



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

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO POTENCIAL EN LA CALIDAD DEL AIRE  
POR PARTÍCULAS DEBIDO A LA OPERACIÓN DEL RECINTO PORTUARIO  
DE VERACRUZ**

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

PRESENTA:  
ING. RAFAEL ESTEBAN ANTONIO DURÁN

**TUTOR PRINCIPAL**  
DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA. CENTRO DE CIENCIAS DE LA  
ATMÓSFERA

**COMITÉ TUTOR**  
M. EN C. VICENTE FUENTES GEA. - FACULTAD DE INGENIERÍA  
DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ. - FES CUAUTITLÁN  
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ- FACULTAD DE INGENIERÍA  
DR. GILBERTO FUENTES GARCÍA-CENTRO DE CIENCIAS DE LA  
ATMÓSFERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX  
NOVIEMBRE, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** Dr. Enrique César Valdez  
**Secretario:** Dr. Armando Aguilar Márquez  
**Vocal 1:** Dr. Gilberto Fuentes García  
**Vocal 2:** M.C. Vicente Fuentes Gea  
**Vocal 3:** Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

Lugares donde se realizó la tesis:  
SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL CENTRO DE  
CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

ADMINISTRACIÓN PORTUARIA INTEGRAL DE VERACRUZ

TUTOR DE TESIS:

**DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRIA**

-----  
FIRMA

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de nivel Maestría de septiembre del 2017 a agosto del 2019.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM (PAPIIT) con el proyecto “Establecimiento de la red nacional de depósito atmosférico” con clave IN112318

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todo el conocimiento otorgado durante mi maestría.

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por todo el apoyo otorgado en la maestría, por compartir sus conocimientos y por todas sus sugerencias, observaciones, comentarios y sobre todo por la confianza depositada en mí, para la realización de este proyecto.

A los miembros del comité tutorial: Dr. Armando Aguilar Márquez y al M. en C. Vicente Fuentes Gea por sus observaciones, sugerencias, correcciones e importantes recomendaciones que me ayudaron a mejorar mi tesis.

A los miembros del Jurado Ampliado: Dr. Enrique Cesar Valdez por el tiempo dedicado para la revisión de este proyecto y sus valiosos comentarios.

Al Dr. Gilberto Fuentes García por todo su apoyo en la parte de modelación, así como su invaluable apoyo en la revisión de la tesis, comentarios, sugerencias realizadas. Gracias por el tiempo y conocimientos compartidos

AL equipo de la sección de contaminación ambiental: Biólogo Pablo Sánchez Álvarez, por siempre estar dispuesto a orientarme en información del RPV. A la M. en I. Ana Alarcón Jiménez, A la QFB María del Carmen Torres, Al Dr. Elías Granados Hernández, a la Dra. Elizabeth Vega Rangel y demás equipo que siempre nos apoyaron con sus puntos de vista y sugerencias en este proyecto.

A la Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A. de C.V. por el proyecto de colaboración (UNAM-APIVER): “Evaluación de la calidad del aire, depósito atmosférico y meteorología para desarrollar el programa para la prevención y

minimización del posible deterioro ambiental significativo en el Recinto Portuario de Veracruz y en las zonas de interés”. Especialmente al Arq. Francisco Liaño Carrera, Gerente de Ingeniería, y al Arq. Jorge Baños Illana.

Al Químico Armando Retama Hernández, responsable del manejo de la información y verificación de operación de la estación de monitoreo de calidad del aire, en el proyecto UNAM-APIVER.

Al Dr. Víctor Magaña Rueda y al Ing. Gustavo Vázquez Cruz, del Instituto de Geografía de la UNAM, responsables de la evaluación meteorológica en el proyecto UNAM-APIVER.

Al personal in situ encargado de la operación de la estación de monitoreo de la calidad del aire en el Recinto Portuario de Veracruz, Lic. Humberto Bravo Witt y al M. en I. José Hernández Téllez.

## **Dedicatoria**

*A mi esposa, la Mtra. Lizette Martínez Pérez por todo su apoyo en este tiempo de maestría y nunca dejar de creer en mí.*

*A mi familia; mis padres y hermanos, por siempre estar ahí y ayudarme a llegar a esta etapa de mi vida.*

*A mis amigos de la maestría, Angelica, Myriam, Guadalupe, Pedro, Christian, y Ricardo por su apoyo en todos los momentos difíciles del posgrado.*

*A mis compañeros del CCA Isabel, Daimy, Ilse y Roberto por el apoyo en las horas de trabajo de la tesis.*

*Y a todas esas personas que han estado en mi vida, gracias.*

---

[Contenido](#)

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	IX
RESUMEN .....	X
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Hipótesis .....	3
1.4 Objetivos.....	3
General .....	3
Específicos.....	3
1.5 Alcances .....	4
Capítulo 2. Antecedentes .....	5
2.1 Calidad del aire.....	5
2.2 Partículas.....	5
2.2.1 Efectos en la salud de las partículas sólidas.....	6
2.3 Dispersión de partículas.....	7
2.3.1 Tablas de Pasquill-Gifford.....	9
2.3 Normatividad.....	10
2.3.1 Normatividad en México.....	10
2.3.2 Normatividad Internacional.....	10
2.4 Medición de partículas .....	10
2.4.1 Muestreo de alto volumen .....	11
2.4.2 Método TEOM.....	12
2.4.3 Método de Atenuación Beta .....	13
2.4.4 Estaciones de monitoreo.....	15
2.5 Estimación por factores de emisión .....	16
2.5.1 Método AP42 de la EPA.....	16
2.5.2. Metodología HERMES .....	16
2.5.3. Metodología de Cooper & Gustafsson .....	16
2.6 Modelos de dispersión .....	17
2.6.1. Modelos de la calidad del aire.....	17

---

2.6.2. Escalas de los modelos.....	17
2.6.3. Modelo de dispersión CALPUFF .....	18
2.6.4. Etapas del modelo CALPUFF.....	18
2.7 Puertos en México .....	20
2.7.1 Puerto Integral de Veracruz.....	21
2.7.3 Características del Puerto.....	23
2.7.3. Tipos de Buques en el Recinto Portuario de Veracruz. ....	23
2.7.3. Nuevo Puerto de Veracruz .....	24
2.7.4 Evento “Norte” en el Recinto Portuario de Veracruz. ....	26
2.7.5 Puertos Verdes.....	27
2.7.6 Proyecto puerto verde en Veracruz.....	27
2.8 Emisiones en el puerto .....	28
2.9 Convenio MARPOL .....	29
Capítulo 3. Metodología.....	31
3.1 Monitoreo de la calidad del aire .....	31
3.1.1 Determinación del sitio de monitoreo Atmosférico.....	31
3.1.1.5 Visita al sitio de estudio.....	36
3.1.2 Equipo de Monitoreo.....	36
3.1.3 Manejo y tratamiento de los datos. ....	37
3.2. Factores de Emisión .....	39
3.3 Modelo de dispersión.....	43
3.3.1 Selección de días.....	43
3.3.2 Etapa del Pre-procesador .....	43
3.3.3 Modelo de dispersión CALPUFF .....	46
3.3.4 Post-procesador CALPOST .....	47
3.3.5 Selección de Factores de emisión .....	47
3.4 Análisis de los casos particulares .....	47
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	49
4.1 Monitoreo de la calidad del aire (PM10).....	49
4.2 Meteorología.....	55
4.3 Variación temporal de las concentraciones de partículas.....	60
4.4 Inventario de emisiones .....	65



---

4.5 Estudio de casos particulares.....	70
4.6 Aplicación del Modelo de dispersión CALPUFF .....	80
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	89
5.1 Conclusiones .....	89
5.2 Recomendaciones .....	90
Capítulo 6. Bibliografía .....	91
ANEXO 1. Análisis de calidad del aire y meteorología para los días en que se excedió la concentración de referencia de la NOM-SSA1-025-2014 .....	97
Anexo 2. Transporte, dispersión y concentración de PM10 en el Puerto de Veracruz. .....	117

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la atmósfera, según las clases de Pasquill-Gifford para horas diurnas (Turner, 1969).....	9
Tabla 2. Clasificación de la atmósfera, según las clases de Pasquill-Gifford para horas nocturnas (Turner, 1969).....	9
Tabla 3. Clasificación de los motores de buques en función a su velocidad (Guevara, 2010).....	39
Tabla 4. Factores de emisión en función de su tipo de motor y combustible. (Cooper & Gustafsson, 2004b).....	40
Tabla 5. Factores de emisión en mar. (Entec, 2002).....	41
Tabla 6. Factores de emisión en el puerto. (Entec, 2002).....	41
Tabla 7. Factores de emisión en maniobra. (Entec, 2002).....	42
Tabla 8. Emisiones del RPV diferente a buques (Tami, 2014).....	43
Tabla 9. Características de los dominios usados en WRF.....	44
Tabla 10. Datos de la fuente de emisión.....	46
Tabla 11. Características de la simulación.....	47
Tabla 12. Días que se superó la NOM-025-SSA1-2014.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tasa de lapso ambiental, y tasa de lapso adiabático seco. (Masters & Ela, 2008).....	8
Figura 2. Pluma de contaminantes en función de la estabilidad atmosférica. (Masters & Ela, 2008).....	8
Figura 3. Muestreador de alto volumen para PM10.(Thermofisher, 2018).....	12
Figura 4. Filtro oscilante del equipo TEOM. (Thermoscientific, 2007).....	13
Figura 5. Equipo TEOM. (Thermoscientific, 2007).....	13
Figura 6. Equipo de Atenuación Beta -BAM1020. (Hart & Hart --, 2009).....	14
Figura 7. Vista interior del Equipo BAM1020.(Hart & Hart --, 2009).....	15
Figura 8. Etapas del Modelo CALPUFF. (Scire, et. al., 2000).....	20
Figura 9. Municipio de Veracruz. INEGI, 2015.....	21
Figura 10. Ubicación del puerto de Veracruz. Google Earth 2018.....	22
Figura 11. Comunicaciones del puerto de Veracruz con otras regiones. APIVER 2017.....	23
Figura 12. Construcción del nuevo puerto de Veracruz.....	25
Figura 13. Ubicación del nuevo puerto de Veracruz. (APIVER, 2015).....	26

---

Figura 14. Emisión global de contaminantes generados por las fuentes evaluadas en el inventario de emisiones atmosféricas.....	28
Figura 15. Ubicación de la estación de Monitoreo del RPV. (Google Earth, 2019).....	33
Figura 16. Estación de Monitoreo de la calidad del aire en el RPV.....	34
Figura 17. Cabezal del equipo analizador de PM10 BAM1020.....	34
Figura 18. Equipo de cómputo dentro de la estación.....	35
Figura 19. Equipo de aire acondicionado dentro de la estación.....	35
Figura 20. Cambio de cinta al equipo BAM1020.....	36
Figura 21. Equipo BAM1020 perteneciente a la estación de monitoreo.....	37
Figura 22. Consola para datos meteorológicos “Vantage Pro2” dentro de la estación de Monitoreo.....	37
Figura 23. Mapa con los dominios utilizados para WPS.....	45
Figura 24. Terreno realizado en CALPUFF.....	46
Figura 25. Rosa de vientos sobre la estación de monitoreo. (Google Maps, 2019).....	48
Figura 26. Variación de la concentración de PM10 en el RPV.....	49
Figura 27. Concentración promedio diaria de PM10 en el 2017.....	51
Figura 28. Concentración promedio diaria de PM10 en el 2018.....	52
Figura 29. Concentración promedio diaria de PM10 en el 2018.....	53
Figura 30. Variación de la velocidad del viento en el RPV (ago. 2017-dic 2018).....	55
Figura 31. Variación de la radiación solar en el RPV (ago. 2017-dic 2018).....	56
Figura 32. Variación de la temperatura en el RPV (ago. 2017-dic 2018).....	56
Figura 33. Rosa de vientos mensual 2017 en la estación de monitoreo del RPV.....	57
Figura 34. Rosa de vientos mensual 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	58
Figura 35. Rosa de contaminantes 2017 en la estación de monitoreo del RPV.....	59
Figura 36. Rosa de Contaminantes 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	60
Figura 37. Variación temporal de PM10 en el 2017 en la estación de monitoreo del RPV .....	62
Figura 38. Variación temporal de PM10 en el 2018 en la estación de monitoreo del RPV .....	63
Figura 39. Variación temporal de PM10 en el 2019 en la estación de monitoreo del RPV .....	64
Figura 40. Caja de Tukey de las concentraciones de PM10 en los años 2017 al 2019.....	65
Figura 41. Inventario de emisiones de PST por actividades de los buques en el RPV con metodología A.....	66

---

Figura 42. Inventario de emisiones de PST por actividades de los buques en el RPV con metodología B .....	66
Figura 43. Inventario de emisiones de PM10 por actividades de los buques en el RPV con metodología A .....	67
Figura 44. Inventario de emisiones de PM10 por actividades de los buques en el RPV con metodología B .....	67
Figura 45. Inventario de emisiones de PM2.5 por actividades de los buques en el RPV con metodología B .....	67
Figura 46. Inventario de emisiones de PM2.5 por actividades de los buques en el RPV con metodología B .....	68
Figura 47. Cantidad de buques existentes en el puerto de Veracruz en el periodo mayo 2018 a abril 2019.....	69
Figura 48. Emisiones anuales de PM10 generadas por tipo de buque de mayo del 2018 a abril del 2019.....	69
Figura 49. Variación de la concentración de PM10 el 24/01/2018 .....	71
Figura 50. Estabilidad atmosférica 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	71
Figura 51. Rosa de vientos 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	72
Figura 52. Rosa de contaminantes 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	73
Figura 53. Variación de la concentración de PM10 del 14 al 15 de abril del 2018 .....	73
Figura 54. Estabilidad atmosférica del 14 al 15 de abril del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	74
Figura 55. Rosa de vientos del 14 al 15 de abril del 2018 en la estación de monitoreo del RPV .....	75
Figura 56. Rosa de contaminantes del 14 al 15 de abril del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	75
Figura 57. Variación de la concentración de PM10 del 13 y 14 de noviembre del 2018.....	76
Figura 58. Estabilidad atmosférica del 13 y 14 de noviembre del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	76
Figura 59. Rosa de vientos del 13 y 14 de noviembre del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	77
Figura 60. Rosa de contaminantes del 13 y 14 de noviembre del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	78
Figura 61. Variación de la concentración de PM10 del 26 de noviembre del 2018.....	78
Figura 62. Estabilidad atmosférica el 26 de noviembre del 2018 .....	79
Figura 63. Rosa de vientos del 26 de noviembre del 2018 .....	79
Figura 64. Rosa de contaminantes del 26 de noviembre del 2018 .....	80
Figura 65. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 30/06/2018.....	82
Figura 66. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 01/07/2018.....	83

