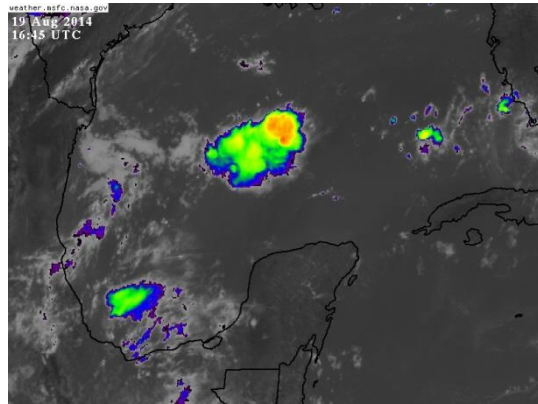
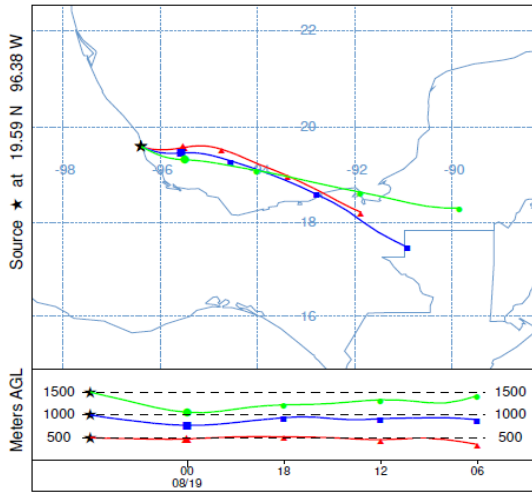
(12)



(13)

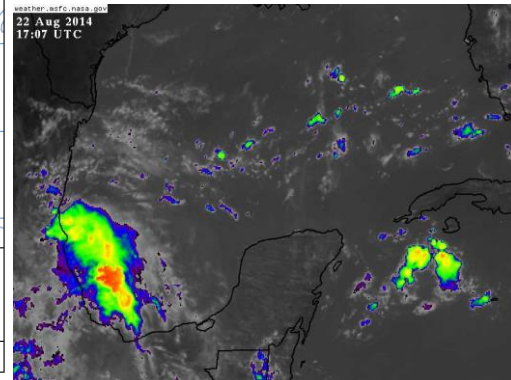
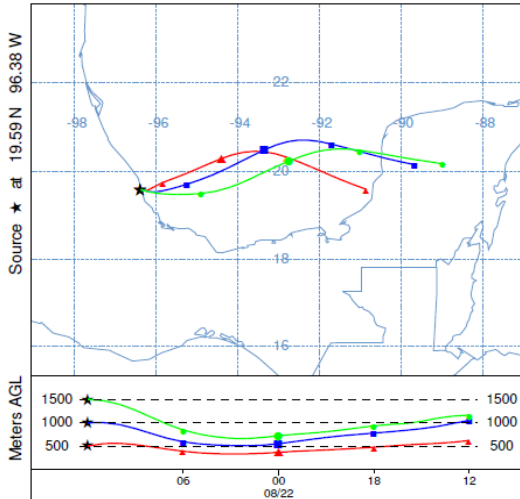


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0600 UTC 19 Aug 14  
 GDAS Meteorological Data



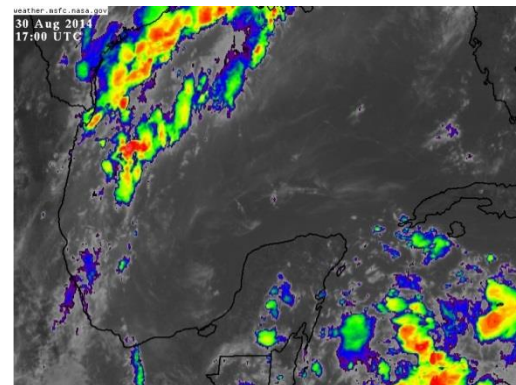
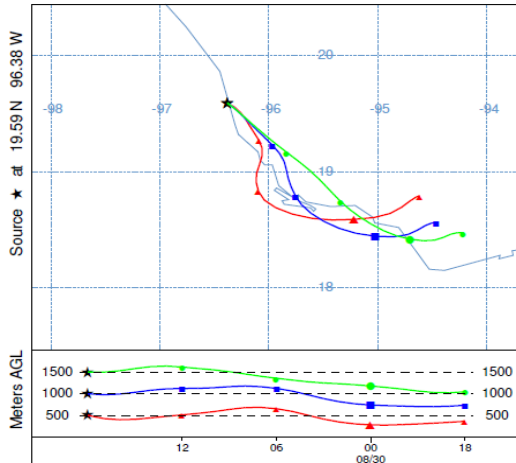
(14)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 22 Aug 14  
 GDAS Meteorological Data



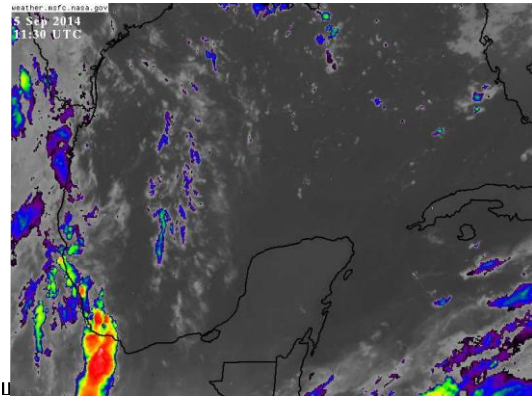
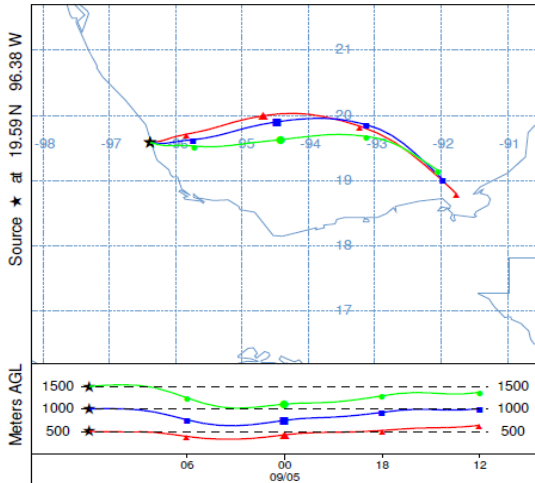
(15)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 30 Aug 14  
 GDAS Meteorological Data



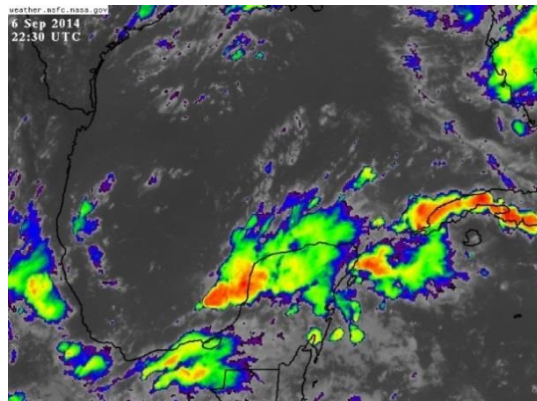
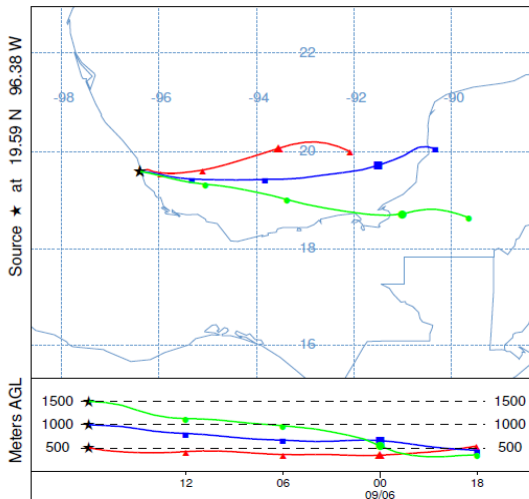
(16)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 05 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



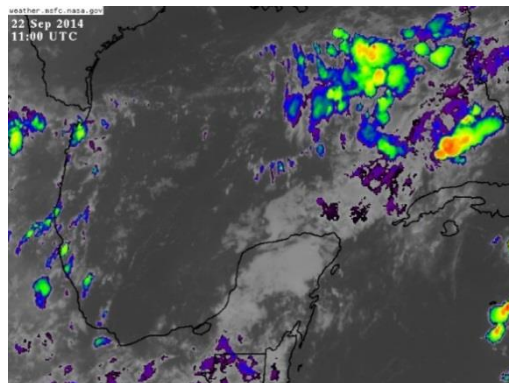
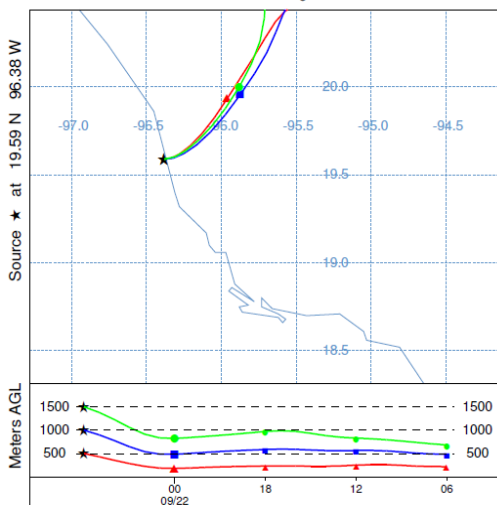
(17)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 06 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



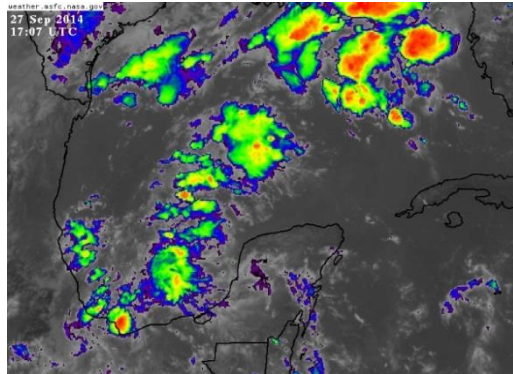
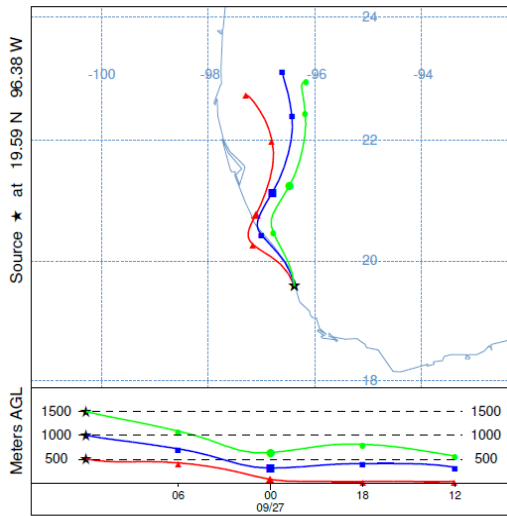
(18)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0600 UTC 22 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



