



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – AIRE**

**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO DE LA
CIUDAD HISTÓRICA FORTIFICADA DE CAMPECHE**

**Que para optar por el grado de:
Maestro en Ingeniería Ambiental**

Presenta: Lic. DALINA RODRÍGUEZ SANCHEZ

TUTOR PRINCIPAL:

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

COMITÉ TUTOR

Dra. Georgina Fernández V, Facultad de Ingeniería. UNAM
M.I. Alba Beatriz. Vázquez G, Facultad de Ingeniería. UNAM
Dr. Victor Magaña Ruedas. Instituto de Geografía. UNAM
Dr. Enrique César Valdez. Facultad de Ingeniería. UNAM

Ciudad Universitaria. CDMX, diciembre 2017.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Fernández Villagómez Georgina

Secretario: M.I. Vázquez Gonzáles Alba Beatriz

Vocal: Dr. Magaña Rueda Víctor O.

1^{er.} Suplente: Dr. César Valdez Enrique

2^{d o.} Suplente: Dr. Sosa Echeverría Rodolfo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: **Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.**

TUTOR DE TESIS: Dr. Sosa Echeverría Rodolfo

NOMBRE

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado de Ingeniería por su apoyo durante mis estudios. A la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera, lugar donde realicé mi tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado. Así como al proyecto PAPIIT 1T109711: Aplicación del diagnóstico de la caracterización de la deposición ácida en la zona costera del Golfo de México, para la evaluación de sus efectos y estrategias de control.

Particularmente al Dr. Humberto Bravo Álvarez (QEPD), por permitirme realizar estudios en su grupo de trabajo. Al Dr Rodolfo Sosa Echeverría por su apoyo y comprensión al ser mi tutor durante la elaboración de mi tesis. De igual manera a mi comité tutorial, a la Dra. Georgina Fernández Villagómez, la M. en I. Alba Beatriz Vázquez González, por su ayuda y recomendaciones durante toda mi maestría.

A la M. en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez por sus enseñanzas sobre conocimientos químicos indispensables para la realización de la tesis; y a la QFB. María del Carmen Torres Barreda, a ambas por la realización de los análisis cromatográficos del depósito húmedo, datos utilizados en esta tesis. De igual manera al Dr. Javier Reyes Trujeque y su equipo (Centro de Investigación en Corrosión), por su participación en la realización de la Evaluación de Impacto Ambiental.

A resto de mi comité tutorial ampliado, los doctores Víctor Orlando Magaña Rueda y Enrique César Valdez, por la revisión y sugerencias a mi trabajo de maestría.

A mis compañeras Arisleidis Rodríguez Sosa, Milena Lemes y Anayli Alonso Saranova, por sus contribuciones a la tesis y por su ayuda incondicional.

DEDICATORIA

A mi hijo, mi madre, mi esposo, mi familia, mis amigos

RESUMEN

La ciudad fortificada de San Francisco de Campeche fue declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en 1999 debido a su importancia histórica y arquitectónica. Su centro histórico conserva edificios de carácter militar, civil y religioso dentro de su complejo histórico y arquitectónico. En la actualidad, se evidencia el desgaste que sufren los monumentos y construcciones de la ciudad, producto de fenómenos de intemperismo y de otros tipos de impactos ambientales, a causa del crecimiento demográfico e industrial que ocurre, tanto en regiones del Estado de Campeche, como en zonas aledañas. Las características del depósito atmosférico húmedo en la ciudad, principalmente los iones Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} contribuyen al deterioro del material pétreo.

La meta del presente estudio consistió en proponer un programa preliminar para la prevención del deterioro ambiental significativo de la Ciudad Fortificada de Campeche (PSD). Se realizó la evaluación del depósito atmosférico húmedo del año 2007, mediante la caracterización fisicoquímica (pH, conductividad y especiación iónica). Las muestras del depósito atmosférico húmedo presentaron una tendencia natural a la alcalinidad del agua de lluvia. Las concentraciones de sustancias alcalinas, provenientes del suelo característico de la zona, afectan significativamente la acidez de las precipitaciones, neutralizando una porción de las especies ácidas presentes en la lluvia, pero contribuyendo al depósito de SO_4^{2-} y NO_3^- resultantes de la degradación del material por formación de costras.

Se identificaron las fuentes emisoras de contaminantes precursores del depósito atmosférico que potencialmente impactan a la zona de estudio, aplicando el modelo de trayectorias de retroceso HYSPLIT. Las trayectorias de retroceso indicaron que la mayoría de las posibles fuentes emisoras de precursores del depósito húmedo atmosférico se encuentran al Este, correspondiendo a la región de la península de Yucatán, y las locales con una importante contribución.

Se analizaron los impactos del depósito atmosférico húmedo sobre la calidad atmosférica de la ciudad de Campeche, utilizando la matriz de Leopold y el método de Battelle - Columbus.

Las acciones que causan mayor impacto ambiental en la calidad atmosférica fueron, preparación de terrenos para cultivos, extracción de materiales, urbanización y reforestación.

Como parte de las propuestas del programa para la Prevención del Deterioro Ambiental Significativo (PSD) en la región, se recomienda especial atención de las fuentes locales, la mejora y/o renovación de la tecnología de algunos procesos industriales, así como la protección del patrimonio cultural *in situ*.

ABSTRAC

The fortified city of San Francisco de Campeche was declared Cultural Heritage of Humanity by UNESCO in 1999 due to its historical and architectural importance. Its historical center preserves buildings of a military, civil and religious character within its historical and architectural complex. Currently, there is evidence of deterioration suffered by monuments and constructions of the city, product of weathering phenomena and other types of environmental impacts due to population and industrial growth that occurs both, in regions of the State of Campeche and in surrounding areas. The characteristics of the wet atmospheric deposition in the city, mainly Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} contribute to the deterioration of the stone material.

The objective of the present study was to propose a preliminary program for the prevention of significant environmental deterioration of the Fortified City of Campeche (PSD). The evaluation of the wet atmospheric deposition of the year 2007 was carried out, through the physicochemical characterization (pH, conductivity and ionic speciation). Samples of the wet atmospheric reservoir showed a natural tendency to alkalinity. The concentrations of alkaline substances from the soil characteristic of the area significantly affect the acidity of precipitation, neutralizing a portion of the acidic species present in the rain, but contributing to the deposit of SO_4^{2-} and NO_3^- resulting from the degradation of the material by formation of crust.

The sources of atmospheric deposition precursor pollutants that potentially impacted the study area were identified by applying the HYSPLIT trajectory model. The backward trajectories indicated that most of the possible sources of precursors of the atmospheric wet deposit are to the East, corresponding to the region of the Yucatan peninsula, and the localities with an important contribution.

The impacts of the wet atmospheric deposition on the atmospheric quality of the city of Campeche were analyzed using the Leopold matrix and the Battelle - Columbus method. The actions that cause the greatest environmental impact on the atmospheric quality were: preparation of land for crops, extraction of materials, urbanization and reforestation.

Among the proposals of the Program for the Prevention of Significant Environmental Deterioration (PSD) in the region, it is recommended to have special interest in local sources, the improvement and / or renewal of the technology of some industrial processes, as well as the protection of the cultural heritage in situ.

CONTENIDO

I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Prevención del deterioro ambiental significativo (PSD).....	6
2.1.1 Requerimiento para la aplicabilidad del PSD	7
2.1.2 Clasificación actual de las áreas para aplicación del PSD	8
2.2 Evaluación de Impacto Ambiental	8
2.2.1 Procedimiento para evaluar el Impacto Ambiental	9
2.2.2 Matriz de Leopold	13
2.2.3 Método de Battelle – Columbus	14
2.3 Contaminación atmosférica.....	16
2.3.2 Influencia de la estabilidad atmosférica en la dispersión de los contaminantes atmosféricos	21
2.3.3 Influencia de la capa de mezcla en la dispersión de los contaminantes.....	23
2.3.4 Relación de la dispersión de contaminantes y los Sistemas Sinópticos.....	24
2.4 Contaminantes atmosféricos	25
2.4.1 Fuentes de emisión de contaminantes	27
2.5 El deterioro de materiales pétreos	29
2.5.1 Depósito ácido y su efecto en el material pétreo.....	31
2.5.2 Efecto de los contaminantes atmosféricos como SO ₂ y NO _x en los materiales pétreos	32
III.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	33
3.1 Área de estudio.....	34
3.2 Medio físico de la ciudad de Campeche	35
3.2.1 Ubicación y extensión	35
3.2.2 Suelos	36
3.2.3 Orografía	36
3.2.4 Hidrografía	37
3.2.5 Clima	38
3.3 Medio biótico de la Ciudad de Campeche.....	39
3.3.1 Recursos naturales.....	39
3.4 Perfil socioeconómico del municipio de Campeche.....	41
3.4.1 Habitantes y su entorno socioeconómico.....	41
3.4.2 Actividades económicas.....	42
3.5 Contaminación atmosférica en la Ciudad de Campeche. Estudios sobre calidad del aire.....	46
IV.- METODOLOGÍA.....	50
4.1 Descripción ambiental	52
4.1.1 Muestreo de depósito atmosférico húmedo (D.H)	52
4.1.2 Análisis químico de las muestras.....	53

4.1.3 Procesamiento de datos.....	55
4.2 Modelos atmosféricos	56
4.2.1 HYSPLIT	56
4.3 Evaluación de impacto ambiental.....	57
4.3.1 Matriz de Leopold	59
4.3.2 Método de Battelle-Columbus.....	61
4.4 Procedimiento para la clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS)	64
V- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
5.1 Depósito atmosférico	69
5.1.1 Depósito húmedo.....	69
5.2 Modelos atmosféricos	79
5.2.1 Vector del viento en la Ciudad de Campeche	79
5.2.2 Modelación con HYSPLIT	81
5.3 Descripción de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) para casos significativos	83
5.4 Fuentes emisoras de precursores del depósito atmosférico para evaluar el deterioro ambiental significativo.....	89
5.6.1 Matriz de Leopold	102
5.6.2 Aplicación del método de Battelle-Columbus modificado	104
5.7 Programa para la prevención del deterioro ambiental significativo (PSD) de la Ciudad de Campeche	107
5.8 Propuesta de medidas de mitigación	108
5.9 Propuesta de medidas de control.....	112
REFERENCIAS	117
ABREVIATURAS	127
ANEXOS.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1. 1 Aspectos del patrimonio cultural tangible en el estado de Campeche. A) Catedral de Nuestra Señora de la Soledad, en San Francisco de Campeche. B) Baluarte de San Pedro, muro N. C) Baluarte de San Carlos, muro SE. Fuente: Reyes et al., 2013. 2

Capítulo III

Figura 3. 1 Ubicación de la ciudad de San Francisco de Campeche y su área urbana. Fuente: Google Maps, consulta septiembre de 2017..... 36

Figura 3. 2 A) Proyectos mineros no metálicos del estado de Campeche. B) Ubicación de las plantas trituradoras activas en el estado de Campeche. Fuente: "Panorama Minero del estado de Campeche" Servicio Geológico Mexicano, 2014..... 46

Capítulo IV

Figura 4. 1 Dispositivo de muestreo automático de precipitación húmeda y seca. Colector de precipitación húmeda y seca (Aerochem Metrics modelo 301). Fuente: Torres, 2009..... 53

Capítulo V

Figura 5. 1 Concentración ponderada mensual de aniones y cationes ($\mu\text{eq/L}$)..... 69

Figura 5. 2 Concentración ponderada mensual de Na^+ , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} ($\mu\text{eq/L}$) del depósito atmosférico húmedo, Campeche..... 71

Figura 5. 3 Total anual de la concentración ponderada de compuestos presentes en el depósito húmedo..... 72

Figura 5. 4 Distribución porcentual de aniones (A) y cationes (B) del depósito húmedo..... 73

Figura 5. 5 Relación entre los iones SO_4^{2-} / NO_3^- del depósito atmosférico húmedo..... 75

Figura 5. 6 pH promedio mensual ponderado del depósito húmedo..... 76

Figura 5. 7 Concentración mensual ponderada de los iones OH^- , H^+ , HCO_3^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} en ($\mu\text{eq/L}$)..... 77

Figura 5. 8 Correlación entre los compuestos analizados del depósito húmedo..... 78

Figura 5. 9 Distribución anual de la velocidad y dirección del viento..... 80

Figura 5. 10 Corridas del HYSPLIT para días de máximas concentraciones de SO_4^{2-} . A) Trayectoria de retroceso del día 3 de marzo de 2007, a las 1800 UTC. B) Trayectoria de retroceso del día 30 de noviembre de 2007, a las 0600 UTC. C) Trayectoria de retroceso del día 16 de diciembre de 2007, a las 0000 UTC..... 81

Figura 5. 11 Corridas del HYSPLIT para días de mínimas concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} . A) Trayectoria de retroceso del día 10 de febrero de 2007, a las 0000 UTC B) Trayectoria de retroceso del día 21 de octubre de 2007, a las 0000 UTC .. 82

Figura 5. 12 Corridas del HYSPLIT para días de evento ácido. Trayectoria de retroceso del día 25 de septiembre de 2007. A) 0600Z. B) 1200Z. C) 1800Z..... 83

<i>Figura 5. 13 Mapa sinóptico en superficie del 3 de marzo del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5. 14 Mapa sinóptico en superficie del 30 de noviembre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5. 15 Mapa sinóptico en superficie del 16 de diciembre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. D) Mapa en superficie a las 18Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5. 16 Mapa sinóptico en superficie del 21 de octubre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. D) Mapa en superficie a las 18Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5. 17 Mapa sinóptico en superficie del 25 de septiembre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. D) Mapa en superficie a las 18Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5. 18 Fuentes de contaminantes atmosféricos que afectan la zona de estudio.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5. 19. Mapas de flujo de 1000MB para los días 2 y 3 de marzo de 2007. Fuente https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5. 20 Mapas de flujo de 1000MB de los días 29 y 30 de noviembre de 2007. Fuente https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5. 21 Mapas de flujo 1000MB de los días 15 y 16 de noviembre de 2007. Fuente https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5. 22 Mapas de flujo 1000MB de los días 24 y 25 de septiembre de 2007. Fuente https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5. 23 Gráficas de Calidad Ambiental (CA). A) SO_4^{2-}. B) NO_3^-. C) pH. D) Cl⁻.....</i>	<i>106</i>

ÍNDICE DE TABLA

Capítulo II

Tabla 2. 1 Problemas de la contaminación atmosférica de diferente nivel y escala.....	18
---	----

Capítulo III

Tabla 3. 1 Emisiones en toneladas por año del estado de Campeche.	49
--	----

Capítulo V

Tabla 5. 1 Fechas de ocurrencia de los máximos de relación SO_4^{2-}/NO_3^-	76
Tabla 5. 2 Lista de las centrales termoeléctricas que afectan la zona de estudio. (Adaptado de SENER, 2006; CFE, 2009; SENER, 2010; Cureño, 2010).	91
Tabla 5. 3 Emisiones de las diferentes plantas de generación de electricidad de las entidades federativas Campeche y Yucatán, reportadas en el INEM, 1999. (Adaptado de SEMARNAT et al., 2006 y Cureño, 2010).....	91
Tabla 5. 4 Emisiones e índice de emisiones de SO_2 , NO_x y CO_2 para las CT que consumen combustóleo en Campeche y Yucatán. (Adaptado de Miller et al., 2004 y Cureño, 2010).	92
Tabla 5. 5 Matriz de Leopold para la ciudad de Campeche.....	103
Tabla 5. 6 Ponderación de sistemas ambientales.	104
Tabla 5. 7 Ponderación de factores ambientales.	105
Tabla 5. 8 Cálculo de las Unidades de Impacto Ambiental.	107

I.- INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

La ciudad fortificada San Francisco de Campeche, se localiza en la costa occidental de la Península de Yucatán. Fue fundada en 1527 por colonizadores españoles, con un centro histórico que conserva cerca de 1500 edificios de carácter militar, civil y religioso dentro de su complejo histórico y arquitectónico. La ciudad fue declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en 1999 (Reyes et al., 2013).

A pesar de su resistencia al paso del tiempo, pueden observarse numerosas patologías de deterioro en los edificios coloniales construidos con rocas (Reyes et al., 2005). Las figuras 1A al 1C, muestran el deterioro de algunas de las principales edificaciones de la ciudad.



Figura 1. 1 Aspectos del patrimonio cultural tangible en el estado de Campeche. A) Catedral de Nuestra Señora de la Soledad, en San Francisco de Campeche. B) Baluarte de San Pedro, muro N. C) Baluarte de San Carlos, muro SE. Fuente: Reyes et al., 2013.

Esta zona se ha visto expuesta al deterioro constante del material que la constituye (roca caliza, conformada principalmente por CaCO_3). En la actualidad, al desgaste que sufre naturalmente la roca por intemperismo (Antúnez, 2013), fenómenos tales como: la erosión, disolución, arenización, formación de costras de deterioro y biodeterioro (Reyes et al., 2005 a), se suman otros tipos de impactos ambientales causados por el crecimiento demográfico e industrial, tanto en regiones del estado de Campeche, como en zonas aledañas. Por tales motivos, es posible observar impactos negativos en las edificaciones que comprometen, en gran medida, su integridad estructural y estética.

Un ejemplo de los impactos ambientales potenciales negativos que afectan a estos sitios

históricos, es el efecto causado por el depósito ácido atmosférico (lluvia ácida). La acidez de la lluvia se produce por la reacción que ocurre en la precipitación en la que intervienen los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x) encontrados en la atmósfera. Los NO_x y SO_x existen como producto de diversas actividades humanas y algunas fuentes naturales, y confiriéndole un pH inferior a 5.6, valor de acidez natural de la lluvia (Masters y Wendell, 2008). Estas aguas ácidas en contacto con materiales pétreos ricos en calcio, como los que presentan las edificaciones de la ciudad, dan lugar a la formación de nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonatos de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), etc. Algunas de estas sales son altamente solubles y fácilmente lixiviables.

Dado que en estudios previos a nivel internacional y nacional (Reyes et al, 2005 a, 2005 b, 2011 y 2013; Corvo et al., 2008 y 2010; Arnaiz y Martin, 1977; Bravo et al., 2003), se ha encontrado un daño significativo en el material pétreo por la presencia de la lluvia ácida y otros contaminantes atmosféricos, en el presente estudio se elaboró un Programa para la Prevención del Deterioro Ambiental Significativo (PSD) para la zona de estudio, en el cual se sugieren acciones para mejorar la calidad ambiental de la ciudad, en cuanto a la contaminación atmosférica existente.

El objetivo general del presente estudio fue:

Proponer un programa preliminar para la prevención del deterioro ambiental significativo de la Ciudad Fortificada de Campeche, Campeche.

Objetivos

- Evaluar el depósito atmosférico húmedo de la zona de Campeche mediante la caracterización fisicoquímica (pH, conductividad y especiación iónica).
- Identificar las fuentes emisoras de contaminantes precursores del depósito atmosférico que impactan a la zona de estudio, aplicando el modelo de trayectorias de retroceso HYSPLIT.

- Describir las condiciones meteorológicas que favorecen el transporte de precursores hacia la zona de estudio, considerando los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS).
- Analizar los impactos del depósito atmosférico húmedo sobre la calidad atmosférica de la ciudad de Campeche, utilizando la matriz de Leopold y el método de Battelle-Columbus.
- Proponer un programa para la Prevención del Deterioro Ambiental Significativo (PSD) tomando en cuenta la región de interés, en el cual se prevenga, minimice y controle las emisiones de precursores de la contaminación atmosférica en la zona.

II.- MARCO TEÓRICO

II. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan una serie de elementos conceptuales y teóricos con la finalidad de dar sustento al procedimiento de evaluación, prevención y control del deterioro ambiental.

2.1 Prevención del deterioro ambiental significativo (PSD)

En la Ley del Aire Limpio de 1970 de E.U.A (publicada en 1997), surgió el concepto de Prevención del Deterioro Significativo, donde la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) publicó los reglamentos para prevenir la "degradación" del aire en áreas donde las concentraciones de contaminantes cumplieran con lo exigido en las normas nacionales de calidad del aire.

El deterioro significativo se define como un aumento en la concentración máxima permitida de contaminantes, o bien como un incremento sobre las concentraciones recomendadas por las normas de calidad del aire existentes para una zona determinada. En el programa PSD se establece un incremento para áreas designadas como zonas en las cuales se están alcanzando las normas nacionales de calidad del aire. No son permitidos aquellos aumentos en las emisiones que ocasionan un incremento que conduce a un incumplimiento de las normas de calidad del aire para un contaminante en particular (US-EPA, 2005).

En las regiones en donde existe una calidad del aire satisfactoria, es decir que no se rebasa alguna de las normas de calidad del aire, es necesario trabajar para que precisamente se conserve esta calidad. Es en esta situación cuando las medidas preventivas se vuelven necesarias, y es posible la aplicación del programa para la "Prevención del Deterioro Significativo" (PSD) (Sosa et al., 2009).

El programa PSD tiene como meta principal permitir el crecimiento urbano-industrial manteniendo los niveles de calidad ambiental adecuados para proteger la salud de la población y su bienestar, así como para proteger los recursos naturales (Sosa et al., 2009). El PSD se

aplica a nuevas fuentes contaminantes o fuentes instaladas con modificaciones considerables en “áreas en cumplimiento” (Antúnez, 2013).

El programa PSD regula las emisiones de NO_x, dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), y partículas (PM), cuyas emisiones deben ser controladas con la aplicación de la mejor tecnología de control disponible.

Para su realización se requiere de:

1. Uso de la mejor tecnología de control existente y aplicable.
2. Análisis de impacto ambiental.
3. Participación de la población.

El PSD está diseñado para:

1. Proteger la salud pública y el bienestar de la población.
2. Preservar, proteger y mejorar la calidad ambiental en parques, monumentos, etc.
3. Asegurar que el desarrollo económico ocurra de manera congruente con la preservación y sustentabilidad de la calidad ambiental existente.

2.1.1 Requerimiento para la aplicabilidad del PSD

De acuerdo con Sosa et al., (2009) y Antúnez, (2013), para cumplir con el PSD se requiere llevar a cabo una evaluación del impacto en la calidad del aire asociado con la construcción y operación de una fuente nueva o modificación de alguna ya existente. El propósito principal de la evaluación del “Programa para la prevención del deterioro Ambiental Significativo” es demostrar que las nuevas emisiones generadas en conjunto con otras emisiones ya existentes en el sitio de interés, no causarán o contribuirán a la violación de cualquier norma aplicable o los límites establecidos en el programa de PSD de la US-EPA.

En los lineamientos del PSD, las áreas que cumplen con las normas relacionadas con un

contaminante específico se denominan *áreas adecuadas de calidad ambiental*. Las áreas que no cumplen estas normas son *áreas no adecuadas de calidad ambiental*. Un área puede ser adecuada, por ejemplo, para cumplir con CO y al mismo tiempo no adecuada para el SO₂. Los estados son responsables de establecer los límites de cada zona geográfica considerada en el programa con base en su plan estatal para minimizar o controlar contaminantes primarios a la atmósfera.

2.1.2 Clasificación actual de las áreas para aplicación del PSD

El programa PSD contiene un sistema de clasificación de áreas, el cual sirve a los estados como una oportunidad de identificar metas locales para el uso de suelo cumpliendo con lo relativo a la calidad del aire. Existen tres clases de áreas, las cuales difieren en términos del crecimiento que puede permitirse antes de que pueda ocurrir un deterioro significativo en la calidad del aire (Sosa et al., 2009). La clase I tiene los menores incrementos, permite un pequeño grado de deterioro de la calidad del aire. Dentro de la Clase I están los parques nacionales y áreas protegidas y no podrán ser designadas en otra clasificación. Las áreas de la clase II pueden permitir un crecimiento industrial debidamente controlado. Las áreas de la clase III tienen los mayores incrementos y por lo tanto permiten una mayor cantidad de desarrollo que las áreas correspondientes a las clases I y II.

2.2 Evaluación de Impacto Ambiental

“El Impacto Ambiental (IA) es la alteración de la calidad del medio ambiente producida por una actividad humana”(…) Un impacto ambiental proviene del cambio de la valoración del medio (calidad ambiental) (…) éste tiene que estar producido directa o indirectamente por una actividad humana, o en el caso de la evaluación de una obra o actividad concreta, el efecto ha de ser debido a la actividad que se está estudiando. Para que un efecto ambiental se pueda considerar un impacto, es necesaria una valoración positiva o negativa de este cambio de calidad ambiental, (Garmendia et al., 2005)”.

Según Garmendia et al., (2005), los potenciales efectos significativos (positivos y negativos), de los proyectos o actividades que se realicen en un lugar determinado, deben analizarse teniendo cuenta:

- a) La extensión del impacto (área geográfica y tamaño de la población afectada).
- b) El carácter transfronterizo del impacto.
- c) La magnitud y complejidad del impacto.
- d) La probabilidad del impacto.
- e) La duración, frecuencia y reversibilidad del impacto.

En el año de 1971, en México fue publicada la primera ley en materia ambiental: Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. Hasta el año 1988 es que se publica la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en el Diario Oficial de la Federación (DOF). En la reforma publicada en el DOF, el 30 de agosto de 2011, el artículo 28, sección V, indica que:

“La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente, preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente (SEMARNAT, 2015)”.

2.2.1 Procedimiento para evaluar el Impacto Ambiental

El término Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) se utiliza para describir el proceso jurídico-administrativo impuesto por un gobierno a las agencias públicas y privadas para aprobar, rechazar o modificar un proyecto o actividad desde su etapa de planeación a través de un proceso o método analítico que permita identificar y evaluar los impactos ambientales potenciales que puede provocar un proyecto, programa o actividad.

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un instrumento de la política ambiental, cuyo objetivo es prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana (SEMARNAT, 2015). Es un instrumento de planeación y en México es la herramienta principal con la que se cuenta para prevenir el daño a la salud, deterioro de los ecosistemas naturales y proteger el patrimonio nacional.

Según lo establecido en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental, el procedimiento para la evaluación de impactos ambientales se realiza en diferentes etapas. Primeramente, se deben de detallar las características del proyecto, obras y actividades involucradas en cada una de sus fases. También se debe de caracterizar la situación ambiental existente y los posibles niveles de alteración, así como describir los aspectos ambientales y socioeconómicos, analizando, además, las posibles condiciones ambientales que se tendrían de no llevarse a cabo el proyecto.

Posterior a conocer el dictamen de la autoridad responsable acerca del nivel de estudio requerido, según sea la actividad que se pretende realizar, debe elaborarse la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), documento en el cual, de acuerdo con el artículo 28 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), se deben evaluar los impactos potenciales que las operaciones, construcciones y/o realización de actividades pudieran causar al ambiente y proponer las medidas necesarias para prevenir, disminuir o compensar dichas alteraciones.

En la segunda etapa, se incluye la identificación, predicción y evaluación de los efectos que tendrá la implantación del proyecto. En esta etapa se utilizan diversas metodologías, técnicas, modelos de análisis, etc.

La etapa final consiste en proponer diversas medidas de prevención y mitigación para los impactos ambientales que causaría el proyecto en cada una de sus fases, de no contemplar

su control y mitigación.

La SEMARNAT, (2015) establece que para la elaboración de una EIA se deben considerar secuencialmente las siguientes acciones y análisis:

1. Descripción del proyecto: Se describe el proyecto o actividad desde el enfoque ambiental, principales atributos y debilidades.
2. Desglose del proyecto: Prospección de las actividades relacionadas con el proyecto y las inducidas por el mismo, identificando los impactos al ambiente.
3. Descripción del ambiente, previo al proyecto: descripción del medio físico en sus elementos bióticos y abióticos, empleando datos reportados en la literatura y recabados por observaciones directas en campo, incluyendo medio social y económico.
4. Elementos significativos del ambiente: resumen de la información, acorde a la magnitud de la importancia en el ambiente, para determinar el significado de los elementos para su conservación, empleando los criterios de diversidad, rareza, perturbación, singularidad, entre otros, de manera integral.
5. Ámbito de aplicación de la EIA: se definirá el alcance del estudio según su ámbito de aplicación, su incidencia o no con áreas naturales protegidas o con planes parciales de desarrollo urbano o del territorio, así como el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas vigentes.
6. Identificación de impactos: definir las repercusiones que tendrá el proyecto sobre el ambiente descrito y sobre sus elementos más significativos. Cada impacto deberá ser valorado sobre una base lógica, mensurable y fácilmente identificable. Posteriormente, el análisis debe llegar a una sinergia que permita identificar, valorar y medir el efecto acumulativo del total de los impactos identificados.

7. Alternativas: las alternativas del proyecto deben ser definidas desde la etapa de planeación, para seleccionar aquella sobre la que se hará el EIA. Si existen dos o más alternativas para el proyecto, deberán analizarse, valorarse sobre la base de su significado ambiental y de sustentabilidad para seleccionar la que mejor se ajuste a las necesidades del mantenimiento del equilibrio ambiental y a los objetivos, características y necesidades del proyecto.

8. Identificación de medidas de mitigación: propuesta de medidas lógicas y viables en la aplicación de la preservación, minimización y control ambiental.

9. Valoración de impactos residuales: identificación de situaciones, negativas para el ambiente, que pueden derivar de una falta de previsión o de intervención del hombre y que pudieran derivar de la puesta en operación del proyecto.

10. Plan de vigilancia y control: definir impactos considerados en el plan de seguimiento y control; determinar los parámetros a evaluar, indicadores que demuestren la eficiencia del plan, la frecuencia de las actividades, los sitios y las características del muestreo.

En esta tesis se aplica el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental, para determinar el impacto potencial significativo capaz de producir un deterioro significativo sobre la Ciudad Fortificada de Campeche, causado por la contaminación atmosférica. Además, se identifican las medidas de mitigación viables para prevenir, minimizar y controlar los efectos de las emisiones de precursores de contaminantes atmosféricos.

Las técnicas que más se adecuan a un estudio para la prevención del deterioro ambiental significativo, según Antúnez, (2013) son las matrices de interacción, las cuales enfatizan los rasgos característicos de la zona de estudio y su relación e impacto respecto a las diferentes actividades dentro del proceso. Particularmente se emplearon las técnicas de Leopold y de Battelle-Columbus que se describen a continuación.

2.2.2 Matriz de Leopold

Esta matriz fue diseñada en 1971 para identificar los impactos causados por un proyecto. Según Garmendia et al., (2005), la matriz proporciona una relación causa-efecto del impacto ambiental provocado por las acciones de un proyecto determinado. Fue preparada para el Servicio Geológico del Ministerio del Interior de los Estados Unidos, para la evaluación de impactos ambientales de una mina de fosfatos en California y que desde entonces se utiliza en los estudios de impacto ambiental. Fue el primer método que se estableció para las evaluaciones de impacto como elemento de guía de los informes y de las evaluaciones de impacto ambiental.

De los estudios de Antúnes, (2013); Garmendia et al., (2005), se recopilaron las siguientes ventajas y desventajas de la Matriz de Leopold.

Méritos:

- Obliga a considerar los posibles impactos de proyectos sobre diferentes factores ambientales.
- Incorpora la consideración de magnitud e importancia de un impacto ambiental.
- Permite la comparación de alternativas, desarrollando una matriz para cada opción.
- Sirve como resumen de la información contenida en el informe de impacto ambiental.

Desventajas:

- No contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto.
- No considera la interacción entre diferentes factores ambientales.
- No distingue entre efectos a corto y largo plazo, aunque pueden realizarse dos matrices que consideren dos escalas de tiempo.
- Los efectos no son exclusivos o finales, existe la posibilidad de considerar un efecto dos o más veces.

La matriz obtenida presenta una serie de valores que indican el grado de impacto que una acción puede tener sobre un factor del medio. A pesar de hacer una ponderación o definición de la importancia de dicho factor, los valores de las distintas celdas de una misma matriz no son comparables ni, por supuesto, pueden sumarse o acumularse. La evaluación de los parámetros "magnitud" e "importancia" ha de hacerse, dentro de lo posible sobre la base de datos, cuyo sistema de procesamiento o interpretación permita definirlos (Cotán-Pinto, 2007).

A continuación, se definen los términos *magnitud e importancia*.

Magnitud: valoración, grado, escala o extensión del impacto o alteración potencial. La calificación es del 1 al 10, en el que el 10 corresponde a la alteración máxima provocada en el factor ambiental considerado y 1 a la mínima. A este valor debe anteponerse un signo + para efectos positivos y – para efectos negativos.

Importancia (ponderación): corresponde a qué tan significativa es la acción particular sobre el factor ambiental, o elemento impactado, en el momento específico del análisis. Se califica también del 1 al 10, en orden creciente de importancia. Se puede analizar como la ponderación que da el peso relativo que el factor ambiental considerado tiene dentro del proyecto, o la posibilidad de que se presenten alteraciones.

2.2.3 Método de Battelle – Columbus

Se considera uno de los estudios más serios de la valoración cuantitativa que por el momento existen por tener una visión más detallada (Cotán-Pinto, 2007). Fue diseñado para determinar el impacto ambiental de proyectos hidráulicos. Se basa en una lista de indicadores de impacto, conformada por parámetros o factores ambientales susceptibles de ser impactados (Vidal de los Santos y Franco, 2009). La evaluación de cada uno de ellos, se maneja de forma unitaria. Con este procedimiento se puede conseguir una planificación a medio y largo plazo de proyectos con el mínimo impacto ambiental posible (Cotán-Pinto, 2007).

Méritos y desventajas del método de Battelle – Columbus

Ventajas:

- El método es un serio ejemplo de valoración de impactos, y ha servido como base para estudios posteriores.
- Los parámetros o factores ambientales se transforman a unidades conmensurables (comparables) representativas de la calidad del medio ambiente, lo que permite la adición de las magnitudes de impacto para cada acción y para cada factor ambiental.
- Para cada parámetro se reflejan los valores en unidades de impacto ambiental (UIA) correspondientes “con proyecto”, “sin proyecto” y el referente al proyecto por diferencia de los dos.
- Permite el cálculo del impacto ambiental global del proyecto y la comparación de alternativas al proyecto.

Desventajas:

- Las unidades ponderales de los parámetros (UIP) se asignan de manera subjetiva.
- El árbol de factores ambientales y el de acciones-actividades se deben adaptar al tipo de proyecto y al medio receptor.

- Los factores ambientales son ilimitados y no es posible contar con todas las funciones de calidad ambiental para todos los proyectos posibles.

2.3 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema de deterioro ambiental que en la actualidad el ser humano padece y se enfrenta ante la disyuntiva de cómo detenerlo.