---

Figura 67. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 01/07/2018 con la metodología B.....	84
Figura 68. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 15/07/2018 con la metodología A.....	85
Figura 69. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 15/07/2018 con la metodología B.....	85
Figura 70. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 24/07/2018 con la metodología A.....	86
Figura 71. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 24/07/2018 con la metodología B.....	87
Figura 72. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 25/07/2018.....	88
Figura 73. Distribución de partículas PM10 en el RPV el día 25/07/2018.....	88
Figura 74. Variación de la concentración de PM10 el 16/10/2017 en la estación de monitoreo del RPV.....	97
Figura 75. Estabilidad atmosférica 16/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.....	98
Figura 76. Rosa de vientos 16/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.....	98
Figura 77. Rosa de contaminantes 16/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.....	99
Figura 78. Variación de la concentración de PM10 el 28/10/2017 en la estación de monitoreo del RPV.....	100
Figura 79. Estabilidad atmosférica 28/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.....	100
Figura 80. Rosa de vientos 28/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.....	101
Figura 81. Rosa de contaminantes 28/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.....	101
Figura 82. Variación de la concentración de PM10 el 8/12//2017 .....	102
Figura 83. Estabilidad atmosférica 8/12//17 .....	102
Figura 84. Rosa de vientos 8/12//17 en la estación de monitoreo del RPV.....	103
Figura 85.. Rosa de contaminantes 8/12//17 en la estación de monitoreo del RPV.....	104
Figura 86. Variación de la concentración de PM10 el 03/01/2018 .....	104
Figura 87. Estabilidad atmosférica 03/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	105
Figura 88. Rosa de vientos 03/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	105
Figura 89. Rosa de contaminantes 03/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV....	106
Figura 90. Variación de la concentración de PM10 el 24/01/2018 .....	107
Figura 91. Estabilidad atmosférica 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	107
Figura 92. Rosa de vientos 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	108
Figura 93. Rosa de contaminación 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV....	109
Figura 94. Concentraciones de partículas del 29 de junio al 2 de julio del 2018. ....	110

---

Figura 95. Estabilidad atmosférica del 29 de junio al 2 de julio del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	110
Figura 96. Rosa de vientos del 29 de junio al 2 de julio del 2018.....	111
Figura 97 Rosa de contaminantes del 29 de junio al 2 de julio del 2018.....	111
Figura 98. Concentraciones de partículas del 14 al 16 de julio del 2018.....	112
Figura 99. Rosa de vientos de los días 14 al 16 de julio del 2018.....	113
Figura 100. Rosa de contaminantes de los días 14 al 16 de julio del 2018.....	113
Figura 101. Variación de la concentración de PM10 el 12/08/2018 .....	114
Figura 102. Estabilidad atmosférica 12/08/2018 en la estación de monitoreo del RPV....	114
Figura 103. Rosa de vientos el 12/08/2018 en la estación de monitoreo del RPV.....	115
Figura 104. Rosa de contaminantes el 12/08/2018 en la estación de monitoreo del RPV .....	116
Figura 105. Modelación de PM10 el día 29/06/18 con la metodología A.....	117
Figura 106. Modelación de PM10 el día 02/07/18 con la metodología A.....	118
Figura 107. Modelación de PM10 el día 16/07/18 con la metodología A.....	118
Figura 108. Modelación de PM10 el día 21/07/18 con la metodología A.....	119
Figura 109. Modelación de PM10 el día 12/08/18 con la metodología A.....	119

---

## ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

APIVER	Administración Portuaria Integral de Veracruz
AQLI	Air Quality Life Index
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
COV's	Compuestos Orgánicos Volátiles
CALT	Centro de Atención Logístico al Transporte
CICE	Corporación Integral de Comercio Exterior
ICAIVE	Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz
MARPOL	Marine Pollution
NPV	Nuevo Puerto de Veracruz
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NOM	Norma Oficial Mexicana
NOx	Óxidos de Nitrógeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM <sub>10</sub>	Partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micrómetros
PM <sub>2.5</sub>	Partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros
PST	Partículas suspendidas totales
RPV	Recinto Portuario de Veracruz
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América
UE	Unión Europea
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research

---

## RESUMEN

La evaluación de la calidad del aire es un factor muy importante para proteger la salud pública en México, por lo cual, es de vital importancia que sea satisfactoria de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas emitidas por la Secretaría de Salud. Uno de los indicadores de la calidad del aire más reconocidos es el establecido por la USEPA a través de los contaminantes criterio, dentro de los cuales se encuentran las partículas y dentro de estas las  $PM_{10}$ , las cuales, son generadas tanto por actividades antropogénicas como por fuentes naturales.

En México, existe el monitoreo de la calidad del aire en las grandes zonas urbanas como la CDMX, la ciudad de Monterrey, entre otras. Estos sistemas de monitoreo y muestreo indican si exceden los límites establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas y recomiendan medidas a la población en caso de que estas se excedan. Sin embargo, en el país existen zonas donde pueden existir afectaciones a la calidad del aire por diversas actividades antropogénicas.

Una de esas zonas es el RPV, el cual es uno de los puertos comerciales más importantes del país, que por su índole es generador de distintos tipos de emisiones atmosféricas que afectan la calidad del aire. Aunado a esto, actualmente se trabaja en la construcción de la ampliación del Nuevo Puerto de Veracruz, el cual ya tiene un avance significativo y comenzó sus primeras actividades en julio del año 2019.

En este proyecto se realizó el monitoreo de  $PM_{10}$ , utilizando un equipo automático de Atenuación Beta BAM1020 instalado en una estación de monitoreo que se ubicó dentro del RPV y del nuevo puerto de Veracruz para evaluar el impacto potencial en la calidad del aire, además de evaluar meteorología del lugar para realizar un análisis a mayor profundidad. Se encontró que en un lapso de 20 meses existieron 31 días en los cuales se superó la norma de calidad de aire para  $PM_{10}$ , además de no cumplirse el límite anual en el 2018.

Se analizaron estos 31 casos observando que existe una gran influencia de las actividades de operación del RPV y de la construcción del Nuevo Puerto de Veracruz, aunque también puede existir la influencia de otras actividades de la zona.



---

Con los datos de monitoreo se realizó un análisis de la variación temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$ , lo cual, dio como resultado que las horas con mayor concentración se presenta entre las 6 y las 9 am; el día de la semana con mayor concentración fue el martes y el mes con mayor concentración fue en noviembre del 2018.

Se determinaron las emisiones provenientes del puerto de Veracruz durante un año a través de factores de emisión. Se utilizaron dos metodologías propuestas por Cooper & Gustafsson (2004), en las cuales se analizó la actividad de los buques día por día.

Con estos datos se realizaron simulaciones con el modelo CALPUFF para algunos de los días en los que se superó la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. Las simulaciones tuvieron el objetivo de observar las zonas sensibles en un radio de influencia de 50 km a la emisión de  $PM_{10}$  y la dispersión de los contaminantes. Se observó que a partir de la modelación de partículas puede afectar los municipios alrededor de Veracruz como lo son La Antigua, Boca del Río, Medellín entre otros, por lo cual se requiere aumentar las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la zona urbana.

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Introducción

Nuestro planeta ha sufrido muchos cambios debido a la intervención del ser humano y a su escasa preocupación por conservarlo. Una de las áreas que se ha afectado es la referente a calidad del aire, debido a la introducción de contaminantes en este medio.

El aire es indispensable para el ser humano y para muchas especies en el planeta, pero este puede ser contaminado por las actividades antropogénicas y con ello afectar a la salud humana. Entre las actividades que afectan la calidad del aire están la combustión que ocurren en fuentes móviles, las actividades de las industrias y los incendios forestales, entre otros.

Las partículas son un contaminante del aire que ha cobrado gran relevancia debido a sus efectos en la salud humana. Estas son nocivas al sistema respiratorio en función de que tan pequeñas sean. Uno de los generadores de partículas es la actividad portuaria, desde la emisión de los buques, hasta el almacenamiento y movimiento de carga a granel, carbón, chatarra entre otros, los cuales provocan emisiones que afectan la calidad del aire.

Uno de los puertos más grandes y con mayor relevancia en el país es el Recinto Portuario de Veracruz (RPV), para el cual se realizó el monitoreo de partículas  $PM_{10}$ , evaluando el impacto en la calidad del aire causado por las actividades que se realizan en este mismo, y que actualmente en este Recinto Portuario se está construyendo una ampliación la cual se conoce como “Nuevo Puerto de Veracruz” (NPV), proyecto que también generará un impacto potencial sobre la calidad del aire en su zona de influencia.

Con los datos de monitoreo de  $PM_{10}$  se realizó un análisis de la variación temporal para identificar y comparar los niveles encontrados con la NOM-025-SSA1-2014 considerando el promedio diario y anual del 2018. Otra de las actividades que se realizaron para evaluar el impacto fue la identificación de la emisión proveniente de los buques que arribaron en el RPV considerando dos metodologías

diferentes las cuales permitieron realizar un inventario de emisiones por buques día a día en un periodo del 2018.

## 1.2 Justificación

Las partículas son un peligro para la salud humana en función de su tamaño, por lo que, es de gran importancia considerar su muestreo y monitoreo. Las partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) junto con las partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) afectan a la salud y pueden ser cancerígenas.

Actualmente se miden partículas  $\text{PM}_{10}$  en 58 ciudades del país, sin embargo, es necesario que en la mayoría de las ciudades existan estaciones de monitoreo. El municipio de Veracruz de Ignacio Llave no cuenta con una estación de monitoreo por parte del sector gubernamental, por lo que no se tiene un estimado de la concentración de partículas.

El puerto de Veracruz cuenta con un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos, el cual debe actualizarse. Se debe encontrar una relación entre los datos de monitoreo y los inventarios de emisiones.

El nuevo puerto de Veracruz es un proyecto en el que se trabaja actualmente, por lo que es importante considerar el monitoreo de la calidad del aire en este proceso, desde las actividades de la etapa de construcción hasta el aumento de buques debido a la operación. Con ello, se deberán analizar las bases de datos y tomar las medidas correspondientes.

El puerto de Veracruz trabaja para ser reconocido obteniendo el certificado y aprobación de "Green Port", el cual se les asigna a todos los puertos que han realizado acciones a favor de la conservación y preservación del ambiente, no sólo cumpliendo con lo establecido por las leyes de cada país, sino también buscando una regulación más exigente, además de buscar la sustentabilidad. Los resultados obtenidos de esta tesis serán un gran aporte para que el puerto cumpla con esta meta.

El puerto de Veracruz se ubica en el Golfo de México, el cual, es un lugar con una amplia vegetación y fauna. En el año 2019 se descubrieron 5 arrecifes nuevos en mares Veracruzanos los cuales pueden estar sufriendo afectaciones

debido a la contaminación atmosférica provocada por la actividad del RPV y la ampliación del NPV. Por ello evaluar su impacto para tomar las medidas adecuadas para prevenir y mitigar sus efectos es de vital importancia

### **1.3 Hipótesis**

La concentración diaria y anual de  $PM_{10}$  en el puerto de Veracruz superará lo establecido en la normatividad ambiental mexicana debido a la operación del RPV junto con la construcción del Nuevo Puerto de Veracruz.

### **1.4 Objetivos**

#### **General**

Evaluar el impacto potencial en la calidad del aire por partículas debido a la actividad portuaria en el recinto portuario de Veracruz.

#### **Específicos**

- Evaluar la emisión de partículas proveniente del Recinto Portuario de Veracruz, usando factores de emisión de acuerdo con la metodología de Cooper & Gustafsson.
- Verificar el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 a partir de los datos del monitoreo de partículas que se lleva a cabo dentro del puerto de Veracruz y su comparación con normatividad de otros países.
- Analizar los periodos donde se hallan registrado las concentraciones máximas de partículas, a través de variables meteorológicas y de la estabilidad atmosférica que se presentó en la estación de monitoreo del RPV.
- Aplicar el modelo de dispersión, CALPUFF, para evaluar y proponer otros sitios para el monitoreo de partículas identificando las zonas sensibles que requieran atención.

## 1.5 Alcances

- Contribuir al monitoreo de  $PM_{10}$  en un puerto de relevancia en México considerado como uno de los más grandes en un periodo de 18 meses de agosto del 2017 a abril del 2019.
- Conocer el nivel de emisión de partículas considerando el factor de emisión de acuerdo con el tipo de buque en un periodo de un año comenzando en mayo del 2018 y terminando en abril del 2019.
- Lograr un avance importante dentro del Convenio MARPOL para el monitoreo de contaminantes criterio, firmado por México en 1992.
- Aportar a la determinación de partículas totales y  $PM_{2.5}$ .
- Añadir al monitoreo de partículas considerando la ampliación del puerto de Veracruz.
- Identificar las zonas sensibles por contaminación atmosférica de  $PM_{10}$  de acuerdo con el modelo de calidad del aire, CALPUFF durante un periodo de mayo a diciembre del 2018 en los días con mayor concentración registrada.