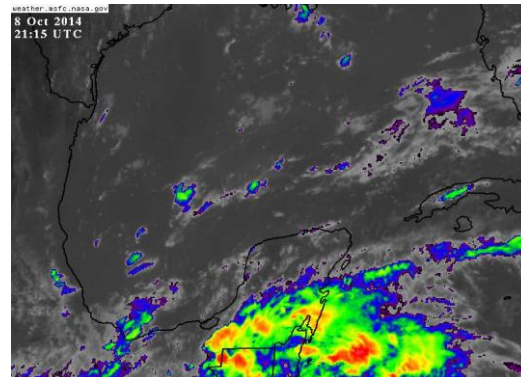
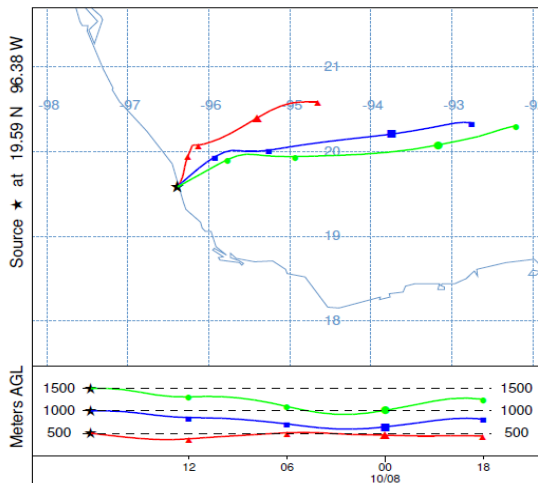
(19)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 27 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



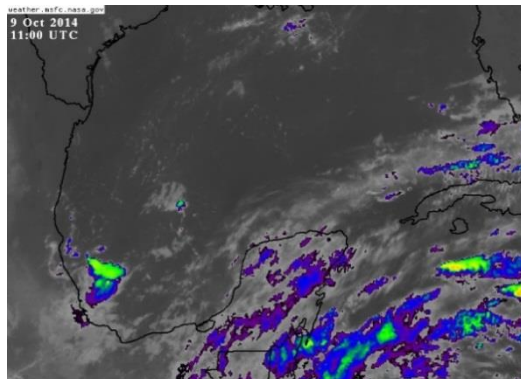
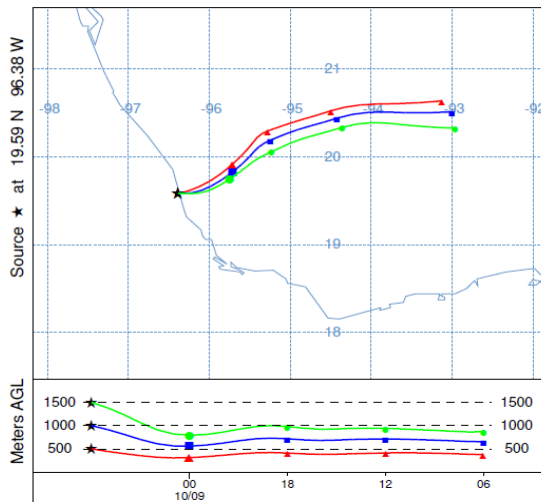
(20)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 08 Oct 14  
 GDAS Meteorological Data



(21)

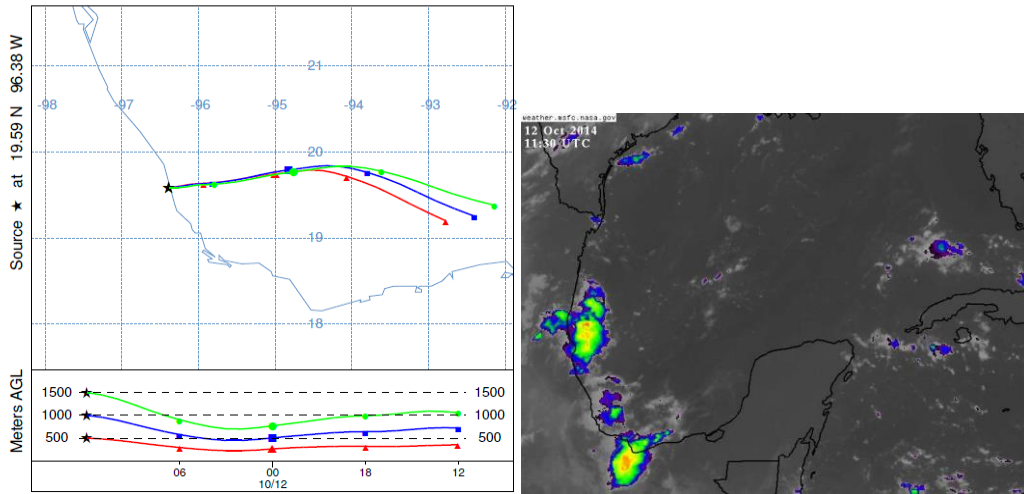
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0600 UTC 09 Oct 14  
 GDAS Meteorological Data



(22)

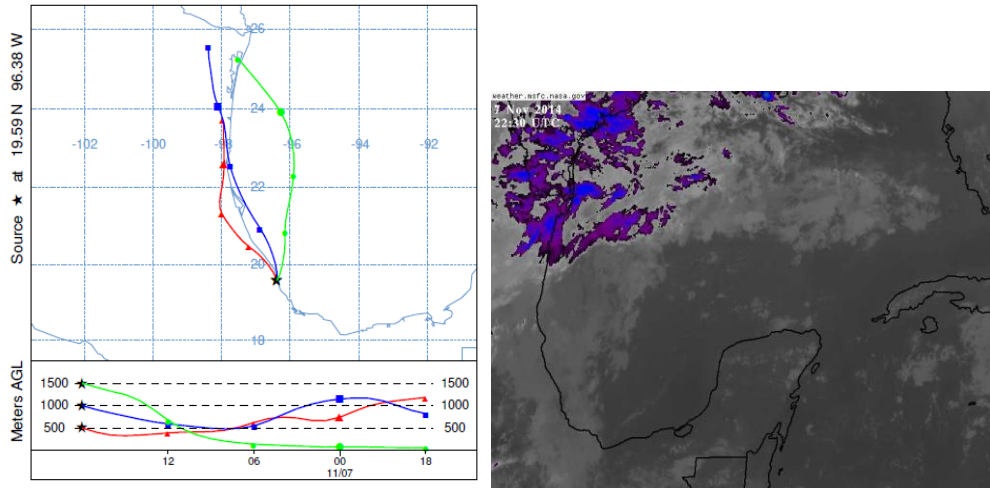


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 12 Oct 14  
 GDAS Meteorological Data



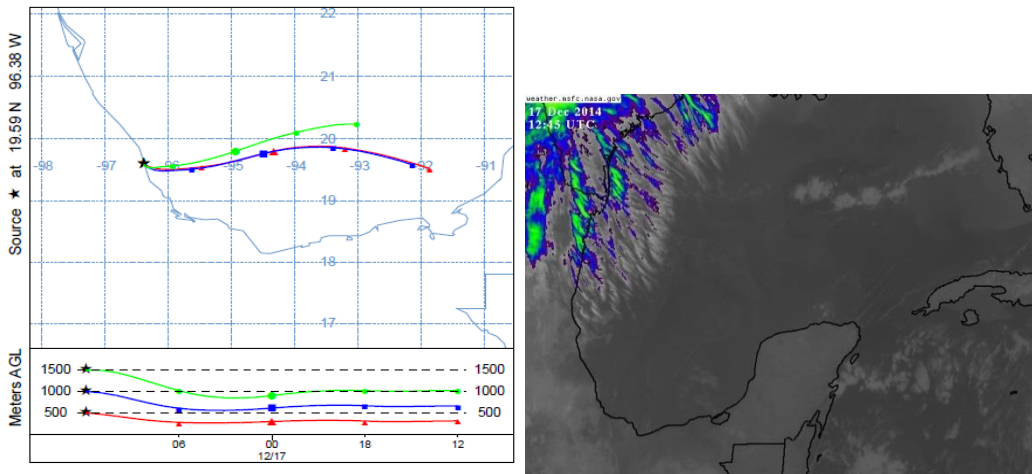
(23)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 07 Nov 14  
 GDAS Meteorological Data



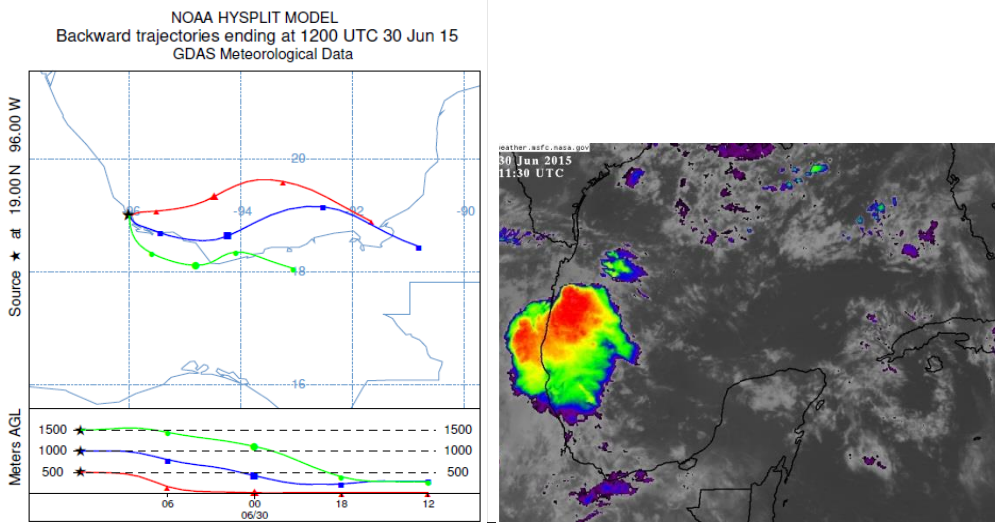
(24)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 17 Dec 14  
 GDAS Meteorological Data

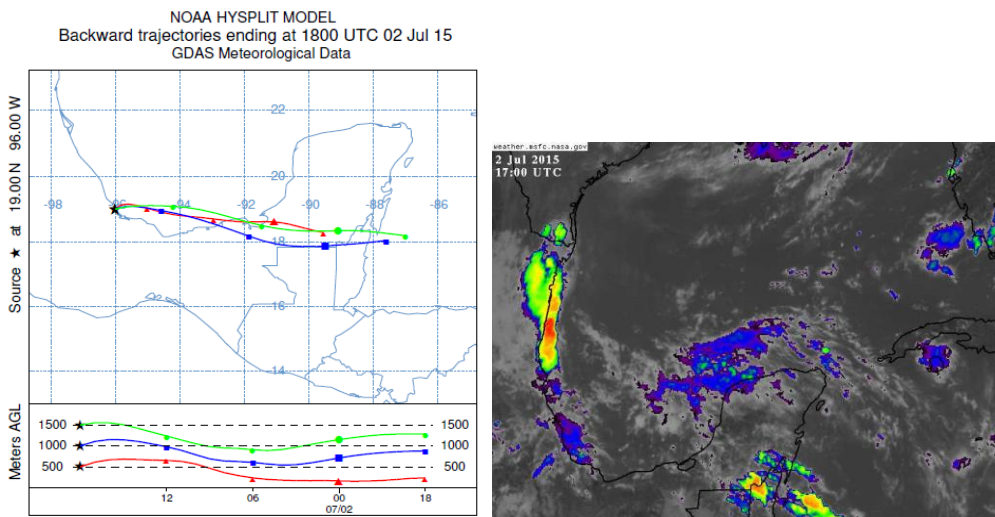


(25)