La contaminación atmosférica consiste en la alteración de la atmósfera terrestre por la adición de gases, o partículas sólidas o líquidas en suspensión en proporciones distintas a las naturales (Villaseñor, 2008). Otros autores como Alonso, (2013) definen la contaminación atmosférica como la presencia en el aire de sustancias, llamadas contaminantes, que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza e implicaciones de carácter ecológico, económico o legal. En muchos casos la contaminación atmosférica se considera como consecuencia de un incremento en emisiones de origen industrial o vehicular.

Las alteraciones de la composición del aire pueden ocurrir de dos maneras:

- a) Alteración natural, que se origina en procesos que no implican la acción directa del hombre. Entre las fuentes naturales se tienen erupciones volcánicas, fuentes marinas, incendios forestales, plantas, etc.
- b) Alteración artificial o antropogénica, que es provocada por actividades humanas, fundamentalmente procesos industriales.

La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos ligados al foco de emisión se observan en las inmediaciones del mismo, o globales, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio general del planeta y zonas alejadas de los focos emisores (Villaseñor, 2008). La contaminación atmosférica es en primer lugar, un problema local, sin embargo, la atmósfera arrastra las impurezas alejándolas de sus

fuentes (Alonso, 2013). La constante oscilación de las concentraciones de la contaminación urbana y regional son el resultado del desequilibrio entre los índices de producción de contaminantes (fuentes antropogénicas y naturales) y los de su dilución y desaparición por varios procesos que incluyen su difusión (transporte y dilución), reacciones químicas de transformación, absorción por el suelo y limpieza por precipitación (Galindo-Leal, 1999; WMO, 1990).

Más del 50% de toda la contaminación atmosférica se debe al uso de combustibles para el transporte automotriz (Andrés et al., 1999). De acuerdo con estudios de las Naciones Unidas el 50% de la contaminación mundial reside en las áreas urbanas, en donde se espera un crecimiento de 15–20% en los próximos 30 años (Raga et al., 2001).

Para entender el problema de la contaminación atmosférica se debe tener en cuenta que la atmósfera, medio en el que se emiten contaminantes, tiene una estructura compleja, y una dinámica que hace que los contaminantes se dispersen de una manera determinada o se concentren de otra (Alonso, 2013). El término “dispersión” generalmente se usa para referirse al conjunto de procesos que ocurren en la atmósfera y por los cuales se diluyen, transportan, remueven o transforman químicamente los contaminantes, hasta alcanzar una fuente receptora (Mora, 1994). Una vez emitidos los contaminantes a este medio (la atmósfera) el destino de éstos es variable. En los casos más favorables, los contaminantes se dispersan y su concentración es baja. Pero en determinadas situaciones, la concentración de los contaminantes puede llegar a ser muy alta. Esta situación puede estar determinada por condiciones meteorológicas desfavorables (vientos en calma, inversiones térmicas). De este modo, la relación entre emisión e inmisión depende en gran medida de las condiciones meteorológicas y, pese a conservar cierta linealidad, no mantienen relación directa (Alonso, 2013). En la tabla 2.1 se muestran los problemas de contaminación atmosférica a distintos niveles espaciales.

Tabla 2. 1 Problemas de la contaminación atmosférica de diferente nivel y escala.

Nivel de contaminación	Escala de transporte y dispersión atmosférica	Ejemplos de Problemas de Contaminación
Mundial	Muy largas distancias. Hemisférica, Planetaria.	1) Incremento del efecto invernadero. Cambio climático. 2) Agotamiento de la capa de ozono. Incremento de los niveles de radiación ultravioleta que alcanzan la superficie del planeta. 3) Modificación de la composición química de la troposfera.
Regional	Medias a largas distancias	1) Contaminación transfronteriza del aire. 2) Acidificación de la lluvia y el aire. Deposición ácida atmosférica. 3) Nitrificación, eutrofización de aguas costeras y lagos. 4) Incremento de las concentraciones de ozono troposférico y superficial. 5) Deposición atmosférica de tóxicos. 6) Incrementos en los niveles de aerosoles y foto-oxidantes (especialmente debido a las quemadas de biomasa).
Local	Cortas a medias distancias	1) Degradación de la calidad del aire en las ciudades. 2) Emisiones accidentales durante el uso, procesamiento, manipulación o transporte de sustancias tóxicas, radiactivas o peligrosas que originan episodios agudos de contaminación del aire.

Fuente: López, (2006); Alonso, (2013).

De acuerdo con Cuesta (2000), la contaminación atmosférica a escala local ocurre usualmente por efecto de una o más fuentes emisoras ubicadas en el entorno de esa localidad. Los ejemplos típicos son las áreas céntricas de las ciudades, en las cuales se superponen los efectos de las emisiones de numerosas fuentes fijas, de la actividad comercial y de las emisiones provocadas por los vehículos. En las ciudades la calidad del aire es el resultado de la interacción compleja entre las condiciones ambientales naturales y antrópicas, las que no siempre pueden evaluarse con suficiente detalle.

Las áreas urbanas crean una zona de transición en la que se producen cambios en las

características del viento, la temperatura y la turbulencia entre la superficie terrestre y el flujo de viento no perturbado por encima del dosel urbano. Esta zona de transición se denomina “Capa Fronteriza Urbana” (WMO, 1996). Esta capa varía con el tamaño de la ciudad y la distancia a favor del viento y se caracteriza por gradientes horizontales débiles de los parámetros meteorológicos (Alonso, 2013).

Desde el punto de vista de la dispersión atmosférica de los contaminantes, los parámetros de interés son: el viento, la turbulencia, la estabilidad atmosférica, la capa de mezcla y las condiciones sinópticas que conducen al estancamiento de las masas de aire (WMO, 1996; Alonso, 2013 y López, 2006).

2.3.1 Influencia del viento en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

El viento desempeña un papel primordial en el tema de contaminación atmosférica. Constituye uno de los componentes principales del clima y se caracteriza vectorialmente por la magnitud de su rapidez (velocidad) y la dirección de donde sopla. El viento es uno de los principales agentes de transporte de sustancias nocivas, de ahí que para realizar estudios de contaminación del aire se necesita estudiar su comportamiento del modo más explícito posible. (SEMARNAT, 2013)

La velocidad del viento estará determinada por los gradientes de temperatura. El viento tendrá mayor velocidad cuando los gradientes de temperatura aumenten. De igual manera aumenta con la altitud como consecuencia de la disminución de la influencia del rozamiento contra el suelo (Cuesta, 2000).

El viento, al transportar los contaminantes, produce su dispersión horizontal y determina la zona expuesta. Por lo general, una mayor velocidad del viento reducirá las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, produciéndose una mayor dilución y mezcla. Según López (2006) y Alonso (2013), una de las características del viento que determina la dilución de los contaminantes en la atmósfera sobre áreas urbanas, es la rapidez promedio de este en la capa de mezcla, debido a que dicha capa varía con la altura.

Como un comportamiento particular del viento pueden producirse circulaciones cerradas, en las que los contaminantes lanzados a la atmósfera se incorporan a la circulación del viento y ocasionalmente se produce un aumento y acumulación progresiva de contaminantes en lugares o zonas barridas por esta variable (Alonso, 2013). El hecho de que la ciudad de Campeche se caracterice por un ambiente urbano y marítimo, hace que la dispersión de los contaminantes se vea afectada por situaciones meteorológicas como la presencia de las islas de calor y las brisas marinas.

Islas de calor

Las áreas urbanas producen calor, principalmente por las actividades humanas, así como por los materiales de construcción como el tabique, el asfalto y el concreto que absorben y retienen el calor de manera más eficiente que el suelo y la vegetación (Córdova, 2011). Las construcciones propias de la ciudad frenan los vientos suaves. Las ciudades suelen tener varios grados más de temperatura que en su periferia, por eso se les llama isla de calor. Esta diferencia de temperatura favorece la formación de una circulación determinada por la ascendencia del aire caliente urbano, este es sustituido por aire de la periferia. Al enfriarse el aire urbano que ascendió, desciende por la periferia de la ciudad, el cual volverá al centro urbano cerrando el ciclo.

Entre los principales factores que influyen sobre el carácter de la variación de los perfiles de la rapidez del viento son (Cuesta, 2000):

- 1- La influencia de la superficie de la Tierra sobre el flujo de aire (rugosidad del terreno).
- 2- El gradiente del viento.
- 3- La fuerza de desviación del viento por el movimiento de rotación de la Tierra.
- 4- El intercambio turbulento en la atmósfera.

Las condiciones imperantes determinan la dilución de los contaminantes. En ausencia de vientos fuertes y lluvias, la dispersión de los contaminantes es compleja, ya que el carácter

cíclico de los vientos dificulta su dispersión produciendo lo que se conoce como cúpula de contaminantes que rodea la ciudad (Córdova, 2011).

Brisas marinas

El sistema de brisas marinas, se origina debido a las diferencias térmicas entre el agua y la tierra (de hasta al menos 2°C). En las zonas costeras se originan sistemas de brisas que durante el día desplazan los contaminantes hacia el interior (la tierra se calienta más y el aire se hace menos denso y se eleva, provocando que sea sustituido por aire más frío que viene del mar), (García et al., 2004 b). De esta manera desarrolla una circulación local desde el agua (mar, lagos y anchos ríos).

Durante la noche, al invertirse la circulación de las mismas (la tierra se enfría más y el mar está más caliente), por lo tanto, la circulación se produce de la tierra hacia el mar. La contaminación se desplaza hacia el mar siguiendo el sistema de brisas, las cuales favorecen la dispersión de los contaminantes. (García et al., 2004 b). La ocurrencia de las brisas da lugar a un aumento de la velocidad del viento (sin la brisa marina habría menos viento), pero su carácter cíclico hace que los contaminantes no se dispersen completamente.

2.3.2 Influencia de la estabilidad atmosférica en la dispersión de los contaminantes atmosféricos

En los estudios sobre calidad del aire, el cálculo de la estabilidad atmosférica se incluye como elemento preponderante entre las determinaciones meteorológicas (Alonso, 2013).

La atmósfera puede ser considerada como un sistema termodinámico en el que cualquier desplazamiento vertical estará sometido a un proceso adiabático. Al ascender las partículas de aire disminuye la presión y se enfrían al dilatarse; al descender la presión aumenta y la compresión hace que la temperatura aumente. El movimiento termodinámico de una parcela determina la estabilidad de la atmósfera en el lugar que se produce. La estabilidad de la atmósfera se clasifica en tres clases principales (estable, neutral e inestable). Según las notas de Bossi, (2000), las condiciones de estabilidad dependerán de los cambios de temperatura al

subir en la vertical. Lo cual es mostrado en las siguientes expresiones.

$$\frac{dT}{dz} < \frac{dT}{dz}|_{ad} \Rightarrow \text{atmósfera inestable} \quad Ec 2.1$$

$$\frac{dT}{dz} = 0 \Rightarrow \text{atmósfera neutra} \quad Ec 2.2$$

$$\frac{dT}{dz} > \frac{dT}{dz}|_{ad} \Rightarrow \text{atmósfera estable} \quad Ec 2.3$$

Las condiciones de estabilidad atmosférica, se observan fundamentalmente durante la noche y el inicio de la mañana donde la turbulencia es limitada, el flujo es cuasi laminar y las emisiones se dispersan poco y lentamente (Rodríguez et al., 2008). Se considera que el aire es estable cuando la disminución de temperatura con la altura es menor que el gradiente adiabático húmedo. Estas características de la atmósfera generan serios problemas de contaminación, principalmente en casos de fuentes con chimeneas de poca altura en relación con los edificios cercanos o con la topografía.

Un ejemplo de cómo se manifiesta la estabilidad atmosférica es el fenómeno de la inversión térmica, el cual se produce cuando el aire más caliente está por encima del aire frío, lo cual inhibe la mezcla vertical. Este fenómeno produce una fuerte acción desfavorable en la dispersión de contaminantes (Alonso, 2013).

Las condiciones inestables ocurren fundamentalmente cuando la temperatura disminuye con la altura a más de $1^\circ\text{C}/\text{km}$, por lo que los movimientos verticales son acelerados y el mezclado es abundante (Bossi, 2000 y Pasquill, 1983). Cuando en una columna o parcela de aire, la masa de aire de la capa inferior, es más cálida y menos densa que el de arriba, el aire se eleva y desplaza al de capas más altas. Las condiciones más inestables se producen en presencia de un calentamiento intenso de la superficie o capa inferior de la parcela. Debido a esto, las emisiones se difunden rápidamente con la ocurrencia de elevadas concentraciones instantáneas en superficie (Rodríguez et al., 2012).

Para el caso de la estratificación neutral, ocurre cuando coinciden la variación de temperatura de la parcela o columna con el gradiente vertical adiabático. En estas condiciones la dispersión vertical de contaminantes no está limitada (Pasquill, 1983). Las condiciones más estables se producen en épocas de bajas temperaturas, en días fríos con inversiones térmicas.

2.3.3 Influencia de la capa de mezcla en la dispersión de los contaminantes.

En la literatura sobre contaminación ambiental, la capa de mezcla es considerada como el estrato de aire a través del cual los contaminantes liberados desde la superficie terrestre son transportados y difundidos a través de la atmósfera (Arya, 1988), ya sea en la componente horizontal como en la vertical por el efecto de mezcla. De esta forma, las emisiones que tienen lugar en las capas bajas de la atmósfera quedan retenidas en un volumen de aire cuya dimensión vertical está delimitada por la altura de la capa de mezcla. Por lo que se dice que existe una estrecha relación entre los índices de contaminación atmosférica y el espesor de la capa de mezcla.

El procedimiento estándar para determinar el espesor de la capa de mezcla es examinar el perfil de temperatura potencial, la temperatura a la cual el aire estaría si se mantuviera la misma presión encontrada en la superficie. Las velocidades del viento no serán constantes a través de la capa de mezcla atmosférica (Trejo y Villagómez, 2011).

La dispersión de los contaminantes emitidos depende de la cantidad de turbulencia en la capa de mezcla, creado por el movimiento horizontal y vertical de la atmósfera. Cuando el transporte de los contaminantes se da con la misma velocidad y en la misma dirección que el viento que los transporta, se produce un transporte por advección. Por lo general, una mayor velocidad del viento reduce las concentraciones de los contaminantes al nivel del suelo, ya que facilita su dilución (INECC, 2016 a).

Al transporte y la dispersión de los contaminantes por efecto del movimiento vertical de la atmósfera se le conoce como transporte por difusión, y puede ser de tipo molecular o

turbulento. El transporte turbulento se debe básicamente a la existencia de remolinos en el aire, que se producen por irregularidades en el terreno (turbulencia mecánica) o por diferencias de temperatura entre las capas atmosféricas (turbulencia térmica). Estos procesos de transportes contribuyen al movimiento vertical de las masas de aire y definen las condiciones de estabilidad atmosférica (INECC, 2016 b).

2.3.4 Relación de la dispersión de contaminantes y los Sistemas Sinópticos

La escala Sinóptica es la escala meteorológica que describe los fenómenos definidos por un rango espacial de cientos a miles de kilómetros y cuyos procesos tienen una duración de días. En esta escala se pueden observar fenómenos como núcleos de altas y bajas presiones, frentes de cualquier tipo (cálidos, fríos, polares, ocluidos), etc. Los sistemas sinópticos (Serrano, 2007), comprenden las grandes masas de aire más o menos homogéneas formadas sobre diferentes regiones, obteniendo así sus propias características.

Los patrones sinópticos tienen gran influencia en el estado del tiempo y afectan las condiciones de calidad atmosférica, determinando la dispersión de contaminantes emitidos en la parte baja de la tropósfera en escalas de tiempo del orden de días. Los contaminantes se distribuyen a todo lo largo de la capa límite planetaria gracias a la turbulencia y alcanzan grandes extensiones, para luego ser depositados gracias a las nubes que traen consigo estos sistemas (Garreaud y Rutllant, 2006). Así, estos sistemas, con sus vientos intensos, nubes y precipitaciones contribuyen a la limpieza de la atmósfera.

Los sistemas estacionarios o semi-estacionarios de altas presiones son de gran interés para los estudios de dispersión de contaminantes ya que crean movimientos en la atmósfera que tienden a estancar a los contaminantes en una capa delgada cercana a la superficie. Cuando un anticiclón permanece estacionario, los contaminantes emitidos dentro de la capa de mezcla no se pueden diluir. Ante estas condiciones es probable que las concentraciones se eleven durante algunos días (Serrano, 2007). Los casos más graves de contaminación del aire en Estados Unidos se han producido o bien por un anticiclón migratorio estancado (por ejemplo, el de Nueva York en noviembre de 1966 y el de Pensilvania en octubre de 1948) o en el límite

este del anticiclón semipermanente del Pacífico (Los Ángeles) (Alonso, 2013).

2.4 Contaminantes atmosféricos

Según lo publicado por el INECC, (2016 b), se manejan varias clasificaciones para los contaminantes atmosféricos.

- Contaminantes primarios. - Aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión, por ejemplo: plomo (Pb), CO, SO_x, NO_x, hidrocarburos (HC), partículas, entre otros.
- Contaminantes secundarios: - Aquellos originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los componentes naturales de la atmósfera. Por ejemplo: ozono (O₃), peroxiacetil-nitrato (PAN), HC, SO₄²⁻, NO₃⁻, ácido sulfúrico (H₂SO₄), partículas (PM), entre otros.

El tiempo de vida de los contaminantes en la atmósfera tiene una gran importancia para la generación de problemas de contaminación atmosférica de diferentes escalas (local, regional, mundial) (López, 2006). Gases como ozono (O₃), óxidos de carbono (CO, CO₂), NO_x, SO_x y partículas atmosféricas (PST, PM₁₀, PM_{2.5}) son conocidos como contaminantes atmosféricos y son comúnmente empleados como indicadores de la calidad del aire en zonas urbanas. Estos contaminantes pueden originar daños a la salud, cambio en las condiciones ambientales y degradación de materiales.

En general, tanto gases como partículas pueden depositarse sobre la superficie a través de los procesos de depósito seco y depósito húmedo, dependiendo de la fase con la que el contaminante haga contacto con la superficie y sea adsorbido o absorbido por ésta (INECC, 2016 a).

Sulfatos

Los SO_4^{2-} son componentes secundarios originados principalmente de la oxidación del SO_2 , pueden además estar presentes como componente primario derivado de la sal de mar o de la materia mineral, como el yeso (NADP, 2004).

El azufre (S) es también un importante nutriente para las plantas y un componente de las proteínas animales y vegetales. Las fuentes naturales de S incluyen los océanos, microorganismos del suelo, la vegetación y los cultivos, la actividad geotérmica y volcánica, así como la quema de biomasa. Actualmente, las fuentes antropogénicas de S y SO_2 (como la quema de combustibles fósiles), han superado a las fuentes naturales como el principal contribuyente de S atmosférico en el hemisferio N. Conclusiones como estas son manejadas en el Programa Nacional de Depósito Atmosférico de los Estados Unidos (NADP por sus siglas en inglés), (NADP, 2004).

Los aerosoles de SO_4^{2-} se relacionan con los problemas de salud en el este de los Estados Unidos. La NADP, (2004), relaciona las emisiones de S y SO_4^{2-} con la pérdida de visibilidad no sólo en un ambiente urbano, sino también en muchas zonas rurales y áreas naturales (Antúnez, 2013) y en las áreas urbanas son los que más contribuyen a la pérdida de visibilidad.

Nitratos

La forma más común de los NO_3^- en las partículas suspendidas (PS) es como nitrato de amonio (NH_4NO_3), compuesto que se deriva de la neutralización de vapores de ácido nítrico (HNO_3) por amoníaco (NH_3). También los NO_3^- , pueden estar presentes como nitrato de sodio (NaNO_3), (INECC, 2016 b).

Al igual que los compuestos de azufre, los NO_x reaccionan para formar compuestos ácidos en la atmósfera, actuando como componentes principales de la lluvia ácida. Las fuentes naturales de los compuestos de nitrógeno incluyen las tormentas eléctricas, microorganismos del suelo, la quema de biomasa y océanos. Sin embargo, la principal fuente de NO_x en el hemisferio N

es la actividad humana, producto del escape de los automóviles, las emisiones industriales y por la actividad agrícola (NADP, 2004).

El depósito atmosférico de nitrógeno puede tener un efecto fertilizante sobre los ecosistemas naturales. Un aumento en las concentraciones de los nitratos en la tierra puede resultar en la saturación de nitrógeno de los suelos y la acidificación de los cuerpos de agua. Dicho proceso se agudiza durante períodos de fuertes lluvias.

Cloruros

Las partículas atmosféricas que se encuentran en suspensión pueden sufrir un proceso de sedimentación, depositándose en la superficie de los materiales. En las zonas costeras, el depósito atmosférico se debe principalmente a aerosoles marinos transportados por el viento. El conjunto de estos depósitos recibe el nombre de contaminación salina. Los aerosoles marinos están representados por los iones cloruro principalmente. Estos iones abundan en atmósferas marinas, en las que la fuente básica lo constituye las partículas de agua salada arrastradas por el viento hacia la costa, transportándolas varios kilómetros tierra adentro (Corvo et al., 2008). Las concentraciones de cloruros dependerán de las variables que influyen en su transporte, como la dirección y velocidad de viento y topografía local.

Este ión no se relaciona con daños a la salud, por lo que es poco detectado en las redes de seguimiento. Sin embargo, este contaminante natural, si tiene gran importancia (Reyes et al., 2006), ya que causa el deterioro de materiales pétreos, debido a su poder de penetración en los poros de la roca y su gran capacidad de humectación, que le permite originar microfracturas y agrietamientos en la matriz mineral de la roca. Una de las maneras de determinar la corrosividad de la atmósfera es mediante la determinación de la velocidad de deposición de cloruros.

2.4.1 Fuentes de emisión de contaminantes

Las emisiones pueden provenir de cinco fuentes, (INEM, 2006):

Fuentes fijas

Son plantas industriales estacionarias (manufactureras o de producción), reguladas por la SEMARNAT en México. Para considerar una fuente como fija, la emisión de sus contaminantes debe ser mayor o igual a 10 Mg/año. Las fuentes fijas generan emisiones desde equipos estacionarios a través de chimeneas o ductos de venteo, o bien desde fuentes fugitivas no confinadas (INEM, 2006).

Fuentes de área

Corresponden a establecimientos industriales pequeños que emiten menos de 10 *Mg/año*. Incluyen actividades donde se involucre el uso comercial y doméstico de solventes, como el lavado en seco, y fuentes fugitivas de partículas, como las actividades de labranza, levantamiento de polvo por vehículos que circulan en caminos no pavimentados y por el transporte del viento. Asimismo, las fuentes de área incluyen vehículos como locomotoras, aeronaves y embarcaciones marítimas comerciales y su emisión se relaciona en el área en que se desarrolla la actividad en (peso/área/tiempo) (INEM, 2006).

Fuentes móviles

Pertenecen a las emisiones del escape de los vehículos automotores que circulan por carreteras y calles pavimentadas, incluidos automóviles particulares, motocicletas, taxis, microbuses, autobuses y camiones de carga pesada que utilizan Diesel, gasolina o biocombustible (INEM, 2006).

Fuentes móviles que no circulan por carreteras

Corresponden a las emisiones de maquinaria agrícola, de construcción y otros similares (INEM, 2006).

Fuentes naturales

Se refieren a las emisiones naturales, tales como los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) generados por la vegetación, los NO_x provenientes de los suelos, así como SO₂ y partículas producto de la actividad volcánica, entre otros (INEM, 2006).

2.5 El deterioro de materiales pétreos

El deterioro de materiales es un proceso natural y se encuentra estrechamente ligado con la naturaleza propia de cada material. Sin embargo, los materiales pueden ser afectados por agentes físicos, químicos y biológicos del medio ambiente. Los efectos de la contaminación atmosférica en la degradación de los materiales de construcción de los monumentos, son bien conocidos desde hace mucho tiempo. Torres, (2009), muestra tres factores involucrados en deterioro de la roca caliza, entre los cuales está la disolución por acción del agua de lluvia libre de contaminantes, dicho proceso de disolución puede verse acelerado por la lluvia ácida. Otro factor consiste en el depósito de gases contaminantes como SO_x y NO_x.

Las principales alteraciones que se presentan en los edificios construidos con materiales pétreos suelen ser (Barcina et al., 1997; Marinoni et al., 2002):

- Las patinas, que son una modificación superficial detectable con cambios de coloración, eflorescencias por cristalización de sales solubles sobre la superficie y en los poros de la roca.
- Las costras, que son capas compactas de material formada sobre la parte externa de la roca por interacción con agentes ambientales

En zonas costeras, como es el caso de la zona de estudio, los aerosoles marinos transportan sales que contribuyen al deterioro de las rocas. Estos aerosoles están compuestos por una mezcla de gotas con partículas dispersas, las cuales son generadas naturalmente por la acción del viento sobre la superficie del agua, introduciendo especies iónicas a la atmósfera,

principalmente cloruros y SO_4^{2-} . En los estudios de Corvo et al., (2008) se muestra que en San Francisco de Campeche los niveles de corrosión atmosférica son más bajos que en otras estaciones costeras de México, donde la influencia industrial y marina resulta más notable.

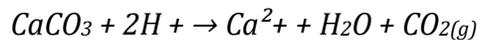
La simple contaminación, por intensa que sea, no afecta directamente a la roca, si no es con la presencia de agua (para formar ácidos, hidróxidos, etc.). El agua es el principal agente natural involucrado en el deterioro de los materiales (Reyes et al., 2011). De manera natural, las gotas de agua presentes en la atmósfera incorporan CO_2 para producir ácido carbónico (H_2CO_3) entonces, el agua adquiere un pH cercano a 5.65, que le confiere carácter ácido, con lo cual es posible la disolución de material calcáreo (Bravo et al., 2006). Cuando las gotas de agua de la atmósfera reaccionan con los SO_x y NO_x (lo que ocurre normalmente en ambientes urbanos), incrementan su carácter ácido a valores por debajo de 5.65, motivo por el cual recibe el nombre de lluvia ácida. Este parámetro es particularmente importante en climas tropicales, donde los largos periodos de precipitación pluvial y la alta humedad relativa del ambiente garantizan su disponibilidad (Corvo et al., 2010).

Hasta hace pocos años apenas existían referencias de investigaciones sobre los mecanismos de degradación de la roca en monumentos históricos del patrimonio cultural del estado de Campeche. Según Torres, (2009) estos estudios son muy necesarios en el estado y se justifican ampliamente si se tienen en cuenta las condiciones ambientales imperantes, con amplias oscilaciones diarias de temperatura, altos niveles de humedad relativa y elevadas tasas de precipitación pluvial, propiciando un ambiente potencialmente agresivo para los monumentos históricos.

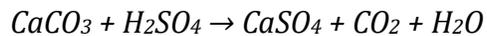
2.5.1 Depósito ácido y su efecto en el material pétreo

El depósito ácido húmedo afecta directamente el material pétreo del que se encuentran construidos los edificios y monumentos de la zona. La caracterización de esta precipitación sirve como un indicador de la calidad del aire.

Los edificios del centro histórico de San Francisco de Campeche, fueron construidos con roca caliza, incluyendo bloques de cantera y morteros fabricados con sascab (polvo que se produce como consecuencia de la pulverización de la roca caliza suave) y cal siguiendo un estilo de construcción conocido como bahpek (Reyes et al., 2011). La roca caliza de la Península de Yucatán, se caracteriza por un amplio intervalo de porosidad (Torres, 2009; Maldonado, et al., 2011), por lo que la dinámica del agua al interior de sus poros y su intercambio con la atmósfera o suelo afectan sus propiedades y durabilidad (Reyes et al 2011).



La calcita también es capaz de formar yeso, $CaSO_4 + 2H_2O$, por la reacción con (H_2SO_4) con hierro (Fe (III)) como catalizador, debilitando la estructura de la roca caliza (Cheng y Castillo, 1984):



El yeso, es una sal altamente soluble a la temperatura predominante en regiones tropicales, por lo que requiere una cantidad mínima de agua para disolverse y migrar hasta el frente de evaporación (Arnaiz y Martin, 1977). Al momento de perder humedad, puede recristalizar al interior de los poros donde se expande hasta un 30% de su volumen original induciendo microgrietas y fatiga en los materiales. En ambientes urbanos, el yeso incorpora a su estructura mineral partículas atmosféricas, polvo y biomasa para formar un depósito llamado costra negra, de fuerte impacto visual (Corvo et al., 2010).

2.5.2 Efecto de los contaminantes atmosféricos como SO₂ y NO_x en los materiales pétreos

El SO₂ proviene principalmente como resultado de la combustión incompleta de los derivados del petróleo. Este compuesto tiene un gran impacto en la roca caliza, los principales efectos son la formación de costras y pérdida de material por solubilización (Antúnez, 2013).

Una posibilidad es la absorción del SO₂ en las rocas mediante el agua de lluvia, aerosoles atmosféricos o pequeñas películas superficiales de agua en la superficie de las rocas. Estas se oxidan para formar (H₂SO₄) diluido, que disuelve al carbonato de calcio (CaCO₃) por formación de yeso. Otra de ellas puede ser mediante la reacción del CaCO₃ con el SO₂.

Lo significativo es que con la presencia de una mínima cantidad de agua es suficiente para la oxidación del SO₂ y la formación de sulfato de calcio (CaSO₄) o yeso (CaSO₄•2H₂O). La aparición de CaSO₄•2H₂O representa un problema bastante serio ya que al cristalizar puede aumentar gradualmente su tamaño hasta en 32% (Feddema et al., 1987), por lo que posee una capacidad para fracturar materiales de baja resistencia.

Torres, (2009), describe las características de alta solubilidad que el CaSO₄•2H₂O presenta bajo las condiciones de temperatura en regiones tropicales, por lo que precisa de una mínima cantidad de humedad para disolverse e iniciar rápidamente su migración por capilaridad hacia el frente de evaporación. Las sales cristalizan dentro del material pétreo saturando los poros, lo cual ocurre al perder la humedad. La presión que las sales pueden generar en el material origina fracturas, y es causa de fatiga en ellos.

Los NO_x proceden de la combustión de combustibles fósiles en vehículos de transporte e instalaciones industriales. Cuando el ácido nítrico entra en contacto con el CaCO₃ se produce nitrato de calcio (Ca(NO₃)₂). El Ca(NO₃)₂ es más soluble en agua que el CaCO₃, por lo que al estar presente en una roca puede ser transportado por el agua a través de los poros y cristalizar en la superficie, para posteriormente ser lavado de la superficie de los monumentos durante los periodos de lluvia (Allen et al., 2000 y Torres, 2009).

III.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

III DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta una descripción del área de estudio, con la finalidad de hacer una descripción de los medios social, económico y natural de la misma. Dicha descripción permitió hacer una valoración ambiental de zona.

3.1 Área de estudio

La ciudad histórica fortificada de San Francisco de Campeche está localizada en la costa occidental de la Península de Yucatán. La ciudad fue fundada en 1527 por colonizadores españoles, siendo puerto importante (durante el siglo XVIII). Campeche fue el distrito más rico en la península de Yucatán debido a que el imperio español llevó a cabo la construcción de un impresionante sistema defensivo para proteger la ciudad y sus habitantes (Reyes et al., 2013). De igual manera se realizaba la exportación de bienes desde su puerto hacía las metrópolis europeas (SECTUR, 2014).

Actualmente exhibe cerca de 1500 edificios de carácter militar, civil y religioso, 500 metros de valla, dos puertas, dos fuertes y ocho baluartes, construcciones defensivas en forma de pentágono (Reyes et al., 2013). Dichas construcciones le confieren un atractivo histórico, cultural y natural (SECTUR, 2014).

San Francisco de Campeche muestra su belleza sobria a pesar del paso de los años. En el año 1998, la ciudad fue incluida dentro de la lista de patrimonio mundial de la Organización de la Naciones Unidas para la Ciencia, la Cultura y las Artes (UNESCO). En 1999, su complejo histórico y arquitectónico fue incluido en la Lista de Patrimonio Cultural de la UNESCO, (UNESCO, 2007) lo que la ubicó como un referente histórico y cultural en México y otros países.

Hasta inicios del presente siglo, la ciudad era considerada un lugar de escaso desarrollo industrial y sus principales actividades productivas eran la administración, la pesca y el procesamiento de alimentos. No existían industrias pesadas, excepto una central

termoeléctrica situada en el cercano poblado de Lerma (Reyes et al., 2011).

Durante los últimos años del siglo XX, la ciudad mostró una mayor expansión económica y social, evidenciada por un explosivo crecimiento urbano y poblacional. En los estudios de Videla y Herrera 2004, Saiz-Jiménez et al., 2004, se describe como una de las consecuencias de esta expansión poblacional, se registró un significativo incremento en el número de automóviles en varias áreas de la ciudad, incluyendo el centro histórico. Dichos autores consideran que dicho crecimiento originó cambios en las condiciones ambientales, lo cuales podrían acelerar los procesos de deterioro del patrimonio histórico de la ciudad como está ocurriendo en otras aéreas urbanas de México e internacionalmente.

3.2 Medio físico de la ciudad de Campeche

3.2.1 Ubicación y extensión

San Francisco de Campeche es una ciudad emergente localizada en la costa occidental de la Península de Yucatán. Se encuentra limitada al N por la Reserva de la Biosfera Los Petenes, al NW por el Golfo de México y al S, E y SE por un grupo de suaves colinas que no llegan a rebasar los 150 m de altura que pertenecen al sistema conocido como Penillanura Yucateca, la cual es una suave planicie, 180 km al sur de la ciudad de Mérida.

Geográficamente San Francisco de Campeche se ubica entre los paralelos 19°51'00" de latitud norte (N), y entre los meridianos 90°31'59" de longitud oeste.

El Municipio de Campeche, tiene una superficie de 3,410.64 km², lo que lo ubica en el séptimo lugar entre los once municipios que integran la geografía estatal. Su cabecera Municipal es la ciudad de San Francisco de Campeche, y cuenta con 77 localidades. La Ciudad de San Francisco de Campeche es la cabecera municipal y representa el 85.09% de la población del Municipio.

La ubicación de la ciudad de Campeche se muestra en la figura 3.1.



Figura 3. 1 Ubicación de la ciudad de San Francisco de Campeche y su área urbana. Fuente: Google Maps, consulta septiembre de 2017.

3.2.2 Suelos

La zona urbana se asentó sobre suelos surgidos de rocas sedimentarias de Neógeno, en lomeríos y playa; áreas en donde originalmente había suelos denominados Phaeozem, Vertisol y Solonchak (Villalobos-Zapata et al., (2010)).

3.2.3 Orografía

La superficie del municipio es plana en su mayor parte con ondulaciones no mayores de 150 metros sobre el nivel del mar. La ciudad de Campeche tiene una altitud máxima de 100 m sobre el nivel del mar (INEGI, 1996).