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1 Calidad del aire

El aire es elemental para la existencia del ser humano, es un recurso natural indispensable para muchas formas de vida, y es considerado como un requisito para la salud de los humanos.

La composición del aire es mayormente 78.08% Nitrógeno y 20.94% Oxígeno, además de estar formado por otros gases como el Oxígeno, Argón, Dióxido de carbono, Neón, Helio, Metano y Kriptón. Sin embargo, existen ciertos compuestos que, estando presentes en la atmósfera, afectan de manera adversa la salud de las personas, animales, plantas o de la vida microbiana, estos los denominamos contaminantes atmosféricos (Moroz, 1999).

La contaminación del aire puede ser de origen natural o antropogénico. Estos contaminantes pueden ser clasificados, por su origen, en contaminantes primarios o secundarios. Los contaminantes primarios se caracterizan por ser vertidos directamente a la atmósfera, mientras que los secundarios se originan en el aire como consecuencia de mecanismos de reacción que sufren los contaminantes químicos en la atmósfera (Contreras, et. al. 2013).

En México existe una regulación de ciertos contaminantes en la atmósfera que deben regularse por ser dañinos para la salud humana, el ambiente y causar daños a la propiedad (EPA, 2017) llamados contaminantes criterio. La definición de estos es aportada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la cual ha decretado los siguientes contaminantes: el ozono a nivel del suelo ( $O_3$ ), Partículas ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ), Dióxido de azufre ( $SO_2$ ), Plomo (Pb) y Mercurio (Hg).

### 2.2 Partículas

Las partículas, también conocidas como “material particulado” por su traducción en inglés “particulate matter”, son una mezcla de material sólido y líquido que se encuentran en el aire. Estas pueden clasificarse por su tamaño en Partículas Suspensas Totales (PST),  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Las PST son todas las partículas en la

atmósfera con diámetro aerodinámico menor a 100  $\mu\text{m}$ . Las  $\text{PM}_{10}$  son las partículas inhalables, con diámetros aerodinámicos que generalmente son menor o igual a 10 micrómetros y  $\text{PM}_{2.5}$  aquellas cuyo diámetro aerodinámico sea menor a 2.5  $\mu\text{m}$  (US EPA, n.d.).

Las partículas en el aire suelen tener formas irregulares, y diferentes densidades. Por ello, se ha creado el término de diámetro aerodinámico con el fin de proporcionar un medio simple de categorizar los tamaños de partículas que tienen diferentes formas y densidades con una sola dimensión. Este concepto se refiere a una partícula esférica que tiene una densidad de 1  $\text{g/cm}^3$  que tiene las mismas propiedades inerciales como la velocidad de sedimentación terminal (EPA, 2010).

Las partículas se componen de diferentes materiales dependiendo de su origen. En zonas industriales pueden estar formadas por restos industriales, carbón, hollín y ceniza. El tamaño de estas partículas influye en su comportamiento. Las partículas en suspensión están controladas por las turbulencias atmosféricas y por el viento (Seoáñez, 2002).

Las partículas se consideran como contaminantes primarios ya que son emitidas directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas y automóviles, entre otros (SEMARNAT, 2013). Aunque también son consideradas como contaminantes secundarios debido a que pueden formarse en la atmósfera debido a reacciones químicas causadas por materiales gaseosos llamados precursores. Estos pueden ser el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), Estas forman partículas de sulfatos y nitratos (contaminantes secundarios), entre otros (SEMARNAT & INE, 2011).

### **2.1.1 Efectos en la salud de las partículas sólidas**

Las partículas suspendidas totales suelen ser retenidas naturalmente por el sistema respiratorio en las fosas nasales y en la garganta. Sin embargo, las  $\text{PM}_{10}$  suelen atravesar ese filtro, llegando a lo largo del tracto respiratorio. Las partículas menores a 2.5 micras suelen llegar a las áreas más profundas de los pulmones y al sistema circulatorio (Lippman et. al, 2000).

Esto provoca que las partículas afecten la salud humana de las poblaciones expuestas. El índice de vida de la calidad del aire (AQLI) señala que la exposición a este contaminante reduce el promedio de vida de las personas en ciudades altamente contaminadas por los efectos oxidantes que causan a las células pulmonares, y las partículas más pequeñas por los daños que causan a los alveolos ((Wilson & Suh, 1997).

### 2.3 Dispersión de partículas

La dispersión de las partículas a partir de una fuente fija o móvil se debe principalmente a las siguientes causas:

- Contenido calorífico de las emisiones.
- Cantidad de movimiento inicial.
- Velocidad del viento a la altura de la fuente.
- Altura de la fuente emisora.
- Variación de la temperatura atmosférica con la altura.

A medida que son emitidas por una fuente, las partículas se mezclan rápidamente con la atmósfera de los alrededores y el grado de dilución aumenta a medida que es arrastrada la pluma (Parker, 1983).

La estabilidad atmosférica es un concepto propuesto por Pasquill en donde describe la tendencia de la mezcla en la atmósfera entre aire y un contaminante debido a la generación de turbulencia por fuerzas naturales (Woodward, 1998). Esta señala la tendencia que tendrá una masa de aire para moverse verticalmente hacia arriba o hacia abajo después de haber sido emitido de una fuente, lo cual, influye en la capacidad de la atmósfera para disolver la contaminación del aire.

Para entender el concepto de estabilidad atmosférica es necesario mencionar la tasa de gradiente adiabático seco ( $\Gamma$ ), la cual señala que la temperatura del aire se elevará 1°C por cada 100 metros de altura, con respecto a la tasa de gradiente ambiental. La tasa de gradiente ambiental señalará la estabilidad atmosférica; cuando el aumento de la temperatura en función de la altura sea menor a  $\Gamma$ , tenderá a la inestabilidad, cuando sea paralela, tenderá a la neutralidad, y cuando sea mayor, tenderá a la estabilidad como se muestra en la Figura 1.



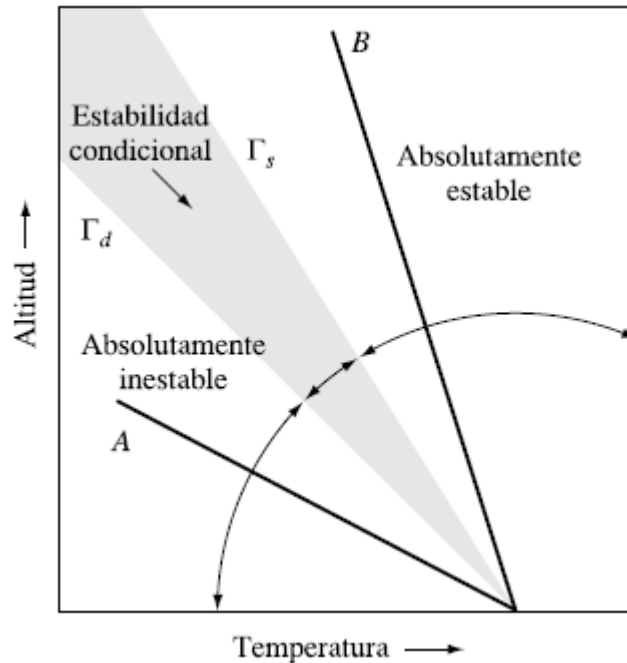


Figura 1. Tasa de gradiente ambiental, y tasa de gradiente adiabático seco. (Masters & Ela, 2008)

La tasa de gradiente ambiental presentará un efecto diferente en la dispersión de contaminantes como se observa en la Figura 2. En condiciones neutrales la dispersión de los contaminantes tendrá forma de cono, lo que, provocará que haya una concentración de contaminantes intermedia al nivel del suelo, (dependiendo también de la altura de la fuente). Cuando tenemos condiciones inestables, vemos que la dispersión de contaminantes es mayor a la altura del suelo, por el efecto ondulante que este provoca, mientras que, en el caso de una alta estabilidad, la pluma de contaminantes tiene una mayor ventilación y afecta en menor concentración el aire al nivel del suelo. Estas figuras también pueden considerar otros comportamientos cuando se presenten fenómenos como la inversión térmica.

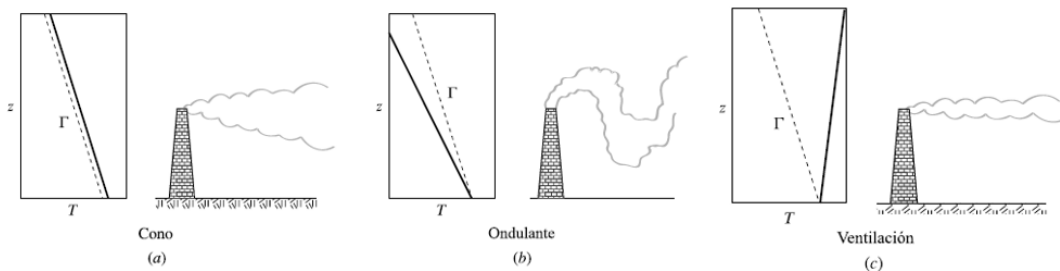


Figura 2. Pluma de contaminantes en función de la estabilidad atmosférica. (Masters & Ela, 2008)

### 2.3.1 Tablas de Pasquill-Gifford

Las tablas de Pasquill-Gifford fueron propuestas por Pasquill (1961) para determinar la estabilidad atmosférica. Estas tablas han sido modificadas a lo largo del tiempo. Las que se muestran en la Tabla 1 y en la Tabla 2, propuestas por la USEPA, dependen de la radiación solar y de la velocidad del viento

Tabla 1. Clasificación de la atmósfera, según las clases de Pasquill-Gifford para horas diurnas (Turner, 1969)

Velocidad del viento (m/s)	Radiación Solar Global (W/m <sup>2</sup> )					
	≥ 700	700 - 540	540 - 400	400 - 270	270 - 140	< 140
<2	A	A	B	B	C	D
2 - 3	A	B	B	B	C	D
3 - 4	B	B	B	C	C	D
4 - 5	B	B	C	C	D	D
5 - 6	C	C	C	C	D	D
>6	C	C	D	D	D	D

Tabla 2. Clasificación de la atmósfera, según las clases de Pasquill-Gifford para horas nocturnas (Turner, 1969)

Velocidad Viento (m/s)	Radiación Neta (W/m <sup>2</sup> )		
	≥ -20	(-20) - (-40)	< -40
< 2	D	F	F
2 - 3	D	E	F
3 - 5	D	D	E
5 - 6	D	D	D
> 6	D	D	D

La estabilidad atmosférica se define por las siguientes nomenclaturas (Pasquill, 1961):

- A - Muy inestable
- B - Inestable
- C - Ligeramente inestable
- D - Neutra
- E - Ligeramente estable
- F - Estable

## 2.3 Normatividad

### 2.3.1 Normatividad en México

En México, la Ley General de Salud, en su artículo 116 y 118, indica que las autoridades establecerán normas que protejan la salud humana de las condiciones del ambiente, y que ellos determinarán las concentraciones permisibles de contaminantes en el ambiente. La norma encargada de los parámetros de nuestro interés es la NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental, valores límites permisibles para la concentración de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el aire ambiente y sus criterios de evaluación. Esta aplica a todo el territorio nacional. Establece los límites para  $PM_{10}$  de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio diario (24 horas), y  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual. Para  $PM_{2.5}$  los límites serán de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio diario y de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual.

### 2.3.2 Normatividad Internacional

En Estados Unidos el estándar en Calidad del Aire en partículas es de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio diario y de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual (EPA, 2012). La Comisión Europea considera estándares de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio diario y de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual (European Commission, 2017). La Organización Mundial de la Salud fija un límite promedio de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio diario y de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual (OMS, 2016).

Es de importancia resaltar que hasta el 2015, uno de los parámetros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) para clasificar a un país dentro del índice para una vida mejor, eran los resultados del promedio anual de  $PM_{10}$ , en donde los primeros lugares fueron países europeos con concentraciones menores a los  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (OCDE, 2015).

## 2.4 Medición de partículas

La legislación en México cuenta con la norma NOM-035-SEMARNAT-1993, Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Sin embargo, dicha norma no aplica para partículas  $PM_{10}$ .

Debido a ello se ha optado por utilizar los métodos establecidos en la EPA quien clasifica a los métodos para medir contaminantes atmosféricos, métodos de referencia y los métodos equivalentes. Los métodos de referencia fueron los primeros en ser establecidos como válidos, son especificados como estándar, estos deben producir resultados específicos, sensibles, estables, precisos y exactos mientras que los métodos equivalentes los definimos como aquellos que proporcionan resultados comparables con los obtenidos por el método de referencia (Bravo y Sosa, s/a). Los métodos equivalentes cumplen con las especificaciones que requieren los métodos de referencia, además de ofrecer funciones adicionales que facilitan el monitoreo del contaminante. Los métodos equivalentes que son aprobados por la EPA, aparecen en un listado proporcionado por la misma institución la cual se actualiza constantemente (EPA, 2018).

### **2.4.1 Muestreo de alto volumen**

El muestreo de alto volumen (Figura 3) también llamado “Hi-Vol” por su nombre en inglés, es el método de referencia para la determinación de  $PM_{10}$ , señalado por el Código Federal de Regulación 40, en su apéndice B, parte 50, titulado “*Reference Method for the Determination of Suspended Particulate Matter in the Atmosphere (High-Volume Method)*”. Este equipo funciona succionando un volumen de aire ambiente hacia una caja de muestreo a través de un filtro durante un periodo de tiempo determinado. A través de métodos gravimétricos, la diferencia de masas del filtro antes y después del muestreo nos indican la cantidad de partículas en el aire. El volumen total de aire muestreado se determina con la velocidad promedio de flujo y el tiempo de muestreo. Estos deben ser ajustados a las condiciones de referencia.