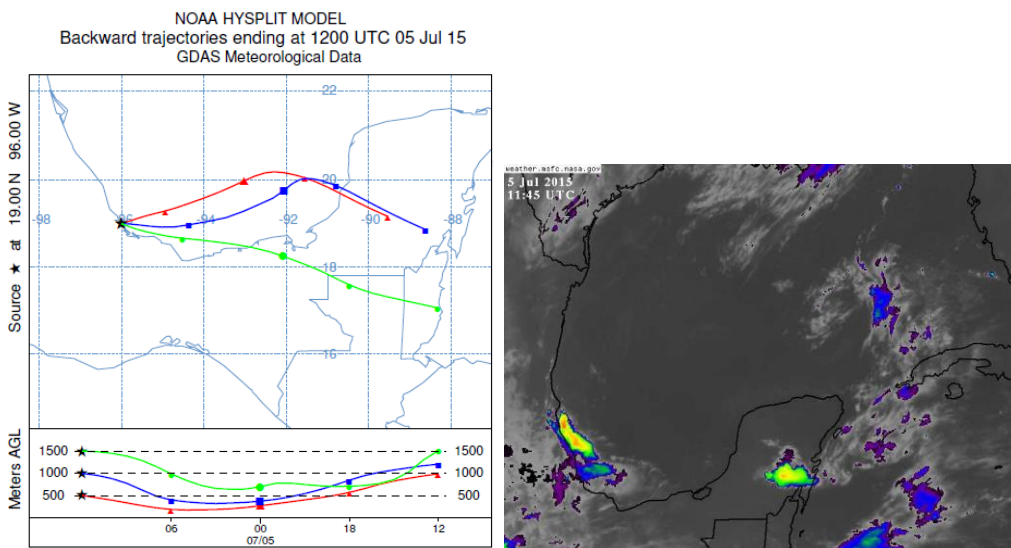
Figura IV. 2.- Trayectorias de retrocesos realizadas e imágenes infrarrojas para los eventos de lluvia ácida ( $5.0 < \text{pH} < 4.5$ ), para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.



(6)

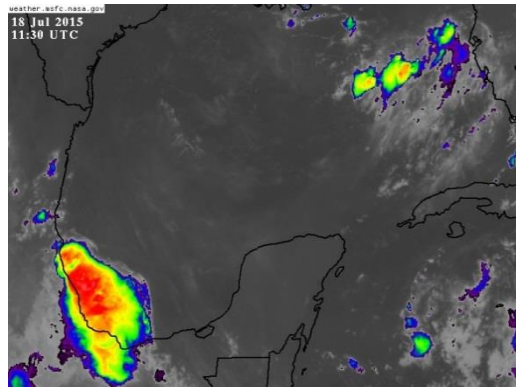
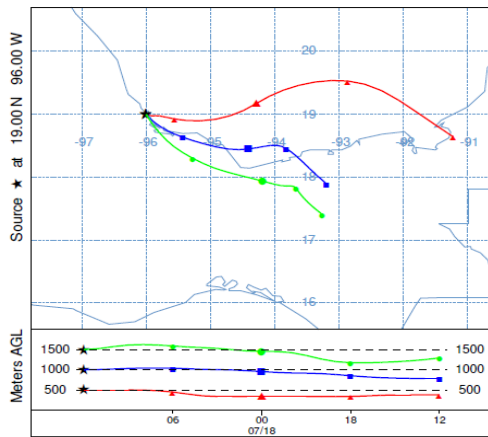


(7)



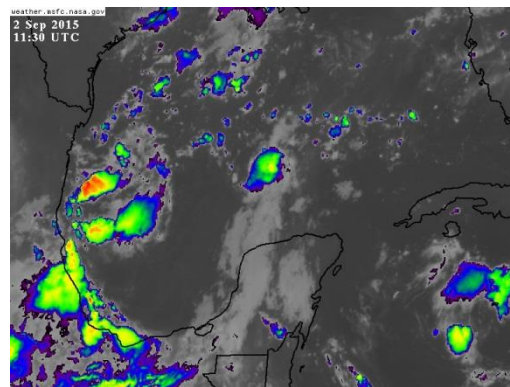
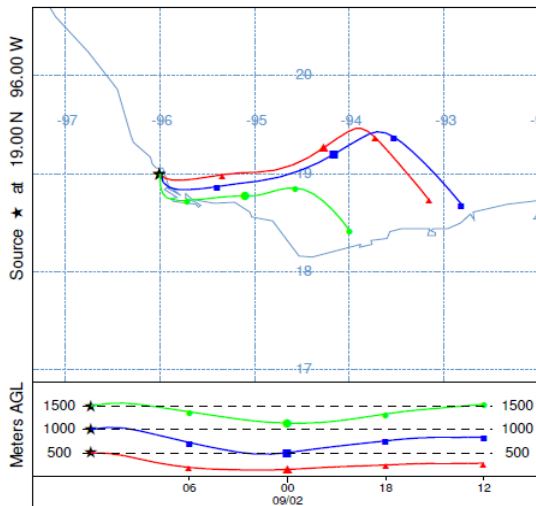
(8)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 18 Jul 15  
 GDAS Meteorological Data



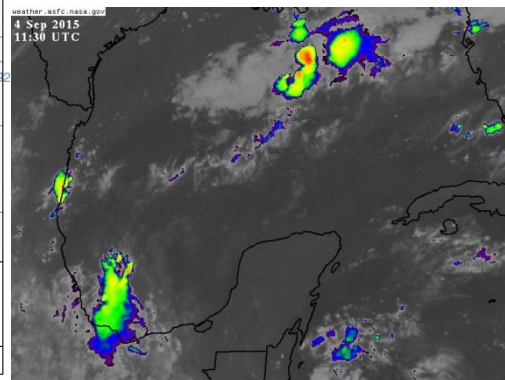
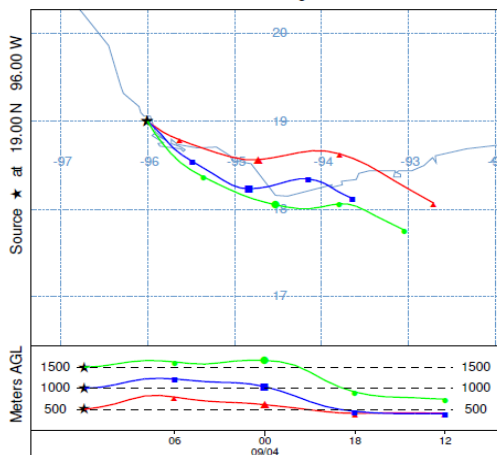
(9)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 02 Sep 15  
 GDAS Meteorological Data

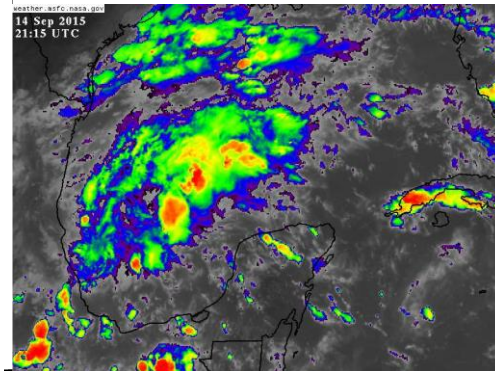
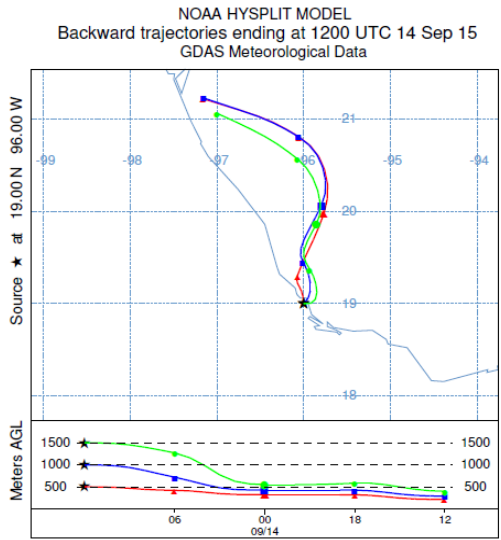


(10)

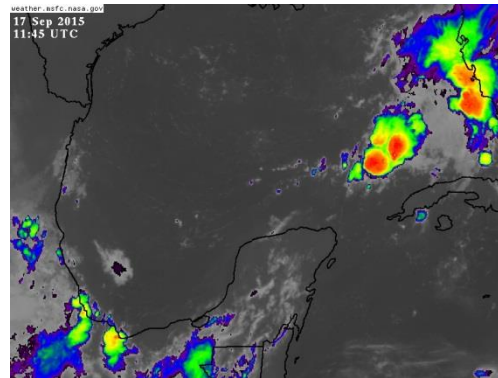
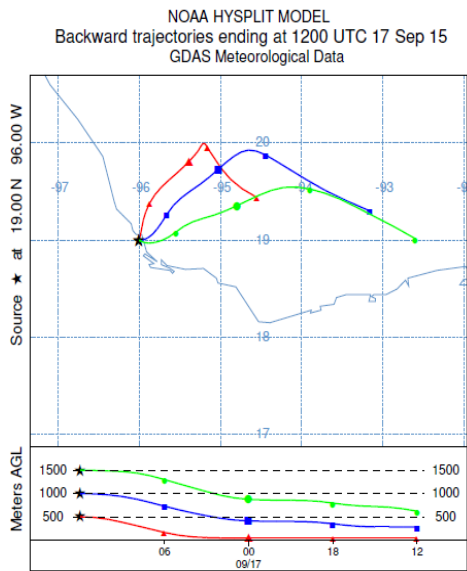
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 04 Sep 15  
 GDAS Meteorological Data



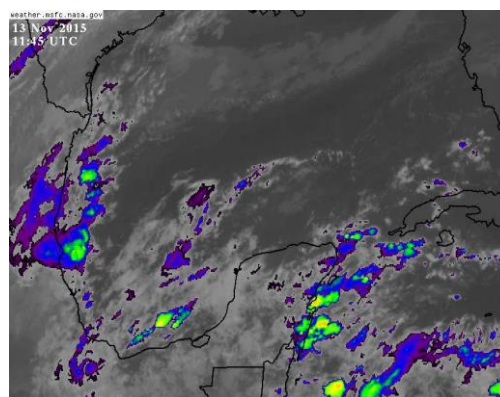
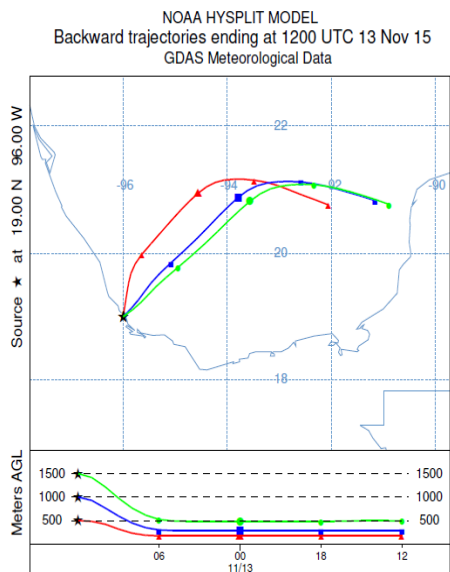
(11)