En el sur de Seybaplaya, en el municipio de Champotón se inicia una serie de lomeríos

conocidos como sierra alta o Puuc, que se dirigen al noreste (NE), hasta Bolonchen y ahí penetran en el estado de Yucatán, tienen una altitud media de entre 40 y 60 metros, llegando a alcanzar en algunos puntos más de 100 metros (INEGI, 1996).

En su recorrido por la costa cercana a la ciudad de Campeche, los lomeríos forman acantilados con puntas conocidas con el nombre de Maxtum, Boxol y el Morro (Castro-Mora, 2002). Por el otro lado de Seybaplaya hacia el sur hay una derivación con estas lomas que se conoce como Sierra Seybaplaya. Estos cerros se extienden por el centro del Estado perdiendo altitud al sur del río Champotón en dirección a Escárcega.

En el sureste se encuentra la parte más elevada del relieve, cerca de los límites con Guatemala y Quintana Roo; las máximas elevaciones están cerca de Zoh Laguna y las principales son: el Cerro Champerico (390 metros de altitud), Cerro los Chinos (370 msnm), Cerro el Ramonal (340 msnm), Cerro el Doce (250 msnm) y Cerro el Gavilán (210 msnm) (INEGI, 1996).

La ausencia de montañas en la península es una característica que le brinda singularidad y distinción a la zona. Su superficie es casi plana, sin embargo, se pueden notar diferencias en el relieve entre el estado de Campeche y el resto de la península, ya que se presentan lomas separadas por extensas zonas bajas (Villalobos-Zapata et al., 2010). Al descender de las partes más altas hacia las bajas del centro y oeste de Campeche, el terreno aparenta formar una especie de escalones, lo que le da a la región características de meseta baja.

3.2.4 Hidrografía

Los ríos, lagos, lagunas y esteros sobre el territorio del estado de Campeche abundan en la porción sur y suroeste, mientras que van disminuyendo hacia el N, debido a la rápida filtración del agua al subsuelo. El municipio de Campeche carece de corrientes superficiales, pero en la parte N y NE se pueden observar grietas de las cuales se han formado corrientes subterráneas por las precipitaciones pluviales. El nivel freático se encuentra a profundidades que van de 6 a 90 metros (Villalobos-Zapata et al., (2010).

3.2.5 Clima

San Francisco de Campeche cuenta con un clima tropical de tipo cálido sub-húmedo con lluvias en verano (Aw) (Castro-Mora, 2002 y García, 2004 a). La temperatura media anual es de 26.8°C. La ciudad presenta valores relativamente altos de humedad relativa a lo largo del año y un extendido periodo de lluvia que comprende de junio a noviembre (Reyes et al. 2011).

En el estado de Campeche es muy común la ocurrencia de lluvias fuertes que pueden ocasionar inundaciones. Los eventos de lluvia son comunes en los meses de verano. El mes de mayor cantidad de días con lluvia es agosto (14,1 días con lluvia), mientras que en el mes de abril sólo ocurrirá lluvia, como promedio en 1,3 días. La precipitación máxima registrada durante los 6 meses más húmedos del año (incluidos los meses de verano), es 10 veces mayor la máxima de precipitación en los meses secos (García, 2004 a).

Durante la estación lluviosa predominan vientos con dirección E-SE y con menor frecuencia de la componente N-NE. En este periodo la ciudad se ve afectada por fuertes tormentas tropicales y abundante precipitación. En invierno, cuando los frentes fríos llegan a la costa campechana, aumenta la frecuencia de las componentes E-NE, N, NW y SW, lo que origina un sensible incremento en los niveles de salinidad del aire (García, 2004 a).

Debido a su ubicación geográfica es usual que la ciudad se vea afectada por ciclones tropicales, durante la temporada lluviosa. Durante el periodo 1960 – 2004, el territorio mexicano se vio afectado por los ciclones tropicales: Brenda (agosto 18-22, 1973), Edith (septiembre 5-15, 1971), Carmen (29 agosto a 8 de septiembre, 1974), Hermine (septiembre 21 - 25 de 1980) y Gilberto (septiembre 1988), Opalo y Roxana (octubre, 1995) e Isidoro (septiembre 14-26 de 2002) han afectado la zona.

Durante la temporada de secas, los vientos provenientes de direcciones E-NE y SW contrarrestan la acción de vientos costeros y aumentan el contenido de partículas atmosféricas provenientes del suelo. Dichos datos pueden ser obtenidos en la página oficial del Servicio Meteorológico Nacional, donde muestra los registros meteorológicos obtenidos en la Estación

Meteorológica, ubicada en el aeropuerto aeronaval de la ciudad (Cook et al., 2000).

Dos fenómenos meteorológicos a mesoescala condicionan la penetración de humedad desde el mar hacia la ciudad. En su estudio Reyes et al., (2011) describe que, durante el otoño, las tormentas tropicales traen humedad desde el Mar Caribe dando lugar al aumento de los niveles de lluvia, fenómeno más frecuente en septiembre y octubre. Durante el invierno, aparecen grandes sistemas atmosféricos (fenómenos meteorológicos de escala sinóptica) conocidos como frentes fríos, provenientes de América del Norte, que arrastran humedad de las aguas cálidas del Golfo de México, propiciando la disminución de las temperaturas y un aumento en los episodios de neblina en zonas costeras. Pero es durante el período de invierno que ocurre una disminución considerable de los eventos de lluvia, dando lugar a una temporada seca que abarca desde noviembre a mayo.

3.3 Medio biótico de la Ciudad de Campeche

3.3.1 Recursos naturales

Los estudios de biodiversidad en el estado son insuficientes y se reconoce la necesidad de abundar en estos (Villalobos-Zapata et al., 2010). Sin embargo, sí se tienen definidas las principales amenazas para su conservación, las cuales son: la alteración de hábitats (cambios en el uso de suelo), la sobreexplotación, la contaminación química (agroquímicos, fertilizantes, HC y metales), el cambio climático, la introducción de especies y el incremento en la urbanización por el crecimiento de la población humana.

En los estudios de Villalobos-Zapata et al., (2010) y basados en trabajos realizados por la Universidad Autónoma de Campeche, se muestra que en general se han identificado hasta el momento, en el estado de Campeche, 88 diferentes microorganismos (entre géneros y especies), 154 especies de hongos, 103 de foraminíferos y 90 de ostrácodos, 242 de macroalgas, 5 de pastos marinos, 5 de manglar, 1 250 de plantas.

Una de las características naturales más significativas de la Ciudad de Campeche es su cercanía a la Reserva de la Biósfera Los Petenes (RBLP). Dicha cercanía le proporciona una interesante oferta de bienes y servicios ambientales al estado, y contribuyen a la elevación del nivel de calidad de vida de su población, permitiendo realizar actividades de turismo ecológico.

La característica más notable de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, es la presencia de islas de vegetación arbolada (manglar o selva) (Durán, 1987), las cuales son características también de Cuba y la península de la Florida. Presenta características de una ciénaga salina especial de inundación constante, dando lugar a la existencia de diversos tipos de humedales marinos y costeros. Su nombre “petenes” proviene del vocablo maya que significa “campos llanos junto al mar a manera de islotes”. La RBLP forma parte de una planicie costera tropical calcárea, con afloramientos de manto freático, caracterizado por áreas inundables, marismas, cenotes, humedales de tierras bajas de la planicie costera y segmentos de selvas medianas.

Flora

En esta zona se localiza la mayor población de mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*) presente en el Estado de Campeche, así como ejemplares de maderas preciosas como la caoba y el cedro americano. Se pueden encontrar varios tipos de mangles tales como: manglar de franja (que bordea el litoral), el manglar chaparro (asociado al periodo de lluvias) y el manglar de cuenca o de ciénaga (Durán, 1987 y Villalobos-Zapata et al., 2010). La flora terrestre de la RBLP, incluye al menos por 678 especies de plantas superiores, de 103 familias y 404 géneros. De todas estas especies, 24 son endémicas de la península de Yucatán, 3 están amenazadas y 5 sujetas a protección especial.

De las 145 familias de plantas registradas, las más importantes por su número de géneros y especies son: Fabaceae, Poaceae, Orchidaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae y Bromeliaceae. Aunque también están representadas las familias Annonaceae, Boraginaceae, Cactaceae, Cyperaceae, Heliconaceae, Icanaceae, Orchidaceae, y Polygonaceae (Durán, 1987).

Fauna

El estado de Campeche reporta un total de 4 379 especies registradas hasta el momento, de las que resaltan mamíferos acuáticos con 15, mamíferos terrestres 105, aves 489 especies y reptiles 99. Como rasgo significativo de su fauna se encuentran la presencia de 240 crustáceos, 660 moluscos, 74 de equinodermos, 322 de poliquetos, 356 de peces marinos, 61 de peces de ambientes dulceacuícolas, 21 anfibios, 99 reptiles, 489 aves, 15 mamíferos acuáticos y 105 de mamíferos terrestres. De estas especies animales se encuentra en peligro de extinción: mono aullador, saraguato, mono araña, ocelote, jaguar, oso hormiguero, tigrillo, armadillo y puma (Villalobos-Zapata et al., 2010). Además de los anteriores, dentro de los mamíferos terrestres en categoría de riesgo dentro de la RBLP destacan: el perro de monte llamado localmente viejo de monte (*Eira barbara*), la onza o yaguarundí (*Puma yagouarundi*), el kinkajú o mico de noche (*Potos flavus*), el cacomixtle (*Bassariscus sumichrasti*), la musaraña (*Cryptotis nigrescens*), el tapir o danto (*Tapirus bairdii*), la rata de oreja grande de Yucatán (*Otonyctomys hatti*), el ratón de patas blancas (*Peromyscus leucopus*), el puercoespín enano peludo mexicano o puercoespín tropical (*Sphiggurus mexicanus*) y dos especies de murciélago (Ricker, 1998).

3.4 Perfil socioeconómico del municipio de Campeche

3.4.1 Habitantes y su entorno socioeconómico

De acuerdo con los datos que obtuvo el INEGI, (2015) del conteo de población intercensal del año 2015, la ciudad de Campeche contaba con una población de 899 931 habitantes, de los cuales 441276 eran hombres (49 %) y 458655 mujeres (51%). El 75 % de los habitantes se encuentran en áreas urbanas conformadas por la ciudad de San Francisco de Campeche, y las localidades de Lerma y de Chiná y sólo 25 % de los habitantes en zonas rurales.

En la ciudad, existen 74016 viviendas, equivalentes al 86.61% del Municipio, de estas el 89.34% disponen de todos los servicios integrados como son luz eléctrica, agua entubada, y

drenaje (SECTUR, 2014).

En el estudio de SECTUR “Competitividad Turística del Destino Campeche” se describen las condiciones socioeconómicas existentes en la ciudad de Campeche. En cuanto a la población de la ciudad ocupada por sector económico, las actividades de agricultura, ganadería o silvicultura generan 1867 empleos (2%). El sector industrial genera 21211 empleos mientras que las ramas de construcción generan el 49%, y de la industria manufacturera el 43%. El sector servicios emplea a 86 480 habitantes (79%), dentro de este la rama de comercio concentra al 26% de la población, mientras que la rama de gobierno y organismos internacionales genera el 19% de empleos, seguida de los servicios sociales (18%), y la de servicios diversos (15%).

Por ser San Francisco de Campeche una ciudad histórica, reconocida por ser una de las pocas localidades amuralladas de América y la única en México, la convierte en un sitio turístico con un alto número de atractivos de calidad y valor cultural excepcional. La ciudad cuenta con el aeropuerto internacional “Alberto Acuña Ongay” y un puerto de cabotaje, el cual es utilizado mayoritariamente por embarcaciones pesqueras, lo que le permite mantener comunicación y la afluencia de turistas a la ciudad. Por vía terrestre, la ciudad se encuentra comunicada con autopistas modernas, de cuatro carriles, con la ciudad de Mérida, Yucatán, y con Cancún, Quintana Roo. De igual manera, carreteras modernas y en buen estado la conectan con Ciudad del Carmen, Villahermosa, Tabasco, y Palenque, Chiapas (SECTUR, 2014).

3.4.2 Actividades económicas

Entre las principales actividades económicas que se desarrollan en el estado de Campeche se encuentran: minería petrolera (80.3%); construcción (7.1%) y comercio (2.1%). Juntas representan el 89.5% del PIB estatal (SE, 2015). Los sectores estratégicos en el estado son: agroindustrial, productos del mar, forestal, minería, petroquímica y turismo (SE, 2015).

El desarrollo económico del estado de Campeche, se ha basado en la explotación de sus recursos naturales (actividad primaria), tales como el palo de tinte (*Haematoxyllum*

campechianun), chicle, obtenido del zapote (*Manilkara zapota*) y el camarón. Sucede lo mismo con la explotación del petróleo que ha ocasionado una grave contaminación ambiental marina. (SE, 2015). En las últimas décadas se ha llevado a cabo la promoción de la rama del turismo (sector terciario).

Turismo

San Francisco de Campeche concentra los diversos servicios públicos, además del desarrollo de las actividades económicas, enfocadas principalmente al sector servicios. El sector turístico es uno de los más desarrollados de la ciudad, aunque el mismo se está viendo amenazado, a mediano plazo, por presentar altos índices de contaminación por aguas residuales que son vertidas en la bahía, y este puede ser un factor que impida un mayor desarrollo turístico de la ciudad (SECTUR, 2014).

Agroindustria

El municipio de Campeche tiene un buen potencial de producción agrícola del 15.19% pero no cuenta con un buen potencial pecuario y forestal. Del porcentaje de participación de la actividad agrícola al valor de la producción total, el 30.18% corresponde a los cultivos cíclicos, sobresaliendo el cultivo de maíz grano y la sandía (Uzcanga et al., 2012).

En cuanto a los cultivos perennes, sobresalen los de caña de azúcar, naranja, papaya, toronja y mango. Para la actividad agrícola se tienen identificadas 45,363 ha de superficie regable y 202,546 ha de temporal (Uzcanga et al., 2012).

Productos de mar

Según datos registrados en 2011, el estado de Campeche ocupó el sexto lugar nacional en el registro de capturas, con un promedio de 47 000 t en el período de 2002 a 2011. El estado figuró como el quinto lugar por el valor de la producción, con 1046 millones de pesos. En ese año se registraron 11000 pescadores, 257 barcos, 3 647 embarcaciones ribereñas y 35 plantas pesqueras (CONAPESCA, 2011).

La captura de peces ha sido un renglón económico significativo en la zona, teniendo resultados importantes desde antes del año 1972. Datos reportados el año 2011 muestran que la captura de peces tuvo una disminución en la captura anual, con cifras de hasta 8100 t. Entre las especies capturadas históricamente están la mojarra, el parco, la corvina, el robalo, el bagre, la sierra. Además de otras especies como son: tiburón, cazón, jurel, moluscos (pulpo, ostión y caracol), camarón (Ramírez, 2015).

El aprovechamiento de este recurso se ha visto bajo un riesgo moderado. En las últimas décadas en toda la zona costera y marina del Golfo de México, se ha evidenciado deterioro ambiental por la descarga continua de aguas residuales domésticas e industriales de las ciudades costeras (Arias y Guzmán, 2009).

Petroquímica

La Sonda de Campeche cuenta con el 90% de las instalaciones para la extracción y el procesamiento del petróleo crudo y gas natural que hay en las costas del Suroeste del Golfo de México. En su área de 8000km² tiene un total de 200 instalaciones que incluyen nueve campos petroleros principales, y 185 plataformas de producción (García et al.,2004 c).

El complejo de instalaciones de PEMEX está dividido en dos regiones, la Región Marina Noreste (RMNE) y la Región Marina Suroeste (RMSO). En estas regiones se realiza la exploración de nuevos yacimientos y producción de aceite y gas de campos petroleros localizados en la plataforma continental y talud del Golfo de México. Al unísono, se realiza el

transporte y comercialización de estos HC a los centros de venta (García et al., 2004 c). Dentro de la infraestructura requerida para el manejo de crudo y gas está también un complejo de plataformas, con 1508 km lineales de ductos marinos que distribuye los productos obtenidos hacia un terminal marino monoboya. En este terminal opera un promedio anual de 500 buques tanques.

Los beneficios económicos y sociales que se han obtenido para México por parte la industria petrolera son grandes, pero sin duda el proceso de producción del crudo ha expuesto a la Sonda de Campeche a factores estresantes. Cada día se incorporan al ambiente marino vía atmosférica gases y partículas, se derraman (y/o fugan) HC, y se emiten a la atmósfera gases de efecto invernadero y (COV's). Dichas actividades podrían implicar impactos significativos en el ecosistema de esta región (Arias y Guzmán, 2009).

Minería

El Servicio Geológico Mexicano, organismo federal coordinado sectorialmente por la Secretaría de Economía, publicó en el año 2014 el documento "Panorama Minero del estado de Campeche" el cual da a conocer la situación de la actividad minera del estado.

Debido a las características físicas, geográficas y geológicas del territorio de Campeche, así como a la poca diversidad de sus recursos minerales, la actividad minera no se ha desarrollado lo suficiente, este incipiente desarrollo alcanza niveles de productividad únicamente por medio de la explotación de yeso y calizas para la fabricación de cal y en la elaboración de cemento, así mismo del aprovechamiento de agregados pétreos que se utilizan para revestimiento de caminos y también en la industria de la construcción. En la figura 3.2 se muestran los proyectos mineros en el estado y las plantas trituradoras activas del estado de Campeche.

La explotación de áridos en las cercanías de la Ciudad de Campeche, llevado a cabo en una planta trituradora es una de las fuentes de empleo para sus pobladores. Sin embargo, esta actividad puede causar un problema ambiental, ya que aunada a las condiciones de vientos predominantes del este, dan lugar a considerables concentraciones de partículas en la ciudad.

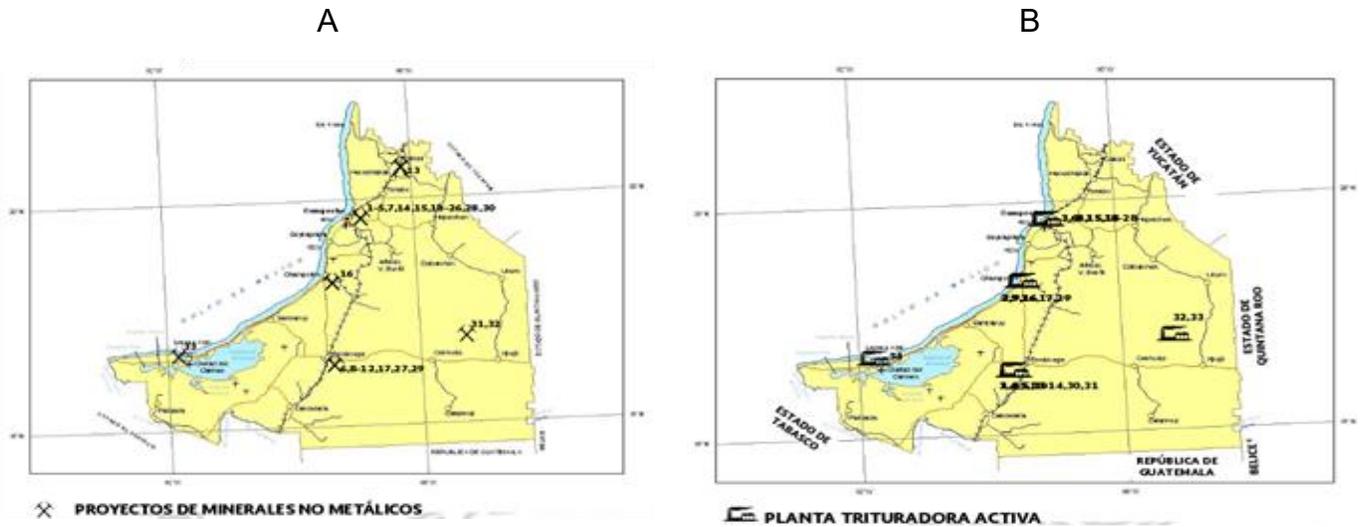


Figura 3. 2 A) Proyectos mineros no metálicos del estado de Campeche. B) Ubicación de las plantas trituradoras activas en el estado de Campeche. Fuente: "Panorama Minero del estado de Campeche" Servicio Geológico Mexicano, 2014.

3.5 Contaminación atmosférica en la Ciudad de Campeche. Estudios sobre calidad del aire

Según el INEM (2006) con datos de muestreos y cálculos para el 2008 para todo el país, en ese año se emitieron alrededor de 58.99 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos, de las cuales 21% provinieron de fuentes naturales y 79% de fuentes antropogénicas. En el caso de las fuentes antropogénicas, a nivel nacional, el mayor volumen emitido (en el período de estudio) provino de las fuentes móviles por carretera, (58% del total), donde se incluyeron los autos particulares, camionetas y autobuses; le siguieron las fuentes de área (13%), donde consideraron la combustión agrícola y doméstica, asfaltado y aplicación de fertilizantes y plaguicidas, entre otras; las fuentes fijas (7%), donde se contabilizaron a las industrias; y finalmente las fuentes móviles no convencionales (1%), que incluyen a la aviación, embarcaciones marinas y locomotoras, entre otras.

Considerando sólo a las fuentes antropogénicas, en 2008 los contaminantes emitidos en mayor proporción fueron el CO (33 millones de toneladas; 70.5% del total), los COVs (6 millones de

toneladas; 12.9%), los NO_x (3.2 millones de toneladas; 6.9%) y el SO₂; (2.2 millones de toneladas; 4.8%). Al resto de los contaminantes correspondió un porcentaje menor al 1.8% en cada uno de los casos. Las fuentes móviles fueron las principales emisoras del CO (89.6% del total emitido) y NO_x (62.5%), mientras que las fuentes de área fueron las principales emisoras de los COV_s (52% del total) (INEM, 2006).

Los estudios sobre calidad del aire son escasos en la ciudad de Campeche. Reyes et al., (2011) los considera insuficientes, debido a que la ciudad se ubica en la región petrolera de la Sonda de Campeche y por la creciente cantidad de automóviles presentes en esta. Considerando dichas condiciones, se esperaría un sensible aumento en el nivel de algunos contaminantes atmosféricos, lo cual supone un estudio detallado del crecimiento de la ciudad. Según Villaseñor, (2008) las investigaciones sobre contaminación atmosférica son incipientes por lo que la implementación de técnicas de muestreos de alta tecnología, es aún una tarea pendiente debido a sus altos costos.

Una iniciativa para estudiar los efectos del medio ambiente sobre la degradación del Patrimonio Cultural fue impulsada por la Universidad Autónoma de Campeche (UAC) (Reyes, 2005a, 2005b). Durante los años de 2005 al 2008, se midieron parámetros atmosféricos como SO₂, NO_x, partículas atmosféricas, aerosoles marinos (representada por el ión cloruro, Cl⁻) y lluvia ácida (Reyes et al., 2011). Estas mediciones demostraron que los niveles de SO₂, NO_x resultaron mayores en la ciudad de San Francisco de Campeche respecto a otros sitios menos contaminados del estado (Villaseñor, 2008 y Reyes et al., 2011). La concentración de ión Cl⁻ en San Francisco de Campeche, suele ser menor a la observada en otros sitios costeros del Golfo de México (Cook et al., 2000).

En sus estudios (Miss, 2008 y Dzul, 2010) refieren que durante las campañas de muestreo realizadas en los años 2006 y 2008 se midieron los niveles de partículas suspendidas totales (PST) y fracción de partículas con diámetro menor o igual a 10 µm (PM₁₀), en el centro histórico y el campus universitario de la Universidad Autónoma de Campeche (UAC) (estación CICORR). La erosión de colinas de naturaleza calcárea que rodean la ciudad en combinación con el viento predominante de región E-NE y S-SW, dan lugar al transporte de partículas a

gran escala desde zonas agrícolas y ganaderas, propiciando los mayores registros de PST y PM₁₀, al final de la estación seca en CICORR (63.10 y 9.72 µg/m³).

Durante la campaña 2006 al 2008 se observó que los niveles más bajos de partículas se registraron durante el periodo agosto-septiembre, en la estación lluviosa (Reyes et al., 2011). Las emisiones de sustancias alcalinas (partículas de polvo y amoníaco, entre otras) afectan significativamente la acidez de las precipitaciones, ya que neutralizan una porción de las especies ácidas presentes en la lluvia. Este comportamiento es consecuencia del patrón de vientos predominante de región este (E) durante la mayor parte del año.

Las condiciones atmosféricas del lugar, especialmente el sistema de brisas marinas imperante en la zona costera, se oponen a la entrada de masas de humedad del Golfo de México, originando una disminución considerable de los niveles de salinidad del aire. Durante el invierno, con la llegada de los frentes fríos ocurre un aumento en la frecuencia e intensidad de los vientos del N, lo que contribuye a incrementar los niveles de aerosoles marinos en la atmósfera local y por consiguiente su potencial corrosivo (Reyes, 1998; Cook et al., 2000).

En los años 2006 y 2007 se evaluaron 147 muestras de precipitación húmeda recolectadas en San Francisco de Campeche. Durante el estudio se observó que en 2006 se registraron 12 eventos de lluvia ácida, con valor de pH máximo de 7.56 y mínimo 5.19. Para 2007, los eventos de carácter ácido fueron 5, con pH máximo 7.80 y mínimo de 4.97. Los resultados de estos estudios reflejaron una tendencia natural a la alcalinidad del pH del agua de lluvia, con valores de pH superiores a 6 durante la temporada seca que comprende de diciembre a junio. Durante la estación húmeda se alcanzaron valores mínimos de pH, (Quirarte, 2010).

Torres (2009), analizó el enriquecimiento iónico de las muestras correspondientes a la campaña 2007 empleando Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC). En este estudio no fue considerada la acidez de la lluvia un factor determinante en las tasas de recesión de materiales calcáreos, siendo el volumen y la intensidad de la precipitación factores clave en el deterioro de los edificios. Se encontró enriquecimiento de los iones (SO₄²⁻), (NO₃⁻), (Ca²⁺) y Cl⁻. Los SO₄²⁻ y NO₃⁻ son compuestos ácidos que surgen como consecuencia de la actividad

humana, mientras los cationes Ca^{2+} son arrastrados desde los suelos alcalinos de la Península de Yucatán, transportados por el viento e incorporada a las gotas de lluvia en la atmósfera donde generan un efecto buffer.

Considerando el Inventario nacional de emisiones 2005, se presenta la tabla 3.1 donde se muestran las emisiones generadas por las fuentes fijas en el estado de Campeche para siete contaminantes criterio. Como dato importante está el hecho de que el estado de Campeche no cuenta con un Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), sin embargo, hay instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y PEMEX en el estado, haciendo necesario diseñar y establecer un SMCA.

Tabla 3. 1 Emisiones en toneladas por año del estado de Campeche.

<i>Entidad federativa</i>	<i>PM₁₀</i>	<i>PM_{2.5}</i>	<i>SO_x</i>	<i>CO</i>	<i>NO_x</i>	<i>COV's</i>	<i>NH₃</i>
Campeche	2.815	2.483	30.027	9.263	17.816	38.823	239

Fuente: Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2005, México 2012.

IV.- METODOLOGÍA

IV. METODOLOGÍA

Para evaluar el deterioro ambiental significativo y poder prevenir, mitigar y/o restaurar los posibles daños en la Ciudad de Campeche causados por la contaminación atmosférica, es necesario evaluar los impactos potenciales causados por la actividad antropogénica. El procedimiento para la evaluación del deterioro ambiental está enfocado en el estudio de la calidad del aire, los pasos a seguir son los siguientes:

1. Describir y delimitar el proyecto con un enfoque ambiental, tomando como área de estudio a la Ciudad San Francisco de Campeche.
2. Describir el medio físico, social y económico, es decir, elaborar un inventario ambiental y realizar un árbol de factores susceptibles de ser alterados por el proyecto.
3. Determinar los elementos significativos del ambiente que sean de interés para su conservación, de acuerdo con su diversidad, rareza, perturbación, singularidad, así como la localización de áreas naturales protegidas, reservas de la biósfera, planes parciales de desarrollo urbano entre otros y de acuerdo con ello, clasificar el área de aplicación de PSD.
4. Identificar las actividades o las industrias que puedan impactar la zona de estudio y su efecto en la calidad del aire.
5. Identificar los impactos causados, empleando la matriz de Leopold.
6. Evaluar el impacto ambiental sobre los elementos más significativos en una base lógica, mensurable y fácilmente identificable. Para ello se empleará el método de Battelle -Columbus.
7. Realizar un programa para la prevención del deterioro ambiental significativo en la zona de estudio.

A continuación, se desarrolla la metodología conforme a la secuencia establecida.

4.1 Descripción ambiental

La Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA-CCA-UNAM) realizó el análisis del depósito atmosférico húmedo de una estación ubicada en la azotea del edificio sede del Centro INAH-Campeche. El sitio de muestreo se localiza en el Centro Histórico de la ciudad de San Francisco de Campeche, con coordenadas geográficas 19° 50´ 33.8" latitud N y 90° 32´ 12.2" longitud oeste, a una altura de 2.4 m sobre el nivel del mar.

A estas muestras se les realizó un análisis químico para determinar diversos parámetros que permitirán describir la calidad del aire con relación al depósito atmosférico en la zona de estudio.

4.1.1 Muestreo de depósito atmosférico húmedo (D.H)

Para este tipo de estudios se requieren datos confiables que cumplan las normas de calidad basadas en las recomendaciones de la NADP y US-EPA, (NADP, 2004; US-EPA, 1994). Para ello, se realizó un programa de monitoreo que consideró un plan de Aseguramiento de Calidad (QA) y Control de Calidad (QC) que incluyó la documentación y el cumplimiento de los procedimientos de muestreo, el mantenimiento preventivo de equipos de laboratorio e instrumentación, la capacitación y actualización de los analistas, cadena de custodia bien definida (registrando los datos de la muestra y su manejo), calibración de los equipos (empleo de estándares y blancos) y el control de precisión (dentro de plazo y duplicados entre distintas series). Igualmente deben ser aplicados procedimientos estrictos a la gestión de datos para asegurar que se mantenga la precisión de los mismos (NADP, 2004).

El sistema de muestreo recomendado por el NADP consiste en un dispositivo de dos cubetas, en las que se colecta el depósito seco y el depósito húmedo de forma separada, regulado por un sensor, que al detectar la lluvia envía una señal que permite desplazar y dejar descubierta la tapa de la cubeta de colección de depósito húmedo; mientras que la cubeta de colección de

depósito seco o “material sedimentable”, permanece cerrada. Al finalizar el evento de lluvia, el sensor envía nuevamente otra señal a este mecanismo, para que cubra la cubeta de depósito húmedo y se destape la cubeta de depósito seco, de tal forma que ahora esta última quede en posición de muestreo de partículas. El procedimiento utilizado para el análisis de las muestras utilizadas en esta tesis, fue descrito en el estudio realizado por Torres, (2009), donde muestra datos técnicos del sistema utilizado en la estación de muestreo, ver figura 4.1.



Figura 4. 1 Dispositivo de muestreo automático de precipitación húmeda y seca. Colector de precipitación húmeda y seca (Aerochem Metrics modelo 301). Fuente: Torres, 2009.

El depósito húmedo es colectado luego de cada evento de lluvia. El procedimiento consiste en retirar la cubeta correspondiente y trasvasar parte de la muestra en una botella de 250 mL previamente lavada. Se deben registrar los valores de campo de pH y conductividad eléctrica a cada muestra, así como el volumen de lluvia por medio de un pluviómetro colocado junto al muestreador automático. El resto de la muestra se envasa en botellas de 500 ml.

4.1.2 Análisis químico de las muestras

El análisis químico en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM consistió en la determinación de los parámetros de pH, conductividad eléctrica, concentración de cationes: Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , y concentración de aniones: Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- .

La cuantificación de iones del depósito húmedo, por encontrarse en fase acuosa, se realiza

directamente y sólo en caso necesario se hacen diluciones.

El valor de pH se determinó con un potenciómetro Corning pH meter modelo HORIBA D-24 con electrodo combinado de vidrio. Antes de la medición es necesario calibrar el instrumento con tres disoluciones buffer de pH=4, pH=7 y pH=10, a una temperatura de 25°C.

La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro HORIBA D-24, con un intervalo de 0.01 $\mu\text{s/cm}$ a 199.9 $\mu\text{s/cm}$, el cual tiene incorporado un termistor. El equipo se autocalibra con dos disoluciones estándar de KCl y NaCl, con conductividades de 13.8 $\mu\text{s/cm}$ y 700 $\mu\text{s/cm}$ respectivamente, a una temperatura de 25°C.

La identificación y cuantificación de los iones inorgánicos se realizó con cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC), basado en el Método EPA 300.1. Se utilizó un cromatógrafo de líquidos de alta resolución con bomba Waters, modelo 510 HPLC pump, de doble pistón, con un intervalo de presión de 0-6000 psig; detector de conductividad Waters 432; integrador de datos. Waters 746 y columnas para aniones HAMILTON PRP-X100 de alta resolución, con un diámetro interno de 4.6 mm, un diámetro externo de 75 mm y 15 cm de longitud, con tamaño de partícula igual a 6 μm capacidad de 30 \pm 3 $\mu\text{eq/mL}$. La columna para cationes es Waters cationes M/D, con diámetro interno de 4.6 mm, diámetro externo de 50mm y 15 cm de longitud y capacidad de 12.0 \pm 0.2 $\mu\text{eq/mL}$.

Debido a la capacidad de la columna del equipo de cromatografía, las muestras que se introduzcan a analizar deben tener una conductividad inferior a 100 $\mu\text{s/cm}$; en caso contrario deben realizarse diluciones.

Cuando el pH > 5.65 la especie HCO_3^- está en disolución. Se cuantifica empleando el gráfico de Gran, ya que nos permite usar datos tomados antes del punto final para hallar el punto de equivalencia (Harris, 1999).

Para ello se titulan 10mL de la muestra adicionando alícuotas de 100 μL de HCl [4.0×10^{-3} M], hasta un pH \leq 4. Se registran los valores de volumen agregados y de pH luego de cada adición

(incluyendo el pH inicial). Se deben tener al menos 5 mediciones, las cuales se introducen a la función de Gran. La curva se debe extrapolar para hallar el volumen de equivalencia y con ello obtener estequiométricamente la concentración del HCO_3^- .

4.1.3 Procesamiento de datos

Los parámetros de conductividad eléctrica, concentración de cationes: Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , y concentración de aniones: Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- , se someten a un balance iónico con el fin de validar los datos.