*Figura 3. Muestreador de alto volumen para PM<sub>10</sub>.(Thermofisher, 2018)*

#### **2.4.2 Método TEOM**

Entre los métodos de referencia más utilizados (INECC, n.d.) se encuentra el método de Microbalanza de Elemento Oscilante, más conocido por sus siglas en inglés como TEOM (Tapered-Element Oscillating Microbalance). Este equipo es utilizado para la detección en tiempo real de partículas midiendo la concentración de su masa. Su funcionamiento está basado en los cambios en la frecuencia. Cuando el equipo recolecta una muestra de aire a través de un cabezal, esta pasa a través de un filtro (Figura 4) que está en constante oscilación que va cambiando su frecuencia en función de la masa recolectada en determinado tiempo (Thermoscientific, 2007). En la Figura 5 se observa el equipo en su presentación comercial.

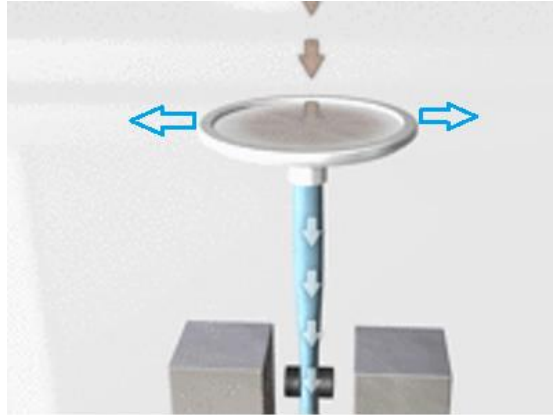


Figura 4. Filtro oscilante del equipo TEOM. (Thermoscientific, 2007)



Figura 5. Equipo TEOM. (Thermoscientific, 2007)

### 2.4.3 Método de Atenuación Beta

El equipo de atenuación Beta (Figura 6) también es uno de los métodos equivalentes aprobados por la EPA. Funciona en tiempo real con un ciclo de medición de 1 hora. Su nombre es debido a que contiene un elemento de carbono  $^{14}$  el cual emite una radiación de rayos beta (Hart & Hart --, 2009). Su principio de operación está basado en la ley de Lambert-Beer la cual establece que hay una relación lineal entre la absorción de luz a través de una sustancia y la

concentración de sustancia (UNAM, 2010). En este equipo la energía de los rayos beta es absorbida por una molécula específica en una longitud de onda determinada.



Figura 6. Equipo de Atenuación Beta -BAM1020. (Hart & Hart --, 2009)

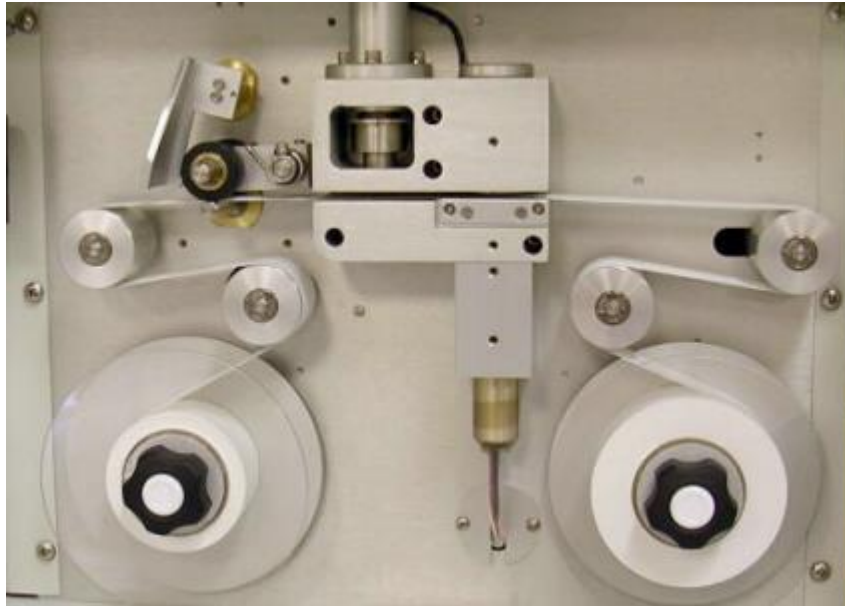
$I$  es el conteo de Rayos Beta a través del papel filtro con la muestra.  $I_0$  es el conteo de Rayos Beta a través del papel filtro limpio. El símbolo " $\neq$ " es el área transversal de absorción del material que absorbe los Rayos Beta ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) y  $x$  es la densidad de masa depositada en el papel filtro ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ). El equipo BAM1020 despeja de esta ecuación la densidad de masa depositada en el papel filtro, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$I = I_0 e^{-\neq x}$$

Para hallar la concentración la obtiene en función del área ( $A$ ) manchada con la masa depositada en el filtro, la cual es multiplicada por la densidad obtenida anteriormente y dividida en el volumen muestreado ( $V$ ) (IDEAM, n.d.).

$$C = \frac{Ax}{V}$$

Físicamente su funcionamiento es el siguiente; al comienzo de la hora, el elemento de Carbono 14 emite radiación beta a un punto limpio de una cinta de fibra de vidrio, visible en la Figura 7, para determinar la lectura cero. A través de un cabezal toma una muestra de aire el cual pasa por una boquilla. Esta pasa a través de la cinta, la cual, genera una mancha en forma de círculo. La fuente de radiación Beta pasará a través de la mancha y emitirá la concentración emitida en la pantalla del equipo.



*Figura 7. Vista interior del Equipo BAM1020.(Hart & Hart --, 2009)*

### **2.4.4 Estaciones de monitoreo**

Todo equipo de monitoreo se debe colocar en una estación de monitoreo que cumpla con lo establecido en la norma NOM-156-SEMARNAT-2012. La cantidad de estaciones de monitoreo son establecidas en función de la población. El INEGI indica la existencia de 552,156 habitantes en el municipio de Veracruz. La OMS recomienda la instalación de por lo menos 2 estaciones de monitoreo de partículas en función de la población existente y una estación de meteorología (OMS, 2006). La EPA a través de las leyes establecidas en Estados Unidos recomienda de 1 a 5 estaciones de monitoreo en función de las concentraciones a las que estén expuestos (OFR-US, 2006).



## **2.5 Estimación por factores de emisión**

Los factores de emisión son relaciones entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una sola unidad de actividad (Radian Corporation, 1996). Estos se basan en procesos tales como horas de operación, producción, área superficial o en datos basados en censos como lo son población, número de empleados, etc.

### **2.5.1 Método AP42 de la EPA**

Los documentos de la AP-42: Compilación de factores de emisión en aire ambiente existen desde el año de 1972. Estas abarcan más de 200 categorías de fuentes de contaminación del aire. Estos factores se desarrollaron con base en datos de prueba de origen, estudios de balance de materiales y estimaciones de ingeniería (EPA, 2017).

Los factores de emisión son valores establecidos para la emisión de contaminantes en un equipo específico o de algún tipo de fuente de alguna instalación. Dentro de los capítulos existentes del AP-42 no se encuentran factores de emisión directos para ser utilizados en buques.

### **2.5.2. Metodología HERMES**

Estos factores de emisión se obtienen del modelo HERMES (High-Effective Resolution Modelling Emission System). Este es un modelo de emisiones atmosféricas multiescala de código abierto, paralelo y autónomo que procesa y calcula las emisiones de gases y aerosoles para su uso en modelos de transporte químico (Baldasano et. al., 2008). Estos nos ayudan a saber la emisión de un buque en función del tipo de motor que tienen, el tipo de carga, el Gross Tonnage (GT), los tiempos de estadía y en la etapa de operación en la que se encuentren.

### **2.5.3. Metodología de Cooper & Gustafsson**

Los factores de emisión propuestos por Cooper & Gustafsson funcionan evaluando las actividades de los buques día a día. Para determinar la emisión se requiere saber la etapa en la que se encuentran, ya sea en mar, en maniobra o en puerto, y de ahí existe la opción de determinarlos en función al tipo de buque o al tipo de combustible que consuman junto con el tipo de motor. (ENTEC, 2002).

## 2.6 Modelos de dispersión

Un modelo es una representación de la realidad simplificada, el cual es usado para explicar o predecir comportamientos a partir de datos de entrada. Existen diversos tipos de modelos y formas de representarse como lo son los físicos, los matemáticos, conceptuales entre otros.

### 2.6.1. Modelos de la calidad del aire

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes del aire a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera. Estos se basan en datos meteorológicos e información de fuentes como las tasas de emisión y la altura de la fuente emisora, estos modelos están diseñados para caracterizar los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera y, en algunos casos, los contaminantes secundarios que se forman como resultado de reacciones químicas complejas dentro de la atmósfera (EPA, 2016).

La EPA propone la siguiente clasificación para los modelos de la calidad del aire:

- Modelos de dispersión: se utilizan para estimar la concentración de contaminantes en receptores a nivel del suelo específicos que rodean una fuente de emisión.
- Modelos fotoquímicos: son para simular los impactos de todas las fuentes al estimar las concentraciones de contaminantes y el depósito de contaminantes tanto inertes como químicamente reactivos a grandes escalas espaciales.
- Modelos de receptores: estos modelos son técnicas de observación que utilizan las características físicas y químicas de los gases y partículas medidas en la fuente y el receptor para identificar la presencia y para cuantificar las contribuciones de las fuentes a las concentraciones del receptor.

### 2.6.2. Escalas de los modelos

Entre las escalas meteorológicas, está la de Orlandini en 1975 (Casellas, n.d.), quien propuso tres principales escalas:

- Micro escala: Su escala espacial es de hasta 2 km y su escala temporal es de varios minutos

- Meso escala: Su escala espacial es mayor o igual a 2 km e inferior a los 2000 km. Su escala temporal es de horas a días.
- Macro escala: Su escala espacial es mayor a 2000 km y su escala temporal es de una semana o más.

### **2.6.3. Modelo de dispersión CALPUFF**

Este es un sistema de modelado tridimensional de meteorología y calidad del aire, desarrollado por Earth Tech, Inc. Este modelo cuenta con la aprobación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Protonotariou et al., 2005). Este sistema sirve para evaluar el alcance de contaminantes en la calidad del aire, además de mostrar los impactos causados por éstos, involucrando condiciones meteorológicas completas.

### **2.6.4. Etapas del modelo CALPUFF**

Para la modelación de partículas existen 3 módulos que utiliza el modelo los cuales son los siguientes.

Modelo Meteorológico: Este abarca dos etapas, la primera es el pre-procesador de datos meteorológicos y geofísicos. En este se encuentra el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) el cual es un sistema de simulación atmosférica y de predicción numérica de nueva generación, que trabaja a meso-escala. Está diseñado tanto para la investigación atmosférica como para las aplicaciones de pronóstico operacional. (NCAR, 2001). Estos son obtenidos a través de la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), la cual, es un centro de investigación que pone a disposición datos a través del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) que pueden ser usados para la investigación y el pronóstico del tiempo a través del modelo WRF. Estos datos provienen del Sistema Global de Asimilación de Datos que recopila continuamente datos de observación del Sistema Global de Telecomunicaciones que se preparan cada 6 horas y el tipo de datos que ponen a disposición es a través de cuadrículas (grids). Manejan 28 tipos de variables y son útiles para generar los datos meteorológicos necesarios para el siguiente modulo (NCEP et. al, 1999)

En la segunda etapa se encuentra CALMET. Este es un modelo meteorológico que incluye un generador de campo eólico de diagnóstico que contiene análisis,

objetivos y tratamientos parametrizados de caudales, efectos de terreno cinemáticos, efectos de bloqueo del terreno y un procedimiento de minimización de divergencias, y un modelo micro-meteorológico para las capas de frontera terrestres y sobre el agua (Scire et. al, 2000).

Para el modelo de dispersión, CALPUFF es un modelo de pluma gaussiana lagrangiana de estado no estacionario que contiene módulos para efectos complejos en el terreno, transporte sobre el agua, efectos de interacción costera, lavado de la atmósfera, eliminación húmeda y seca y transformación química simple (Scire et. al, 2000).

Para la etapa de post-procesador, CALPOST es un programa con opciones para el cálculo de la concentración promedio en el tiempo y flujos de deposición previstos por los modelos CALPUFF y CALGRID. CALPOST calcula los impactos de la visibilidad de acuerdo con las recomendaciones del diferentes grupos de trabajo como lo son el interinstitucional sobre modelado de calidad del aire de la EPA (IWAQM), y del grupo de trabajo de valores relacionados con la Calidad del Aire (Scire et. al, 2000). En la Figura 8 se observa el esquema de las etapas de CALPUFF.