(12)



(13)



(14)



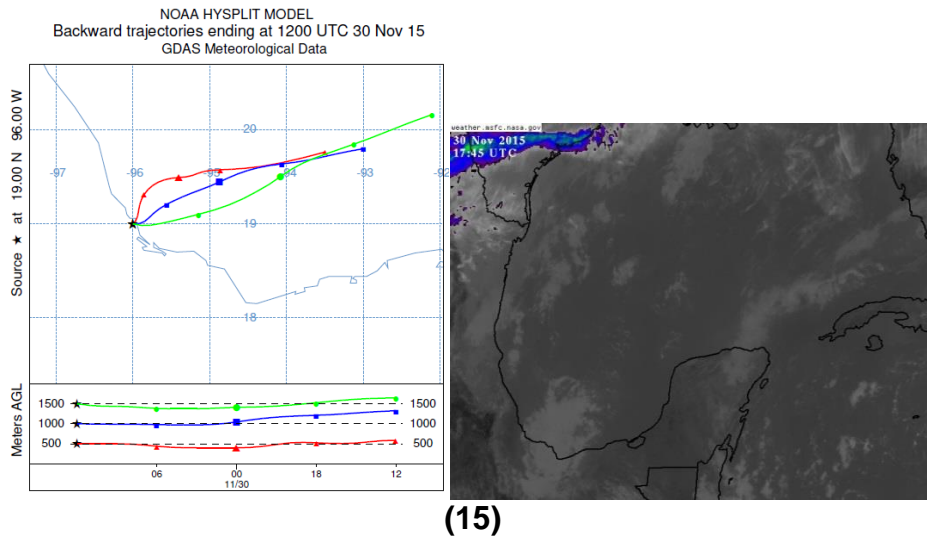
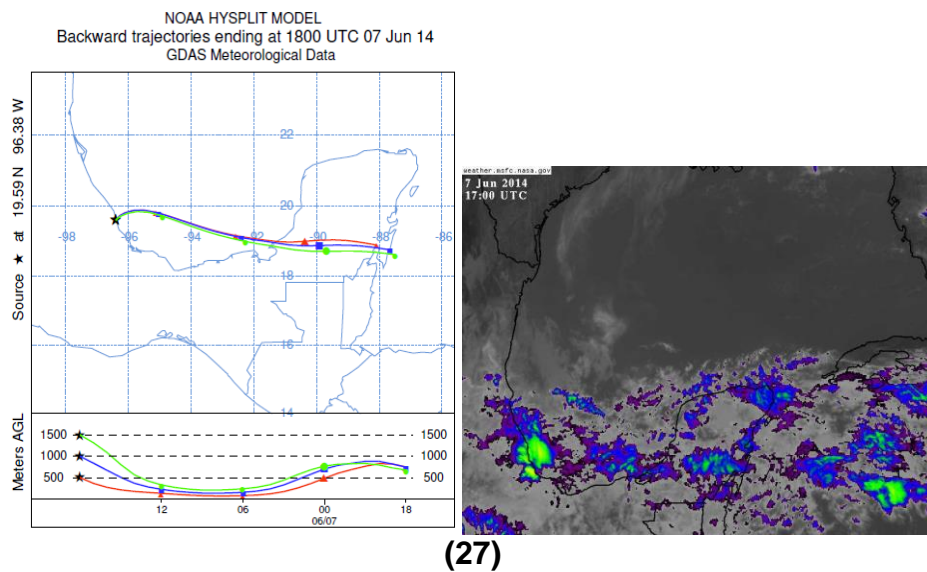
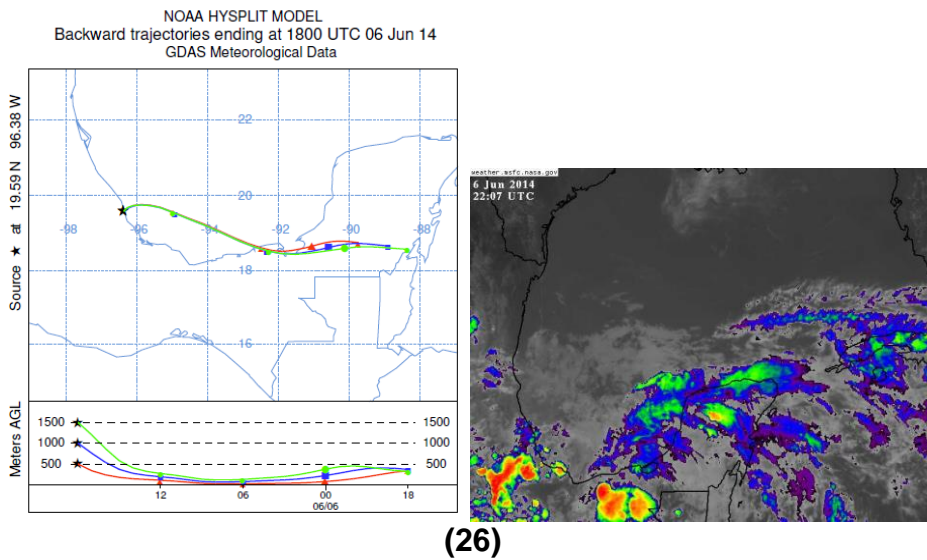
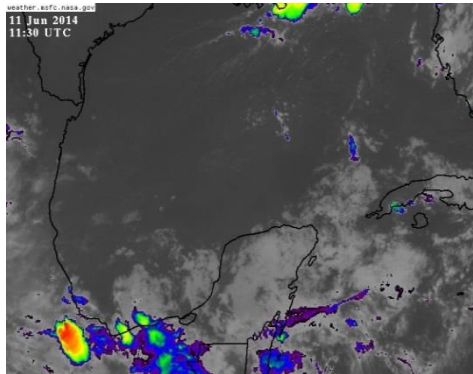
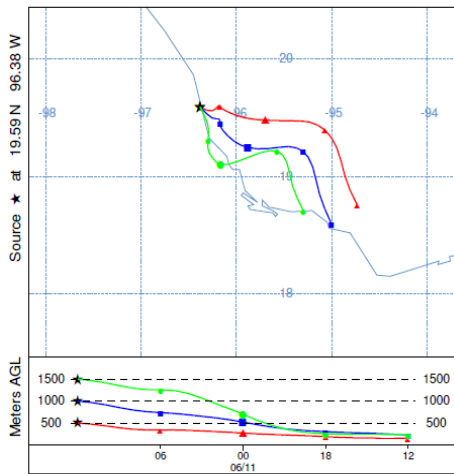


Figura IV. 3.- Trayectorias de retrocesos realizadas e imágenes infrarrojas para los eventos de lluvia ácida baja ( $5.6 < \text{pH} < 5.0$ ), para el año 2014.

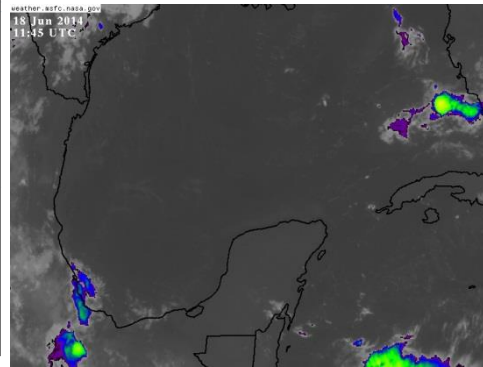
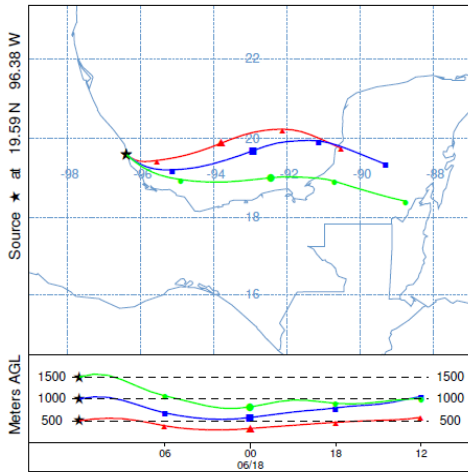


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 11 Jun 14  
 GDAS Meteorological Data



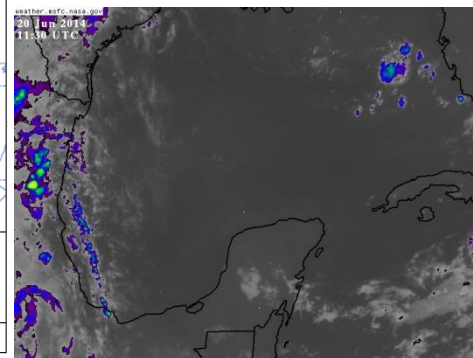
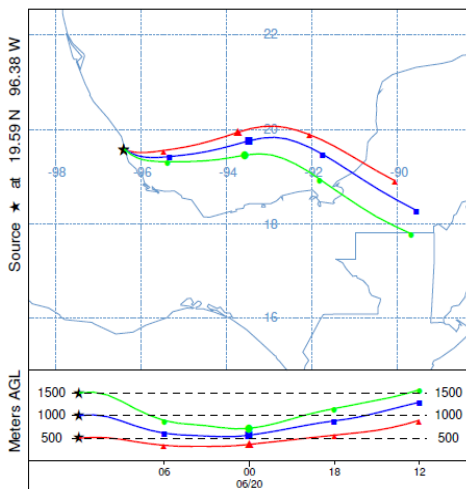
(28)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 18 Jun 14  
 GDAS Meteorological Data



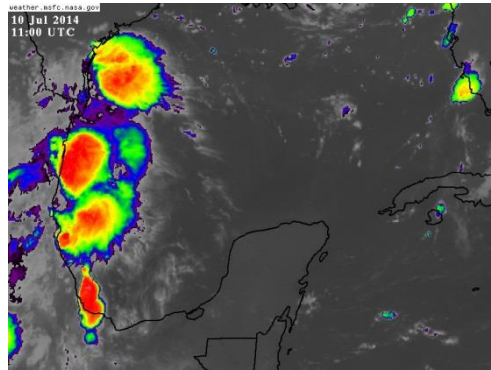
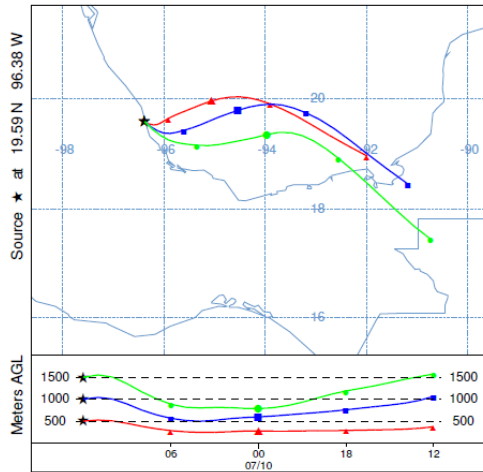
(29)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 20 Jun 14  
 GDAS Meteorological Data