Los resultados del estudio se analizaron por medio de estadística descriptiva para establecer valores máximos, mínimos y promedios. En el análisis de los resultados del pH, y concentración de iones del agua de lluvia se utilizó, el valor promedio ponderado. De esta manera, al utilizar los promedios ponderados se ajustan los valores a la contribución del volumen de lluvia.

Para el cálculo del promedio ponderado se utilizó la siguiente expresión. La concentración ponderada (C_i^p) de un ión i se obtuvo de la siguiente manera:

$$C_i^p = \frac{\sum C_i * V_{pmi}}{\sum V_{pt}} \quad \text{Ec 4.1}$$

Donde:

- C_i . Representa la concentración del ión i en la muestra
- V_{pmi} . Es el volumen de precipitación pluvial de la muestra i .
- $\sum V_{pi}$ Es el volumen de precipitación total.

Se determina la media ponderada de pH, anual y mensual, para identificar la existencia de lluvia ácida y determinar los periodos con mayor incidencia.

Utilizando el software SPSS versión 2.2 se realizó una correlación entre las concentraciones

de cada compuesto en $\mu\text{eq/L}$ para establecer comportamientos similares en las variaciones de cada elemento. Para este estudio se seleccionó una correlación de tipo binomial, mediante el método de Spearman, el cual permitió expresar el grado de asociación entre dos variables, según el sentido de la relación de estas en términos de aumento o disminución.

De igual manera fueron analizados estadísticamente datos meteorológicos del año 2007, tales como: dirección y velocidad del viento y precipitación. Dichos datos fueron obtenidos de la base de datos del METAR del Aeropuerto Internacional de Campeche (MMCP) (WMO index: 76695). El cual se encuentra a los 19-50-00N.y 090-30-00W, a una altura de 5 m.

4.2 Modelos atmosféricos

Para identificar las trayectorias de retroceso y simular los procesos físicos y químicos de los contaminantes en el aire, que se emiten y reaccionan en la atmósfera, se emplean modelos atmosféricos. Por el método de integración del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, los modelos se clasifican como eulerianos (coordenadas fijas respecto a la tierra) y lagrangianos (coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera) (INECC, 2016 (c)). Estos últimos, integran la posición de una partícula a partir de campos de viento mediante la resolución de la ecuación diferencial ordinaria. 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.

Los modelos de dispersión que caracterizan los procesos atmosféricos a los que se ve expuesto un contaminante emitido por una fuente, son utilizados para predecir la dispersión y trayectoria de los contaminantes en la atmósfera considerando las condiciones meteorológicas reales y de las fuentes de emisión, un ejemplo de este modelo es el HYSPLIT.

4.2.1 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 HYSPLIT 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 (Antúnez, 2013).

El análisis de las trayectorias de retroceso es una herramienta muy útil pues permite determinar los orígenes y las fuentes de los contaminantes.

Antúnez, (2013) explica que para el cálculo de una trayectoria particular se debe de estimar 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):

$$X = X_0 + v(t) + 1/2 a t^2 \quad \text{Ec 4.2}$$

Los datos se interpolaron a un sistema de coordenadas y se graficó la parcela. Fue preciso introducir al modelo los valores de: latitud, longitud, altitud, fecha y dirección de la trayectoria.

Los datos introducidos correspondieron a aquellos días donde se presentó un mayor valor de depósito de SO_4^{2-} y NO_3^- en la lluvia de la Ciudad de Campeche. La información meteorológica utilizada se obtuvo en la base de datos de reanálisis regional de Norte América, (NARR, por sus siglas en inglés) de la NOAA. Las trayectorias que se obtuvieron se compararon con el comportamiento de los vientos para los días evaluados. Como otro método de análisis de las condiciones del tiempo, para los días de depósito de SO_4^{2-} y NO_3^- significativos, se compararon las trayectorias obtenidas con los patrones o tipos de situaciones sinópticos imperantes en la zona.

4.3 Evaluación de impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental permite identificar y predecir los efectos de ciertas acciones sobre el medio a estudiar. Para identificar los impactos se parte del conocimiento de

las acciones capaces de afectar el medio (árbol de acciones) y del estudio del medio o los elementos del medio ambiente que puedan ser afectados (árbol de factores ambientales). La metodología para esta evaluación, se basa en dos pilares fundamentales, el conocimiento de las actividades que se desarrollan en la ciudad para obtener las acciones y el estudio del entorno para obtener los factores.

En esta tesis se escogieron dos métodos para la identificación y evaluación de impactos.

El primer método consistió en analizar una lista de verificación de factores ambientales para detectar aquellos que podían ser afectados por las actividades que se realizan en la zona. Este es considerado un método sencillo en cuanto a su profundidad de análisis, aunque permite determinar los medios sobre los que producen impactos y cuales no son afectados o en caso de serlo se puede determinar su grado de afectación. Para este fin se aplicó el Método de Delphi.

Se utilizó el Método Delphi con el fin de lograr las mayores ventajas y resultados, ya que se basa en la consulta a expertos, los cuales realizaron una ponderación de los factores ambientales y las acciones que se llevan a cabo en la zona. El esquema en que fue realizado el Método Delphi se muestra en el Anexo 1.

En la realización de un Método Delphi se utiliza la siguiente estructura de acción:

- Se seleccionó un panel de expertos (conjunto de expertos que forman el grupo). En este caso fue conformado por el comité tutorial de la presente tesis.
- El moderador (persona responsable del equipo técnico que recoge las respuestas y prepara los cuestionarios), recayó en la autora de esta tesis.
- Los Cuestionarios (documentos que se envían a los expertos) fueron formados por las cuestiones y los resultados de las anteriores circulaciones.

- A la forma en que se fueron presentando los sucesivos cuestionarios se le llamó "Circulación".

Mediante la realización del método anterior, se obtuvieron los factores ambientales y las acciones de mayor importancia. Luego se realizó una matriz de cruce entre factores ambientales y acciones, lo cual consistió en el segundo método utilizado, clasificado con un tercer nivel de profundización. Se basó en obtener la lista de impactos y realizar una valoración cualitativa de ellos. Varios autores como Garmendia et al., (2005), consideran las matrices de relaciones causa-efecto, como la mejor herramienta para determinar los impactos. En este caso se utilizó la Matriz de Leopold.

Para hacer un mejor análisis de los resultados obtenidos de aplicar los dos métodos anteriores se realizó sobre la matriz una evaluación cualitativa y cuantitativa de los impactos, dando paso a un cuarto nivel de complejidad. Una vez realizada una cuantitativa de los impactos, se le asignó un valor dimensional, en unidades conmensurables cambiadas de escala para presentar los datos obtenidos con un índice de calidad ambiental general.

4.3.1 Matriz de Leopold

Esta matriz identifica los impactos causados por un proyecto, involucra el uso de 100 acciones o actividades específicas y 88 factores ambientales, dando una matriz con 8,800 celdas de impactos potenciales. Cuando se detecte un impacto, la celda correspondiente debe ser marcada con una línea diagonal para indicar la magnitud (escala o extensión del impacto) e importancia (significancia de la acción) en una escala del 1 al 10. La magnitud se califica en una valoración objetiva de los hechos y la importancia se asigna de manera subjetiva por un grupo interdisciplinario (Vidal de los Santos, 2009).

El trabajo para el uso de información de una matriz se realizó de la siguiente forma:

1. Se identificaron las acciones que pueden tener lugar en el proyecto y se les colocó en la parte superior de la matriz (columnas).

2. Los factores ambientales susceptibles a impactos se colocaron en el eje de las ordenadas.

3. En las celdas que interactuaron se trazó con una línea diagonal. Las celdas vacías corresponden a situaciones que no causan impactos.

4. En la esquina superior izquierda de cada celda se calificó (M) con valores del 1 al 10, donde el número 10 representa el mayor impacto, 1 el menor y 5 un valor medio. La calificación se señaló con un signo (+) o (-) para efectos positivos y negativos, respectivamente. Ver figura 4.2.

En cuanto a la interpretación de los signos en el valor de la Magnitud, que puede ser positivo o negativo, se analizará según fuera el efecto beneficioso o perjudicial.

- **Efecto positivo o beneficioso**

Aquél admitido como tal, tanto por la comunidad técnica y científica como por la población en general, en el contexto de un análisis completo de los costes y beneficios genéricos y de las externalidades de la actuación contemplada (Garmendia et al., 2005).

- **Efecto negativo o perjudicial**

Aquél que se traduce en pérdida de valor naturalístico, estético-cultural, paisajístico, de productividad ecológica, o en aumento de los perjuicios derivados de la contaminación, de la erosión o demás riesgos ambientales en discordancia con la estructura ecológico-geográfica, el carácter y la personalidad de una localidad determinada (Garmendia et al., 2005).

5. En la esquina inferior derecha se calificó la importancia (I) de la interacción. De igual forma, se asignó un valor numérico que va de 1 a 10. Ver figura 4.2

	Acciones que afectan
Elementos ambientales	

Figura 4.2. Forma de llenado de la Matriz de Leopold.

6. Se sumaron los números en los renglones y en las columnas de la matriz, el total obtenido dio una visión sobre la evaluación e interpretación parcial de los impactos.

En la evaluación de impacto ambiental que compete a esta tesis, se prestó especial atención a los componentes ambientales involucrados con la calidad del aire, específicamente las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- , así como los casos donde la contribución de compuestos provenientes del mar fue significativa.

4.3.2 Método de Battelle-Columbus

El método de Battelle consiste en un listado de indicadores de impacto, está compuesto por cuatro categorías ambientales, que a su vez contienen 18 componentes y se subdividen en 78 parámetros ambientales. Esta lista de parámetros y componentes representan una unidad o un aspecto del medio ambiente a considerarse individualmente y cuya evaluación es representativa del impacto ambiental derivado de las acciones o proyectos.

Se siguió la metodología para la realización de este método presentada por Garmendia et al., (2005):

1. Se determinó una lista de parámetros o factores ambientales (mediante el Método de Delphi)
2. Se ponderaron dichos parámetros (mediante el Método de Delphi).

3. Se predijo la situación sin proyecto utilizando unos indicadores, (basados en las concentraciones de SO_4^{2-} , NO_3^- , pH, Cl^-).
4. Se calcularon esos mismos indicadores con proyecto, (basados en las concentraciones de SO_4^{2-} , NO_3^- , pH, Cl^-).
5. Se transformaron mediante funciones de transformación en valores entre 0 y 1.

Se pretende que los parámetros se lleguen a evaluar en unidades comparables, representando valores que en lo posible sean resultado de mediciones reales. Para transformar estos datos en “unidades de impacto ambiental” (UIA) se realizaron los siguientes pasos:

- Transformar los datos en su correspondiente equivalencia de índice de calidad ambiental para el parámetro correspondiente.

Para calcular el índice de calidad ambiental en unidades que sean comparables, se le asignó un valor de 1 al valor óptimo del parámetro y al pésimo el de 0, quedando comprendido entre ambos extremos los valores intermedios para definir los estados de calidad del parámetro. La “función de transformación o de evaluación $f(M_i)$ ” de la calidad ambiental de un parámetro i en términos de su magnitud (M) se define como:

$$CA_i = f(M_i) \quad \text{Ec 4.3}$$

La función (calidad-magnitud) puede ser lineal o no, con pendiente positiva, si al aumentar el valor del indicador aumenta el valor absoluto del impacto (negativo), o con pendiente negativa si el índice mide calidad ambiental y al aumentar éste disminuye el impacto (negativo) o si el impacto ambiental es positivo o beneficioso, cuya presencia mejora la calidad ambiental.

Para el caso del presente estudio la función de transformación que se utilizó para determinar la contaminación del aire fue de tipo lineal decreciente, que a medida que aumenta el valor en

x (valor de concentración) disminuye el impacto (Garmendia et al., 2005). Por lo tanto, la función que se utilizó es una recta que pasa por los puntos (Min, 0) y (Máx, 1):

Función aplicada:

$$Y = (Máx - x) / Máx - Min \quad Ec 4.4$$

Para el caso del elemento ambiental "pH" se utilizó la función de transformación de tipo lineal creciente, que a medida que aumenta el valor de pH disminuye el impacto.

Función aplicada:

$$Y = (Mín - x) / Min - Máx \quad Ec 4.5$$

- Se ponderó la importancia del parámetro considerado, según su importancia relativa dentro del medio ambiente.

Se reflejó la diferencia entre unos parámetros y otros, por su mayor o menor contribución a la situación del medio ambiente. Con este fin se atribuye a cada parámetro un peso o índice ponderal, expresado en forma de "unidades de importancia" distribuyendo mil puntos o los que se establezcan.

6. Se multiplicó cada valor ponderado por su peso y se calculó la suma ponderada de la situación sin proyecto.

- Luego se expresó el impacto neto como resultado de multiplicar el índice de calidad por su índice ponderal.

Se indican las UIP (Unidades de Importancia del Parámetro), o índice ponderal, así como los que corresponden por suma de aquellos niveles de agrupación de parámetros, componentes y categorías.

$$(UIA) = (CA)_i \times (UIP)_i$$

Ec 4.6

La UIA se estimó dándole un valor de “1” al valor cuya calidad ambiental se consideró la más favorecedora y “0” al valor obtenido con menor calidad, así mismo se puede obtener un tercer parámetro que sirva como referencia para observar el comportamiento de la calidad y a partir de esto, construir una gráfica que permita determinar los valores de calidad ambiental del parámetro que se desee medir a UIA.

Primeramente, se calculó la UIA de cada parámetro (UIA_i) y luego se sumó el valor de cada parámetro ambiental.

7. Se calculó la suma ponderada de la situación con proyecto.

La unidad de impacto ambiental debida al proyecto es igual a la diferencia entre las unidades de impacto ambiental con el proyecto y sin el proyecto:

$$UIA_i \text{ (debida al proyecto)} = UIA_i \text{ (sin proyecto)} - UIA_i \text{ (con proyecto)}$$

Ec 4.7

8. Se obtuvo el impacto global para cada situación (con y sin proyecto).

El impacto global se obtuvo de:

$$\sum (UIA_i) \text{ (debida al proyecto)}$$

Ec 4.8

Donde la sumatoria va desde $i=1$ hasta n

4.4 Procedimiento para la clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS)

Para la clasificación de las configuraciones sinópticas se utilizó un método manual o subjetivo, el cual se fundamentó en la apreciación cualitativa del especialista. El nivel de incertidumbre

que se crea en el procedimiento de clasificación es aceptable y surge como un aspecto polémico. Sin embargo, (Fernández y Díaz, 2005) consideran que la incertidumbre puede ser mayor en aquellas clasificaciones manuales que no realizan una subdivisión detallada de los procesos circulatorios.

La presente investigación se limitó al análisis de la incidencia de los nueve tipos de situaciones sinópticas (TSS) principales, descrita por (Lapinel, 1988), para el período 1980-2010. Para el caso de estudio se consideró pertinente utilizar dichas clasificaciones, las cuales están descritas para Cuba, por la coincidencia en latitud entre la Ciudad de Campeche y el territorio cubano.

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

Cercana influencia del Anticiclón del Atlántico (AA).

TSS I. Influencia del anticiclón del Atlántico o de las Azores-Bermudas. Se considera este TTS, cuando el anticiclón penetra en forma de cuña sobre Cuba, llegando a cubrir el Golfo de México y el sureste (SE) de los Estados Unidos. El viento predominante asociado al sistema puede ser del primero o del segundo cuadrante.

Flujo anticiclónico extendido (AE)

TSS II. Configuraciones del campo bórico donde la región central del anticiclón del Atlántico se aleja sensiblemente de las áreas, permitiendo una mayor modificación de sus características iniciales, producto de una más prolongada interacción Océano-Atmósfera (flujo extendido). Se consideran dos subtipos: **Ila** flujo extendido no perturbado y el **Ilb** que corresponde a la influencia del sector de divergencia de las ondas u hondonadas.

Débil gradiente barométrico (GD)

TSS III. Configuraciones del campo bórico que expresan una débil influencia anticiclónica o la existencia de hondonadas, vaguadas o sistemas de bajas por lo que las isóbaras se muestran de una manera espaciada, predominando un débil gradiente barométrico.

Situaciones ciclónicas (SC)

TSS IV. Situaciones ciclónicas, tales como depresiones, perturbaciones o huracanes.

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 y zonas adyacentes. Existen dos subtipos: **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.

Bajas extratropicales (BE)

TSS VI. Bajas extratropicales, resultado de ondas de grandes dimensiones que generalmente se originan en zonas troposféricas de intensa baroclinidad (frentes Ártico y Polar). 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.

Zonas frontales (ZF)

TSS VII. El frente o zona frontal es una zona de discontinuidad o transición entre dos masas de aire diferentes, entre las que se produce un mezclamiento. Ocurre una rápida transición entre las temperaturas, la presión, los vientos y el contenido de humedad del aire. Se relaciona con los frentes fríos. 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 revesino (**VIIb**), el frente casi estacionario (**VIIc**), y el frente disipándose (**VIIId**).

Anticiclones continentales migratorios (AM)

TSS VIII. Se asocia al anticiclón continental polar de poco espesor, considerándose su profundidad en el orden de 1,5 a 3,0 km, aunque en ocasiones puede ser superior. Se consideran tres subtipos: Cuando el centro del anticiclón continental se encuentra en la parte central del continente (**VIIIa**). El centro del 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)

Otras situaciones (indeterminadas)

TSS IX. No es posible su identificación.

V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Depósito atmosférico

Como resultado del monitoreo atmosférico realizado en la estación UAC, ubicada en la ciudad de Campeche, se generó una base de datos con los registros del muestreo de la precipitación en el lugar. Este muestreo permitió analizar y procesar las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire en un lugar de estudio y durante el año 2007.

5.1.1 Depósito húmedo

Se analizaron muestras del depósito húmedo de la ciudad de Campeche, de las cuales se estudiaron las concentraciones de aniones y cationes. La figura 5.1 muestra la distribución mensual de la concentración ponderada de aniones y cationes presentes en las muestras de lluvia.

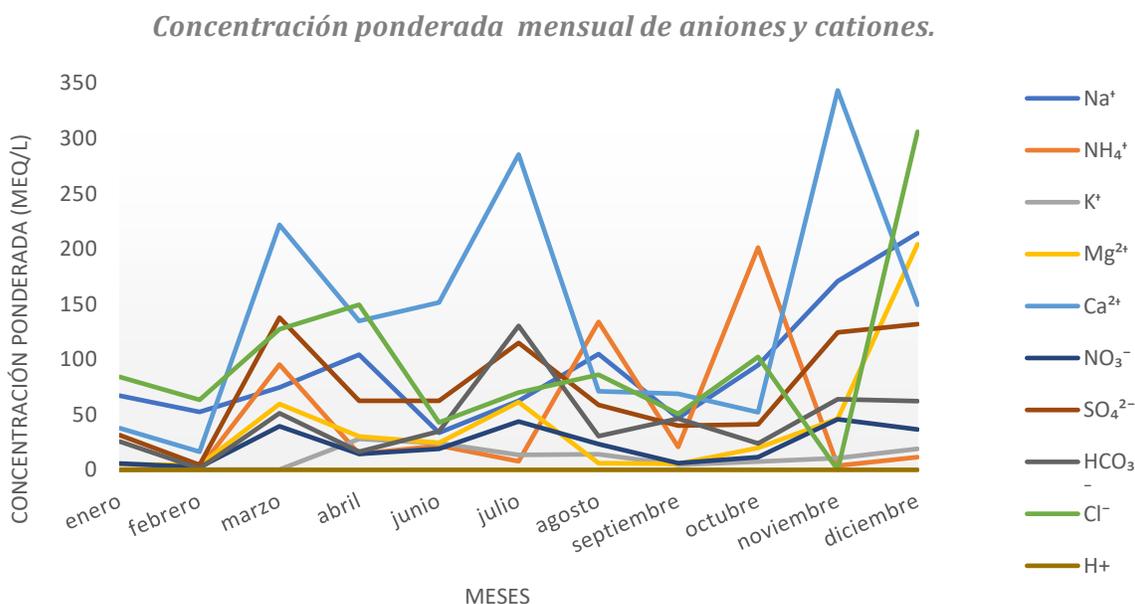


Figura 5. 1 Concentración ponderada mensual de aniones y cationes ($\mu\text{eq/L}$).

En la figura 5.1 se muestran las concentraciones promedio mensual en $\mu\text{eq/L}$ de cada uno de

los aniones y cationes analizados. Esta gráfica fue elaborada con el fin de hacer una comparación del comportamiento de la concentración mensual de cada uno de los iones. Las concentraciones de Ca^{2+} son superiores a las del resto de los aniones y cationes, presentando un pico máximo en los meses de marzo, julio y noviembre. Las concentraciones de calcio se ven favorecidas por las características cálcicas de los suelos existentes en la Península de Yucatán. Estas concentraciones, provenientes principalmente de cationes alcalinotérreos, que pueden venir, además del suelo u otras fuentes y viajar en forma de aerosol (Antúnez, 2013). Analizando el impacto potencial que tendría esta sustancia en las condiciones de las edificaciones en Campeche, Corvo et al., (2010) explica que los principales mecanismos de formación de las costras se producen por disolución de agua y recristalización de carbonato de calcio.

Otro de los iones de mayor abundancia en las muestras analizadas es el Cl^- . Las concentraciones de Cl^- pueden estar favorecidas por las condiciones marítimas en donde se encuentra la ciudad, y se comprende como ejemplo de aerosol marino. Existen máximos significativos del Cl^- , en los meses de abril y diciembre, el cual tiene un comportamiento similar con el Na^+ , (ambos de origen marino), excepto en el mes de noviembre.

Las concentraciones de H^+ fueron muy bajas durante el período de estudio, por lo que su contribución a la acidez no fue significativa, dándole características básicas del depósito atmosférico húmedo. El anión HCO_3^- presentó una tendencia similar a los aniones SO_4^{2-} y NO_3^- , con su máximo el mes de julio y su mínimo en el mes de febrero. Este anión pudo aportar mayor carácter básico a las muestras de lluvia, aún cuando las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- fueron significativas.

Para el caso del NH_4^+ , se presentaron dos picos significativos en los meses de agosto y octubre coincidiendo en tendencia con Na^+ , Cl^- y NO_3^- . En estos meses se comportó de manera opuesta a las concentraciones de SO_4^{2-} y Mg^{2+} . Por lo tanto, las condiciones que pudieron favorecer las mayores concentraciones de NH_4^+ influyeron en las concentraciones de SO_4^{2-} y Mg^{2+} de forma inversa.

Excepto en los meses de febrero, septiembre y octubre, el SO_4^{2-} presentó concentraciones mayores que todos los iones (sin incluir Cl^- y Ca^{2+}). De igual manera las concentraciones de Na^+ tuvieron una tendencia inversa a las concentraciones de SO_4^{2-} , lo cual indica que las condiciones que pueden favorecer las altas concentraciones de uno de estos iones pueden hacer disminuir la del otro. Ambos iones son importantes en la degradación de monumentos, según lo comentado por Corvo et al., (2010) en Campeche los niveles de contaminación están en función de una situación de múltiples contaminantes, pero siempre con la presencia adicional de salinidad en el aire. La figura 5.2 muestra de manera detallada el comportamiento anual de las concentraciones de SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- y Na^+ .

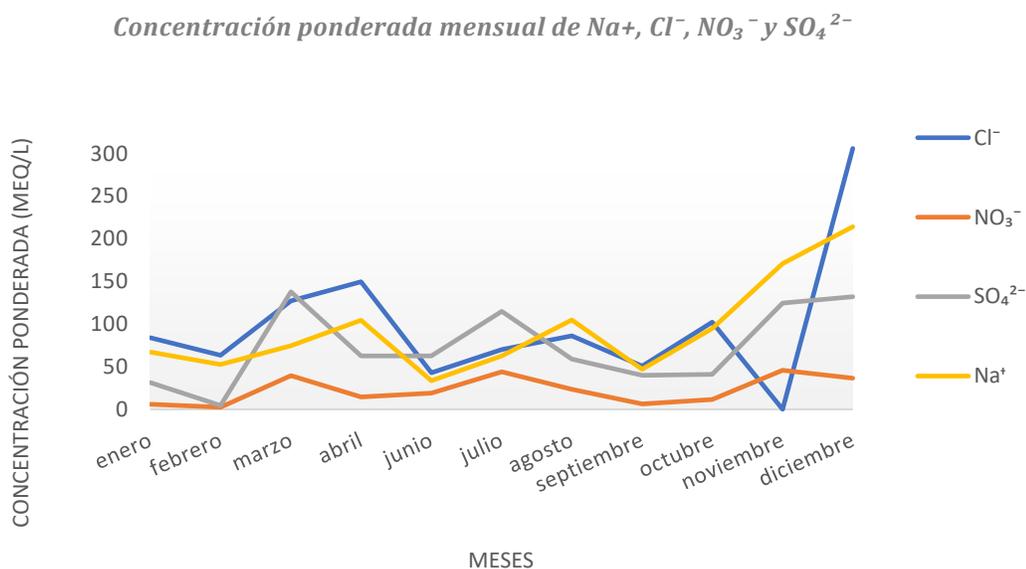


Figura 5. 2 Concentración ponderada mensual de Na^+ , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} ($\mu\text{eq/L}$) del depósito atmosférico húmedo, Campeche.

El análisis del comportamiento de estos iones Cl^- y Na^+ fue necesario, debido a que ambos son agentes corrosivos que degradan el material pétreo. Los meses de abril, octubre y diciembre fueron los de mayores concentraciones de Cl^- y de Na^+ , alcanzando su pico máximo en el mes de diciembre, donde sólo se contó con una muestra analizada para este mes. Ambos iones presentaron similares tendencias en su comportamiento excepto en el mes de

noviembre. Su procedencia puede asociarse al ambiente marino de la ciudad. Teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas imperantes en el lugar se infirió que bajo las condiciones del tiempo en que se ve favorecida la presencia de SO_4^{2-} se verá desfavorecida la presencia de NO_3^- , aunque no en igual cantidad. En algunos meses como abril y agosto la tendencia de los iones SO_4^{2-} y Na^+ fue inversa.

Se muestra en la figura 5.3 el total anual ponderado de cada compuesto del depósito húmedo atmosférico.

Concentración ponderada total de aniones y cationes

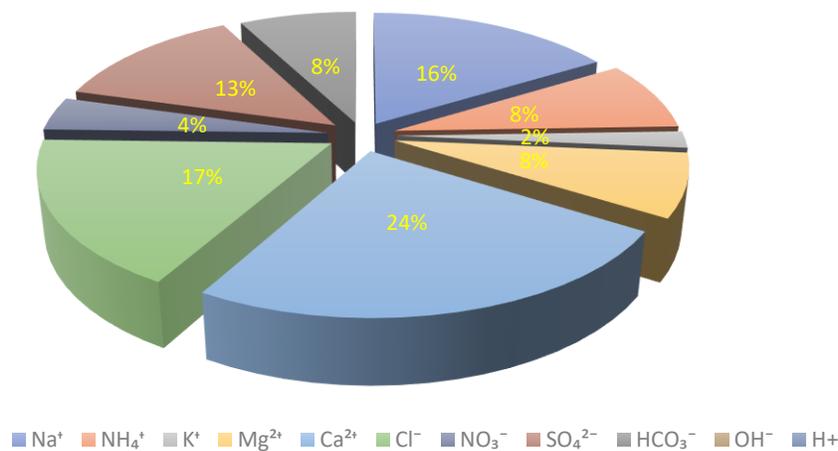


Figura 5.3 Total anual de la concentración ponderada de compuestos presentes en el depósito húmedo.

Como se observa en la figura 5.3, los iones más comunes son el Ca^{2+} , seguido del Cl^- y del Na^+ , lo cual está determinado por el ambiente marino imperante en la zona, propiciando la filtración de agua de mar. Las altas concentraciones de Ca^{2+} muestran la vasta contribución del transporte que realiza el viento de este compuesto tan común en los suelos cercanos a la ciudad. Estos compuestos pueden formar sales solubles combinadas con factores atmosféricos (agua, viento, cambios térmicos). Estas contribuciones alteran las condiciones

naturales de la atmósfera, donde el agua es el agente que controla las reacciones de disolución.

De una comparación entre las concentraciones de los aniones y cationes analizados se obtuvo la figura 5.4, en la que se observan la distribución de aniones (A) y cationes (B), respectivamente, expresada de manera porcentual.

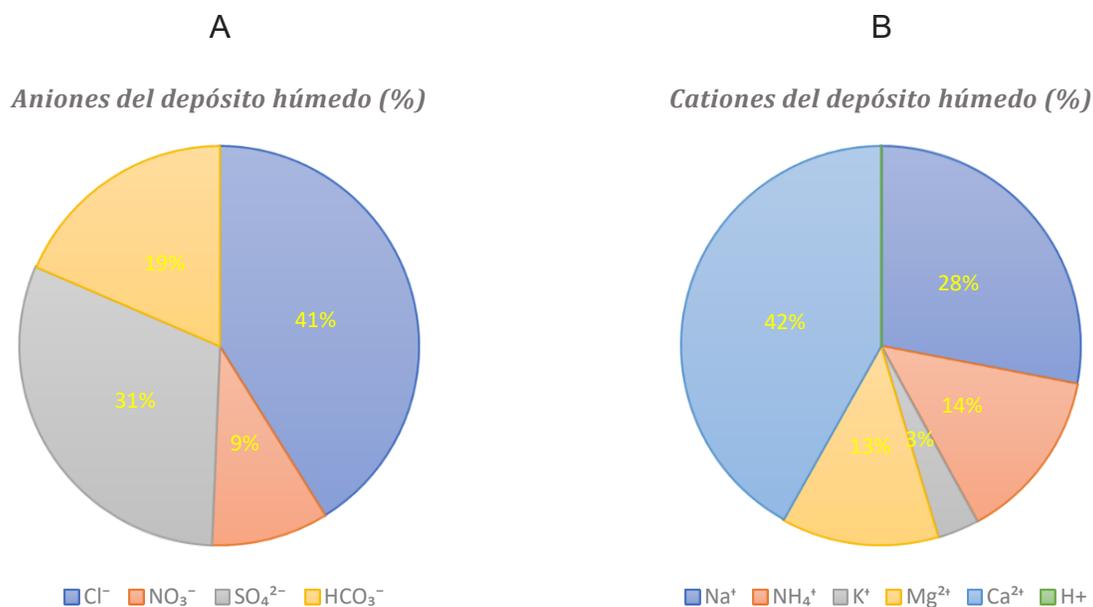


Figura 5. 4 Distribución porcentual de aniones (A) y cationes (B) del depósito húmedo.

Del análisis de las concentraciones de SO₄²⁻ (figura 5.4 A), se encontró que estas se encuentran por encima de otros iones como el NO₃⁻ y HCO₃⁻, e inferiores a las de Cl⁻. Este comportamiento indica que el impacto en los materiales pétreos pudiera ser mayor por SO₄²⁻ que por NO₃⁻, ya que estos SO₄²⁻ se encuentran en mayor concentración.

Además del poder corrosivo que puede representar la contribución marina al ambiente de la ciudad, el segundo proceso que se relaciona estrechamente con la degradación de los monumentos es la presencia de partículas y aerosoles antropogénicos en la atmósfera, característicos de ambientes urbanos e industriales, tales como los NO₃⁻ y SO₄²⁻. En la figura

5.5 se aprecia que el 38% de los aniones analizados pertenece al SO_4^{2-} y sólo el 12 % es lo representado por el NO_3^- .

El SO_4^{2-} no es un contaminante primario, por lo que se forma a partir del SO_2 . El SO_2 presente en la atmósfera, reacciona con el oxígeno (O_2) para formar trióxido de azufre (SO_3), de acuerdo a la siguiente reacción:



La molécula SO_3 , por ser altamente higroscópica se combina inmediatamente con el agua y forma H_2SO_4 (Barcina et al., 1997).

El H_2SO_4 penetra en la roca debido a su porosidad de esta y diluye al sustrato. Posteriormente, el material disuelto se seca y luego se evapora hacia el exterior de la roca, depositándose como una capa compacta de $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Si este fenómeno se desarrolla en el interior de los poros de la roca ocurre un incremento de volumen del 32%, lo que puede producir, la fractura y dislocación de la estructura (Barcina et al., 1997).

Por la importancia que sugiere el estudio se obtuvieron, las concentraciones de los NO_3^- y SO_4^{2-} . Se desarrolló una relación entre la concentración de SO_4^{2-} y la concentración de NO_3^- . Dicha relación ($\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$) se muestra en la figura 5.5.

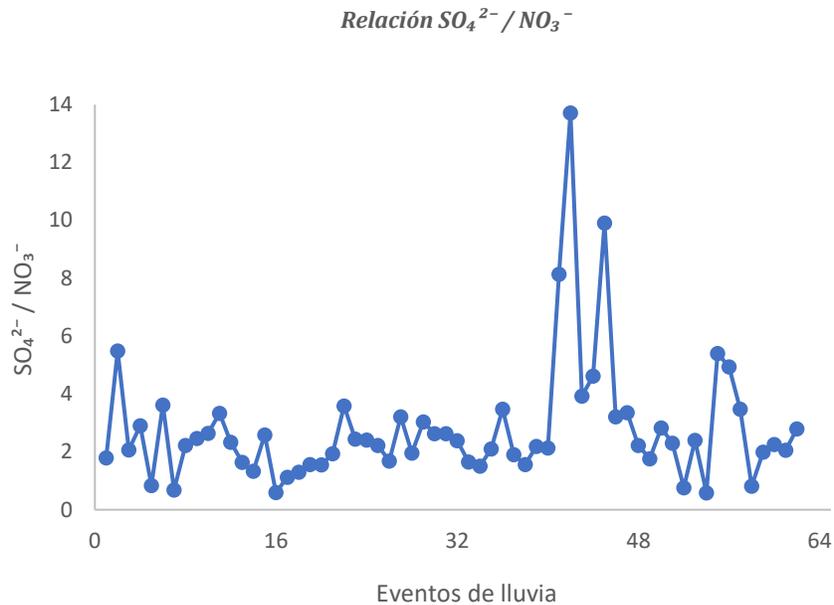


Figura 5.5 *Relación entre los iones SO_4^{2-} / NO_3^- del depósito atmosférico húmedo.*

Solo en el 8 % de los casos se encontró que la concentración de SO_4^{2-} era menor que la de NO_3^- . Y la mayor cantidad de casos con este comportamiento ocurrieron en el mes de octubre.

El 92% de los casos muestran como los valores de SO_4^{2-} superaron a los de NO_3^- , y su relación osciló entre 1 y 13.50. La tabla 5.1 muestra las fechas en que ocurrieron los días donde la relación SO_4^{2-} / NO_3^- tuvo sus valores máximos. La media anual de esta relación fue de 2.3. Esta relación fue menor que en sitios más contaminados dentro del Golfo de México, como es el caso de Veracruz.