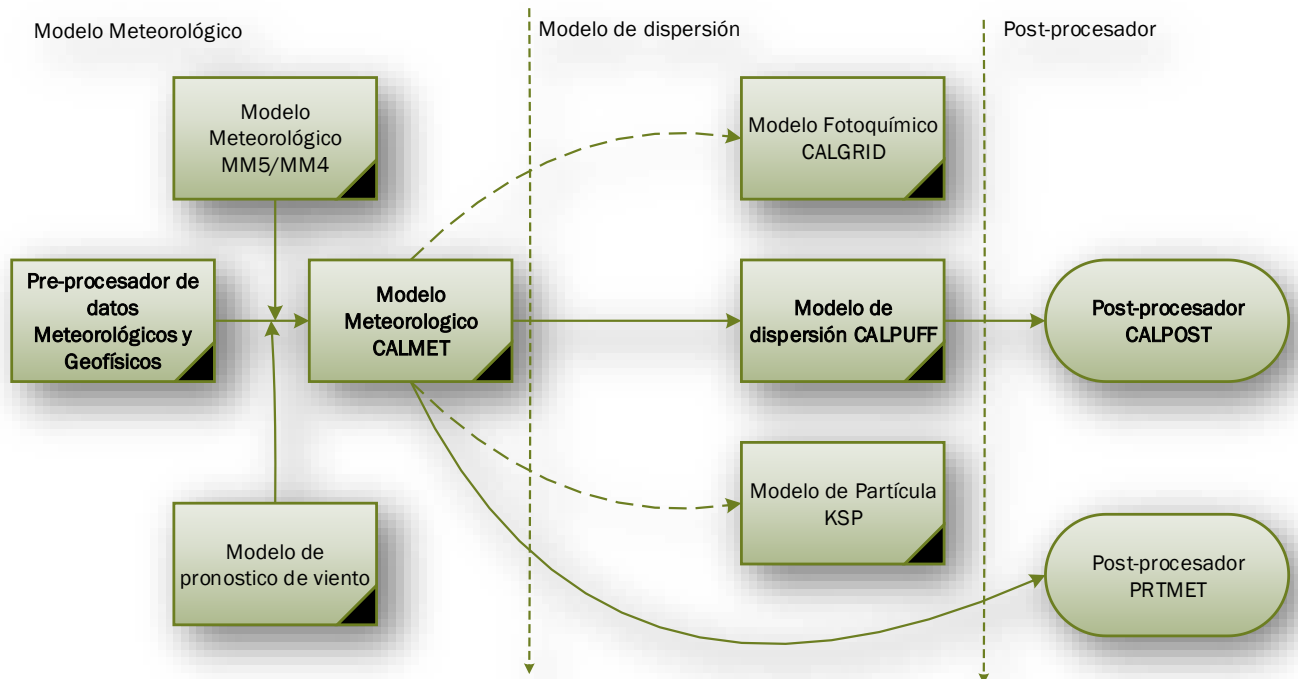


Figura 8. Etapas del Modelo CALPUFF. (Scire, et. al., 2000)

### 2.7 Puertos en México

Los puertos comerciales se clasifican en dos categorías, los de altura, que son aquellos en condiciones de recibir embarcaciones con grandes cantidades de carga, así como mantener relaciones comerciales, se caracteriza por enviar y recibir embarcaciones internacionales. La otra categoría de puertos son los de cabotaje, los cuales se caracterizan por transportar carga y pasajeros entre puertos de un mismo país (Cruz, 2012).

Los puertos comerciales sirven para hacer llegar materias primas al país, ayudan a que México pueda exportar productos manufacturados. Además, un tercio de la carga que se mueve en México se transporta por vía marítima. En México tenemos 16 Administraciones Portuarias Integrales Federales, 5 Administraciones Portuarias Integrales Estatales, 2 Administraciones Portuarias Integrales FONATUR y una Administración Portuaria Integral Privada la cual se encuentra en Acapulco (SCT, 2017)

La importancia de un puerto radica en el número de conexiones con otros puertos del mundo los cuales constituyen sus mercados potenciales y que tienen enlaces con los cuales hacer escalas a través de diversas rutas marítimas. Otro factor para determinar su importancia es la zona de influencia de un puerto marítimo hacia el interior del territorio del país al que pertenece, además su importancia será mayor si estas conexiones pueden extenderse hacia otras naciones. Estos conceptos se conocen como “foreland” y “hinterland”, respectivamente (Geogia Tech & ITESM, 2011). Los principales puertos del país con estas características son el puerto de Veracruz y el puerto Lázaro Cárdenas, seguido del puerto de Altamira y el puerto de Manzanillo.

### 2.7.1 Puerto Integral de Veracruz

El Puerto de Veracruz es una construcción antigua que data de la época de la conquista de México. Fundado por el conquistador Hernán Cortes en 1519, era el principal destino para los españoles que decidían visitar o abandonar la Nueva España (Aguilar & Ortiz, 2011). En el año de 1994 se crea la Administración Portuaria Integral de Veracruz, como consecuencia de la creación de la Ley de Puertos publicada en 1993. El puerto se encuentra en el municipio de Veracruz en el estado del mismo nombre (Figura 9). La ubicación del puerto se muestra en la Figura 10.

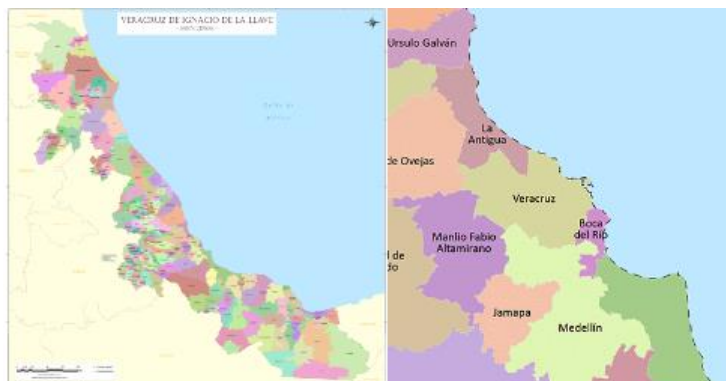


Figura 9. Municipio de Veracruz. INEGI, 2015

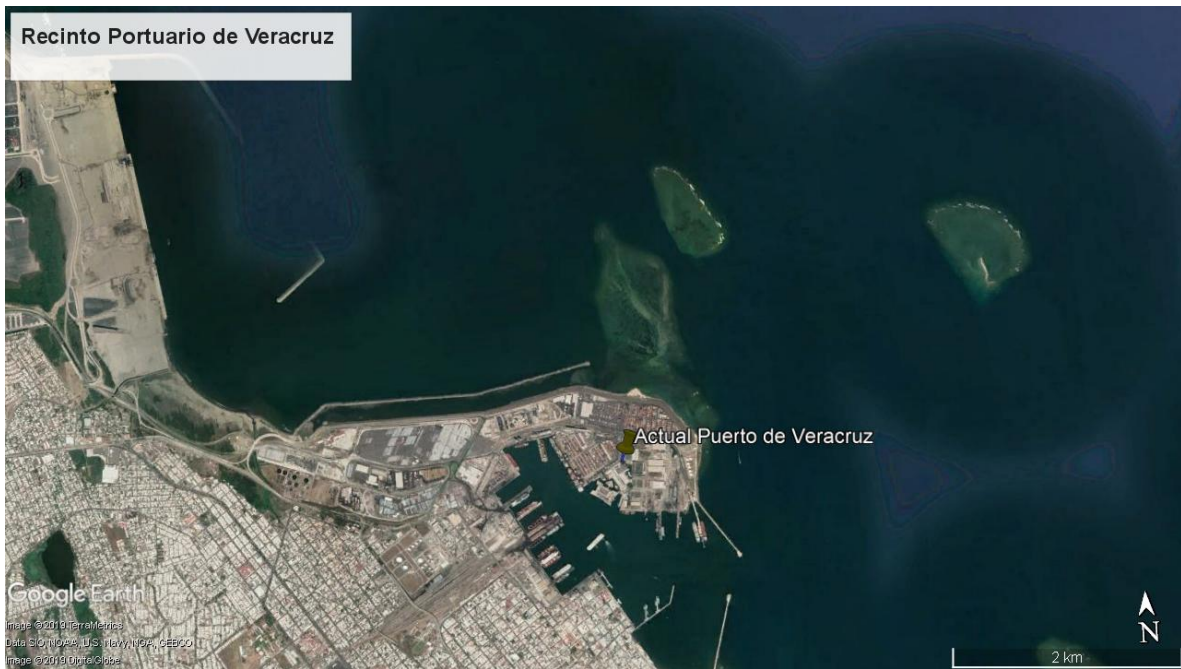


Figura 10. Ubicación del puerto de Veracruz. Google Earth 2018.

El puerto de Veracruz se encuentra comunicado con los principales centros logísticos de México. Cuenta con diferentes certificaciones como lo son ISO 14001:2004, ISO 9001: 2008, ISO 28000:2007, certificado de industria limpia, certificado ISPS y certificado de Igualdad Laboral (APIVER, 2017). Es de gran importancia debido a que tiene relación comercial con más 25 puertos de importancia mundial, además de estar situado en una posición estratégica, ya que cuenta con excelentes conexiones ferroviarias y carreteras, que lo enlazan a los principales centros logísticos como se observa en la Figura 11. Se prevé que para el 2030 el puerto crecerá al triple, lo que hace de suma importancia monitorearlo en este proceso de transición.

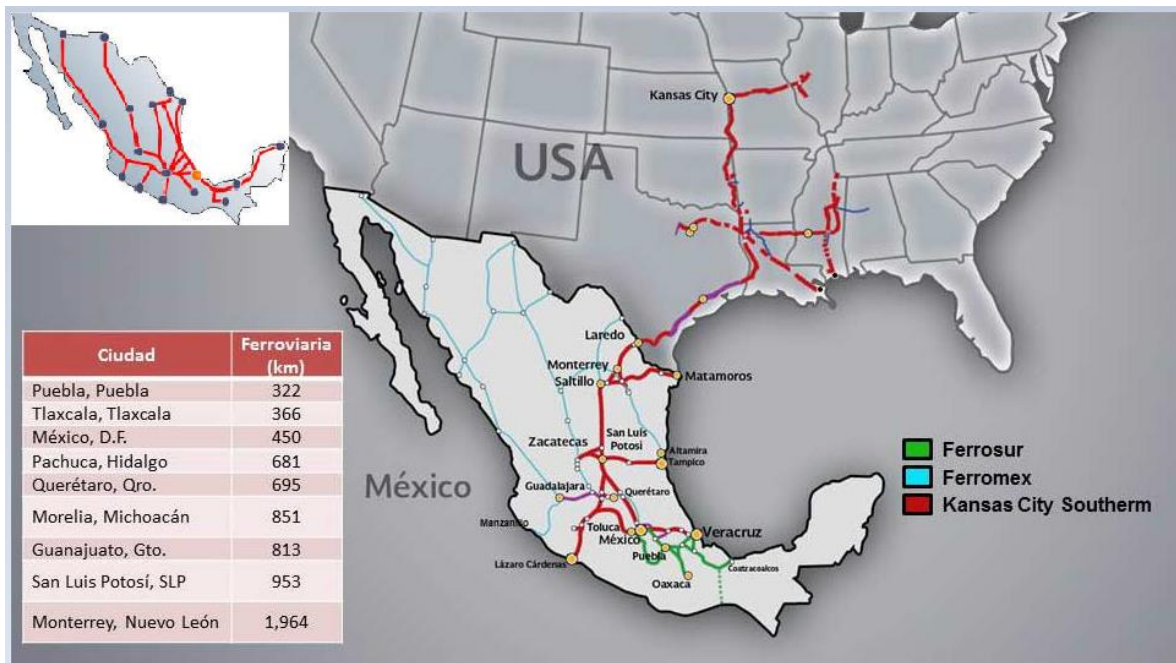


Figura 11. Comunicaciones del puerto de Veracruz con otras regiones. APIVER 2017

**2.7.3 Características del Puerto**

El puerto cuenta con la siguiente infraestructura: 65 Almejas, 9 bandas transportadoras fijas, una barredora, 22 básculas, 2 camiones, 53 camionetas, 18 cargadores frontales, 52 grúas de más de 15 toneladas, 41 grúas de menos de 15 Toneladas, 5 grúas de pórtico de muelle, 33 grúas de patio, 4 grúas Gottwald, 9 lanchas, 158 montacargas, 112 plataformas, 4 remolcadores de más de 4000 HP, 2 torres móviles, 55 tolvas, 2 trackmovil, 72 tractocamiones, 16 trascavo, 6 tractores ferroviarios y 42 spreader (APIVER, 2017).

Dentro de las instalaciones del puerto se tienen 11 muelles, 20 Empresas cesionarias, 31 prestadores de servicios portuarios, 61 prestadores de servicios conexos, 18 líneas navieras, 20 agencias navieras, 300 agentes aduanales y 2 empresas de servicios ferroviarios (APIVER, 2017).

**2.7.3. Tipos de Buques en el Recinto Portuario de Veracruz.**

Los registros publicados en los registros de APIVER, señalan que los tipos de buques que se presentan son los siguientes:



**Automóviles:** Se refiere a los buques de cargamento rodado, los cuales pueden ser automóviles, camiones o vehículos industriales, entre otros. Se le conoce también como Ro-Ro, el cual es un acrónimo del término en inglés Roll On-Roll off (Stock Logistic, 2016).

**Carga General:** Se trata de buques que pueden transportar cualquier tipo de carga seca no a granel. Una de sus características más comunes es que normalmente tienen su propio equipo de carga y descarga en tierra, además de que son versátiles, lo cual les permite transportar en tiempos de escasez, contenedores o carga a granel en bolsas (MIF, 2013).

**Combustible (Fluido):** También conocidos como “Tanques” o buques petroleros. Son buques cisterna para transportar crudo, los cuales tienen como características la estanqueidad al petróleo, la resistencia estructural, y su sistema de bombeo para la carga y descarga del combustible (Biologistik, 2019). En los factores de emisión lo conocemos con el término de “oil”.

**Contenedores:** Como lo dice su nombre, están diseñadas para el transporte de mercancías en contenedores las cuales pueden ser general o especializada. Los buques de esta clase acaparan la mayoría del cargamento seco (Biologistik, 2019).

**Granel:** Esta se clasifica en agrícola convencional, agrícola especializado, y granel mineral. No poseen embalaje en específico y transportan mercancía suelta o desmenuzadas como lo pueden ser granos, cementos o minerales (Biologistik, 2019). En los factores de emisión lo conocemos con el término de “bulk dry”.

**Líquidos:** Estos buques también se refieren a los “Tanques” de combustible, pero a diferencia de estos, transportan líquidos de diferente composición química. En los factores de emisión lo conocemos con el término de “other liquids”.