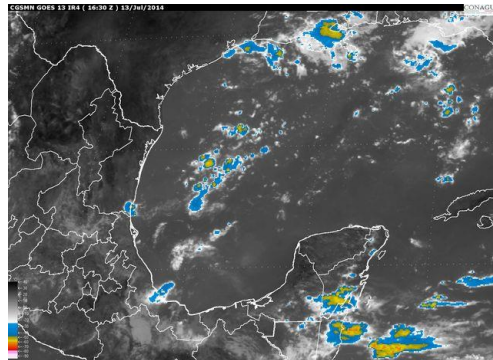
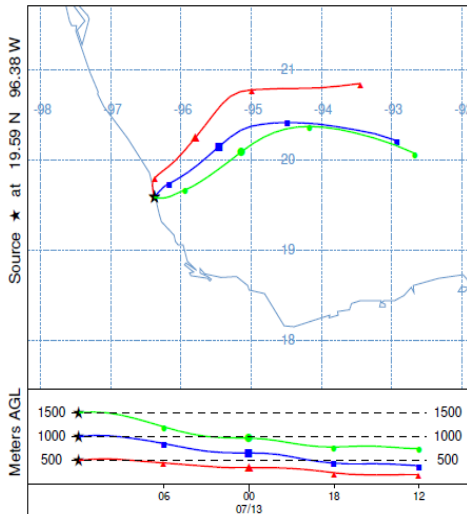
(30)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 10 Jul 14  
 GDAS Meteorological Data



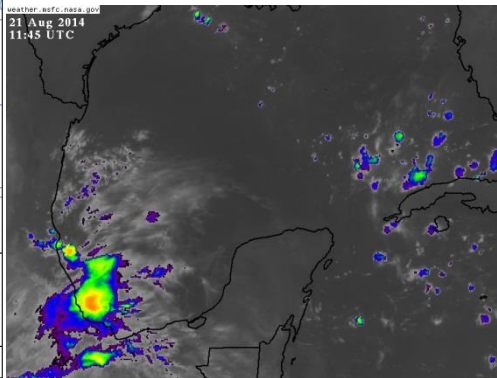
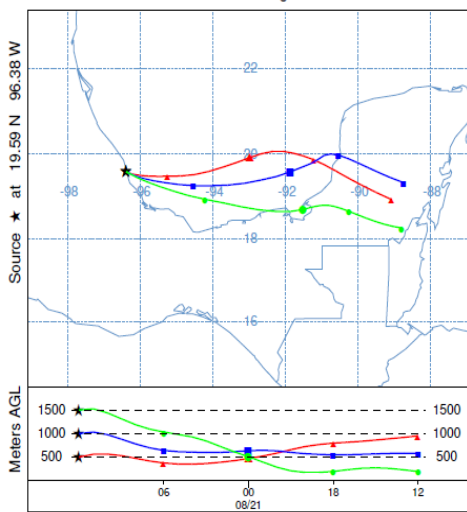
(31)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 13 Jul 14  
 GDAS Meteorological Data



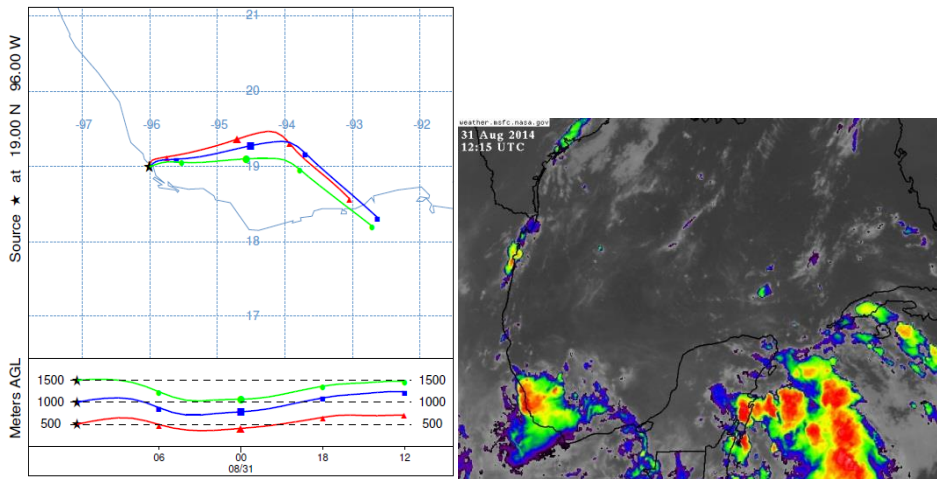
(32)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 21 Aug 14  
 GDAS Meteorological Data



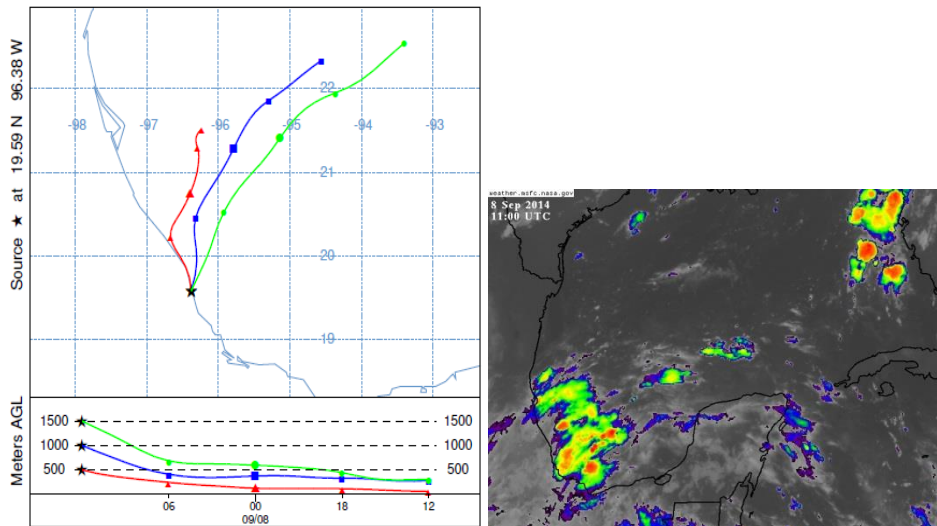
(33)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 31 Aug 14  
 GDAS Meteorological Data



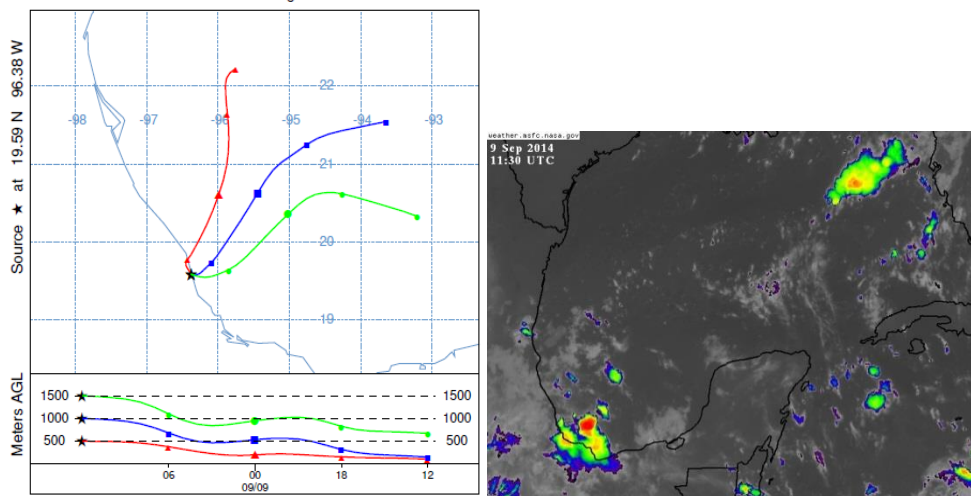
(34)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 08 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



(35)

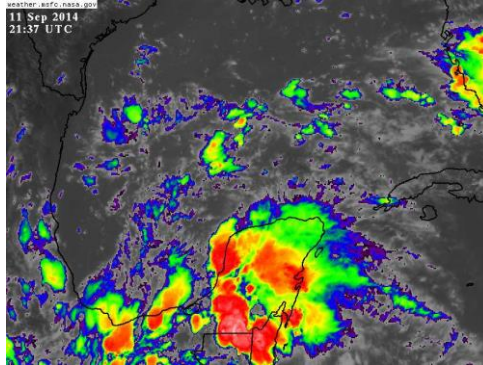
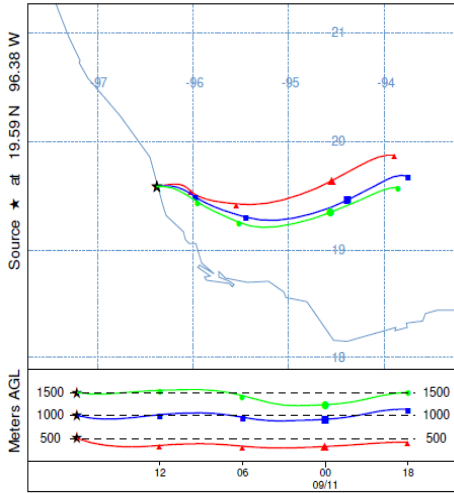
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 09 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



(36)

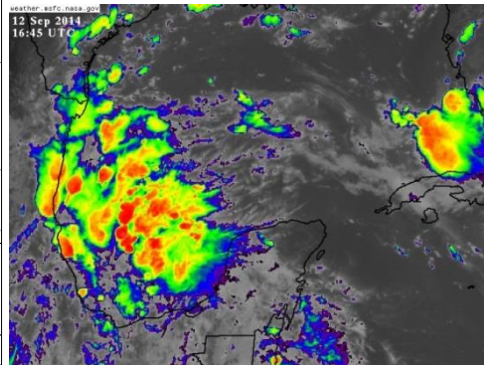
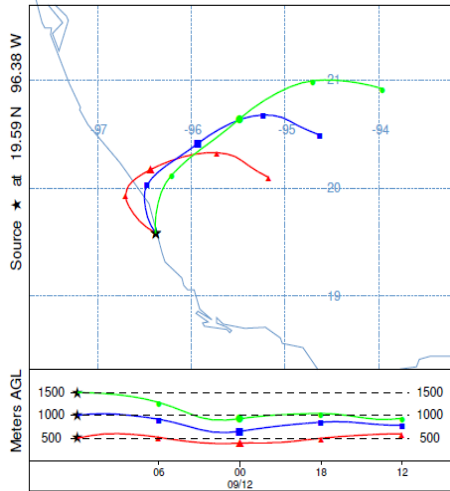


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 11 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