Los eventos extraordinarios de la relación anterior fueron hasta 13 veces mayor en el caso más crítico. Los días de máxima razón SO_4^{2-} / NO_3^- ocurrieron el 25 y 26 de septiembre coincidiendo con el único día de pH menor de 5.6, evento de lluvia ácida en la ciudad para el período de estudio.

Tabla 5. 1 Fechas de ocurrencia de los máximos de relación SO_4^{2-}/NO_3^- .

<i>Fechas de ocurrencia de máximos de relación SO_4^{2-}/NO_3^-</i>	
<i>Fechas</i>	<i>Relación</i>
14/09/07	5.50
25/09/07	8.14
26/09/07	13.50
03/10/07	9.92
21/10/07	5.40

Los días donde las concentraciones de SO_4^{2-} / NO_3^- resultaron mayores coincidieron con actividades festivas que se llevan a cabo en la ciudad.

La figura 5.6 muestra la distribución del ponderado mensual del pH para el año 2007.

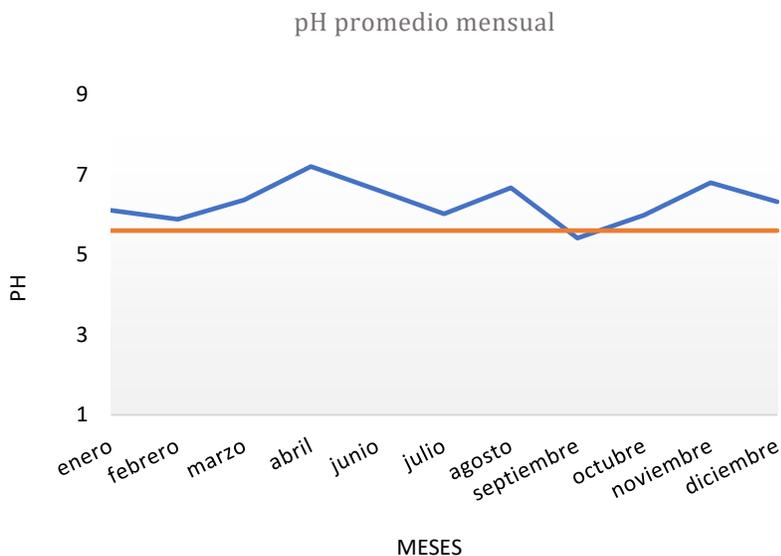


Figura 5. 6 pH promedio mensual ponderado del depósito húmedo.

En la figura 5.6 la línea azul muestra los valores mensuales del pH y la línea naranja indica el valor estándar del pH de la lluvia. El pH tuvo una marcada tendencia a la alcalinidad, pues sólo el mes de septiembre registró un promedio mensual de pH inferior a 5.6. Los mayores valores

de pH se registraron en abril, agosto y noviembre, mientras que en los meses de febrero, julio y septiembre ocurrieron los menores. El día 25 de septiembre de 2007 se registró un pH=4.97, siendo el único caso ácido de las muestras analizadas. No se encontró comportamiento estacional del pH, sin embargo, el valor mínimo ocurrió en la temporada lluviosa.

Con el fin de analizar las especies que determinaron las características del pH en las muestras, se analizó el comportamiento mensual de las concentraciones de las especies existentes en el depósito húmedo. Se presentan en la figura 5.7 los iones OH^- , H^+ , HCO_3^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} .

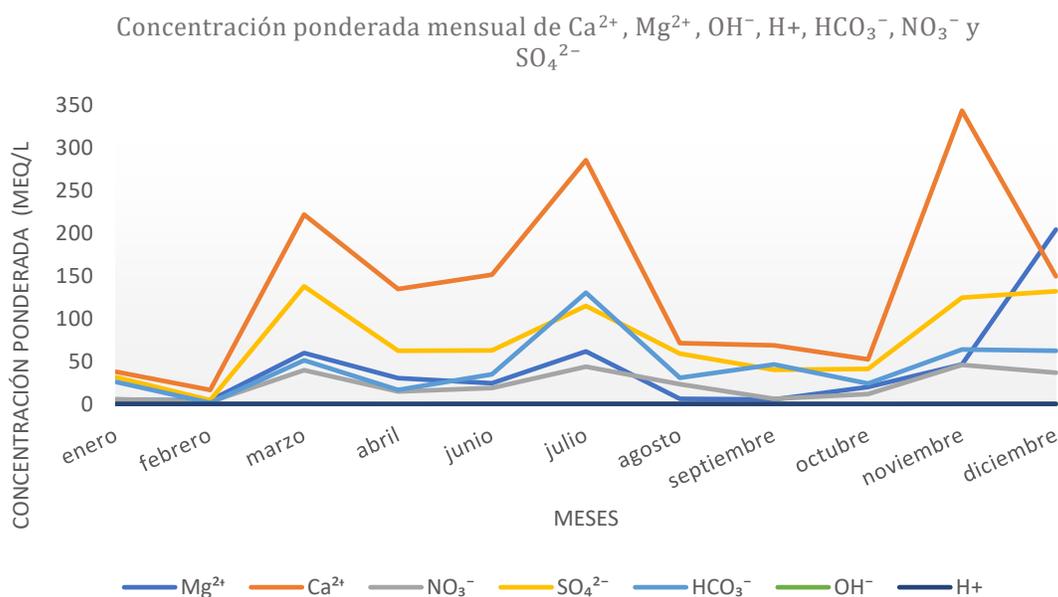


Figura 5. 7 Concentración mensual ponderada de los iones OH^- , H^+ , HCO_3^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} en ($\mu\text{eq/L}$).

En la figura 5.7 se aprecia cómo las concentraciones de Ca^{2+} son mayores que la del resto de los iones analizados, teniendo un papel importante en la neutralización de las muestras. En algunos meses como julio y septiembre las concentraciones de HCO_3^- superaron las del SO_4^{2-} . El aporte del NO_3^- al carácter ácido de la lluvia fue, en todos los casos menor al del SO_4^{2-} , por

lo que la formación de ácidos fuertes como el H_2SO_4 fue más probable que la del HNO_3 . Sin embargo, las muestras de lluvia no presentaron valores de acidez, excepto en un caso, contrarrestado por las concentraciones encontradas de HCO_3^- y Ca^{2+} , siendo esta última la especie alcalina más abundante en la atmósfera de esta ciudad.

Con el fin de encontrar la correlación que presentan entre sí los iones analizados se realizó un análisis estadístico, donde se determinó la correlación entre estos, lo cual produjo los resultados mostrados en la figura 5.8.

		<i>Correlaciones 2007</i>										
<i>Coefficiente de correlación</i>	<i>Na⁺</i>	<i>NH₄⁺</i>	<i>K⁺</i>	<i>Mg²⁺</i>	<i>Ca²⁺</i>	<i>HCO₃⁻</i>	<i>H⁺</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>NO₃⁻</i>	<i>SO₄²⁻</i>	<i>OH⁻</i>	
<i>Na⁺</i>	1,000											
<i>NH₄⁺</i>	,112	1,000										
<i>K⁺</i>	,317*	,188	1,000									
<i>Mg²⁺</i>	,630**	,022	,215	1,000								
<i>Ca²⁺</i>	,657**	-,065	,136	,740**	1,000							
<i>HCO₃⁻</i>	,376*	,043	,321*	,631**	,603**	1,000						
<i>H⁺</i>	-,340*	,084	-,074	-,443**	-,390**	-,162	1,000					
<i>Cl⁻</i>	,788**	,028	,335*	,760**	,757**	,506**	-,226	1,000				
<i>NO₃⁻</i>	,430**	,272	,445**	,389*	,452**	,298	-,111	,482**	1,000			
<i>SO₄²⁻</i>	,621**	,064	,300	,602**	,770**	,486**	-,304*	,698**	,652**	1,000		
<i>OH⁻</i>	-,467**	-,052	-,080	-,501**	-,488**	-,164	,796**	-,309*	-,140	-,340*	1,000	

Figura 5. 8 Correlación entre los compuestos analizados del depósito húmedo.

Del análisis de los resultados para el anión SO_4^{2-} , se encontró que este tiene buena correlación con el sodio, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ y NO_3^- . El NO_3^- , presentó buena correlación con el Cl^- , Ca^{2+} ,

Na⁺ y K⁺ y una baja correlación con el ión hidronio y de manera negativa. Ambos aniones (SO₄²⁻ y NO₃⁻), presentaron una baja correlación con el H⁺ y de manera negativa.

Es importante señalar que el SO₄²⁻ y el Cl⁻ pueden tener origen marino y por lo tanto no están asociados a la acidez libre (H⁺) de la lluvia, sino que se asocian a los cationes naturales del agua de mar (principalmente Ca²⁺, Na⁺ y K⁺ y Mg²⁺). La especie de mayor correlación con el SO₄²⁻ es el Ca²⁺, reafirmando a este catión como el de mayor poder de neutralización en la muestra. Debido a la alta capacidad neutralizante de la atmósfera de la ciudad, sólo unas porciones de los iones potencialmente ácidos contribuyen a la acidez de las lluvias. La contribución del suelo en la alcalinización de la lluvia es muy significativa.

5.2 Modelos atmosféricos

La calidad del aire dependerá de la dinámica de la atmósfera, la cual estará caracterizada por la dirección y fuerza de los vientos, la radiación solar, la temperatura, la humedad y la precipitación. En esta tesis se analizaron las concentraciones de los iones que conforman el depósito atmosférico húmedo en la ciudad de Campeche, siendo significativas las concentraciones de SO₄²⁻ y NO₃⁻. Fue necesario entonces identificar las fuentes de emisión de los precursores del depósito ácido atmosférico, mediante las trayectorias del viento.

5.2.1 Vector del viento en la Ciudad de Campeche

La dispersión de los contaminantes emitidos desde una fuente, depende de la velocidad y dirección del viento. Del análisis vectorial del viento se obtuvo la figura 5.9, en la cual se muestran la dirección y velocidad promedio anual en el año 2007. Los datos utilizados fueron monitoreados en la estación del Aeropuerto Internacional de Campeche (MMCP) (WMO index: 76695) y elaborada con el software WRPLOT versión 8.0.

Durante el período de estudio la dirección del viento imperante fue de región E, con algunos casos de región SE, registrándose las mayores velocidades desde estos rumbos. Dicho

comportamiento del viento es muy común en zonas tropicales, donde los vientos alisios (con componente E) imperan durante casi todo el año.

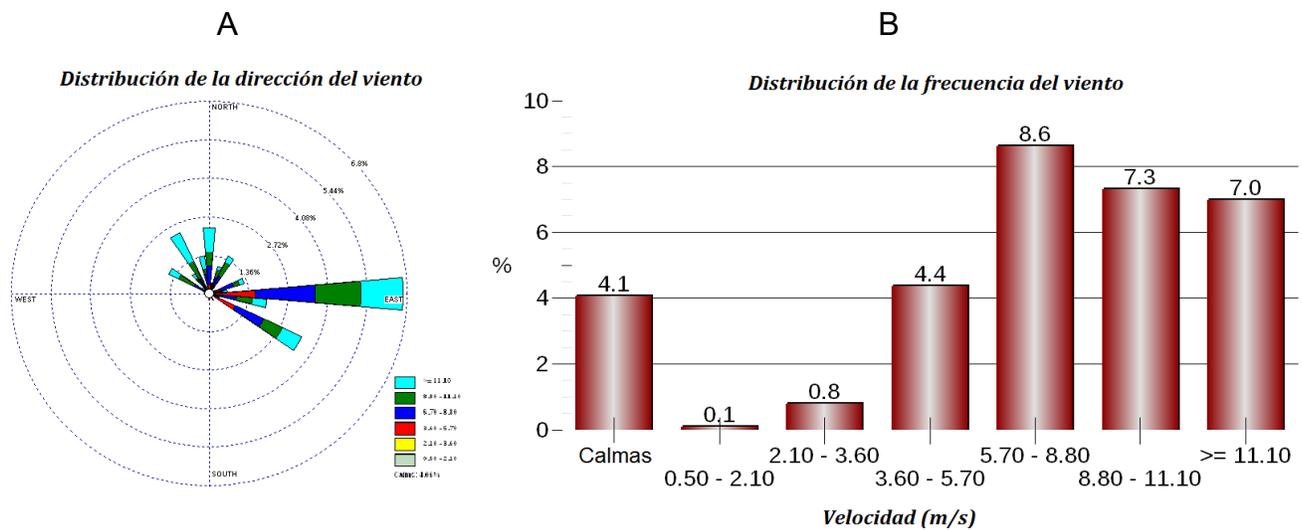


Figura 5. 9 Distribución anual de la velocidad y dirección del viento

Los vientos de región N y noroeste (NO) ocurrieron en menos del 3% de los casos con velocidades de hasta 11m/s. El 7% de los casos analizados resultaron en vientos fuertes (11m/s), las velocidades más comunes se encontraron entre 5.7 y 8.8 m/s, mientras que los casos de calma llegaron al 4.1%. Las condiciones de calma se consideran desfavorables para la dispersión de contaminantes, por lo que el impacto negativo a las condiciones atmosféricas producto de emisiones de fuentes locales se vio potenciado. La distribución mensual de la velocidad y dirección del viento se presenta en el Anexo 2 del presente estudio.

Los vientos provenientes del cuarto y primer cuadrante estuvieron relacionados con el paso de Frentes Fríos que llegaron a las costas de Campeche durante todo el año. Otro de los fenómenos que pudo favorecer los vientos de estos cuadrantes es la influencia de las brizas marinas, tan comunes en las zonas costeras, en donde los vientos comienzan en la mañana a tener dirección E y entrada el día presenta mayor componente NO.

5.2.2 Modelación con HYSPLIT

Para la modelación de las trayectorias de retroceso, se seleccionaron los eventos de precipitación con las mayores concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} ($\mu\text{eq/L}$), así como el día de ocurrencia del menor valor de pH, partiendo de datos meteorológicos disponible de la NOAA. Las corridas se realizaron para 72 horas antes de los días significativos.

La figura 5.10 muestra las distintas trayectorias que se obtuvieron para los días de máximas concentraciones de SO_4^{2-} ($\mu\text{eq/L}$). Para los casos B y C las trayectorias provinieron de región E. Para el caso A, la circulación 48 horas antes del evento fue de región S y de 24 horas antes la circulación se volvió local, con un giro de los vientos propiciando una contribución de contaminantes del área cercana de explotación petrolera, Sonda de Campeche. Para las 72 horas antes, en todos los casos presentados, las trayectorias muestran una circulación proveniente de territorios centroamericanos y del archipiélago de Cuba. En el Anexo 3 se muestran las corridas diarias para los tres días para cuatro horarios.

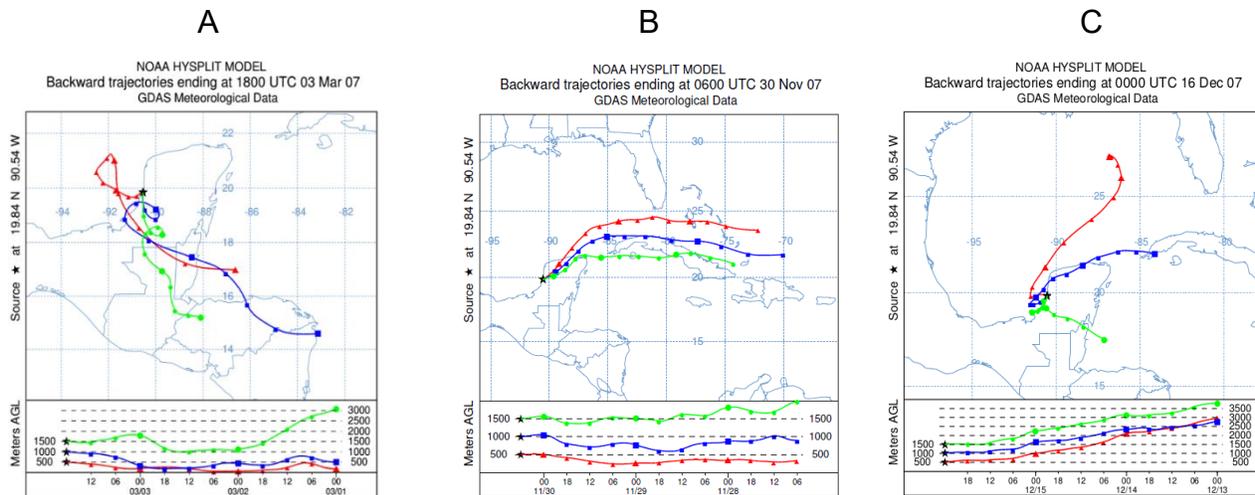


Figura 5. 10 Corridas del HYSPLIT para días de máximas concentraciones de SO_4^{2-} . A) Trayectoria de retroceso del día 3 de marzo de 2007, a las 1800 UTC. B) Trayectoria de retroceso del día 30 de noviembre de 2007, a las 0600 UTC. C) Trayectoria de retroceso del día 16 de diciembre de 2007, a las 0000 UTC.

Se realizó el procedimiento anterior para los días de mínimas concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} , de este análisis se obtuvieron las trayectorias de retrocesos que se muestran en la figura 5.11.

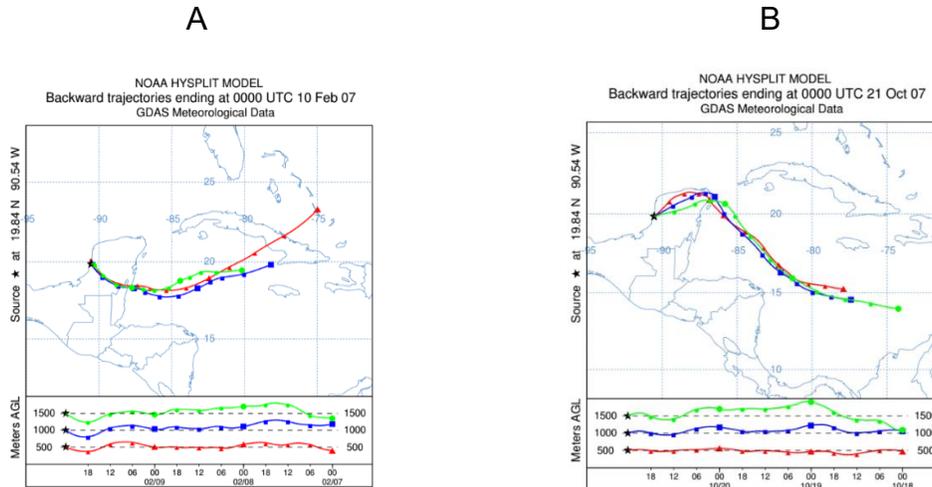


Figura 5. 11 Corridas del HYSPLIT para días de mínimas concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} , A) Trayectoria de retroceso del día 10 de febrero de 2007, a las 0000 UTC B) Trayectoria de retroceso del día 21 de octubre de 2007, a las 0000 UTC.

En los casos de mínimas concentraciones de NO_3^- y SO_4^{2-} , se encontró una trayectoria que se extiende en el mar Caribe, sin llegar a pasar por un área de fuentes importantes de contaminantes atmosféricos dentro de México y sí pasa por gran parte de la Península de Yucatán, en donde la parcela se enriquece de sustancias alcalinas propias de los suelos de la región. En el caso B las trayectorias provienen de Cuba, por un área de poco desarrollo industrial. En ambos casos prevalecen los vientos con dirección imperante de componente E. Las trayectorias obtenidas ratifican el importante papel de la contribución de los suelos de la Península de Yucatán en las características del depósito húmedo.

Se realizó la modelación para el día del evento ácido en la ciudad. En la figura 5.12 se observa la trayectoria de retroceso modelada para 72 horas antes de ocurrido el evento de mínimo pH. Las trayectorias de retroceso mostraron una circulación local, evidenciando el impacto de las

fuentes de contaminantes locales.

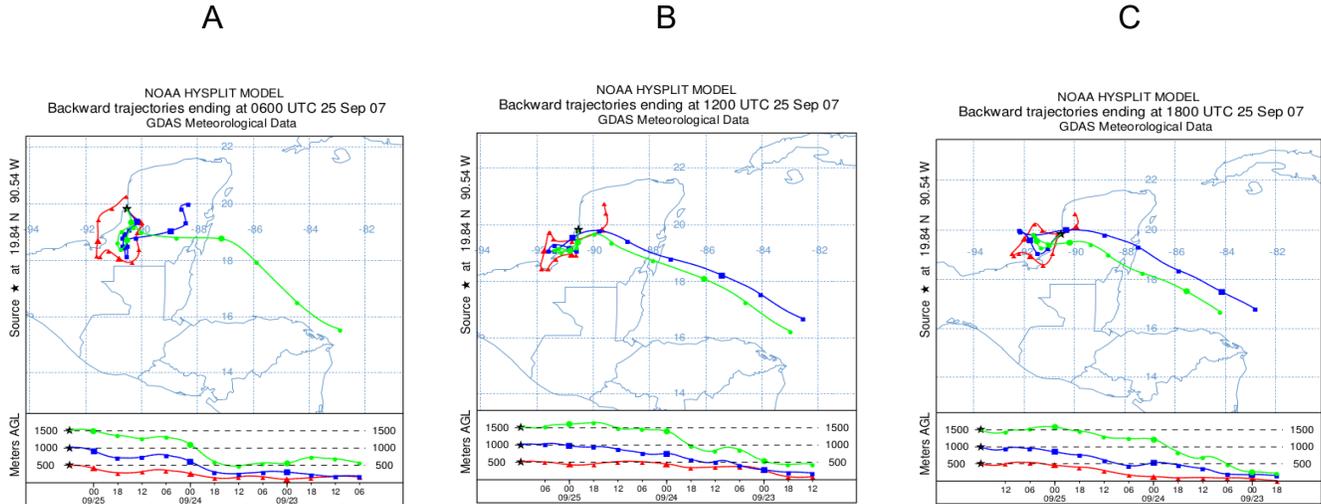


Figura 5. 12 *Corridas del HYSPLIT para días de evento ácido. Trayectoria de retroceso del día 25 de septiembre de 2007. A) 0600Z. B) 1200Z. C) 1800Z.*

Las trayectorias obtenidas mediante el modelo HYSPLIT, brindaron una primera aproximación de cómo se comportaron las condiciones atmosféricas en la zona de estudio y las posibles zonas con fuentes de precursores del depósito húmedo. Se constató que las trayectorias de retroceso para días de máximas y mínimas contribuciones de NO_3^- y SO_4^{2-} , las parcelas de aire provienen de región E. En el presente capítulo se utilizaron otras herramientas meteorológicas para describir el tiempo imperante en la zona, para los días de máximas concentraciones.

5.3 Descripción de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) para casos significativos

Se realizó la clasificación de los Tipos de Situaciones Sinópticas (TSS) observadas en los casos significativos de concentraciones de NO_3^- , SO_4^{2-} , pH (Lapinel, 1988).

La figura 5.13 muestra los mapas sinópticos para el día 3 de marzo del 2007, en el cual se

registraron máximas concentraciones de SO_4^{2-} . La TSS fue de tipo VI, Bajas extratropicales Subtipo 6: Zona anterior al frente. Sin hondonada pre-frontal.

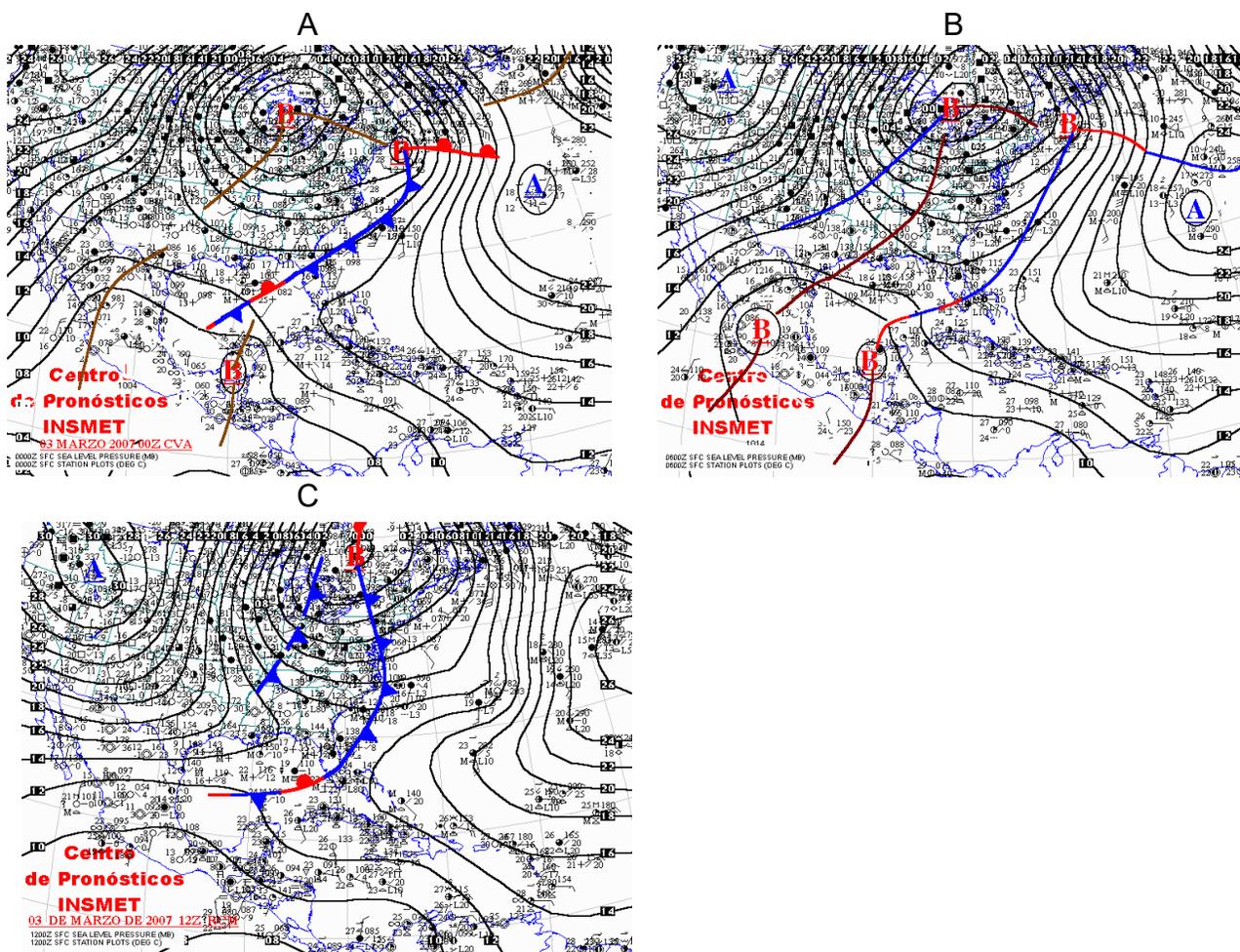


Figura 5. 13 Mapa sinóptico en superficie del 3 de marzo del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.

La figura 5.14 muestra el patrón sinóptico para el día 30 de noviembre del 2007, día de máximas concentraciones de SO_4^{2-} . El análisis de ésta mostró la influencia de vientos del NO y N de 20 a 30 km/h (vientos moderados a fuertes) en la Sonda de Campeche. El tiempo presente en la ciudad se caracterizó por un cielo parcialmente nublado y bruma. Este día

ocurrieron lluvias al paso del reforzamiento de la línea frontal trayendo consigo el consecuente descenso en la temperatura. La TSS que imperaba el día 30 de noviembre del 2007, según la clasificación de Lapinel, (1988) fue una TSS de tipo III, Débil gradiente barométrico (GD).

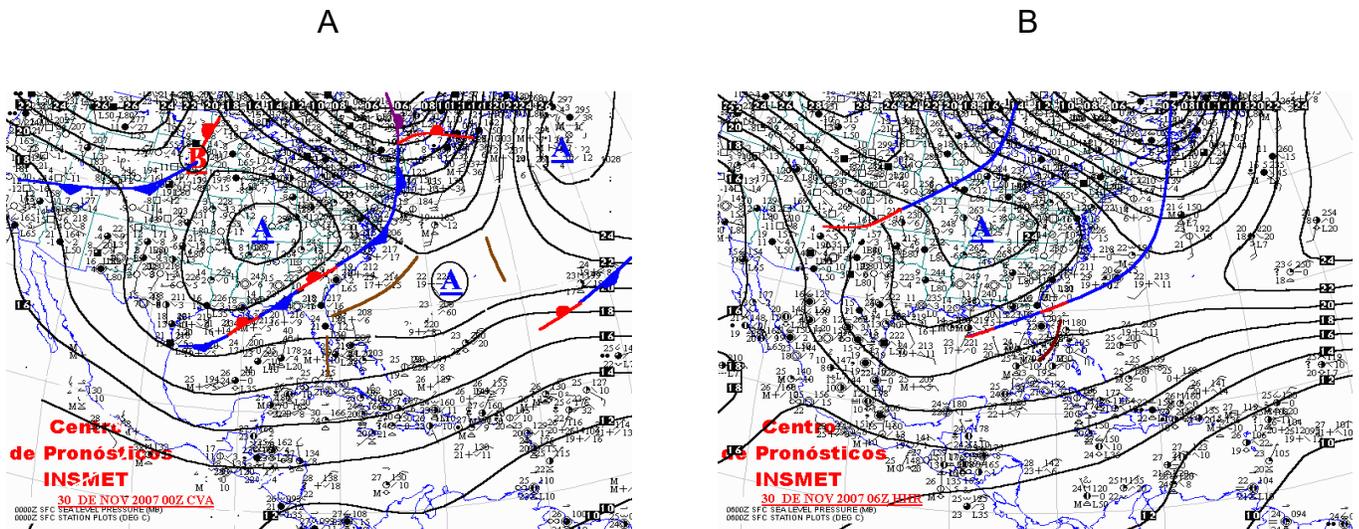


Figura 5. 14 Mapa sinóptico en superficie del 30 de noviembre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.

La figura 5.15 muestra el mapa sinóptico para el día 16 de diciembre del 2007, en el cual se registraron máximas concentraciones de SO_4^{2-} . El estado de Campeche se vio afectado por el Frente Frío No. 13 de ese año proveniente de un intenso sistema de baja presión en el NE de Estados Unidos, caracterizado por una masa de aire polar. Dicho sistema provocó un evento de “Norte” fuerte, para la mayor parte del Golfo de México, aumentando la nubosidad, y las precipitaciones. La TSS identificada el 16 de diciembre del 2007, fue una TSS de tipo VII, identificado como Zonas frontales (ZF).

En este capítulo se analizaron los TSS que imperaban los días de menores registros de NO_3^- , SO_4^{2-} . Los días de mínimas concentraciones ocurrieron: 10 de febrero de 2007 y 21 de octubre de 2007. Para el día 10 de febrero imperaban condiciones de calma en la corriente de vientos máximos provocó la advección de nubosidad media y alta proveniente del Océano Pacífico, lo

cual generó precipitaciones vespertinas y nocturnas en la ciudad. Por otra parte, en la Península de Yucatán se estableció una hondonada en su porción Este.

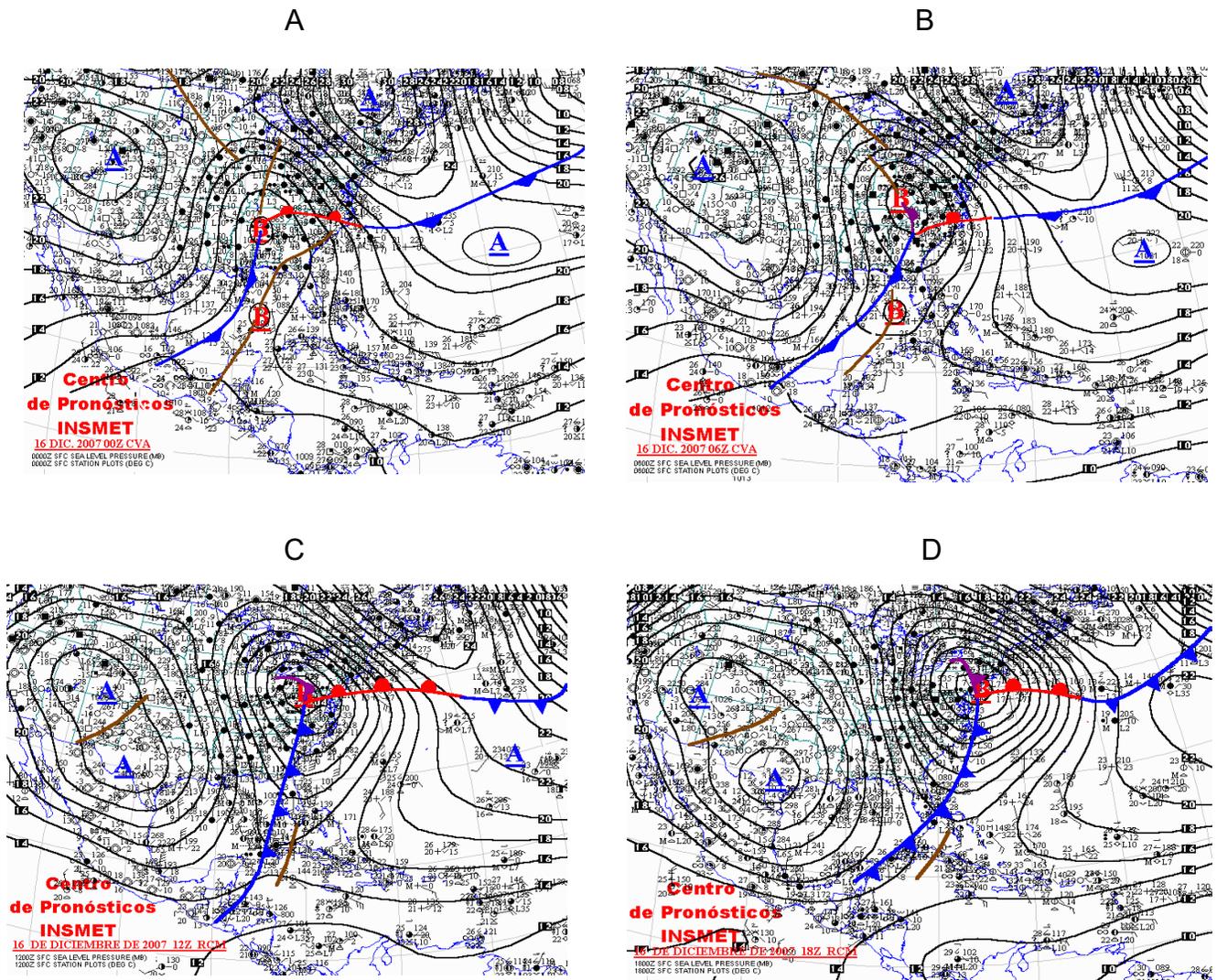


Figura 5. 15 Mapa sinóptico en superficie del 16 de diciembre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. D) Mapa en superficie a las 18Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.