### **2.7.3. Nuevo Puerto de Veracruz**

El nuevo Puerto de Veracruz es una ampliación del actual puerto, esta se dividirá en dos etapas. La primera etapa en su primera fase del 2014 al 2019 se construyó el rompeolas poniente de 4.3 km de longitud, un muelle marginal de 2.8 km de longitud, en el que se construyen 5 terminales especializadas, estas las

observamos en la Figura 12. En la segunda fase del 2019 al 2024 se construirá la terminal satélite en el extremo del rompeolas poniente.



*Figura 12. Construcción del nuevo puerto de Veracruz.*

La segunda etapa del nuevo Puerto será del 2019 al 2030, en esta se realizará la construcción del rompeolas oriente de 3.5 km de longitud, además de que tendrá nuevas terminales especializadas (APIVER, 2015).

El proyecto de la ampliación del puerto está considerando el cuidado del ambiente, además de acatar las medidas de mitigación señaladas establecidas en la manifestación de impacto ambiental presentadas ante la SEMARNAT (APIVER, 2016). El nuevo puerto se muestra en la Figura 13 donde observamos de color rojo y amarillo la primera etapa del puerto, de color verde la segunda etapa, y de color morado el actual puerto de Veracruz.



Figura 13. Ubicación del nuevo puerto de Veracruz. (APIVER, 2015)

El Nuevo Puerto de Veracruz concluirá su primera etapa en junio del 2018, por lo que se esperaba que en esa fecha arribara el primer buque (ASC, 2016). Sin embargo, el primer buque, un portacontenedores llamado “*White Shark*” (Zamudio, 2019), llegó el 1 de julio del 2019. A partir de esta fecha se empezará a observar cambios de la calidad del aire, el incremento de emisiones de los buques que se presenten en el nuevo puerto de Veracruz aunado a la actividad portuaria del actual RPV que continuará funcionando de manera habitual.

#### **2.7.4 Evento “Norte” en el Recinto Portuario de Veracruz.**

En el Golfo de México existe un evento llamado “Norte”, el cual, es un fenómeno donde los vientos llegan a alcanzar velocidades que superan los 80 km/hora en las zonas de Laguna Verde y del Puerto de Veracruz durando entre un día y hasta un día y medio. Este evento se debe a cambios de presión, orografía y el rozamiento sobre el mar en estados del Golfo de México como Tamaulipas, Veracruz y Oaxaca (García, 2018). Cuando se presenta este evento, se suspenden las actividades en el RPV.

### **2.7.5 Puertos Verdes**

Puerto verde es una certificación que se le da a los puertos que cumplen con sus aspectos ambientales siendo sostenibles. Es otorgado por la Organización Europea de Puertos Marítimos, a través de la Fundación ECO Cadenas Logísticas Sustentables (ECOSLC). La sostenibilidad la definimos como el desarrollo capaz de responder a las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras a la hora de satisfacer sus propias necesidades (UNESCO, 1987).

En México ya existen tres puertos que han alcanzado el reconocimiento de Port Environmental Review System (PERS). El primero de ellos fue el puerto de Ensenada, Baja California, que en agosto del 2015 se le otorgó debido a que cumple rigurosamente con todos los ordenamientos nacionales e internacionales en materia de gestión ambiental y sustentabilidad portuarias, a fin de reducir al mínimo las emisiones contaminantes a la atmósfera y al agua (SEMARNAT, 2015). El segundo puerto en conseguir esta certificación fue el puerto Lázaro Cárdenas, ubicado en Michoacán en mayo del 2016. El tercer puerto se encuentra en Dos Bocas, Tabasco, lo cual se observa en el sitio web de ECOSLC (2019).

### **2.7.6 Proyecto puerto verde en Veracruz**

Uno de los objetivos del puerto de Veracruz es convertirse en un puerto Verde. Para conseguir esta certificación y cumplir en calidad del aire se han establecido cinco etapas (Bravo et. al, 2014):

1. Realizar un inventario de emisiones del puerto de Veracruz
2. Manejo de materiales peligrosos generados por las actividades del puerto
3. Evaluación de riesgo en las actividades del puerto de Veracruz
4. Verificación y monitoreo continuo de las condiciones establecidas por la evaluación ambiental.
5. Evaluación de la calidad del aire (SO<sub>2</sub>, partículas, deposito atmosférico) y meteorología para desarrollar programas para prevenir y minimizar un posible deterioro significativo del puerto de Veracruz y su zona de influencia.

En virtud de lo anterior, el resultado de esta tesis contribuirá a la 5ta etapa del proyecto del puerto verde.

## 2.8 Emisiones en el puerto

Se han realizado diversos trabajos en el puerto de Veracruz con relación a sus emisiones de partículas.

El primero de ellos es un inventario de emisiones del puerto de Veracruz realizado por Tami (2013), en donde a través de factores de emisión de la EPA, se consideraron diversas fuentes de emisión de contaminantes. La suma total de las emisiones (emisión global) obtenidas en el Recinto Portuario de Veracruz de manera general son:

553.24 Toneladas PST/año

432.69 Toneladas PM<sub>2.5</sub>/año

469.56 Toneladas de PM<sub>10</sub>/año

Además, existe una considerable emisión de partículas, sin embargo, no es el contaminante con la mayor emisión, como se observa en la Figura 14.

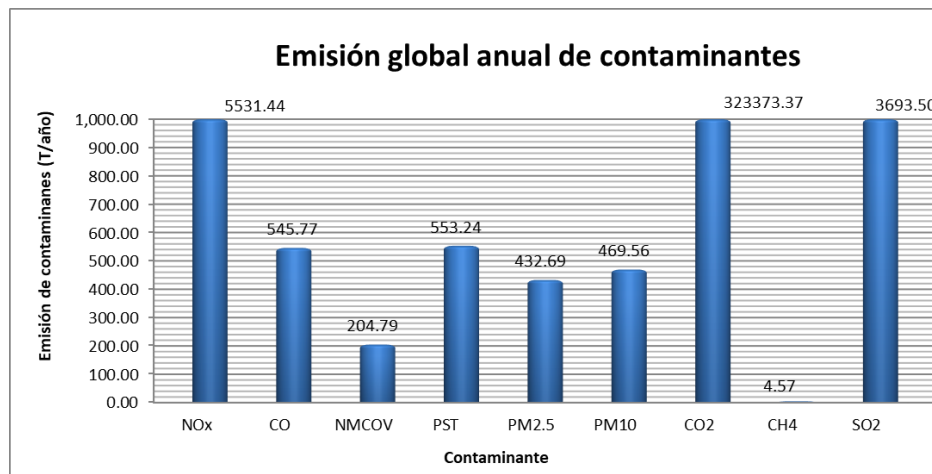


Figura 14. Emisión global de contaminantes generados por las fuentes evaluadas en el inventario de emisiones atmosféricas, (Tami, 2014).

El segundo trabajo es el realizado por Rojas (2016), quien realizó una estimación de emisiones de partículas por manejo de granel en el recinto portuario de Veracruz. En este trabajo se usaron factores de emisión del AP-42 de la USEPA para estimar las emisiones fugitivas de partículas por el manejo de granel agrícola y mineral durante los años 2014 y 2015. La actividad que resultó ser la que

presentaba las mayores emisiones de partículas  $PM_{10}$  fue en la recepción de grano, además que en julio de 2014 hubo una mayor emisión de partículas con 9020.91 kg/mes de  $PM_{10}$  y en diciembre del 2015 hubo una emisión de 11476.44 kg/mes de  $PM_{10}$ .

## 2.9 Convenio MARPOL

En el año de 1973, la Organización Marítima Internacional (OMI), organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques, creó el convenio Marine Pollution (MARPOL) con el objetivo de prevenir la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales (OMI, 2019a).

Como parte de estos convenios se han realizado diferentes anexos listados a continuación:

- a) Anexo I: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos (entrada en vigor 2 de octubre de 1983)
- b) Anexo II: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel (entrada en vigor: 2 de octubre de 1983)
- c) Anexo III: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos (entrada en vigor 1 de julio de 1992)
- d) Anexo IV: Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques (entrada en vigor: 27 de septiembre de 2003)
- e) Anexo V: Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques (entrada en vigor: 31 de diciembre de 1988)
- f) Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (entrada en vigor: 19 de mayo de 2005).

En el anexo VI se establecen los límites de las emisiones de  $SO_x$  y de  $NO_x$  de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan el ozono; para las zonas de control de emisiones designadas se establecen normas más estrictas en relación con la emisión de  $SO_x$ ,  $NO_x$  y de partículas (OMI, 2019a)

Desde el año de 1992 México se ha adherido al convenio MARPOL a través de los anexos I, II, y V (SEGOB, 2013). En el año 2014 el gobierno de México tuvo el interés en suscribir los anexos III, IV y VI del Convenio MARPOL (SCT, 2014). Esto ha llevado a cambios en la normatividad como en la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. En esta se menciona en el punto cuarto la modificación al contenido de azufre en el combustóleo intermedio, y se menciona que esta entrará en vigor a partir de que se publique en el Diario Oficial de la Federación el Anexo VI del Convenio MARPOL. Por el momento este anexo no es parte de los acuerdos firmados por México (OMI, 2019b).

## Capítulo 3. Metodología

La metodología que se aplicó para evaluar el impacto generado por las actividades del RPV se resume en la Figura 15 mostrando las actividades principales.

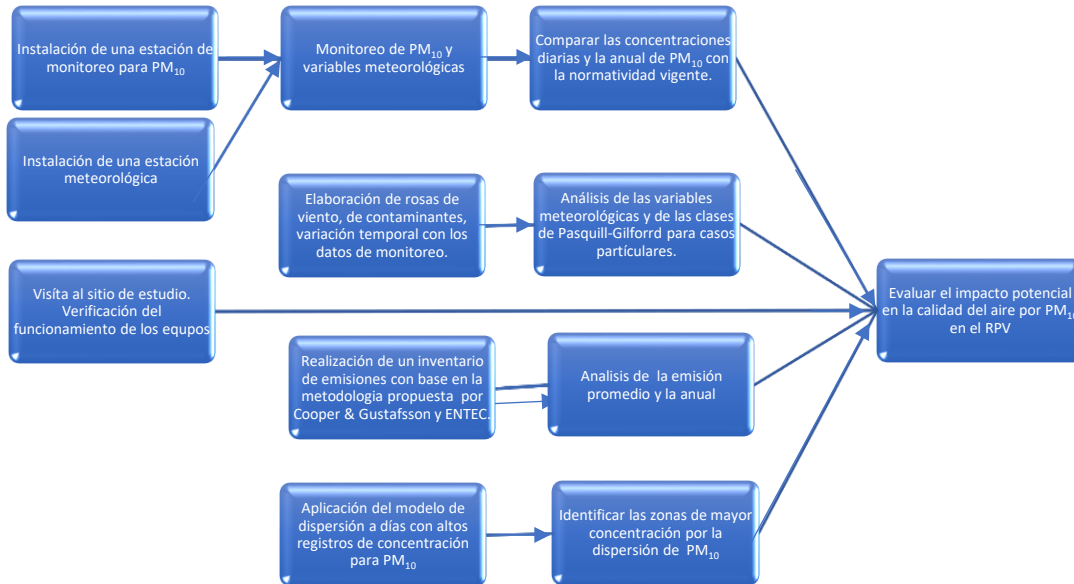


Figura 15. Esquema de la metodología aplicada.

### 3.1 Monitoreo de la calidad del aire

Uno de los objetivos fue la verificación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 a partir del monitoreo continuo de partículas. Para ello lo primero fue el establecimiento del sitio de monitoreo. Para ello se siguieron las recomendaciones publicadas por la OMS (OMS, 2006).

#### 3.1.1 Determinación del sitio de monitoreo Atmosférico

##### 3.1.1.1 Objetivos de la estación de monitoreo

Entre los objetivos que tiene la estación de monitoreo están los siguientes

- Verificar que no se superen los límites establecidos por la norma oficial mexicana NOM-SSA1-0025-2014.
- Medir los efectos causados por las actividades del recinto portuario, así como la construcción y operación de la ampliación del nuevo Puerto de Veracruz



### 3.1.1.2 Parámetros ambientales

Para el monitoreo de la calidad del aire se consideraron partículas  $PM_{10}$ , junto con estas se midieron los siguientes parámetros meteorológicos:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Humedad relativa
- Radiación solar
- Lluvia
- Presión atmosférica

### 3.1.1.3 Cantidad y ubicación de los sitios de muestreo

Debido al alto costo de las estaciones de monitoreo y a los objetivos del monitoreo, se instaló solamente una estación de monitoreo de partículas con su respectiva estación meteorológica, como lo recomienda el CFR de Estados Unidos.

El sitio de monitoreo cumplió con lo establecido en las recomendaciones de la OMS y la CFR, en particular con los siguientes puntos:

- Estar a una altura de entre los 2 y 7 metros sobre el nivel del suelo.
- Estar alejada a una distancia mayor de 20 metros de la circunferencia que marca el follaje o las raíces de los árboles y por lo menos a 10 metros si los árboles actúan como un obstáculo.
- La distancia del muestreador a obstáculos como edificios, deberá ser por lo menos del doble de la altura que sobresale el obstáculo sobre el muestreador.
- Estar alejado a más de 20 metros de circunferencia de los árboles y se verificó que no existieran obstáculos a su alrededor
- No deben existir edificios u objetos alrededor que obstruyeran la medición del muestreador.
- Tener un flujo de aire sin restricciones  $270^\circ$  alrededor de la toma de muestra.
- No haber flujos de hornos o de incineración cercanos.
- La distancia a las carreteras o caminos estará en función del tráfico, a excepción de los sitios rodeados de edificios, en los cuales deberá ser de 2 a 10 metros del borde de la línea de tráfico más cercana.

### 3.1.1.4 Determinación de tiempos de muestreo

Para este proyecto se estableció tener un monitoreo continuo de  $PM_{10}$  y de su respectiva meteorología. Se determinó que el lapso a monitorear sería por lo menos un año de datos válidos, comenzando por el periodo de agosto del 2017.