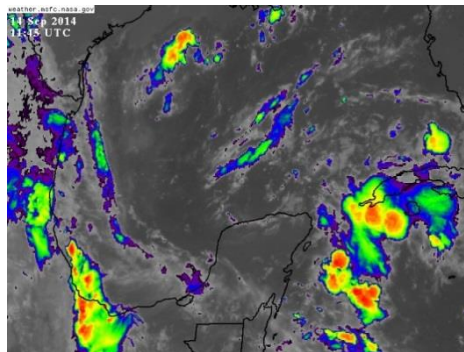
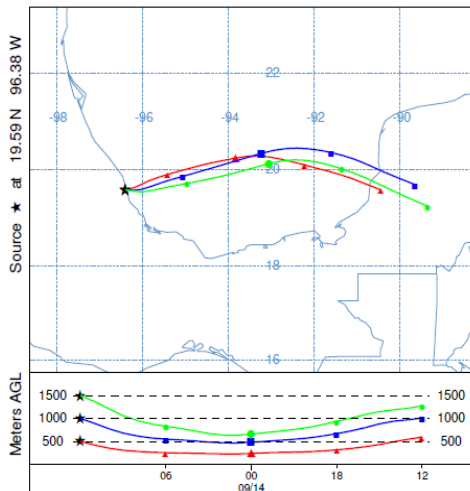
(37)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 12 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



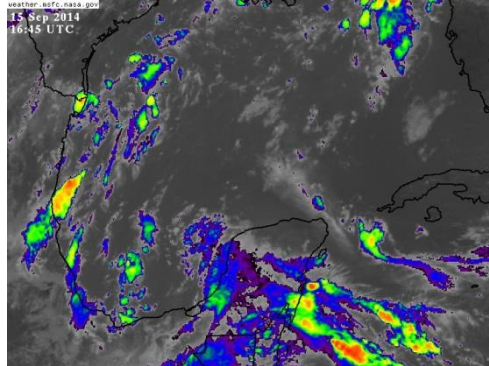
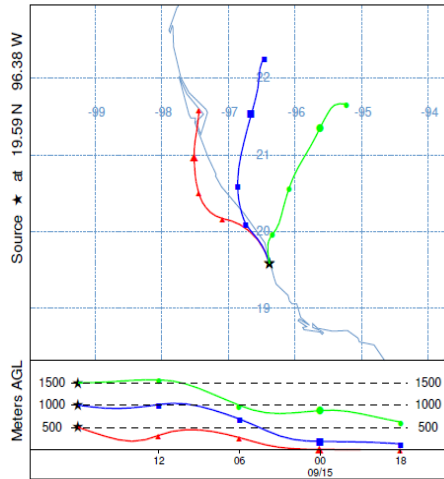
(38)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 14 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



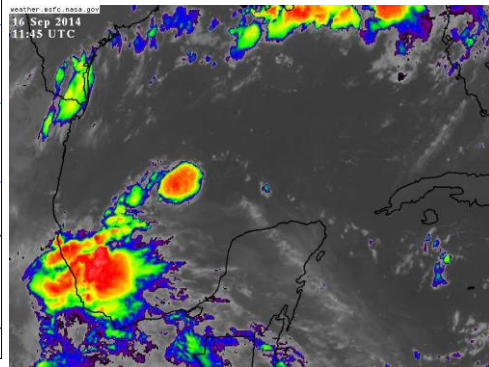
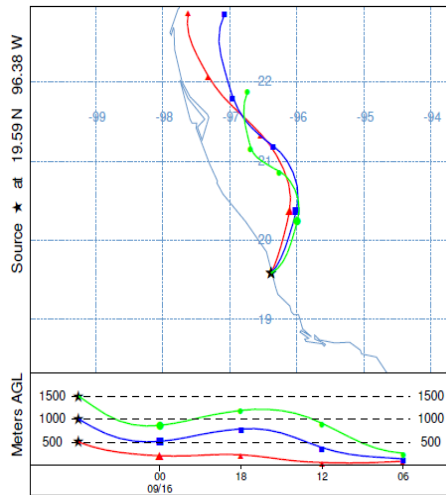
(39)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 15 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



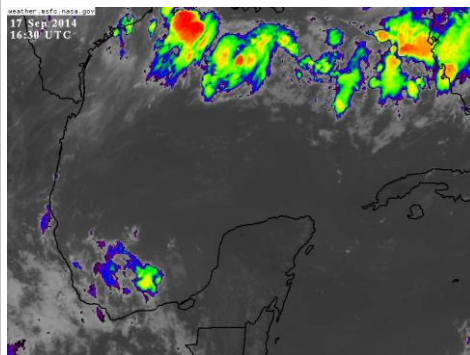
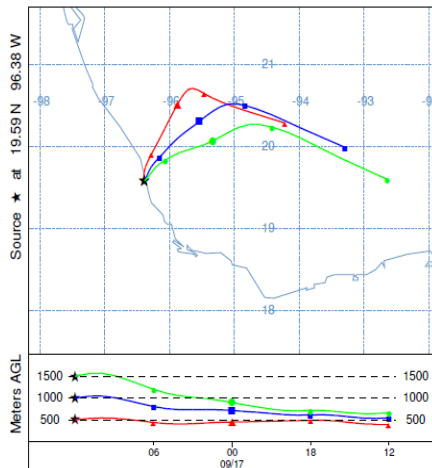
(40)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 0600 UTC 16 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



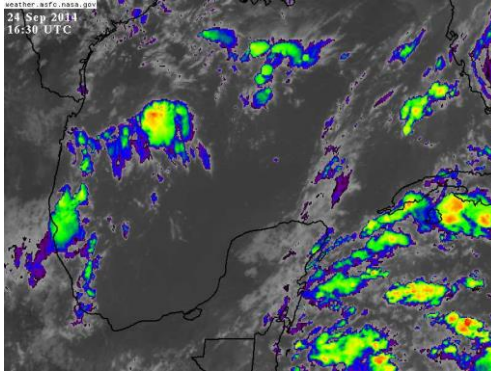
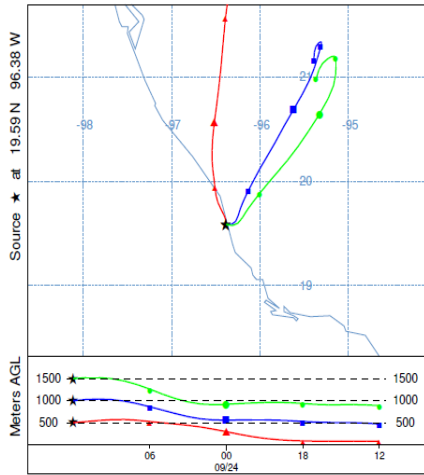
(41)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 17 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



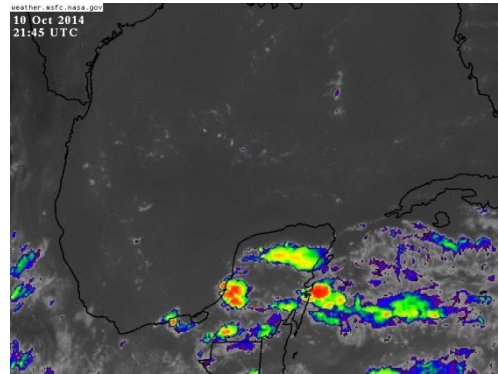
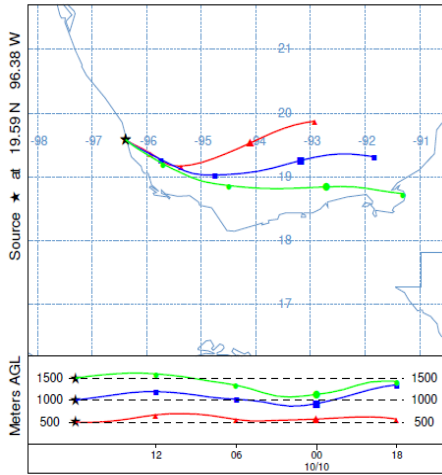
(42)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 24 Sep 14  
 GDAS Meteorological Data



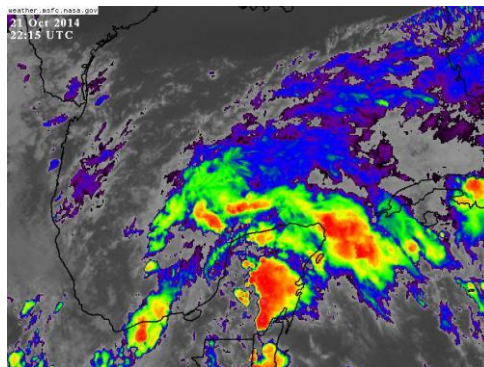
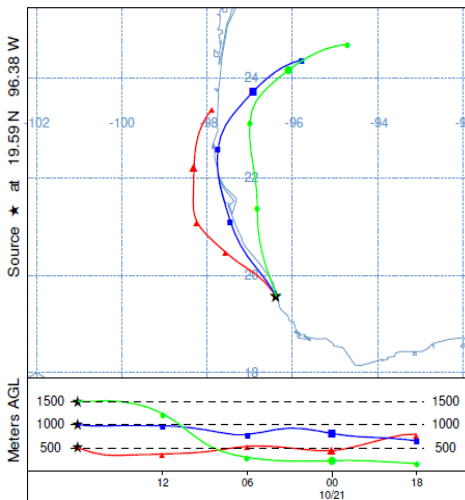
(43)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 10 Oct 14  
 GDAS Meteorological Data



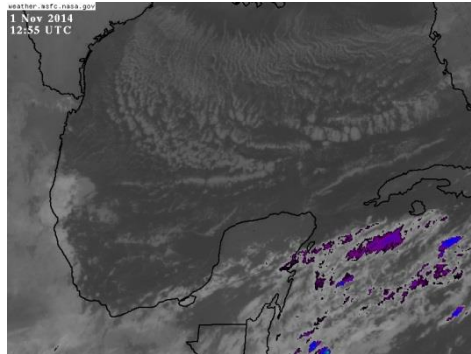
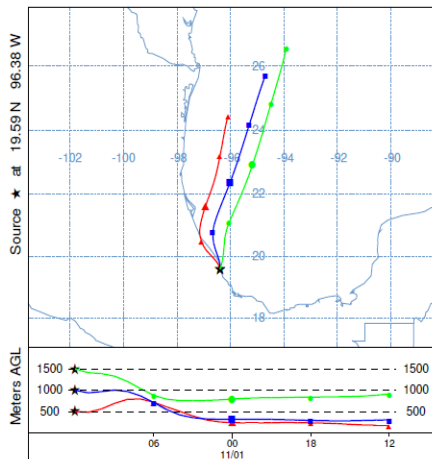
(44)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 21 Oct 14  
 GDAS Meteorological Data



(45)

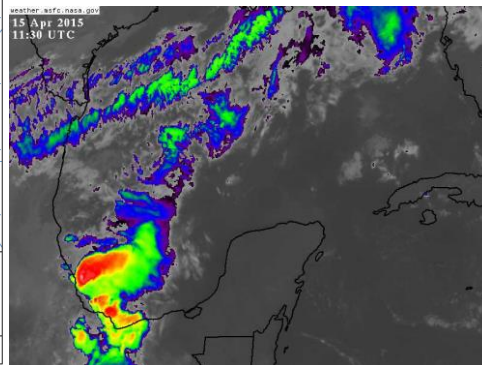
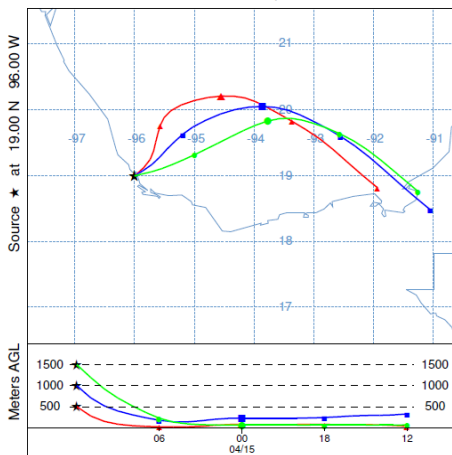
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1200 UTC 01 Nov 14  
GDAS Meteorological Data