La figura 5.16 muestra la TSS imperante ese día en la zona de estudio, para el día el 21 de octubre de 2007. El estado de Campeche se vio bajo la circulación producida por un sistema de baja presión sobre la porción E de la Península de Yucatán manteniendo el viento del E

rolando a NO de 15 a 20 km/h. Esta onda generó una TSS V, Zonas de convergencia en el flujo Horizontal (ZC).

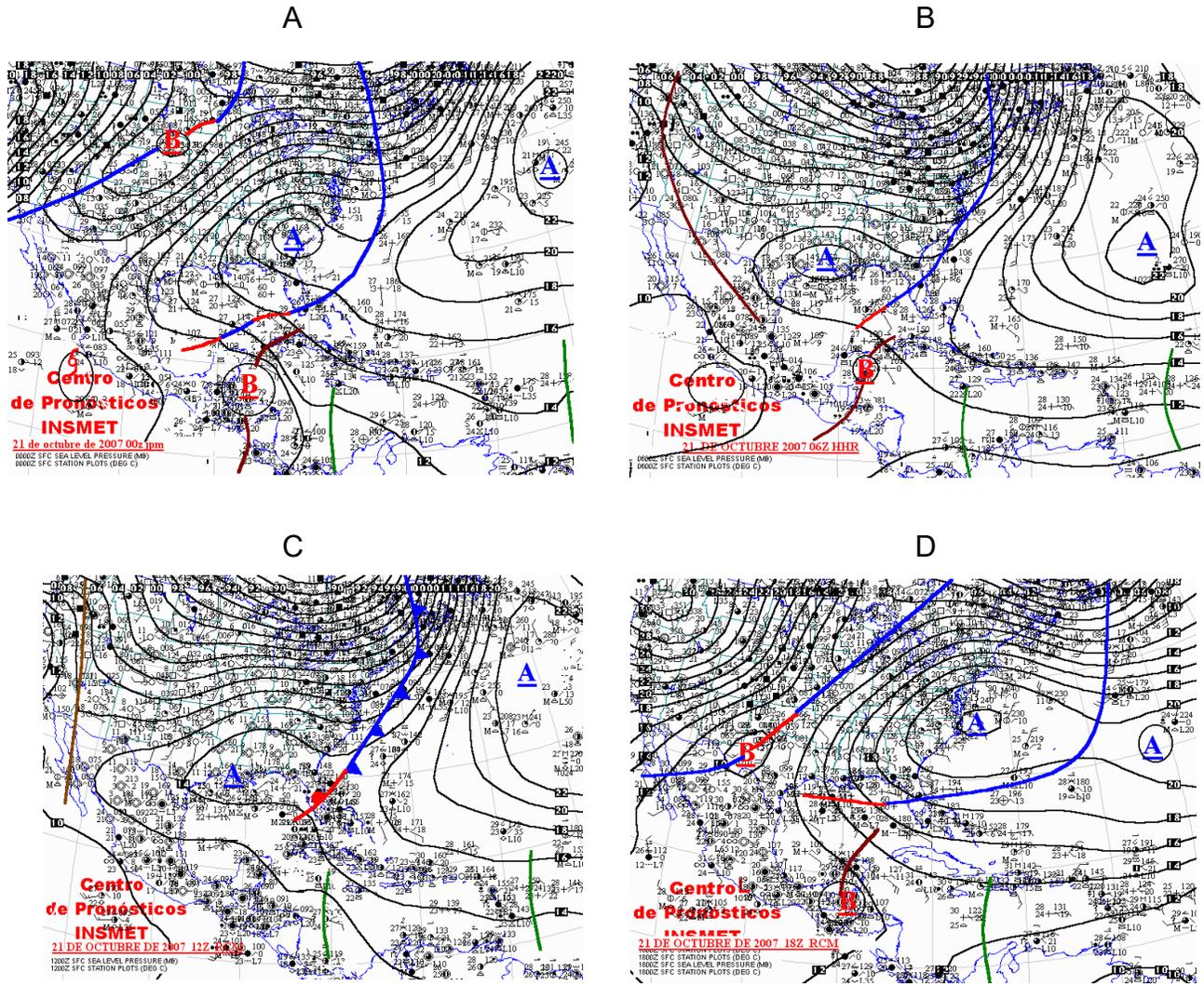


Figura 5. 16 Mapa sinóptico en superficie del 21 de octubre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. D) Mapa en superficie a las 18Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.

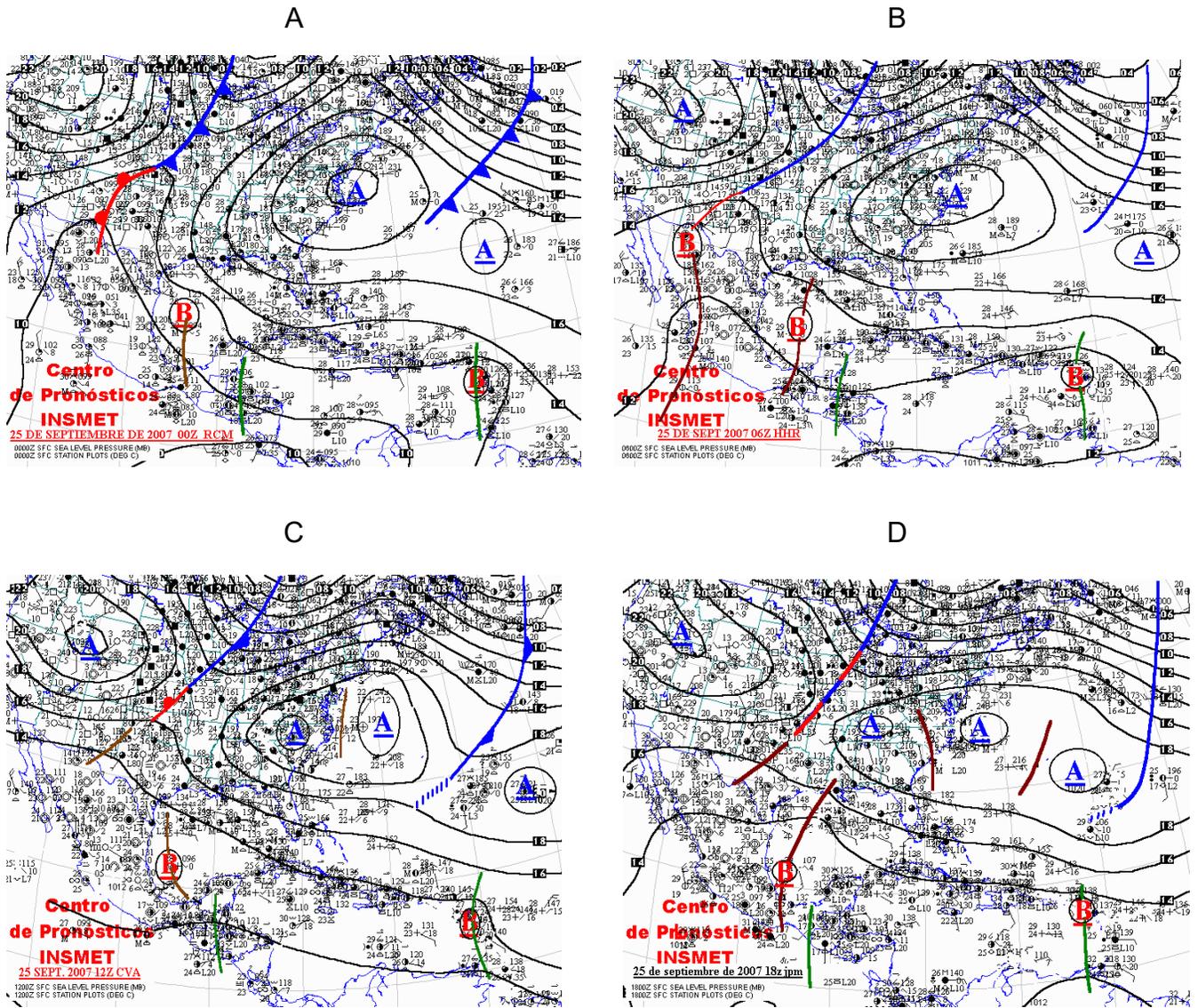


Figura 5. 17 Mapa sinóptico en superficie del 25 de septiembre del 2007. A) Mapa en superficie a las 00Z. B) Mapa en superficie a las 06Z. C) Mapa en superficie a las 12Z. D) Mapa en superficie a las 18Z. Fuente: Centro de Pronóstico del Tiempo. Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba 2007.

El día 25 de septiembre del 2007 ocurrió el único evento de lluvia ácida registrada en los datos analizados. Para este día el mapa sinóptico mostró (figura 5.17) una vaguada en superficie

que se desplazó lenta y erráticamente sobre aguas del Golfo de México y las condiciones en la atmósfera superior se tornaron más favorables para su intensificación. En la ciudad de Campeche se mantuvo un flujo variable del S y SE de 10 a 20 km/h rolando a O y NO por la tarde.

Las concentraciones de Cl^- y Ca^+ tuvieron un comportamiento máximo en los meses de abril y diciembre. El día 6 de abril del 2007, día de máxima concentración de Cl^- y Na^+ estuvo influenciado por el frente frío No. 47 del año 2007, el cual se extendía a las 00Z en superficie al oeste de la Península de Yucatán, precedido de una vaguada en superficie que se extendió a lo largo de la Sonda de Campeche. A las 18Z de este día la zona frontal tocaba en su porción S a la Península de Yucatán, donde mantuvo vientos del N y NO propiciados por una TSS de tipo VII, Zona Frontal (ZF).

5.4 Fuentes emisoras de precursores del depósito atmosférico para evaluar el deterioro ambiental significativo

Una vez analizadas las muestras de lluvia se encontró que las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- son superiores en comparación con otros iones de las muestras de lluvia, las cuales son dañinas para el material pétreo. Gracias a este resultado conjuntamente con las trayectorias de retrocesos modeladas en el HYSPLIT y teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, se constató que las fuentes precursoras de contaminantes en la zona de estudio provienen de dirección E, asociado con los vientos predominantes en la región. Luego de este análisis se ubicaron posibles fuentes potenciales de contaminantes atmosféricos que pueden presentar un impacto potencial para la ciudad (figura 5.18).

Las posibles fuentes encontradas, fueron analizadas en tres grupos entre los que están las centrales termoeléctricas presentes en el estado de Campeche y el estado de Yucatán; el área de extracción petrolera de la Sonda de Campeche; la zona de explotación y procesamiento de petróleo Habana-Matanzas.

Leyenda

SDC. Plataformas petroleras de la Sonda de Campeche

TUX. Planta eléctrica de Tuxpan

TAM. Ciudad industrial de Tampico

MTY. Ciudad industrial de Monterrey

BRO. Ciudad industrial de Brownsville/ Matamoros

P.R.V. Refinerías de Poza Rica y el Puerto de Veracruz

CDC. Ciudad industrial del Ciudad del Carmen

LER. Planta eléctrica de Lerma

MER. Planta eléctrica de Mérida

VAL. Planta eléctrica de Valladolid

HAV- MAZ. Zona industrial y de extracción petrolera. Habana-Matanzas

BEL Belice

GTM Guatemala

♦ Zona de estudio

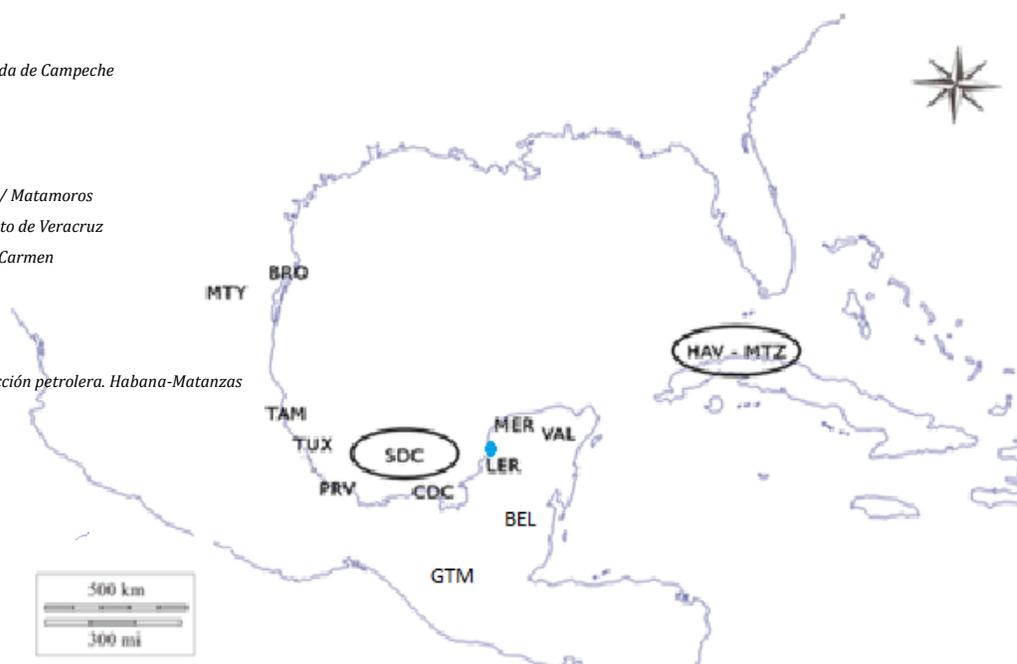


Figura 5. 18 Fuentes de contaminantes atmosféricos que afectan la zona de estudio.

De las posibles fuentes seleccionadas se les brindó especial interés a las ubicadas al E de la ciudad de Campeche. Es pertinente resaltar las Centrales Termoeléctricas (CT) de Lerma (Campeche), de Mérida (Yucatán) y de Valladolid (Yucatán), teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento. Debido a las trayectorias proporcionadas por la modelación en HYSPLIT para 72 horas se tubo en cuenta la zona industrial y de extracción petrolera de la zona Habana - Matanzas en Cuba.

Centrales termoeléctricas presentes en la zona

De acuerdo con datos aportados por la SEMARNAT et al., (2006) las emisiones en México producidas por las plantas de generación de electricidad son: 259, 833.8 Mg/año de NO_x (57.89% de las emisiones totales a nivel nacional), las emisiones de SO_x son 1,604,849.2 Mg/año (60.93% de las emisiones totales), las emisiones de COV_s son 11,394.4 Mg/año (4.60% de las emisiones totales, las emisiones de CO son 25,310.8 Mg/año (15.10% de las emisiones totales), las emisiones de PM₁₀ son 79,508.3 Mg/año (26.74% de las emisiones totales) y las emisiones de PM_{2.5} son 62,884.7 Mg/año (31.59% de las emisiones totales).

De las fuentes ubicadas dentro del territorio mexicano se constató que todas las CT consumían combustóleo (dato para el año 2007). La tabla 5.2 muestra un listado de las características de las CT que estuvieron en operación el año 2007, como son: el tipo de tecnología utilizada, el número de unidades, su capacidad instalada, su generación de electricidad y su factor de planta.

Tabla 5. 2 Lista de las centrales termoeléctricas que afectan la zona de estudio. (Adaptado de SENER, 2006; CFE, 2009; SENER, 2010; Cureño, 2010).

Nombre de la central	Estado	Tecnología	Combustible	Número de unidades	Capacidad efectiva MW	Generación bruta de energía GMW	Factor de planta %
Lerma	Campeche	TC	COM	4	150	784	59.5
Mérida II	Yucatán	TC	COM y GAS	2	168	953	54.8
Valladolid	Yucatán	TC / CC	COM y GAS	5	295	1524	58.8

TC: Termoeléctrica Convencional, CC: Ciclo Combinado, TG: TurboGas, COM: Combustóleo, GAS: Gas natural

En la tabla 5.3 se presentan las emisiones por las diferentes plantas de generación de electricidad, incluyendo a las centrales termoeléctricas.

Tabla 5. 3 Emisiones de las diferentes plantas de generación de electricidad de las entidades federativas Campeche y Yucatán, reportadas en el INEM, 1999. (Adaptado de SEMARNAT et al., 2006 y Cureño, 2010).

Entidad federativa	No. de establecimientos	Emisiones anuales (Mg/año)					
		NO _x	SO _x	COV's	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}
Campeche	1	2,057.7	21,145.8	38.9	187.1	981.0	708.2
Yucatán	2	2,579.7	26,089.9	56.3	240.6	1,131.8	874.1

Las CT ubicadas en Yucatán emiten anualmente mayor cantidad de SO_x que la planta ubicada en Campeche. Sin embargo, las dos plantas presentes en Yucatán sólo difieren en cerca de 5Mg/ año, lo cual indica que la planta ubicada en Lerma emitió más SO_x que cualquiera de las dos plantas de Yucatán por separado en el período muestreado.

La información presentada por Miller et al., (2004) muestra que para el año 2002 la CT de Lerma (Campeche) presentó el mayor índice de emisiones para SO₂ y CO₂ en la región. Con este resultado se constató que no necesariamente las CT que presenten la mayor generación de electricidad tendrán el mayor índice de emisiones (unidades de masa de contaminante por energía generada). Esta conclusión se cumple para los contaminantes SO₂, NO_x y CO₂, siempre y cuando las centrales cuenten con algún tipo de control o que la eficiencia en la operación sea factible. De igual manera debemos considerar que las CT de Valladolid y Mérida presentan producción de energía por medio de Ciclo Combinado.

Tabla 5. 4 Emisiones e índice de emisiones de SO₂, NO_x y CO₂ para las CT que consumen combustóleo en Campeche y Yucatán. (Adaptado de Miller et al., 2004 y Cureño, 2010).

<i>Central Termoeléctrica</i>	<i>Generación (MWh)</i>	<i>Emisiones de SO₂ (Mg)</i>	<i>Índice de emisiones de SO₂ (Kg/MWh)</i>	<i>Emisiones de NO_x (Mg)</i>	<i>Índice de emisiones de NO_x (Kg/MWh)</i>	<i>Emisiones de CO₂ (Mg)</i>	<i>Índice de emisiones de CO₂ (Kg/MWh)</i>
Mérida II	1099,710	17,497	15.91	1,151	1.05	897,935	817
Lerma	812,720	17,742	21.83	1,005	1.24	796,032	979
Valladolid	414,970	8,409	20.27	709	1.71	381,132	918

De las CT analizadas se observó que las emisiones de CO₂ (gas de efecto invernadero) son las más abundantes, seguidas de las emisiones de SO₂.

A partir del mes de noviembre del año 2006 la CFE implementó un programa de retiros de unidades generadoras al servicio público. Salió de funcionamiento una unidad operacional con 37.5 MW de la CT Lerma. El año 2007, se procedió al cierre de dos unidades de esta CT, disminuyendo su generación en 37.5 MW. Sin embargo, en el “Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico” para el período del 2007 al 2016 se propuso la CFE el uso de nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica. Tal es el caso de las potenciaciones de unidades de vapor a ciclos combinados, mediante el uso de turbinas de gas acopladas a unidades de vapor. Tal arreglo permitió incrementar la capacidad entre 150% y 200% aproximadamente, con eficiencias ligeramente menores a las de ciclos combinados

nuevos. Dentro de las CT propuestas en la repotenciación se encontró la de Lerma. Para el año 2016 la CT Lerma operó con una tecnología de generación con base en vapor con una capacidad instalada de 112.500 MW.

Sonda de Campeche

Una de las principales fuentes antropogénicas de emisión de contaminantes atmosféricos en la zona del Golfo de México son las operaciones de extracción de HC del subsuelo. El Golfo de México es una zona con una alta actividad industrial y comercial destacando la extracción de petróleo principalmente en la zona sur del golfo. PEMEX Exploración y Producción (PEP) es la entidad encargada de realizar operaciones de extracción de petrolíferos en México, y en la zona sur del Golfo de México, (Mendoza y Graniel, 2007).

Según Mendoza y Graniel, (2007), dentro de las operaciones de extracción y transporte de HC en el Golfo de México, existen varias fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera, tales como: quemadores elevados tipo antorcha de gas venteado, generadores eléctricos y grúas (emplean Diesel como combustible), equipos de transporte (barcos y helicópteros). De igual manera es posible la ocurrencia de fugas de hidrocarburos en tuberías, compresores y bombas, entre otras. Se considera que la quema de gas venteado representa más del 80 % de las emisiones totales (Villaseñor et al., 2003). En esta zona se desarrollan otras actividades como son: actividad comercial, transporte marítimo de carga, y otras actividades humanas.

El estudio realizado por Mendoza y Graniel, (2007), generó un inventario de emisiones para el período noviembre 2000 - agosto de 2001, teniendo en cuenta las emisiones horarias de SO₂, sulfuro de hidrógeno (H₂S), NO_x, CO, CO₂, PS e HC no quemados para 15 quemadores elevados y uno de fosa. Los resultados del estudio mostraron que como promedio fue quemado en las etapas analizadas: invierno II, 1,000 toneladas de gas amargo por día; otoño 1 (690 ton); primavera (611 ton); invierno 1, (541 ton); verano (538 ton); y otoño 2, (271 ton).

Zona industrial y de extracción petrolera Habana-Matanzas

En el litoral norte de Cuba, entre las provincias de La Habana y Matanzas, ocurren eventos de contaminación atmosférica provocados por la actividad de exploración de petróleo y gas, la cual ha ido incrementándose en los últimos años.

Entre los problemas más graves que contribuyen al deterioro de las condiciones atmosféricas, están las emisiones de SO_2 y H_2S a la atmósfera producto de la quema del gas acompañante que se produce durante la extracción de petróleo, así como las emanaciones directas de estos gases (por la insuficiente utilización de dicho gas), durante el proceso de recolección, transporte y almacenamiento (por realizarse en instalaciones no adecuadas).

En un estudio realizado por Díaz et al., (2007) se llevó a cabo la medición de la contaminación atmosférica del área en los últimos 5 años con vistas a comprobar la gestión ambiental de la actividad petrolera en la región. Para los puntos analizados se determinó la tendencia de los compuestos SO_2 , H_2S , NO_x y COV 's. Se encontró que las concentraciones de H_2S han tendido a la disminución (máxima de 0.287 mg/m^3), la concentración de SO_2 se ha mantenido estable (máxima de 0.062 mg/m^3). En este estudio se asociaron los niveles de H_2S a la actividad de producción en el sitio, particularmente a la hermeticidad de los tanques de almacenamiento de crudo. Los niveles de SO_2 se asociaron tanto a las emisiones de los quemadores ubicados en los centros colectores, como a las emisiones de las CT Habana y Antonio Guiteras, estando sus niveles de concentración en función de la dirección y velocidad del viento.

5.5 Identificación de las posibles fuentes emisoras de precursores del depósito atmosférico, mediante mapas de viento

Una vez identificadas las posibles fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos, se decidió estudiar a detalle los mapas de viento (o de flujo), para describir las condiciones del viento imperante los días de máximas concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- .

Las figuras 5.19, 5.20 y 5.21 muestran los mapas de flujo para los días 3 de marzo de 2007, 30 de noviembre de 2007 y el 16 de diciembre de 2007, respectivamente.

El viento, representado en el mapa de viento, es el tiempo meteorológico de reanálisis tomado del conjunto de datos NARR (North American Regional Reanalysis) dentro de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Dichos datos pueden ser generados en la página web <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl>. Las figuras siguientes muestran los mapas de reanálisis para el nivel de 1000MB, para horarios de 3, 6 y 12 horas antes del día del evento analizado. Para una mejor comprensión y valoración de las condiciones imperante, se muestran y describen los mapas de viento de los horarios 00Z, 3Z y 6Z de la fecha de máxima concentración de SO_4^{2-} y NO_3^- . Igual tratamiento se les dio a los mapas del día de ocurrencia de lluvia ácida (25 de septiembre de 2007), figura 5.22.

Durante el 2 de marzo no se registraron acumulados de precipitación en la ciudad. La zona se mantuvo bajo la influencia de un flujo cálido y débil de región sur (S). Dicho flujo fue generado en la periferia occidental del anticiclón del Atlántico Norte. El día 3 de marzo, un sistema frontal se produjo precipitaciones, (máximo en las concentraciones de SO_4^{2-}). Una de las posibles fuentes de precursores de contaminantes fueron las locales, las cuales se vieron favorecidas por la presencia de vientos débiles días antes de la ocurrencia de la precipitación. El día 3 de marzo, dominó un viento de región N tras el paso de la vaguada frontal. Por lo tanto, la ocurrencia de un máximo de SO_4^{2-} pudo ser debido a fuentes locales y a las fuentes presentes en la Sonda de Campeche.

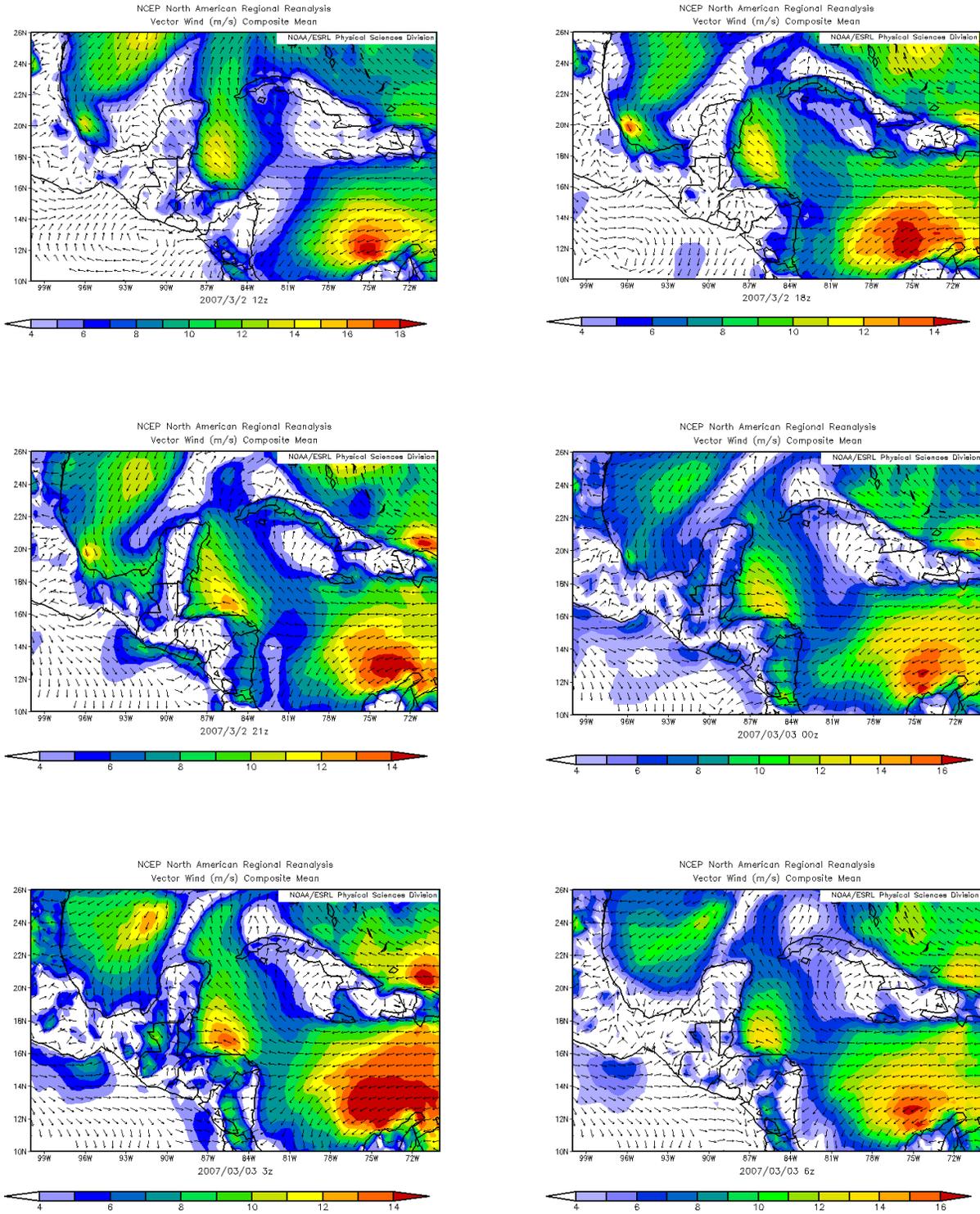


Figura 5. 19. Mapas de flujo de 1000MB para los días 2 y 3 de marzo de 2007. Fuente <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl>

Del análisis de los mapas de flujo para los días 29 y 30 de noviembre, se encontró que el primer días prevalecieron vientos débiles de región S favorecidos por un centro anticiclónico con su centro en el atlántico occidental. El día 30 de noviembre el centro anticiclónico del atlántico se debilitó y dió paso a vientos de región NO, debido a un desborde del anticiclón migratorio por delante de la vaguada frontal. Ante este análisis se consideró que las posibles fuentes de contaminantes fueron las locales y en menor cantidad las presentes al NO de la ciudad.

Otro de los días de máximas concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- fue el 16 de diciembre. Se analizaron los mapas de flujo dos días antes de ocurrido el evento de lluvia. Durante los días 15 y 16, ocurrió un giro del viento del E al S, como un comportamiento normal antes del paso de una banda frontal. Los mapas de flujo de las 1200Z del día 16 de diciembre muestran un viento fuerte de región N. La precipitación ocurrida este día fue producto a una advección fría, por arrastre de nublados bajos en horas de la mañana. Las principales fuentes identificadas para este día son las ubicadas al E de la ciudad y las fuentes locales.

El 25 de septiembre ocurrió un evento de lluvia ácida en la ciudad, producto de una vaguada en superficie en el Golfo de Campeche incentivada por una onda corta en la altura. Las principales fuentes de contaminantes pudieron ser las provenientes del E y las locales.