La ubicación de la estación de monitoreo (Figura 16), se estableció en un sitio que cumplía las recomendaciones de la OMS, además de que fue seleccionado estratégicamente para interceptar las emisiones generadas por la actividad del actual puerto de Veracruz y las actividades de construcción del nuevo puerto de Veracruz. A estas características se agrega que la dirección de los vientos dominantes del norte favorece la recepción de contaminantes en la estación.



Figura 16. Ubicación de la estación de Monitoreo del RPV. (Google Earth, 2019)

La estación de monitoreo (Figura 17) se colocó en el primer piso de una edificación ubicada en el sitio antes mencionado. En la parte superior se colocaron los instrumentos de meteorología como la veleta, el anemómetro, termómetro y pluviómetro, además del cabezal del Equipo BAM1020 (Figura 18).



*Figura 17. Estación de Monitoreo de la calidad del aire en el RPV.*



*Figura 18. Cabezal del equipo analizador de PM<sub>10</sub> BAM1020.*

La estación de monitoreo cumple con lo establecido en la NOM-156-SEMARNAT-2012. Se cuenta con un equipo de cómputo (Figura 19) para el resguardo de los datos, los cuales pueden ser transmitidos vía red a un equipo ubicado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Sección de Contaminación

Ambiental de la UNAM. La estación cuenta con planta de respaldo de energía eléctrica además de un sistema contra incendios. Dentro de la estación de monitoreo se cuenta con una oficina administrativa. El espacio donde se encuentra el equipo de monitoreo BAM1020 dispone de aire acondicionado para un mejor cuidado y funcionamiento de los equipos (Figura 20).



*Figura 19. Equipo de cómputo dentro de la estación.*



*Figura 20. Equipo de aire acondicionado dentro de la estación.*

Como parte de la operación, se realizó el mantenimiento al equipo BAM1020. Este consistió en limpiar el cabezal debido a que se encontraba cubierto con arenas provenientes de los vientos del norte. También se cambió la cinta aproximadamente cada 2 meses como se observa en la Figura 21.



Figura 21. Cambio de cinta al equipo BAM1020.

#### 3.1.1.5 Visita al sitio de estudio

Se realizaron 2 visitas al sitio de estudio en donde se observó y analizó las actividades del RPV y de la construcción del NPV para realizar un análisis de las posibles fuentes de emisión de partículas. En el sitio se verificó el funcionamiento adecuado de los equipos de monitoreo y de meteorología. Otra de las actividades fue la recolección de información para la realización del inventario de emisiones.

#### 3.1.2 Equipo de Monitoreo

El equipo utilizado para el monitoreo de partículas  $PM_{10}$  es el BAM1020 basado en la atenuación Beta. Como se observa en la Figura 22 el equipo cuenta con un display donde se puede ver en tiempo real las concentraciones de partículas monitoreadas.

Para los datos meteorológicos se utilizó la consola “*Vantage Pro2*” de la marca “*davis instruments*” (Figura 23), la cual mide parámetros como: temperatura, dirección y velocidad del viento, radiación solar, UV, presión atmosférica entre otros.



Figura 22. Equipo BAM1020 perteneciente a la estación de monitoreo.

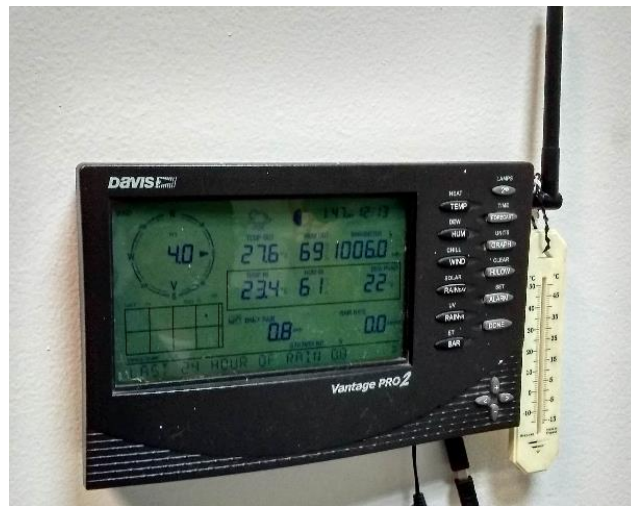


Figura 23. Consola para datos meteorológicos "Vantage Pro2" dentro de la estación de Monitoreo.

### 3.1.3 Manejo y tratamiento de los datos.

Para el monitoreo de las partículas  $PM_{10}$ , los promedios diarios y anuales se calcularon siguiendo la metodología establecida en la norma *NOM-025-SSA1-2014 Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. En esta se establece que se requieren por lo menos 75% de las concentraciones horarias válidas para el promedio diario y para el promedio anual. Esto implica que para el promedio diario requerimos por lo menos 18 registros horarios al día.

Para el promedio anual se requiere también de un 75% de datos válidos. Cuando no se realiza el monitoreo diariamente se busca que se cuente con 3 trimestres válidos del año señalados en la norma, sin embargo, esto no aplica a nuestro monitoreo debido a que se realiza monitoreo continuo.

Para los equipos automáticos los cálculos se realizarán de la siguiente manera de acuerdo con la norma ya mencionada.

Cálculo del promedio diario.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$\bar{x}$ =Promedio de las 24 horas (Promedio diario)

n= número de concentraciones horarias validas

$x_i$ =Concentraciones horarias validas

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} x_{i,t}$$

t= Trimestre del año del calendario

$\bar{x}_t$ =Promedio para el trimestre t

$n_t$ = número de datos validos en el trimestre t

$x_{i,t}$ =Valor de la concentración correspondiente al día i del trimestre t.

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n_a} \sum_{t=1}^{n_a} \bar{x}_t$$

$\bar{x}_a$ =Promedio anual

$n_a$ = Numero de trimestres validos en el año

Mientras que para las variaciones temporales de  $PM_{10}$  se utilizó el software “R-estudio” con la librería OPENAIR. Con ella se obtuvieron las evoluciones de las concentraciones horarias durante los días de la semana, la variación en las concentraciones horarias, las variaciones en las concentraciones mensuales y la evolución por días de la semana.

Con respecto a las variables meteorológicas se generaron 3 graficas para observar la variación de la velocidad del viento, la temperatura y la radiación solar.

Además, se realizaron rosas de viento y rosas de contaminantes mensuales y anuales para los periodos de agosto del 2017 a diciembre del 2018.

### 3.2. Factores de Emisión

Para realizar el inventario de emisiones en buques se consideraron dos metodologías de Cooper & Gustafsson.

La primera metodología la llamaremos “*Metodología A*”, (Cooper & Gustafsson, 2004b) está basada en el tipo de motor que usan en función de su velocidad (Tabla 3) y del tipo de combustible que ocupen. La clasificación de los combustibles es la siguiente: Diésel marino (Marine Diesel Oil - MDO), Gas Marino (Marine Gas Oil - MGO) y aceite residual marino (Residual Oil - RO).

*Tabla 3. Clasificación de los motores de buques en función a su velocidad (Guevara, 2010).*

Tipo de motor Diésel	Velocidad [rpm]
<b>Alta velocidad (High Speed Diesel, HSD)</b>	n>900
<b>Media velocidad (Medium Speed Diesel, MSD)</b>	300<n<900
<b>Baja velocidad (Slow Speed Diesel, SSD)</b>	n<300

Los factores de emisión los vemos en la Tabla 4. En esta se observa que los factores de emisión ya abarcan las tres etapas de posicionamiento de los buques. Las 3 etapas son las siguientes (Browning & Bailey, 2006):

- Sea: (mar): También conocido como “Cruise” es la etapa donde el buque se encuentra en el océano. En esta etapa se producen las mayores emisiones a la atmósfera.
- Port (puerto): También conocido como “hotelling”, es la etapa en la cual el barco está operando sólo con los motores auxiliares o con conexión a tierra debido a que están anclados o atados al muelle. También se le puede denominar zona de atraque.
- Maneuver: (Maniobra): Es la etapa en la cual el buque se encuentra entre el rompeolas y el muelle.



Tabla 4. Factores de emisión en función de su tipo de motor y combustible. (Cooper & Gustafsson, 2004b)

Factores de emisión en las 3 actividades, en mar, en Puerto y en maniobra.at sea, in port, maneuver), g/kWh						
Tipo de buque	NOx	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	HC	PST	Consumo (kW)
MSD/MGO	13.9	1.1	690	0.4	0.3	217
MSD/MDO	13.9	4.3	690	0.4	0.3	217
MSD/RO	14.7	12.3	722	0.4	0.3	217
HSD/MGO	10.9	1.1	690	0.4	0.3	217
HSD/MDO	10.9	4.3	690	0.4	0.3	217
HSD/RO	11.6	12.3	722	0.4	0.3	227

La ubicación de las áreas donde se realizan las etapas de posicionamiento se muestran en la Figura 24. En ella se pueden ver de color azul oscuro la zona de maniobra, de color verde la zona de atraque (puerto) y en color rosa la zona de fondeo el cual es el lugar donde los buques esperan a tener acceso al RPV.

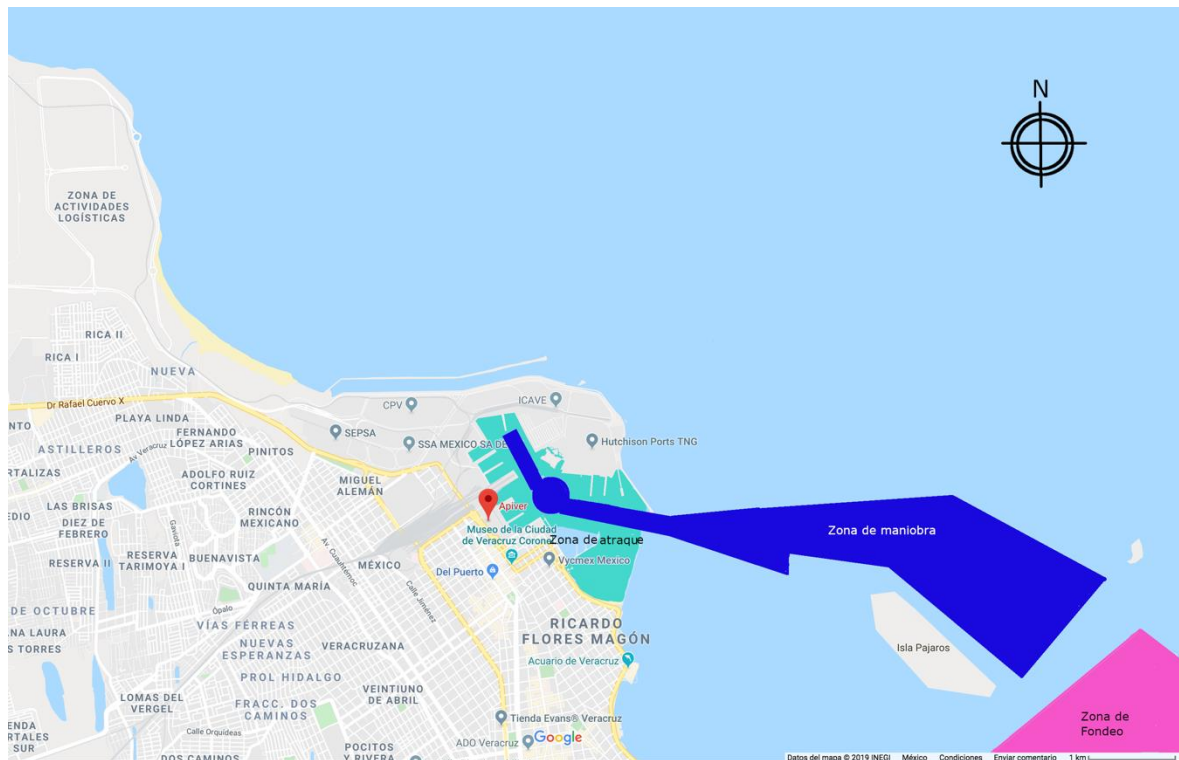


Figura 24. Zona de tráfico marítimo en el RPV (APIVER, 2016, modificado por Antonio, 2019)

Para la aplicación de esta metodología accedimos a la página web de APIVER en <https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/tramites-y-servicios/historico-de-buques/> donde se proporcionan datos de los buques que han zarpado en las últimas semanas al RPV. Con esos datos calculamos la emisión por día generada por buques, en función de las características señaladas anteriormente.

Para la segunda metodología la cual llamamos “Metodología B” (Entec, 2002) utilizamos factores de emisión en función del tipo de buques que ingresan diariamente en el recinto portuario. Estos operan en función de la etapa en la que se encuentre el buque: en mar (Tabla 5), en el puerto (Tabla 6) o en la etapa de maniobra (

Tabla 7).

*Tabla 5. Factores de emisión en mar. (Entec, 2002)*

Factores de emisión en mar, g/kWh				
Tipo de buque	NOx	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	HC
Gas licuado	8.5	12.4	822	0.3
Combustible	14.9	11.7	689	0.5
Líquidos	16.6	10.9	641	0.6
Carga General	16.3	10.9	644	0.6
Contenedores	17.5	10.7	631	0.6
oro cargo	15.6	11.2	659	0.5

Tabla 6. Factores de emisión en el puerto. (Entec, 2002)

Factores de emisión en puerto, g/kWh					
Tipo de buque	NOx	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	HC	PST
Gas licuado	7.5	13.4	884	0.9	2.1
Combustible	12.1	12.8	754	1.4	2.2
Líquidos	13.3	12	707	1.5	2.2
Carga General	13.3	12.1	716	0.9	1.5
Contenedores	13.7	12.1	710	1	1.5
roro cargo	13	12.3	723	0.9	1.4

Tabla 7. Factores de emisión en maniobra. (Entec, 2002)

Factores de emission en maniobra, g/kWh					
Tipo de buque	NOx	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	HC	PST
Gas licuado	7.4	13.5	887	0.9	2.1
Combustible	12	12.8	754	1.4	2.3
Líquidos	13.3	12	706	1.6	2.3
Carga General	13.1	12	709	1.6	2.3
Contenedores	14	11.8	696	1.6	2.3
roro cargo	12.5	12.3	724	1.5	2.3

Debido a que en la sección “*Histórico de buques*” no siempre viene el tipo de buque que ha llegado, se accedió a la sección “*Resumen mensual*”, en el sitio <https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/estadisticas-2/resumen/> donde se utilizaron los datos de los buques como nombre, país, el muelle en que llegan, la fecha de arribo y el tipo de carga (APIVER, 2019).