(46)

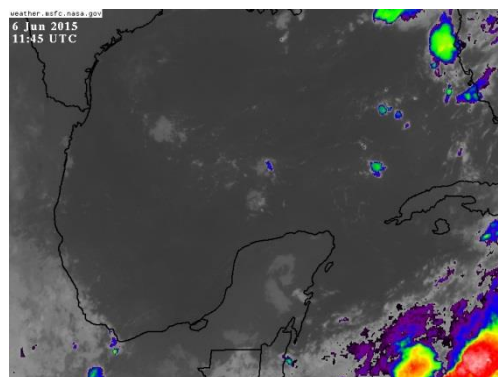
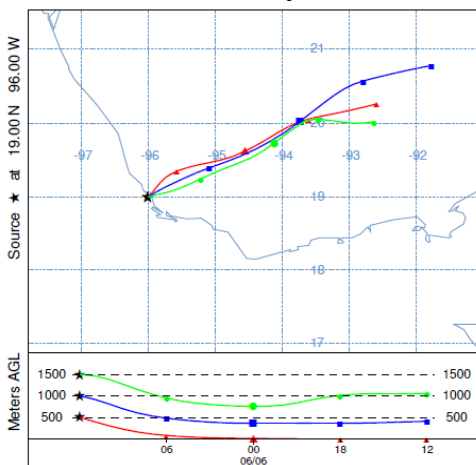
Figura IV. 4.- Trayectorias de retrocesos realizadas e imágenes infrarrojas para los eventos de lluvia ácida ( $5.0 < \text{pH} < 4.5$ ), para el año 2015 en La Mancha, Veracruz.

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1200 UTC 15 Apr 15  
GDAS Meteorological Data



(16)

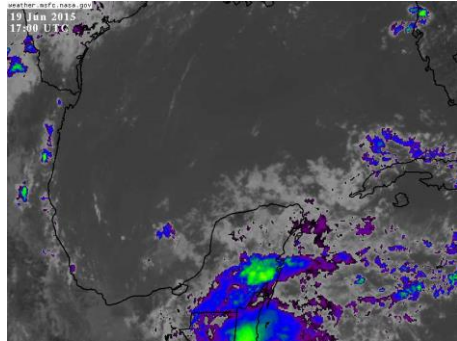
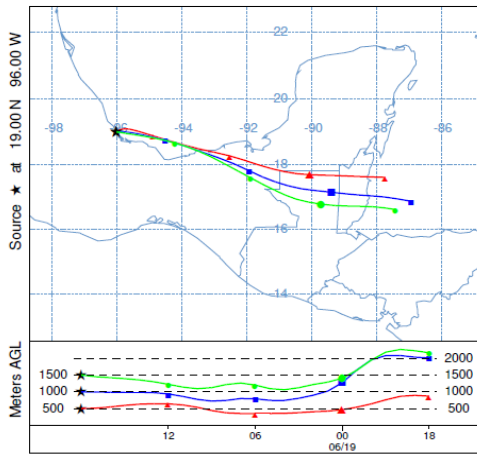
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1200 UTC 06 Jun 15  
GDAS Meteorological Data



(17)

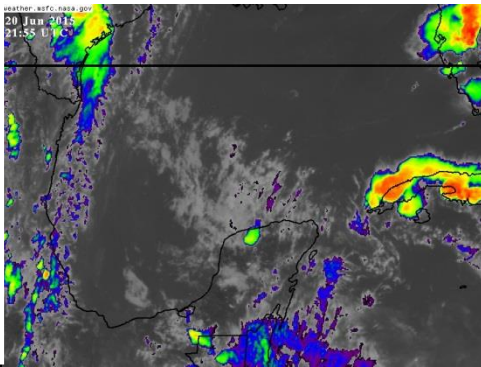
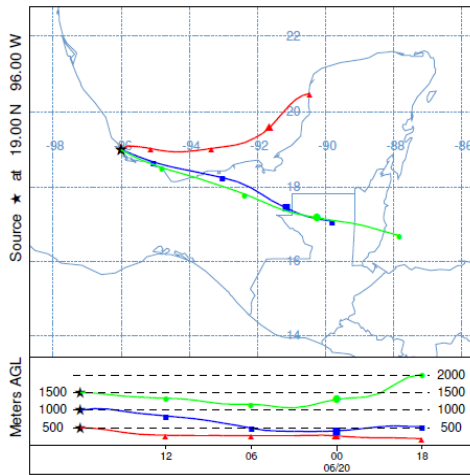


NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1800 UTC 19 Jun 15  
GDAS Meteorological Data



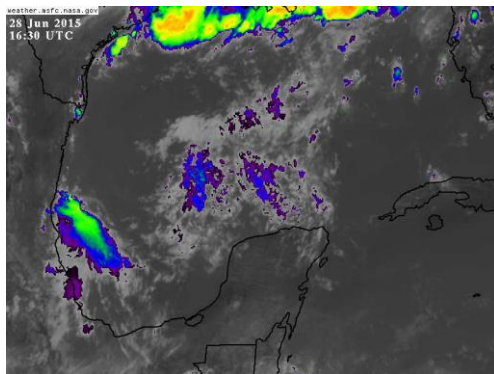
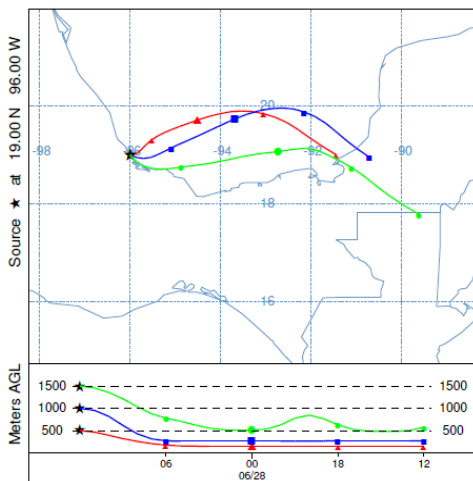
(18)

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1800 UTC 20 Jun 15  
GDAS Meteorological Data



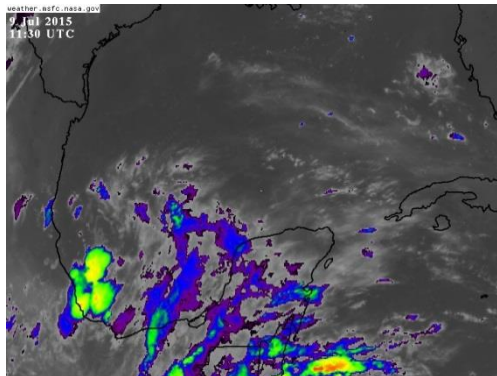
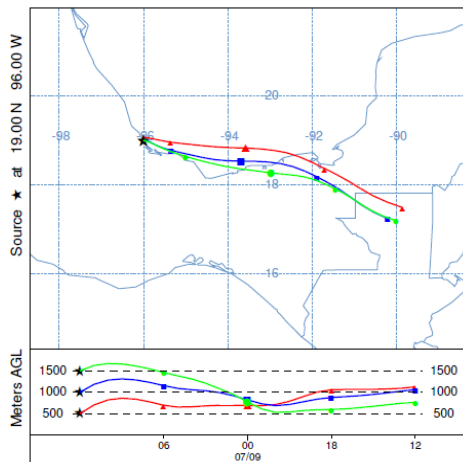
(19)

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1200 UTC 28 Jun 15  
GDAS Meteorological Data



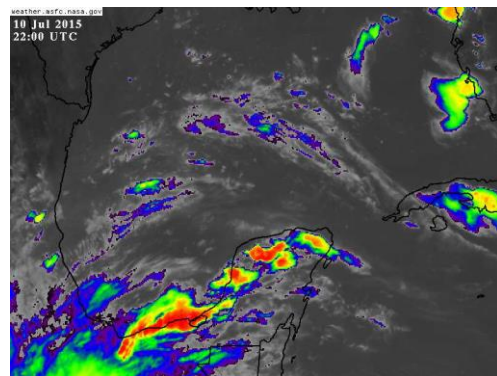
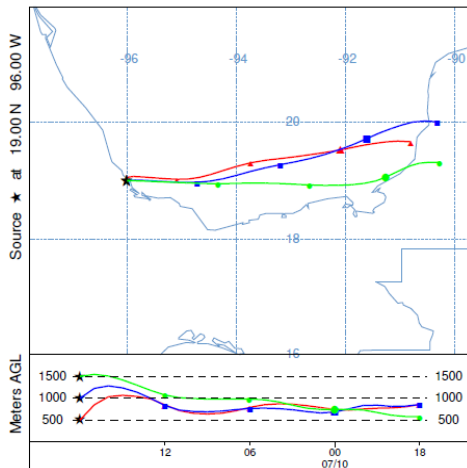
(20)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 09 Jul 15  
 GDAS Meteorological Data



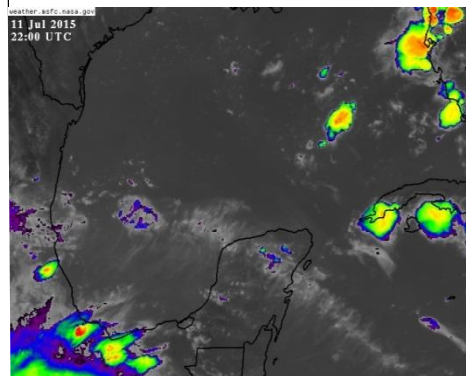
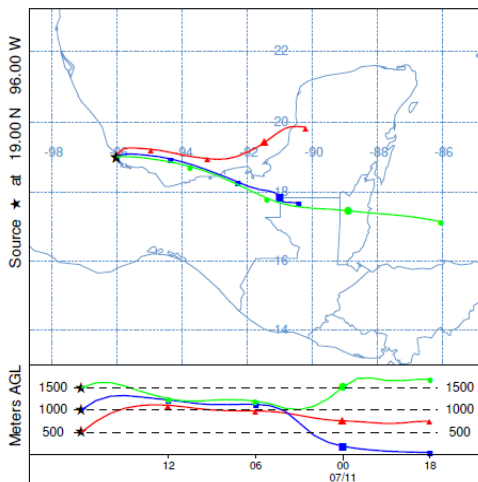
(21)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 10 Jul 15  
 GDAS Meteorological Data