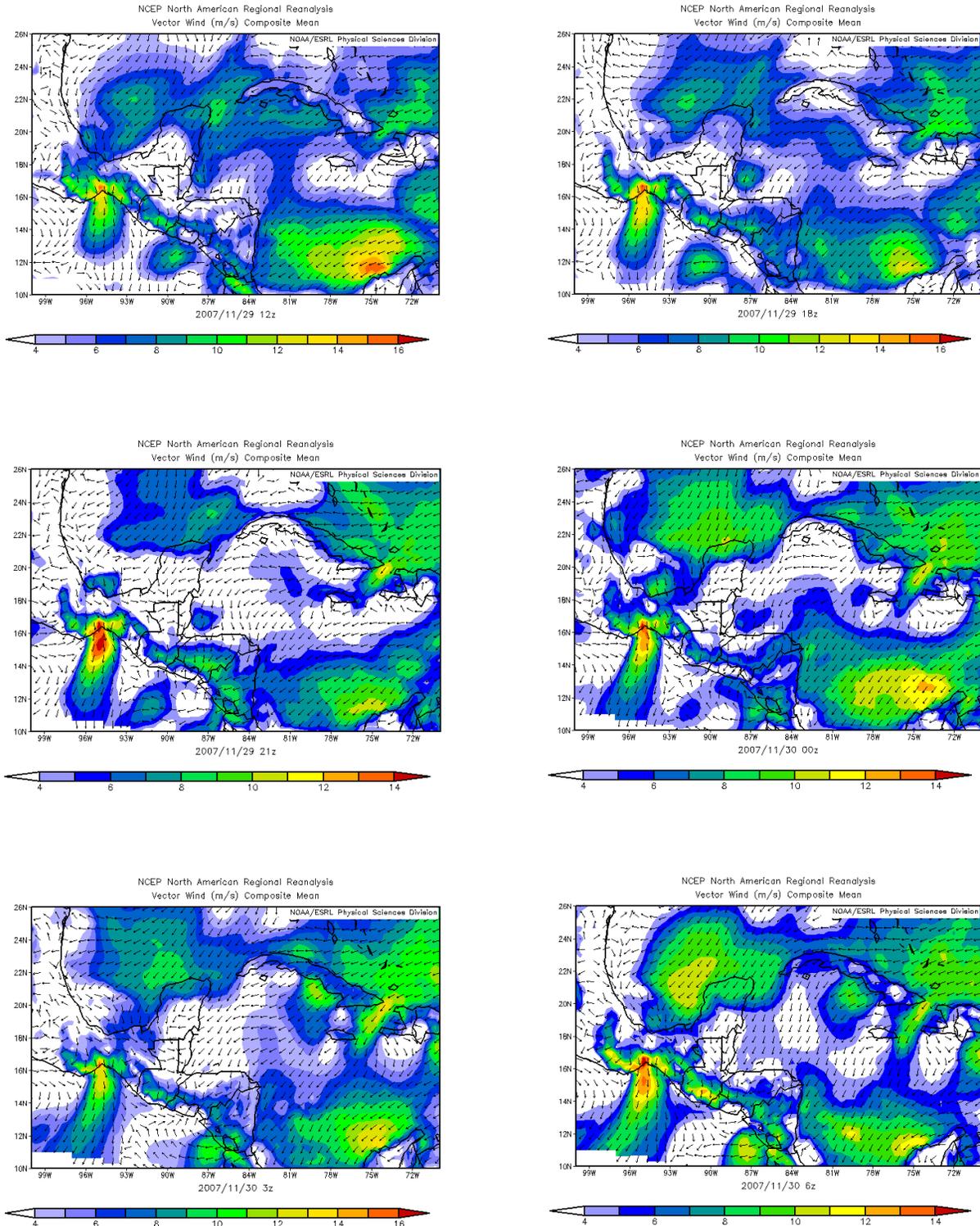


Figura 5. 20 Mapas de flujo de 1000MB de los días 29 y 30 de noviembre de 2007.
Fuente<https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl>

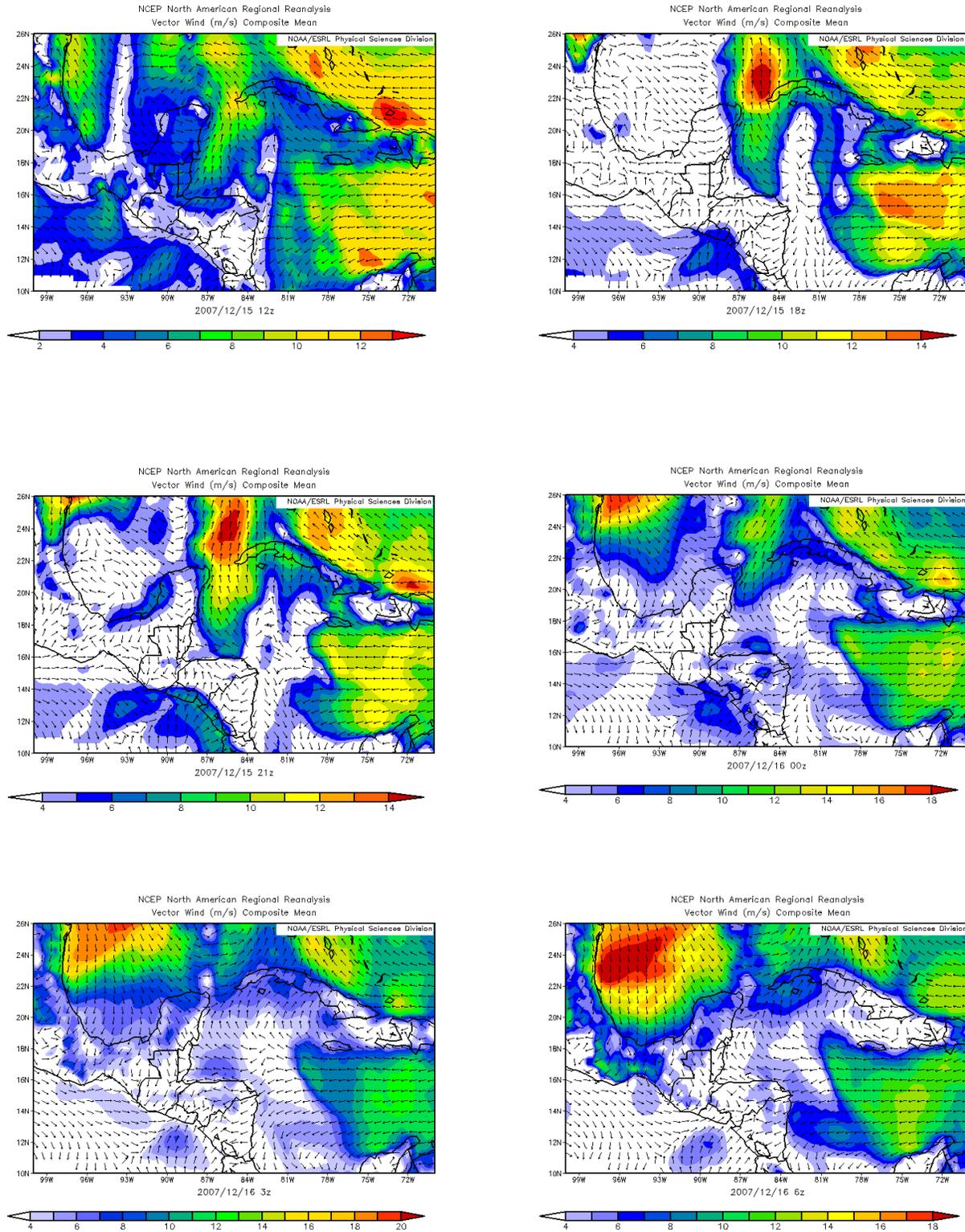


Figura 5. 21 Mapas de flujo 1000MB de los días 15 y 16 de noviembre de 2007. Fuente <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl>

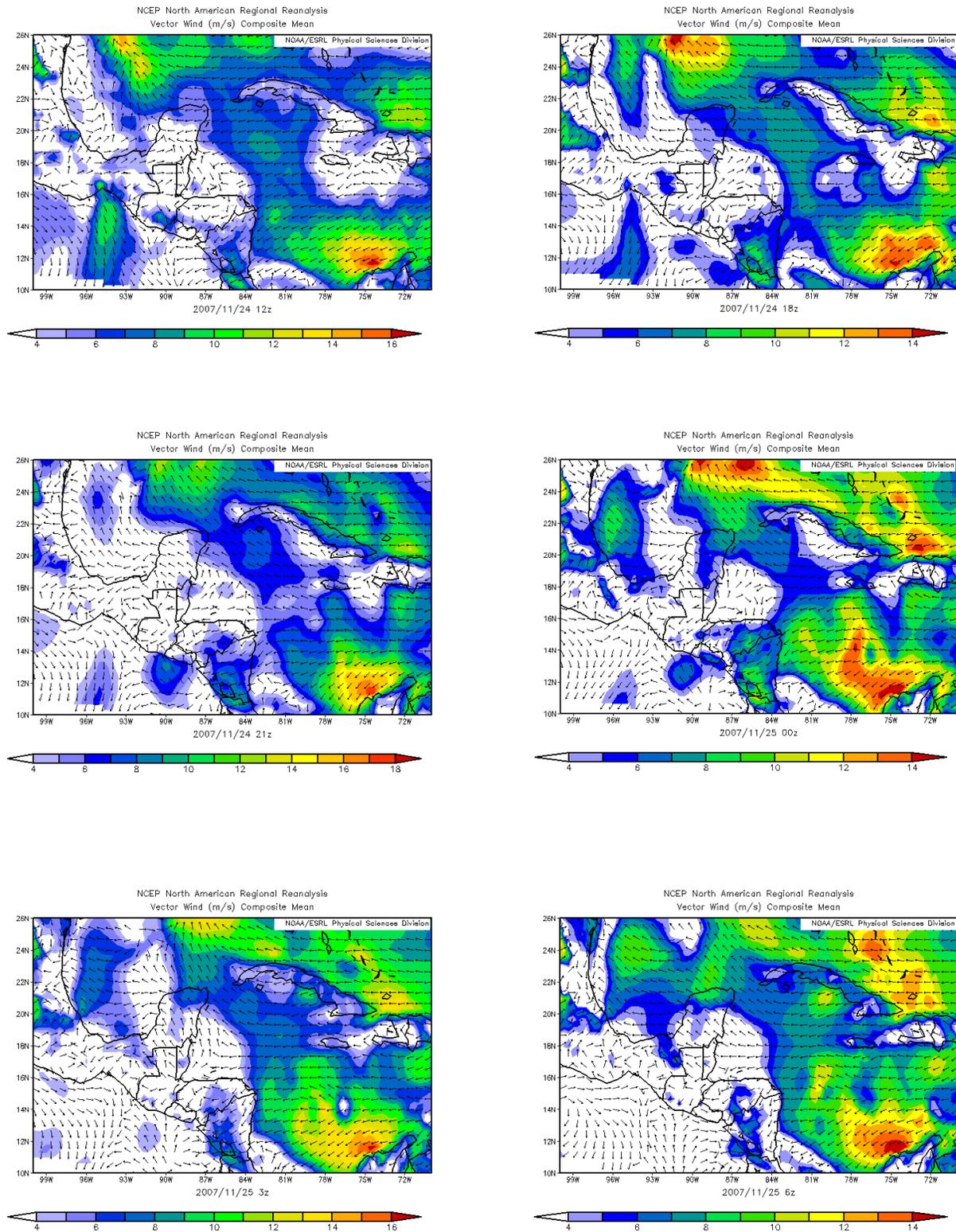


Figura 5. 22 Mapas de flujo 1000MB de los días 24 y 25 de septiembre de 2007.
Fuente<https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl>

5.6 Evaluación del impacto ambiental

La evaluación de impactos en la ciudad de Campeche, consistió en la identificación y cuantificación de los efectos causados por las principales actividades que se desarrollan en la zona sobre el depósito atmosférico húmedo. Lo anterior se llevó a cabo por medio de la matriz de Leopold y el método de Batelle-Columbus.

Los estudios de la EPA (US-EPA, 1994) en los Estados Unidos encontraron varios impactos ambientales, producidos sobre elementos ambientales importantes.

Materiales y construcciones

En los materiales, la lluvia ácida y las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- , provocan la corrosión de metales, el deterioro de pinturas y rocas, (ejemplos el mármol y caliza). Lo anterior causa la degradación de objetos, estatuas o monumentos culturales, edificios, puentes y automóviles, que requieren altos costos de mantenimiento (US-EPA, 1994).

Visibilidad

La visibilidad disminuye por efecto de los SO_4^{2-} y NO_3^- formados en la atmósfera a partir de las emisiones de SO_2 y NO_x . Según la US-EPA, los SO_4^{2-} contenidos en partículas representan del 50 al 70 % de la reducción de visibilidad, en la parte oriental de Estados Unidos de América (US-EPA, 1994).

Salud

Las partículas finas de SO_4^{2-} y NO_3^- pueden ser inhaladas por seres vivos, alojándose en los pulmones o penetrando al torrente sanguíneo; existe un gran aumento de las enfermedades y muertes prematuras por padecimientos cardíacos y pulmonares. Los aerosoles de SO_4^{2-} representan alrededor del 25% de las partículas finas (US-EPA, 1994).

5.6.1 Matriz de Leopold

Del análisis de la matriz de Leopold se obtuvo la tabla 5.5 la cual muestra la matriz de Leopold para la ciudad de Campeche.

Se analizaron 13 acciones que representaban posibles impactos en los 23 factores ambientales listados, permitiendo un total de 299 posibles impactos. Se analizó aquel par de acción - elemento ambiental, que sufriera cambios o impactos significativos. Se identificó un total 169 posibles interacciones a cuantificar. Se identificaron 69 impactos positivos y 105 impactos ambientales negativos producidos a cada elemento ambiental analizado. Las acciones incluidas en el análisis produjeron 64 impactos positivos y 103 impactos ambientales negativos.

Las acciones que produjeron mayor magnitud de impacto fueron: la preparación de terrenos para cultivos, la minería, la urbanización, y la reforestación. Los elementos ambientales más susceptibles a sufrir impactos negativos: la calidad del agua de lluvia, la calidad del aire (gases y partículas), los monumentos y edificaciones de la ciudad (ambos son el objetivo de esta tesis).

5.6.2 Aplicación del método de Battelle-Columbus modificado

Las tablas 5.6 y 5.7 muestran los sistemas ambientales y factores ambientales ponderados y analizados para este caso de estudio.

Tabla 5. 6 Ponderación de sistemas ambientales.

<i>Sistemas ambientales</i>	<i>Exp 1</i>	<i>Exp 2</i>	<i>Exp 3</i>	<i>Exp 4</i>	<i>Exp 5</i>	<i>Suma</i>	<i>Peso</i>	<i>UIP</i>
<i>Características físicas y químicas</i>	495	365	425	300	330	1915	0.383	383
<i>Condiciones biológicas</i>	165	255	165	100	100	785	0.157	157
<i>Factores culturales</i>	215	85	275	300	250	1125	0.225	225
<i>Factores socioeconómicos</i>	125	295	135	300	320	1175	0.235	235
<i>Total</i>	1000	1000	1000	1000	1000	5000	1	1000

Para obtener la importancia ponderada de cada sistema y factor ambiental se utilizó la ponderación de cinco expertos encuestados. Los datos recogidos mostraron que el sistema ambiental de mayor peso fue el de “Características físicas y químicas”, con 383 Unidades de Importancia Ponderal (UIP) de un total de 1000. Dentro de los factores ambientales de mayor UIP resultaron: calidad del agua de lluvia, calidad del aire (gases, partículas), monumentos, paisaje y zonas agrícolas.

Tabla 5. 7 Ponderación de factores ambientales.

<i>Factores Ambientales</i>	<i>Exp 1</i>	<i>Suma</i>	<i>Peso</i>	<i>UIP</i>				
<i>Forma del terreno</i>	125	50	50	20	30	275	0.055	55
<i>Calidad del agua de lluvia</i>	50	85	100	50	60	345	0.069	69
<i>Calidad del agua superficial</i>	50	25	30	20	10	135	0.027	27
<i>Calidad del agua subterránea</i>	40	50	30	10	40	170	0.034	34
<i>Calidad del aire (gases, partículas)</i>	95	25	95	100	90	405	0.081	81
<i>Visibilidad</i>	30	5	20	30	20	105	0.021	21
<i>Clima (micro)</i>	30	20	25	10	10	95	0.019	19
<i>Procesos de erosión</i>	25	65	25	20	30	165	0.033	33
<i>Procesos de deposición (sedimentación, precipitación)</i>	50	40	50	40	40	220	0.044	44
<i>Vegetación natural y endémica</i>	40	100	40	30	30	240	0.048	48
<i>Sistemas agrícolas</i>	45	50	45	20	30	190	0.038	38
<i>Animales terrestres, incluyendo reptiles</i>	55	80	55	25	20	235	0.047	47
<i>Aves e insectos</i>	25	25	25	25	20	120	0.024	24
<i>Paisaje</i>	55	30	55	150	100	390	0.078	78
<i>Monumentos</i>	130	25	110	100	50	415	0.085	85
<i>Sitios y objetos históricos o arqueológicos</i>	30	30	110	50	100	320	0.064	64
<i>Salud y seguridad social</i>	45	25	45	40	25	180	0.036	36
<i>Empleo</i>	10	25	20	70	30	155	0.031	31
<i>Infraestructuras y servicios</i>	10	40	10	50	50	160	0.032	32
<i>Red de transporte</i>	10	10	10	50	15	95	0.019	19
<i>Zonas agrícolas</i>	20	110	20	25	130	305	0.061	61
<i>Zona habitacional</i>	20	70	20	25	50	185	0.037	37
<i>Zona industrial y de servicios</i>	10	15	10	40	20	95	0.019	19
Total	1000	1000	1000	1000	1000	5000	1	1000

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas de la transformación de los datos en unidades ambientales comparables. La función de transformación que se utilizó para determinar la contaminación del aire por SO_4^{2-} y NO_3^- , Cl^- es de tipo lineal decreciente (Garmendia et al., 2005). Por lo tanto, la función que se utilizó es una recta que pasa por los puntos (Min 0) y (Máx 1). Las figuras 5.23 A, B, C y D muestra las gráficas de Calidad Ambiental (CA) SO_4^{2-} , NO_3^- pH y Cl^- , respectivamente.

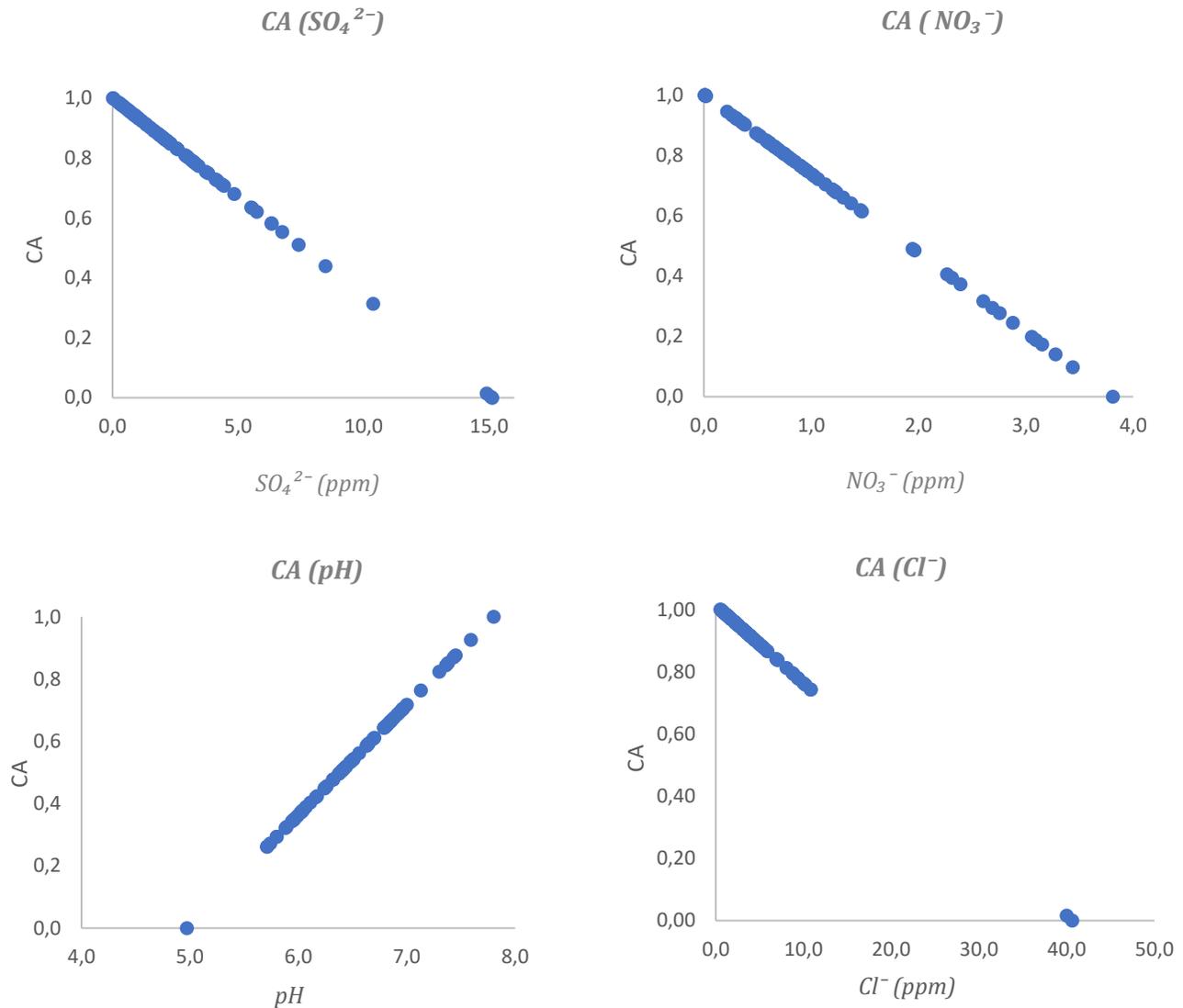


Figura 5. 23 Gráficas de Calidad Ambiental (CA). A) SO_4^{2-} . B) NO_3^- . C) pH. D) Cl^- .

La contaminación ambiental atmosférica tiene la mayor importancia para los fines de esta tesis, debido a que los NO_x y SO_x son los precursores del depósito ácido, ya que al entrar en contacto con los materiales impactan negativamente en su estado. Se realizó el cálculo de las Unidades de Impacto Ambiental (UIA) para los indicadores ambientales referentes a los contaminantes atmosféricos que impactan negativamente en la calidad de los monumentos en la ciudad de Campeche.

Tabla 5. 8 Cálculo de las Unidades de Impacto Ambiental.

	<i>Elementos ambientales</i>	<i>UIP</i>	<i>Con proyecto</i>		<i>Sin proyecto</i>		<i>UIA referente al proyecto</i>
			<i>CA</i>	<i>UIA</i>	<i>CA</i>	<i>UIA</i>	
<i>Calidad del agua de lluvia</i>	<i>SO₄²⁻</i>	150	0.7	105	0.8	120	75
	<i>NO₃⁻</i>	110	0.4	44	0.7	77	33
	<i>pH</i>	15	0.3	4.5	0.4	6	1.5
	<i>Cl⁻</i>	70	0.8	56	0.9	63	7
	<i>Total</i>	<i>345</i>		<i>209.5</i>		<i>266</i>	<i>56.5</i>

Las condiciones ambientales “con proyecto” se refieren a aquellas en las que se aplican medidas de control bajo las indicaciones del programa PSD. Para el caso “sin proyecto” se asumió una situación ambiental proyectada en la que se predijo las condiciones ambientales que se tendrían para un cierto tiempo posterior. Del análisis de las condiciones ambientales para los casos en que se realice un nuevo proyecto en la zona de estudio, se encontró que la calidad ambiental del lugar se pudiera conservar en 56.5 unidades de UIA. Este resultado nos indica la importancia de la aplicación del PSD.

5.7 Programa para la prevención del deterioro ambiental significativo (PSD) de la Ciudad de Campeche

Aunque la tendencia del pH del depósito húmedo en la zona de estudio es a la alcalinidad, se presentan condiciones de contaminación atmosférica deterioran la ciudad de Campeche, lo que hace inminente realizar acciones de control.

Debido a que se reconoce la necesidad de tener un control en el continuo crecimiento económico, con la equidad social, la protección y administración eficiente del medio ambiente, es necesario establecer límites permisibles para zonas de importancia natural y cultural como la ciudad de Campeche.

El PSD está diseñado para: proteger la salud pública y el bienestar social, preservar, proteger y mejorar la calidad ambiental en las áreas patrimonios de la humanidad de México o sitios de

valor recreativo; asegurar que el crecimiento económico se produzca de una forma compatible con la preservación de los recursos naturales existentes.

Este programa para la Prevención del Deterioro Ambiental Significativo se deberá aplicar cuando se establezcan nuevas fuentes de contaminación o se modifiquen las existentes. Por lo tanto, para cumplir con el PSD, se tendrá que realizar un análisis de evaluación de la CA del área de estudio, un monitoreo ambiental de fondo para establecer medidas de mitigación o aplicar la mejor tecnología disponible para contrarrestar el impacto potencial sobre la zona. El deterioro significativo se presenta cuando la concentración de un contaminante excede lo establecido en el PSD de manera que afecte la zona. Y un incremento en el PSD es el aumento máximo permisible de la concentración que se autoriza por encima de una línea base para cada contaminante.

5.8 Propuesta de medidas de mitigación

A continuación, se describen las medidas que pueden considerarse al establecer una nueva fuente de contaminación dentro de la Ciudad de Campeche o para el manejo de las ya existentes. Se considera una medida de mitigación a la implementación o aplicación de cualquier política, estrategia, obra y/o acción tendiente a eliminar o minimizar los impactos adversos que pueden presentarse durante las etapas de ejecución de una actividad. Una medida de mitigación puede mejorar la calidad ambiental aprovechando las oportunidades existentes.

Medidas a tener en cuenta ante el establecimiento de industria, comercio o servicios.

- No permitir, dentro de la ciudad, el establecimiento de industrias en ninguno de los sectores económico.

- En las afueras de la ciudad, se permitirá la puesta en marcha de pequeños productores.

- Fortalecer las actividades de inspección y vigilancia dentro de la industria, comercios o servicios, principalmente a escala local.
- Cumplir con las normas para el establecimiento de industrias como la Cédula de Operación Anual y la Licencia Única Ambiental.
- Implementar mecanismos de autorregulación y mejoramiento de la gestión ambiental en pequeñas y medianas empresas.
- Reducir las emisiones de gas LP en instalaciones domésticas.
- Implementar el uso de energía solar en sustitución de combustibles fósiles.
- Establecer estaciones de monitoreo de la calidad del aire.
- Evaluar la factibilidad de suministrar gasóleo industrial con bajo contenido de azufre.
- Evaluar la factibilidad de suministrar gas LP con bajo contenido de olefinas.
- Solicitar un servicio integral de recolección de residuos en el sitio donde se lleva a cabo la instalación de una nueva fuente de contaminación.
- Evitar el vertimiento al mar de residuos industriales o municipales, generados por las industrias locales.
- Contar con mantenimiento periódico de los vehículos y maquinaria utilizados, asegurando la afinación y reemplazo de piezas o partes defectuosas.
- Minimizar el tráfico vehicular, haciendo hincapié en rutas claramente identificadas.
- Realizarán la extracción de materiales únicamente en bancos de materiales

autorizados, en los cuales se deberá contar con medidas de control para reducir la generación de contaminantes, especialmente partículas.

- Aplicar medidas restrictivas en cuanto al manejo de sustancias químicas nocivas o contaminantes, de manera que se deberá promover el uso productos biodegradables.

Medidas a tener en cuenta en el sector del transporte

En el caso del sector del transporte se proponen medidas para el mejoramiento del funcionamiento del mismo encaminado a la reducción de emisiones en la ciudad. Las mismas consisten en:

- Renovar los autobuses del sistema de transporte colectivo.
- Fomentar del uso de combustibles alternativos en vehículos del sistema de transporte público de pasajeros.
- Reorganizar del sistema de transporte y estructura vial.
- Impulsar la utilización de gas LP y gas natural en el transporte público.
- Implementar programas de verificación de vehículos a Diesel que circulan dentro de la ciudad.

Sin embargo, las medidas anteriores no recaen en un cambio radical en la disminución de los contaminantes dentro de la ciudad, por lo tanto, se recomiendan las medidas siguientes:

- Introducir vehículos eléctricos, como único tipo de transporte dentro de la ciudad.
- Establer corredores de transporte sin incluir rutas dentro del centro de la ciudad.

- Pavimentar las vialidades en zonas periféricas de la ciudad.
- Impulsar el uso de la bicicleta dentro de la ciudad como forma de turismo ecológico, estableciendo accesorias para su guarda a bajo precio.

Medidas a tener en cuenta en el sector de la agricultura

- Realizar programas de asistencia técnica para mejorar las prácticas de manejo del suelo, control de malezas, fertilización, usos de fertilizantes y preparación de suelos.
- Controlar eficientemente los incendios forestales.
- Establecer un control para las prácticas y quemas agrícolas.
- Proteger, inspeccionar y vigilar los recursos naturales, especialmente las Zonas protegidas y Reservas de la Biósfera.
- Implementar programas de recuperación de hábitat a través de la plantación de especies adecuadas.
- Diseñar y hacer de conocimiento colectivo un programa de forestación y preservación de zonas arboladas.
- Recuperación, restauración, conservación y ampliación de las áreas verdes urbanas de la ciudad.

Medidas a tener en cuenta en cuanto a los asentamientos humanos

- Controlar la realización de asentamientos humanos dentro y fuera de la ciudad de Campeche, principalmente en las zonas núcleos.

5.9 Propuesta de medidas de control

El programa PSD recomienda una serie de medidas de control, que incluye la instalación de la mejor tecnología disponible para el control de las emisiones. Estas medidas no estructurales o modificaciones en los procesos, se basan en obtener el máximo grado de control para cada caso a aplicar. Se deben proponer medidas de control caso por caso, dependiendo de la fuente específica de contaminación. Estas incluyen el cambio o tratamiento de combustible y la aplicación de técnicas innovadoras para la combustión. Puede ser la aplicación de un nuevo diseño, equipo o la aplicación correcta de normas de operación y de emisión existentes. Las medidas de control deben de tomarse también en pequeñas industrias y servicios, por lo que se sugieren mejorar los procesos de combustión e instalar sistemas de control de combustión en establecimientos.

Como se ha observado en la presente tesis, el mayor impacto en la calidad atmosférica en la ciudad es producto a las concentraciones de SO_4^{2-} . Por lo tanto, las principales medidas de control (o estructurales) fueron dirigidas a la desulfuración de los procesos industriales. Las tecnologías de desulfuración en un proceso industrial, se caracterizan según el momento en que se aplican (Rodas et al., 2003).

- Antes de la combustión (precombustión): Referido al tratamiento químico del combustible antes de ser inyectado a la caldera u horno. Entre las tecnologías más novedosas y que se recomiendan, para la zona de estudio, se tiene la técnica de Hidrodesulfuración, (HDS). La misma consiste en someter al combustible fósil líquido a altas presiones y temperaturas, inyectando hidrógeno y en presencia de un catalizador, para reducir los compuestos orgánicos sulfurados presentes en dicho combustible a H_2S (Rodas et al., 2003). Como inconveniente principal de esta tecnología se encontró que su costo de operación es relativamente alto en la actualidad, por el uso de hidrógeno durante el proceso.
- Durante la combustión: Basadas en la inyección de compuestos químicos absorbentes en el interior de la flama durante el proceso de combustión. Los compuestos estarán constituidos principalmente por soluciones acuosas alcalinas de cal-caliza, de manera que el SO_2 formado

en la zona de oxidación de la flama se neutraliza y es absorbido por esta solución con la subsiguiente formación de SO_4^{2-} .

- Después de la combustión (poscombustión): Estas técnicas son conocidas también como tecnologías de desulfuración de gases de combustión, ya que se basa en el tratamiento de los gases productos de la combustión. Según Rodas et al., (2003) esta técnica se puede subdividir en desulfuración con regeneración (el material absorbente de SO_x puede ser recuperado al final del proceso, y puede llevarse a cabo en un medio húmedo o seco), o también sin regeneración (el material absorbente se combina químicamente con los SO_x , obteniendo subproductos comerciables).

Para la mejora de la calidad atmosférica en la ciudad de Campeche, se recomienda la modernización paulatina de las centrales termoeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a sistemas de ciclo combinado con gasificación integrada. Esa medida se basa en el cambio de combustible para la obtención de energía eléctrica. De no realizarse un cambio en el combustible y las CT trabajen con combustibles fósiles, se recomienda la reducción de compuestos sulfurados, mediante las tecnologías de poscombustión. Dentro de las tecnologías de poscombustión se recomiendan las que ocurren sin regeneración, ya que los desechos de esta pueden manejarse con carácter comercial. Dentro de la técnica sin regeneración se sugiere la que se realiza por vía seca, ya que en la península de Yucatán (donde se ubican las CT), no cuenta con aguas superficiales disponibles para su desecho, teniendo entonces que destinar espacios para el confinamiento de estos residuos.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El depósito atmosférico húmedo, presentó una tendencia natural a la alcalinidad del pH del agua de lluvia, por lo que las sustancias alcalinas afectan significativamente la acidez de las precipitaciones, ya que neutralizan una porción de las especies ácidas presentes en la lluvia.

Las trayectorias de retroceso realizadas con el HYSPLIT indican que la mayoría de las fuentes antropogénicas de precursores del depósito húmedo atmosférico se encuentran al E de la ciudad de Campeche, por lo que provienen de la península de Yucatán.

La descripción meteorológica realizada mostró una importante frecuencia de vientos de región E, con algunos casos de región N donde fue mayor la contribución de aerosoles marinos por lo que se asoció este comportamiento a una TSS de tipo VII, o Zonas Frontales (ZF).

Para la implementación del PSD se identificaron, con la Matriz de Leopold, los impactos sobre la ciudad de Campeche ocasionados o relacionados con el depósito atmosférico húmedo. Las acciones que causan mayor impacto ambiental en la calidad atmosférica fueron:

- a) Preparación de terrenos para cultivos
- b) Extracción de materiales
- c) Urbanización.
- d) Reforestación

El método de Battelle-Columbus mostró que de aplicarse el PSD, se lograría una disminución en el impacto ambiental por efecto del depósito atmosférico húmedo, que sufre la ciudad de Campeche.

La elaboración del PSD para la ciudad de Campeche, implica la mejora y/o renovación de

tecnología, por lo que se recomienda:

- a. La reducción de azufre en los combustibles empleados en las centrales termoeléctricas u otras fuentes locales.
- b. La implementación de equipos de control de contaminantes en las fuentes nuevas y ya existente.
- c. Proteger los monumentos del desgaste ocasionado por los agentes de la intemperie, principalmente depósito atmosférico húmedo, aislándolos con algún tipo de recubrimiento, para la cual se debe de contar con especialistas en restauración.
- d. Evaluar la posible actividad de las fuentes emisoras de precursores locales en periodos establecidos, tomando en cuenta las condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de contaminantes atmosféricos.

RECOMENDACIONES

- Investigar acerca del régimen de brisas y otras condiciones locales o de mesoescala, para la determinación de su influencia en el transporte de contaminantes.
- Incrementar el número de sitios para el muestreo del depósito atmosférico húmedo y seco en el Golfo de México.
- Analizar el depósito atmosférico seco de la ciudad de Campeche con el fin de tener cuantificado su aporte en el depósito atmosférico húmedo.
- Activar una red internacional para evaluar el depósito atmosférico y la calidad ambiental, que permita establecer medidas de minimización, prevención y control.
- Realizar un estudio de costo/beneficio para sustituir el transporte actual por transporte eléctrico exclusivamente, en un polígono que abarque los monumentos en riesgo.
- Elaborar el inventario de emisiones en la zona de estudio.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- *Alonso, A. (2013). Estudio de algunos factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación atmosférica en La Habana. Tesis de Licenciatura. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Cuba.*
- *Arias R. J, M y Guzmán. I, H. (2009). Pesca y petróleo en el Golfo de México Asociación Ecológica Santo Tomás A.C. 2009.*
- *Arnaiz M., Martín A. (1977). Alteración de los materiales pétreos de obras monumentales, acción de la contaminación ambiental". Informe del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 1977.*
- *Arya, S. P. S. (1988): Introduction to micrometeorology. International Geophysics Series. Academic Press, New York. 303 pp.*
- *Allen, G. C., El-Turki, A., Hallam, K. R., McLaughlin, D., Stacey, M. (2000). Role of NO₂ and SO₂ in degradation of limestone. British Corrosion Journal, 35, 35-38*
- *Andrés, A., Eduardo, Ferrero, J., César E. Mackler M. (1999). Monitoreo de contaminantes del aire en la ciudad de Rosario. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rosario.*
- *Antunez Arguelles Q. M (2013) Plan para la prevención del deterioro ambiental significativo de la zona Arqueológica de el Tajín. Tesis que para optar por el grado de Maestro en Ingeniería. UNAM, México, D. F.*
- *Barcina L., Espina A., Suárez M., García J., Rodríguez J. (1997). Characterization of monumental carbonate stones by thermal analysis (TG, DTG and DSC). Thermochemica Acta 290. Behrends, B., G. Liebezeit. 2006. A Theoretical Environmental Impact Assessment of the Use of a Seawater Scrubber to Reduce SO_x and NO_x Emissions from Ships. Alemania.*
- *Bossi M, Matich D y Juan Manuel Pignani. (2000). Difusión de los productos de combustión de PVC (policloruro de vinilo) en la atmósfera sobre la ciudad del Rosario.*
- *Bravo, A. H., Soto, R., Sosa, R., Sánchez, P. (2003). Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de monumentos mayas mexicanos. Ingeniería Investigación y Tecnología, 195-205.*

- *Bravo A. H., R. Soto A., R. Sosa E, P. Sánchez A., A.L. Alarcón, J. Kahl & J. Ruíz. (2006). Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico. Environmental Pollution. 144, 655-660.*
- *Castro-Mora, J. (2002). Monografía geológica minera del Estado de Campeche. Secretaría de Economía, Coordinación General de Minería. México.*
- *CFE, (2009). Conoce sobre la electricidad. Programa de obras e inversiones del sector eléctrico 2009-2018. México: Subdirección de Programación; Coordinación de Platinificación*
- *Cheng, J. R. y Castillo, R. A. (1984). Study of Marble Deterioration at City Hall, Schenectady New York. Journal of the Air Pollution Control Association. 34 (1), 15-19.*
- *Cook D., Van Order A. C. Reyes, J. Oh, S. J. Balasubramanian R., Carpio, J. J. Townsend E. (2000). Atmospheric corrosion in marine environments along the Gulf of México. In Marine Corrosion in Tropical Environment. S. W. Dean G. Hernández-Duque Delgadillo y J. B. Bushman Eds. USA. ASTM STP 1399. pp 75-97*
- *Córdova S, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre - 2009, marzo - 2010 Terra Nueva Etapa [en línea], XXVII (julio-diciembre): [Fecha de consulta: 11 de octubre de 2017] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72121706005>> ISSN 1012-7089*
- *Cotán-Pinto Arroyo Santiago. Valoración de impactos ambientales. Director de División de Medio Ambiente, INERCO Sevilla. Diciembre de 2007.*
- *CONAPESCA. 2011. Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2011. sagarpa/conapesca/Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. 311p.*
- *Cuesta O., Wallo A., Collazo, A., López, C., Roque, A., Campos, A., Alvarez, L., González, R., Arriba, A., González, M., Pérez, D., Labrador, R., Sánchez, P., Rivero, I., Echevarría, E., Ananias, G. y Manso, R. (2000): Caracterización del Medio Ambiente Atmosférico en la Rivera de la Bahía de la Habana.*
- *Cureño G. I, V. (2010). Determinación de factores de emisión aplicables a México para centrales termoeléctricas que consumen combustóleo como combustible. facultad de Ingeniería, UNAM.*

- *Díaz M; Navarro A, E; Rodríguez, A; Paumier V; Alvarez J; La Maza J, N. (2007). Gestión de la contaminación atmosférica en la franja Norte de crudos pesados Habana – Matanzas. Revista Cubana de Química Vol. XIX No 1: 2220-24.*
- *Durán, R. (1987). Descripción y análisis de la estructura y composición de la vegetación de los petenes del noroeste de Campeche, México, Biótica, 12(3): 181-198.*
- *Corvo, F., Pérez T., Martin Y., Reyes, J., Dzib L., Gonzalez-Sánchez, J., Castañeda, A. (2008). Time of wetness in tropical climate: considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard*
- *Corvo.F & J. Reyes & C. Valdes & F. Villaseñor & O. Cuesta & D. Aguilar & P. Quintana. (2010). Influence of Air Pollution and Humidity on Limestone Materials Degradation in Historical Buildings Located in Cities Under Tropical Coastal Climates. Water Air Soil Pollut 205:359–375*
- *Feddema, J. J., Meierding, T. C. (1987). Marble weathering and air pollution in philadelphia. Atmospheric Environment, 21 (1), 143-157.*
- *Fernández, A. y Díaz, Y. (2005). Catálogo de Procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el período 1979-1993. GeoCuba Gráfica Cienfuegos., ISBN 959-02-0355-8. 167 pp.*
- *Galindo-Leal, C. (1999). La gran región de Calakmul: Prioridades biológicas de conservación y propuesta de modificación de la Reserva de la Biosfera. Reporte Final a World Wildlife Fund – México, México D.F.40 pp.*
- *García. E. (2004 a). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen. Instituto de Geografía UNAM. Quinta edición.*
- *García C, J.C.; Diego L, C.; Fdez. de Arróyabe H, P.; Garmendia P, C. y Rasilla A, D. (Eds.) (2004 b). El Clima entre el Mar y la Montaña. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, nº 4, Santander.*
- *García C, J. A; Arreguín S, F; Hernández V, S; Lluch C; Daniel B. (2004 c). Impacto ecológico de la industria petrolera en la sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión Interciencia [en línea] (2004 c), 29 (junio): [Fecha de consulta: 24 de mayo de 2017] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33909304>> ISSN 0378-1844*

- Garmendia, A.; Salvador, A.; Crespo, C. Y Garmendia, L. (2005). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Pearson, Prentice Hall. Madrid, 396 pp.
- Garreaud R. D; Rutllant, J. (2006). *Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica en Santiago*. Capítulo 2 en *Episodios críticos de contaminación atmosférica en Santiago*. Editorial Universidad. Pp 36-53.
- Harris, D, C. *Análisis químico cuantitativo*. 2a edición. Ed. Reverté S.A. (1999). España. P. 273.
- INEM, (2006): *Inventario Nacional de Emisiones de México 1999*. SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, INECC.
- INECC (a) <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/496/cap3.html>. Última revisión 19 de octubre de 2016.
- INECC (b) <http://www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/525-calair-cont-primarios-secundarios?format=pdf>. Última revisión 19 de octubre de 2016
- INECC (c) <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/582-calair-tipos-modelos/> (Consulta: 15 marzo 2016).
- INEGI, (2015): Instituto Nacional de Estadística y Geografía: www.censo2010.org.mx/ (Consulta: 25 noviembre 2015).
- INEGI, (1996). *Anuario Estadístico de Campeche, Campeche, edición 1996* (Consulta: 25 noviembre 2016).
- INSMET, (2007). *Centro de Pronóstico del Tiempo*. Instituto de Meteorología, Cuba 2007.
- López, Carlos M. (2006): *Introducción a la Gestión de la Calidad del Aire*.
- 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.
- Masters, G. M. P. E Wendell (2008) *Introduction to Environmental Engineering and Science*. 3ed. Pearson, prentice-hall.

- Marinoni N., Pavesa A., Bugini R., Di Silvestro G. (2002) "Black limestone used in Lombard architecture". *Journal of Culture Heritage* 3., 241-249.
- Maldonado, L., Veleza, L., Díaz-Ballote, L. (2011). *Characterization of limestones for building in the Yucatan Peninsula, Mexico, Appl Phys A, Mater. Sci. Processing.* 103, 1105-1110.
- Mendoza A, Graniel M, (2007). *Evaluación exploratoria de la dispersión de contaminantes emitidos por operaciones de quema de gas amargo en la Sonda de Campeche.* Vol 23, Num 3.
- Miss O, M. (2011) *Diseño del programa para la prevención del deterioro ambiental significativo (PSD) en la Reserva de la biósfera de Calakmul, Campeche. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. UNAM, México.*
- Miller P, Van Atten C., Bradley M. & Associates. (2004). *North American Power Plant Air Emissions. Comission for Environmental Cooperation of North America; Canadá, Estados Unidos, 2002.*
- Mora, P. V. (1994). *Verificación del modelo de pronóstico de dispersión de contaminantes atmosféricos HOTMAC-RAPTAP, para el Valle de México. Tesis de maestría en Ingeniería ambiental. IPN/IMP, México*
- NADP. *National Atmospheric Deposition Program/ National Trens Network. (2004) www.nadp.sws.uiuc.edu (Consulta: noviembre 2016).*
- Pasquill, F; Smith, F. R. 1983. *Atmospheric Diffusion. John Wiley and Sons Inc., New York, p. 440.*
- Quirarte, O. (2010). *Variaciones de la acidez de la lluvia en la ciudad de San Francisco de Campeche y la Reserva de la Biosfera de Calakmul (Zona Arqueológica) durante 2006 y 2007. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Campeche.*
- Raga, G. B., Baumgardner, D., Castro, T., Martínez, A., Navarro, N., González, R. (2001). *Mexico City air quality: a qualitative review of gas and aerosol measurements (1960– 2000). Atmospheric Environment* 35,4041–4058.
- Ramírez-Rodríguez, M. *La pesquería de camarón en Campeche: Desarrollo histórico y perspectiva. Ciencia Pesquera (2015) 23(1): 73-87.*

- Reyes, J. (1998). *Influencia de los principales factores atmosféricos y de la calidad del aire en la corrosión atmosférica en la costa sureste del Golfo de México. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana. Boca del Rio, Veracruz. México.*
- Reyes, J. (2005 a). *Evaluación de la degradación de materiales pétreos y cementantes constituyentes de monumentos históricos, patrimonio cultural de la humanidad, mediante exposición natural y ensayos acelerados. Fondo Nacional de Ciencia Básica Clave SEP-2004-C01-46434-Y. Universidad Autónoma de Campeche.*
- Reyes J. (2005 b). *Research Project CONACYT-46434-Y. Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Universidad Autónoma de Campeche, México.*
- Reyes Trujeque, J; Góngora Góngora H. A; Corvo Pérez F; Pérez López T. *Atmospheric corrosion and microclimates at Campeche, México. (2011) Proceedings X International NACE Corrosion Section Congress, XX International Material Research ongress. Can-Cun Quintana Roo, México.*
- Reyes J; Hermosín B; Sáiz-Jiménez C. (2006) "GC/MS en el estudio del proceso de deterioro de monumentos históricos: caracterización de la costra negra presente en la Catedral de Sevilla". *En: la ciencia de materiales y su impacto en la arqueología Vol III. D. Mendoza, J. Arenas, J. L. Ruvalcaba, V. Rodríguez, Eds. Volumen III. México. Innovación Editorial Lagares. 253- 280. ISBN970-773-269-5.*
- Reyes J, Pérez T, Corvo F, Mendoza-Cruz L, Silva-León I. (2013) *La degradación de materiales metálicos y pétreos en San Francisco de Campeche. Centro de Investigación en Corrosión. Universidad Autónoma de Campeche CAC-CIMHA. Incluido en Conservación de materiales de interés histórico y artístico. Primera edición: 2013 Morelia, Michoacán, México D.R. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo pags. 97-130.*
- Ricker, M., (1998). "Evaluación económica del enriquecimiento de la selva con especies nativas", en D. H Benitez et al (eds). *Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México. Conabio-INE, México. pags. 45 49.*
- Rodas G Arturo., Georgina Blass A. y Luz A. Panamá T. (2003). *Tecnologías de desulfuración: pasado, presente y futuro. Boletín IIE, enero-marzo del 2003. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México.*
- Rodríguez, D. et al. 2008. *Resultados preliminares de cálculo de la altura de la capa de mezcla a través del uso del Global Forecast System. Convención Trópico. ISBN 978-959-282-079-1, p. 72-89, 2008. La Habana, Centro de Convenciones Capitolio, Cuba, p. 16-24.*

- *Rodríguez, D. et al. 2012. Estudio de variables meteorológicas secundarias que intervienen en la difusión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio la comunidad de Santa Lucía. Revista Cubana de Meteorología, v. 18, n. 2, p.77-92.*
- *Serrano G, J, A. (2007). Estudio Comparativo de la simulación de de dispersión de contaminantes en la atmósfera para estudios de Impacto Ambiental.*
- *SE. Secretaría de Economía. Información económica y estatal Campeche.2015.*
- *SEMARNAT, (2015). Definición y objetivos de la Manifestación de Impacto Ambiental <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/impactoambiental/Paginas/evaluacion.aspx> (Consulta: 2 noviembre 2015).*
- *SEMARNAT, (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. Cuadernos de divulgación ambiental Primera edición.*
- *SENER, (2006). Prospectiva del sector eléctrico 2005-2014. Secretaría de Energía, Planeación Energética; Integración Política Energética Nacional, México, 2006.*
- *SENER, (2010). Datos Técnicos de las Principales Centrales de CFE en Operación en 2008.*
- *Sosa, E. R., H. Bravo A., P. & P. Sánchez A. (2009). La importancia de la prevención del deterioro ambiental significativo en latinoamérica. ACODAL (Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental). Año 51, No. 224. Pp 45-52 ISSN 020-0798. Bogotá, Colombia.*
- *SECTUR, (2014). Estudio de Competitividad Turística del Destino Campeche. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE.*
- *Torres G. F, A. (2009). Efecto de la lluvia en materiales pétreos del patrimonio histórico del Estado de Campeche. Tesis de maestría en Ciencias marinas, en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. México.*
- *Trejo V. R; Villagómez P. L. (2011). Método Propuesto para Estimar la Altura de Capa de Mezcla en la Atmósfera, con ayuda de la Aviación Investigación. Departamento de Ing. Química, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. México. Conciencia Tecnológica No. 44, julio-diciembre 2011.*

- UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Criterios de selección: <http://whc.unesco.org/en/criteria/> (Consulta: octubre 2016).
- US-EPA: US. 1994. Environmental Protection Agency. "Quality assurance handbook for air pollution measurement systems", V-5 Precipitation Measurement Systems. EPA – 600/R-94/038e.
- US-EPA. (2005). 40 CFR 52.2630. Prevention of significant deterioration of air quality. Code of Federal Regulations. Title 40: Protection of Environment.
- Uzcanga P. N, G; Maya M. A; Cano G. Alejandro de Jesús. (2012) Diagnóstico Sectorial para la Planeación en el Estado de Campeche. Centro de Investigación Regional Sureste Campo Experimental Edzná San Francisco de Campeche, Campeche, México. Septiembre de 2012. Publicación Especial No. 2.
- Vidal de los Santos, E., J. Franco. Impacto ambiental: una herramienta para el desarrollo. AGT Editor. México, (2009).
- Videla H.A., Herrera, L. K. (2004). Detrioration of three churches of the Latin Amerucal cultural heritage. A comparative study of wheatering effects in diferents urban monuments. Air pollution and cultural heritage. Saiz-Jiménez Ed. Amsterdam. Taylor and Francis Group (Balkema Ed). 177-182. ISBN 90 5809 682 3.
- Villaseñor, F. (2008). Uso de técnicas pasivas para el muestreo de contaminantes atmosféricos en el estado de Campeche. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Campeche.
- Villaseñor R., Magdaleno M., Quintanar A., Gallardo J.C., López M.T., Jurado R., Miranda A., Aguilar M., Melgarejo L.A., Palmerín E., Vallejo C.J. y Barchet W.R. (2003). An air quality emission inventory of offshore operations for the exporation and production of petroleum by the Mexican oil industry. Atmos. Environ. 37, 3713–3729.
- Villalobos-Zapata, G. J., y J. Mendoza Vega (Coord.), 2010. La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (conabio), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México, 730 pp.
- WMO (1990): Compendio de Meteorología. Química Atmosférica y Meteorología de la Contaminación del aire. Vol II. Parte 6. No.364. 237 pp.

- *WMO (1996): Report of the Meeting of Experts on Atmospheric Urban Pollution and the Role of National Meteorological Services (NMSs). Geneva. 7-11 October. GAW. 26 p.*

ABREVIATURAS

D.H. Depósito húmedo

D.S Depósito seco

DOF Diario Oficial de la Federación

EIA Evaluación de Impacto Ambiental

LGEEPA Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

MIA Manifestación de Impacto Ambiental

NAAQS Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental

PSD Prevención del Deterioro Significativo

SEMARNAT Secretaría Medio Ambiente y Recursos Naturales

UIA Unidades de Impacto Ambiental

US-EPA Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

CFE Comisión Federal de Electricidad

UNAM Universidad Nacional Autónoma de México

WMO Organización Meteorológica Mundial

PEMEX Petróleos Mexicanos

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

NADP Programa Nacional de Deposición Atmosférica

msnm Metros sobre el nivel del mar

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía

CA Calidad Ambiental

ha hectárea

t toneladas

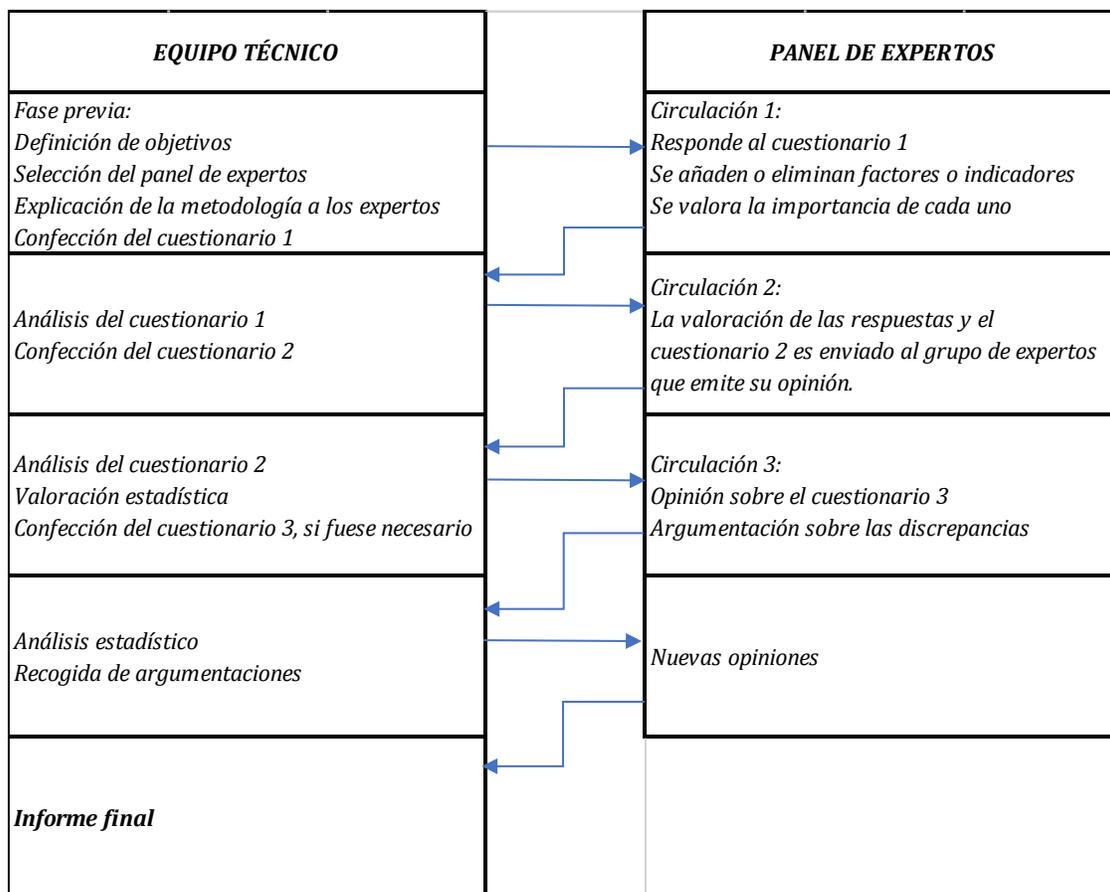
RMNE Región Marina Noreste del Golfo de México

RMSO Región Marina Suroeste

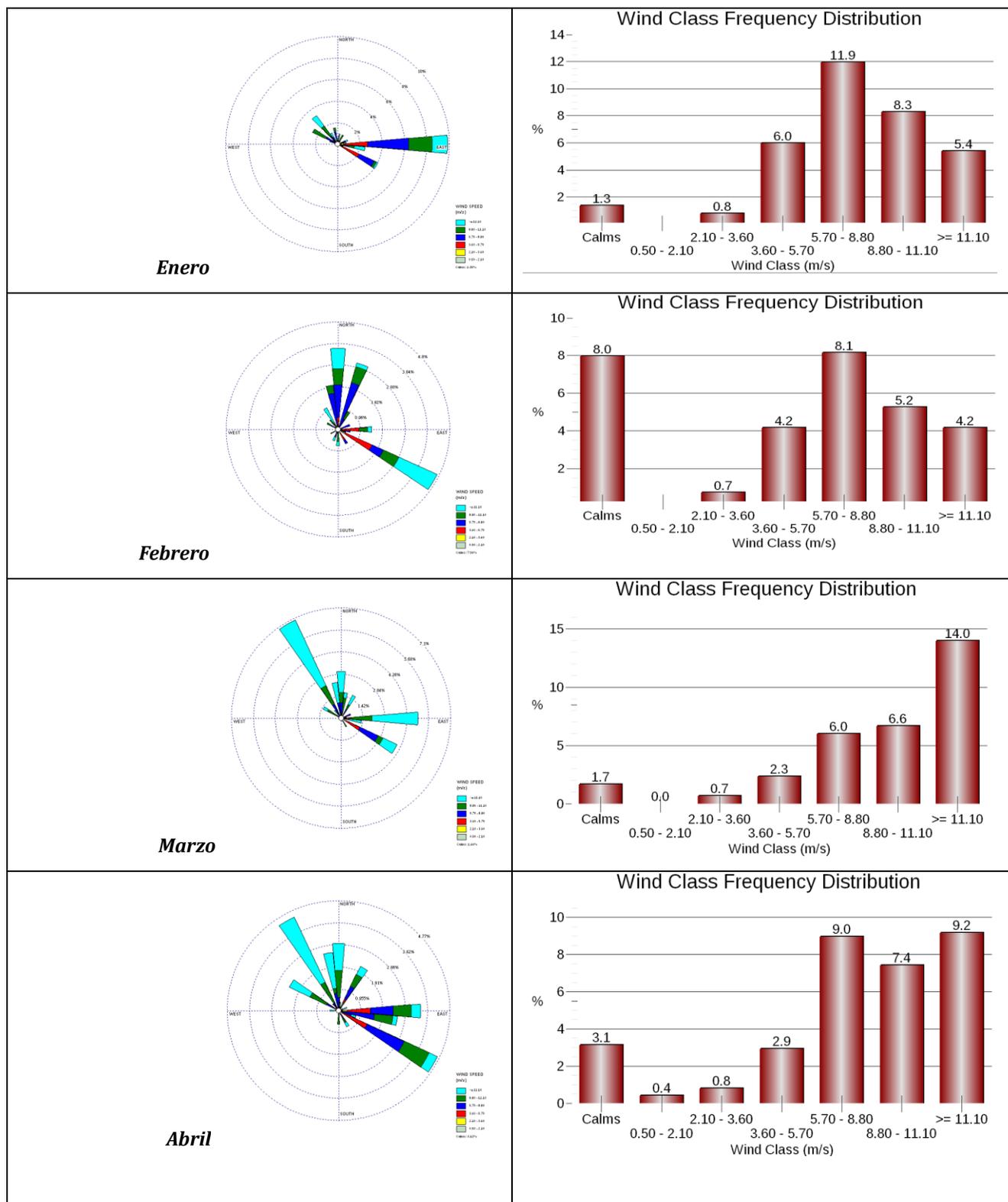
SMCA Sistema de Monitoreo de Calidad Ambiental

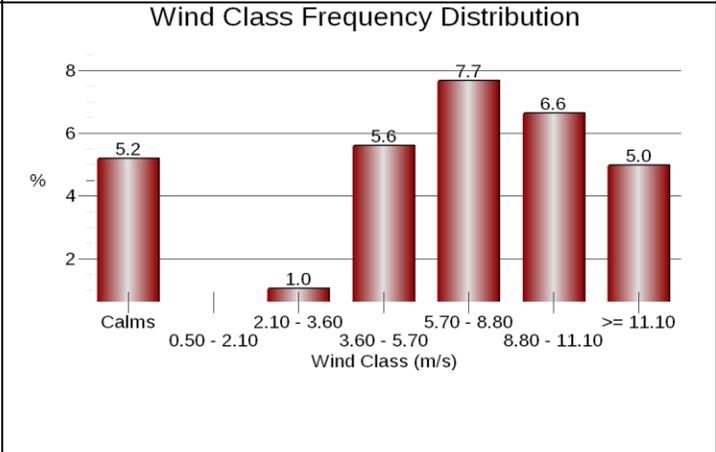
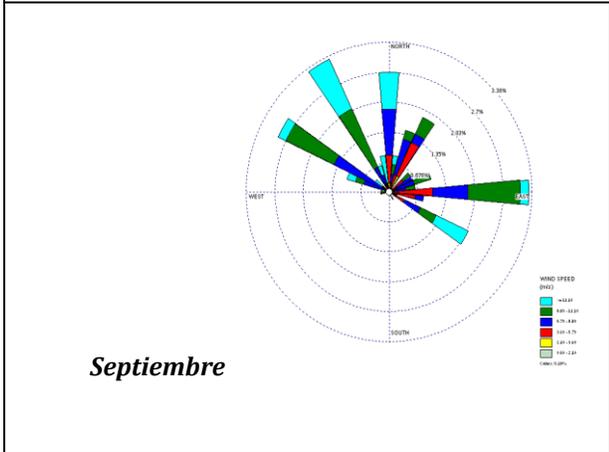
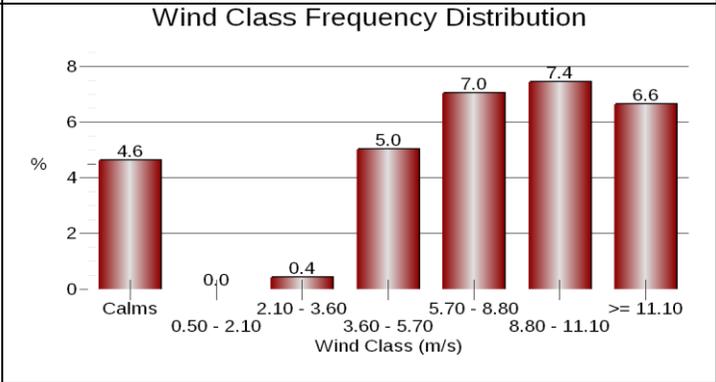
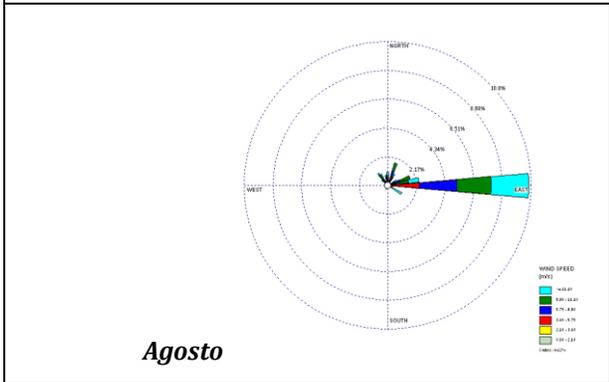
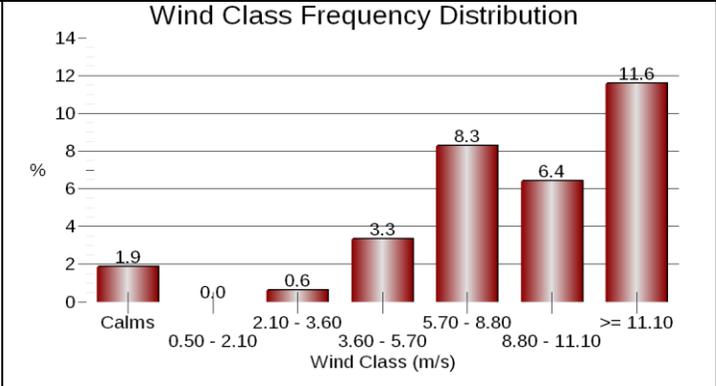
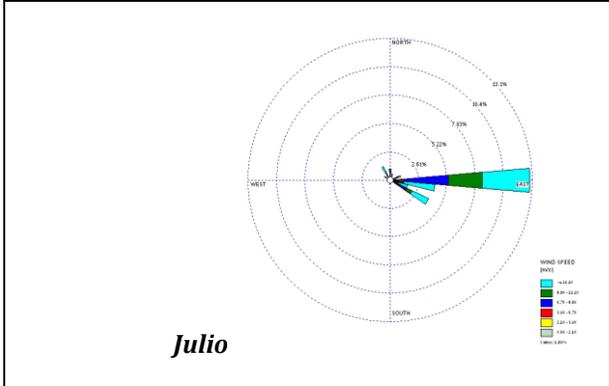
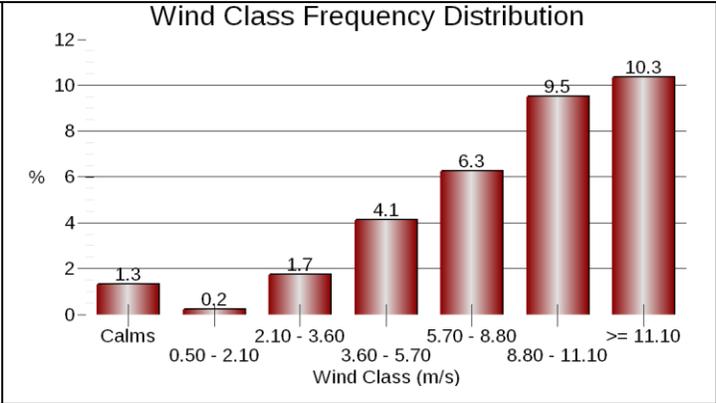
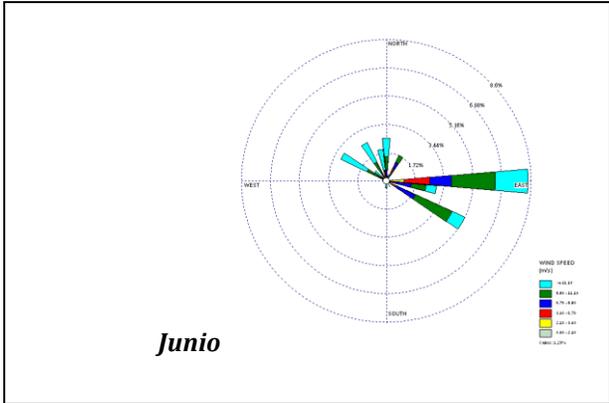
ANEXOS

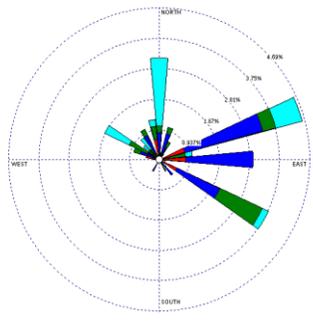
A.1 Esquema Método de Delphi



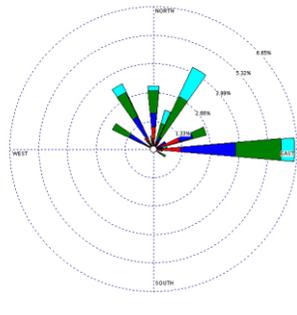
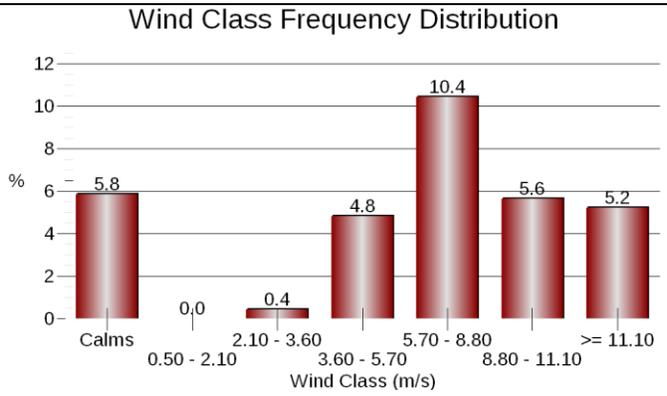
A. 2 Dirección y velocidad del viento mensual. Campeche 2007.



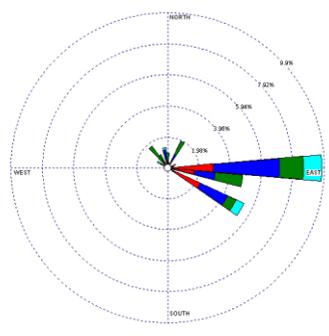
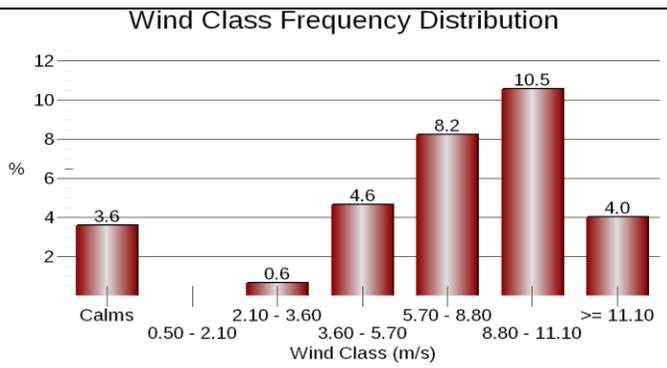




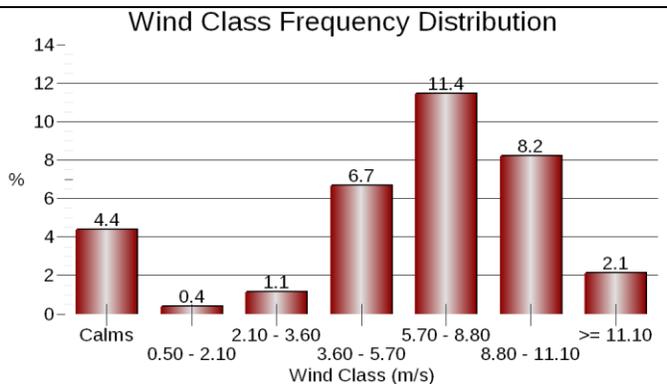
Octubre



Noviembre

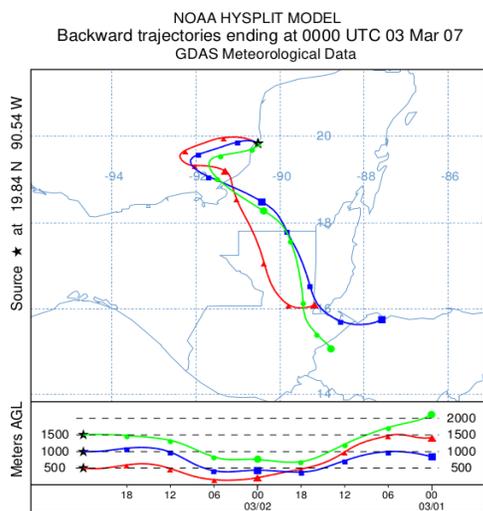


Diciembre

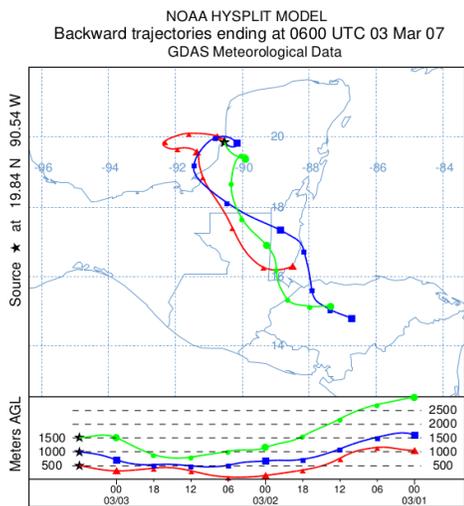


A.3 Trayectorias de retroceso para el día 3 de marzo de 2007.

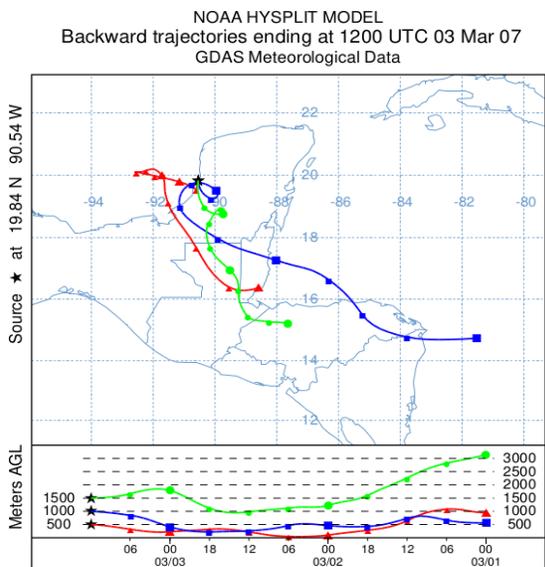
A



B



C



D