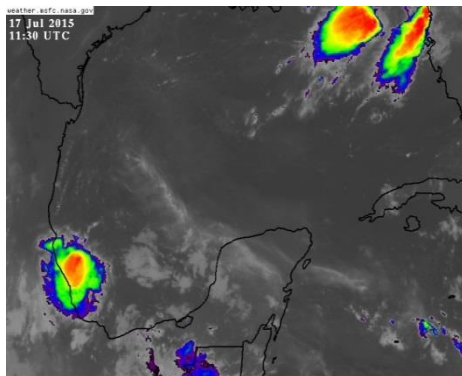
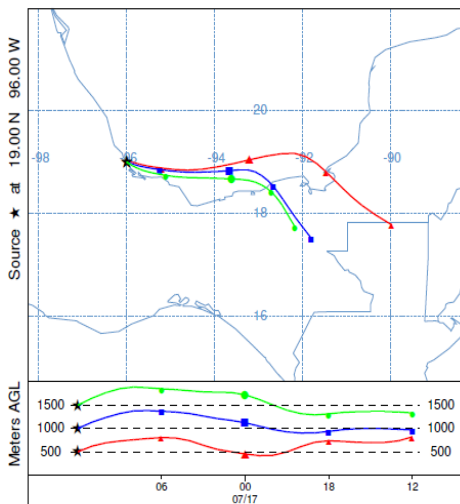
(22)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 11 Jul 15  
 GDAS Meteorological Data



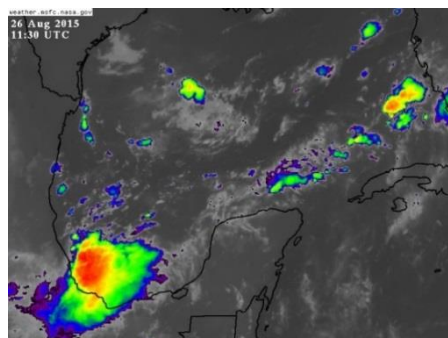
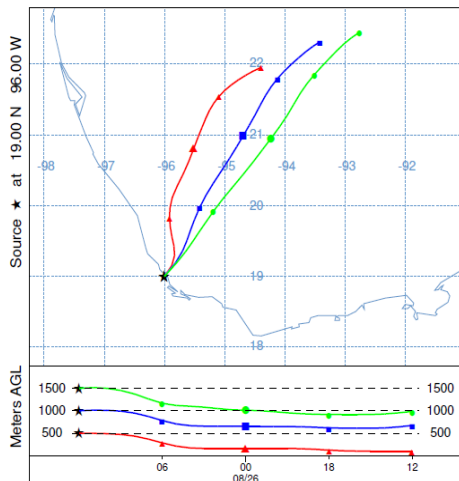
(23)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 17 Jul 15  
 GDAS Meteorological Data



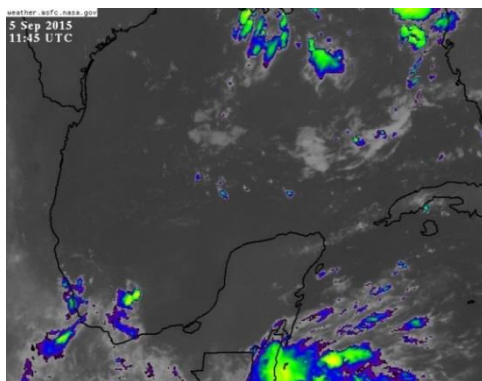
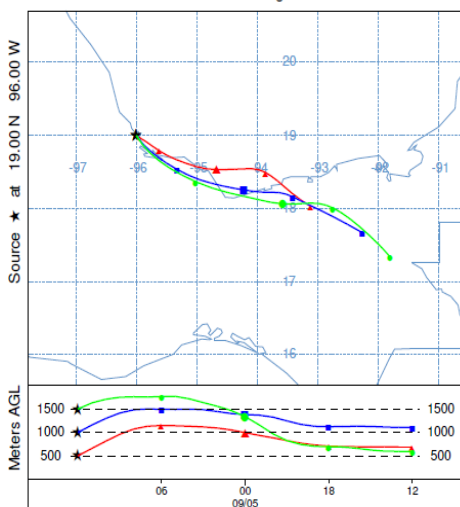
(24)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 26 Aug 15  
 GDAS Meteorological Data



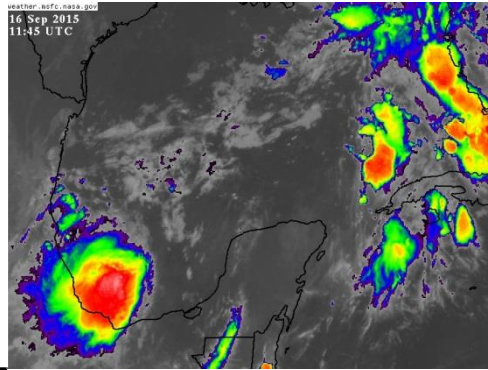
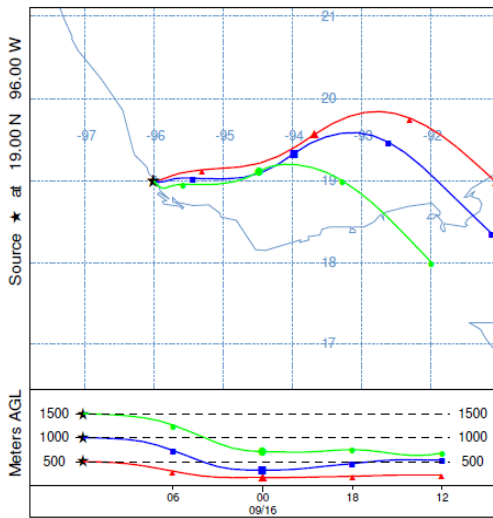
(25)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 05 Sep 15  
 GDAS Meteorological Data



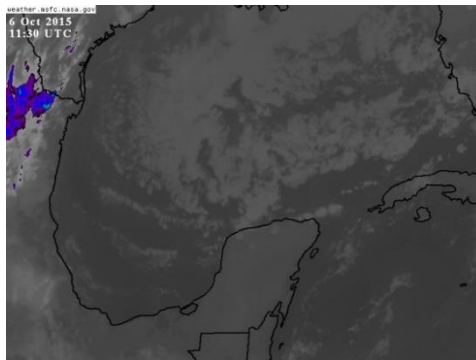
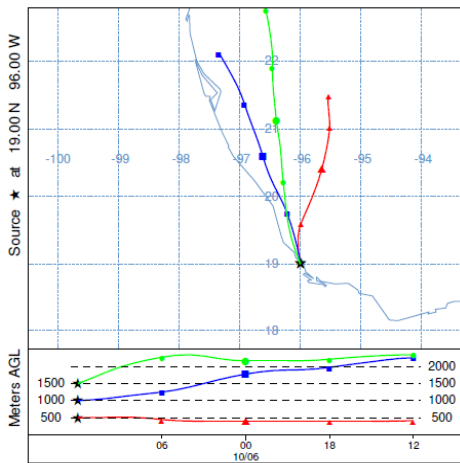
(26)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 16 Sep 15  
 GDAS Meteorological Data



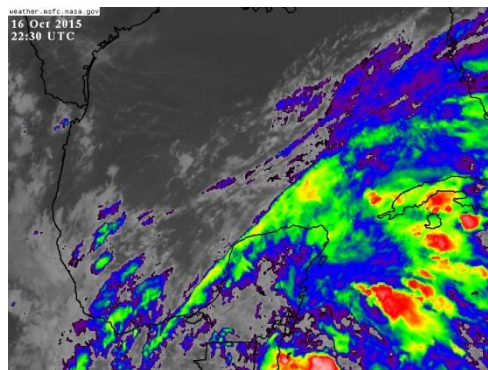
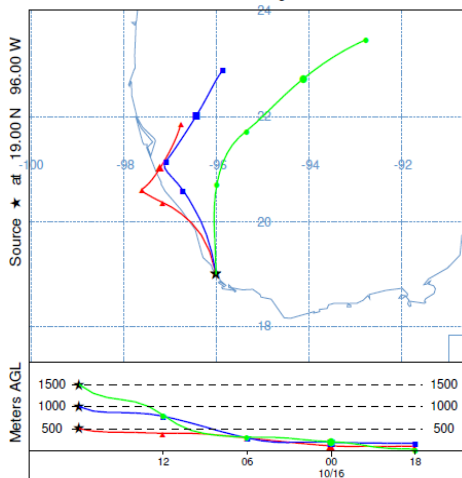
(27)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 06 Oct 15  
 GDAS Meteorological Data



(28)

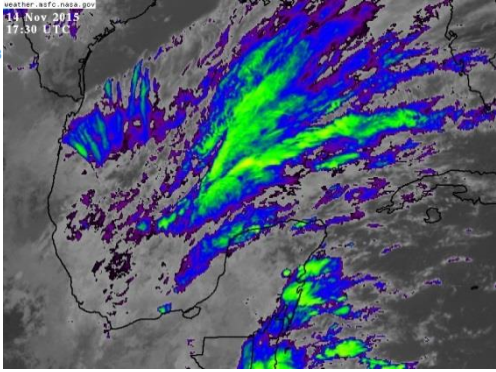
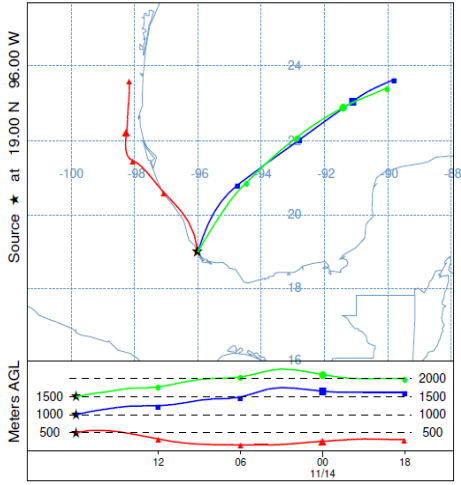
NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 16 Oct 15  
 GDAS Meteorological Data



(29)

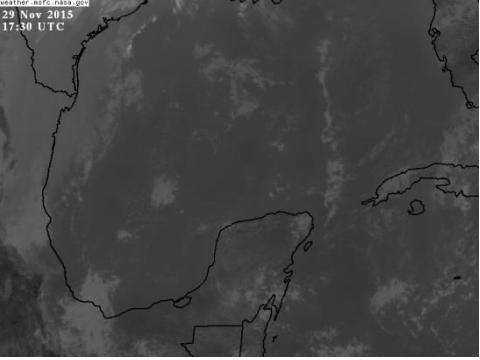
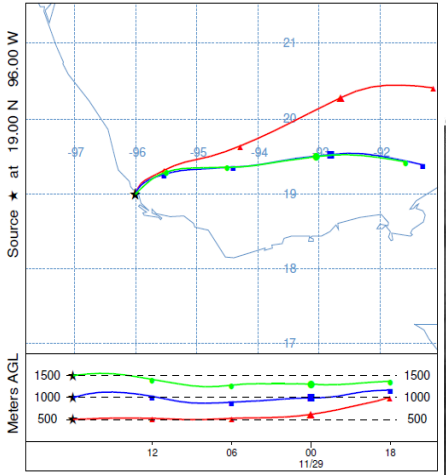


NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 14 Nov 15  
 GDAS Meteorological Data



(30)

NOAA HYSPLIT MODEL  
 Backward trajectories ending at 1800 UTC 29 Nov 15  
 GDAS Meteorological Data



(31)