Para realizar los cálculos correspondientes se consideraron los buques con un motor de potencia media (4000 kW). (Anglo Belgian Corporation, n.d.) y se consideró para cada etapa un lapso de 24 horas.

Para determinar las demás actividades del puerto de Veracruz, retomaremos los datos obtenidos por Tami (2013), en donde consideraremos lo siguiente:

Para PST se tomó en cuenta la actividad del Centro de Apoyo Logístico al transporte (CALT) el cual consiste en las fuentes móviles que circulan dentro del RPV como lo son automóviles, motocicletas camionetas y tráilers. También se tomó en cuenta la actividad del incinerador el cual se encarga de algunos residuos del RPV. Ambas actividades están basadas en los factores de emisión publicados por la US-EPA.

Para las  $PM_{10}$  y las  $PM_{2.5}$  se consideraron las grúas de marco de las cesionarias de la Corporación Integral de Comercio Exterior (CICE) y de la Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz (ICAVE), además de las actividades de las Locomotoras.

Tabla 8. Emisiones del RPV diferente a buques (Tami, 2014)

Emisión de contaminante (T/año)			
	PST	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$
<b>Locomotoras</b>	n/a	0.85	0.88
<b>ICAVE</b>	n/a	14.70	15.27
<b>CALT</b>	0.29	n/a	n/a
<b>Incinerador</b>	0.01	n/a	n/a
<b>Total</b>	0.31	15.55	16.16

### 3.3 Modelo de dispersión

#### 3.3.1 Selección de días

Debido a que en la etapa de monitoreo de  $PM_{10}$  se presentó una cantidad alta de días donde se sobrepasó la norma, se seleccionaron los cinco días con mayor concentración de partículas  $PM_{10}$ , por lo que se usó el modelo CALPUFF con el objetivo de evaluar el alcance geográfico de las altas concentraciones registradas en la estación de monitoreo además de proponer nuevas ubicaciones de estaciones de monitoreo de contaminantes. Para ello se requirió que los días seleccionados pertenezcan al lapso en que se realizó el inventario de emisiones ya que estos son necesarios para su elaboración.

#### 3.3.2 Etapa del Pre-procesador

Para la etapa del Pre-procesador de datos Meteorológicos y Geofísicos se utilizó el modelo WRF a través del sistema operativo CENTOS perteneciente a

Linux [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html). Se descargó la base de datos meteorológicos de reanálisis de la “*National Centers for Environmental Protection*” (NCEP) de tipo “Grid” 1°x1° en el sitio web <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>. Cabe destacar que estos datos meteorológicos tienen cobertura global y mediante el modelo WRF/WPS se puede definir el dominio o los dominios de interés.

Se consideraron dos dominios en el modelo WRF con las siguientes características que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de los dominios usados en WRF

Parámetro	Dominio, d01	Dominio, d02
Número de puntos	140x140	61x61
dx, dy (m)	24000, 24000	8000, 8000
Coordenadas		
Ref.Lat = 24.162		
Ref.Lon=-101.43		
TrueLat1 = 24.162		
Stand_lon=-101.43		
Tipo de Mapa		
"Mercator"		

Una vez instalado WRF, trabajamos por medio del primer modulo WPS, en donde se insertaron los datos señalados en la Tabla 9 en el archivo namelist.wps. Después de correr el ejecutable “*geogrid.exe*” se obtuvo el mapa en la Figura 25 donde se observan los dos dominios necesarios para la simulación.

El dominio 1 abarca completamente a la República Mexicana, mientras que el dominio 2 abarca el municipio de Veracruz de Ignacio Llave, así como sus alrededores. El propósito de utilizar dos dominios fue para ver como los fenómenos meteorológicos que ocurren en el dominio uno (República Mexicana), afectan al segundo dominio (región de Veracruz) y con ello el comportamiento de las partículas sea más acorde a la realidad.

## WPS Domain Configuration

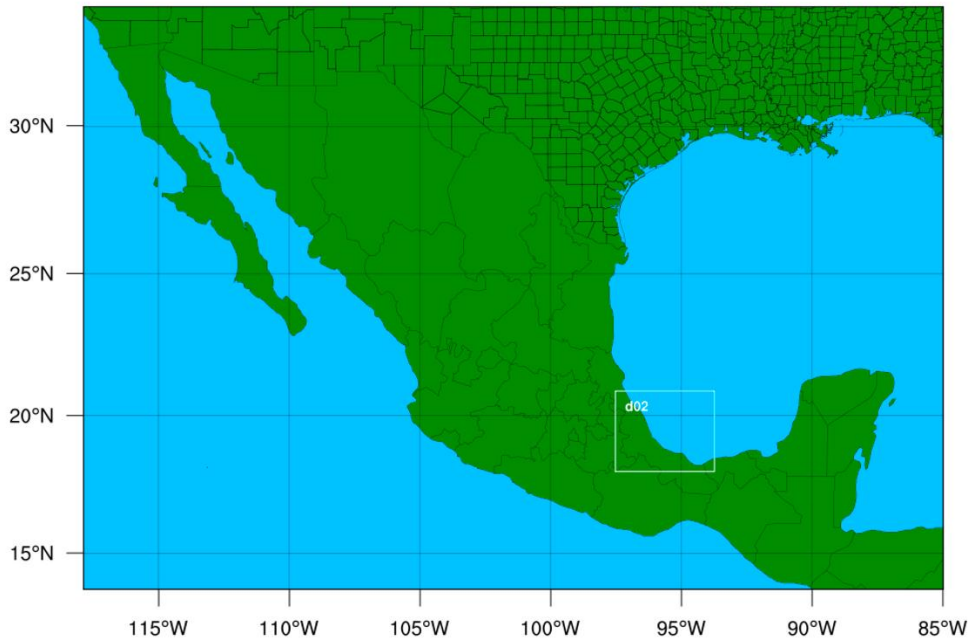


Figura 25. Mapa con los dominios utilizados para WPS

Ya teniendo el dominio hecho, se procedió a convertir los datos descargados de la NCEP a través de diferentes softwares como lo son *“ungrib.exe”* y *“metgrid.exe”* con los cuales obtuvimos archivos con el nombre de *met\_em.d01* y *met\_em.d02* respectivamente para cada dominio. En el siguiente modulo se corrió el ejecutable *“wrf.exe”* con el cual se obtuvieron los archivos *wrfout\_d01* y *wrfout\_d02* para cada dominio.

Se transformaron los datos de salida del modelo WRF al formato *“dat”* por medio del software CALWRF, [http://www.src.com/calpuff/download/mod6\\_codes.htm](http://www.src.com/calpuff/download/mod6_codes.htm), que es el requerido por la etapa de CALMET. En esta etapa se realizó el modelado del terreno como se observa en la Figura 26. En el mapa se puede observar en diferentes colores las diferentes altitudes sobre el nivel del mar, además de un radio de influencia de 50 km.

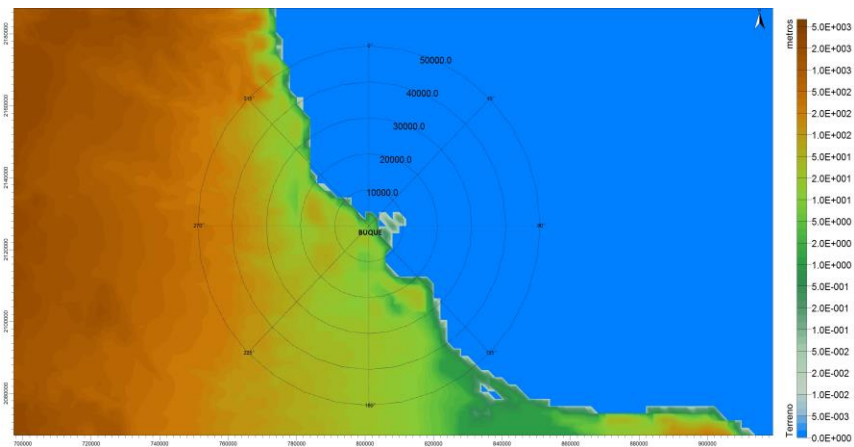


Figura 26. Terreno realizado en CALPUFF.

### 3.3.3 Modelo de dispersión CALPUFF

En esta etapa se ingresaron los datos de la fuente de emisión como se observa en la Tabla 10. La cantidad de emisión de partículas fue obtenida de los inventarios de emisiones por buques. Es importante señalar que de las diversas fuentes existentes en el RPV solo se trabajó con la emisión generada por buques debido a que no existen datos actuales de las actividades de otras fuentes generadoras de partículas como lo pueden ser las locomotoras, grúas, automóviles, ni de la ampliación del NPV como lo son el proceso de dragado, construcción entre otros.

Tabla 10. Datos de la fuente de emisión.

Parámetro	Buque
Ubicación, UTM, m	801142, 2126656
Emisión, kg/h	Partículas
Tipo combustible	Marine Diesel Oil
Tipo fuente	Buque/Puntual
Altura, m	30
Diámetro, m	3
Temperatura de gases de salida, °C	250 a 350
Velocidad de los gases de salida, m/s	40

Tabla 11. Características de la simulación.

<b>Radio de influencia, m</b>	<b>50000</b>
<b>Tamaño malla, km</b>	<b>440x440</b>
<b>Resolución, m</b>	<b>2000</b>
<b>Tipo mapa</b>	<b>Mercator</b>
<b>Zona UTM</b>	<b>14</b>

### 3.3.4 Post-procesador CALPOST

En esta etapa se realiza el cálculo con los datos de meteorología, el tipo de terreno, y emisiones de las fuentes para poder visualizar las concentraciones y la dispersión de los contaminantes. El tiempo promedio que se consideró para la emisión de los buques fue de veinticuatro horas.

### 3.3.5 Selección de Factores de emisión

Se usó el modelo CALPUFF para la determinación de la concentración de partículas con ambas metodologías A y B para hacer una comparación entre el impacto que proyectan cada una de ellas. En la metodología B además se agregó la emisión generada por cada uno de los buques en los diferentes muelles del puerto en el que arribaron, siendo 8 muelles en su posición N, S, E, y W; además de los muelles para contenedores y los muelles especiales para PEMEX.

## 3.4 Análisis de los casos particulares

Para analizar los días en que se presentó la máxima concentración de PM<sub>10</sub> en la estación de monitoreo, se realizó una gráfica con la variación horaria de PM<sub>10</sub> analizando en qué horario se sobrepasó la concentración de 75 µg/m<sup>3</sup> que es el valor límite establecido en la normatividad mexicana. Se analizó también la variación horaria de la estabilidad atmosférica a través de la Tabla 1 y la Tabla 2 de las clases de Pasquill-Gifford observando la velocidad del viento y la radiación solar y con ello determinar el comportamiento del aire en función de la estabilidad.

Por ejemplo, si a las 13 horas la velocidad del viento es de 4.5 m/s y la radiación solar es de 500 W/m<sup>2</sup> entonces la estabilidad atmosférica será poco inestable (“C”).



Se realizó la rosa de vientos y la rosa de contaminantes con la librería OPENAIR del software *R studio* para cada día para interpretar el posible origen de la contaminación, siendo las posibles fuentes el actual recinto portuario de Veracruz, la construcción del nuevo puerto de Veracruz, o la actividad urbana del municipio. Los datos para la realización de la rosa fueron los datos de meteorología in situ monitoreados en el RPV, y el contaminante ingresado en la rosa de contaminantes fueron las partículas  $PM_{10}$ .

Se encontró que la rosa de contaminantes señalaba que el origen de la contaminación atravesó el actual RPV, se analizó el inventario de emisiones para observar la actividad de los buques en ese día y los días previos analizando los datos. Esto lo podemos observar en la Figura 27 donde la dirección N y NNW y NW se refiere a las actividades de la construcción del nuevo puerto de Veracruz, las direcciones NNE, NE, ENE, E y ESE se refieren a actividades del actual Recinto Portuario de Veracruz, y las demás direcciones nos señalan el área urbana del municipio de Veracruz.



Figura 27. Rosa de vientos sobre la estación de monitoreo. (Google Maps, 2019)

## Capítulo 4. Resultados y discusión

### 4.1 Monitoreo de la calidad del aire (PM<sub>10</sub>)

En la Figura 26 se muestra la variación temporal del monitoreo de PM<sub>10</sub> dentro del RPV, donde se observa la concentración diaria en el periodo de agosto del 2017 a abril del 2019. En color rojo se observa el valor de la concentración de referencia de acuerdo a la NOM-025-SSA1-2014, la cual, establece una concentración de referencia de 75 µg/m<sup>3</sup> promedio 24 horas. En color verde se observa el valor de la concentración de referencia de acuerdo a la Unión Europea y la OMS de 50 µg/m<sup>3</sup> promedio 24 horas. Se encontraron días en donde se llegó a rebasar la concentración de referencia tanto para la NOM-025-SSA1-2014; así como para el valor normado de la UE y la OMS.

variación de la concentración de PM<sub>10</sub> de agosto-2017 a abril-2019

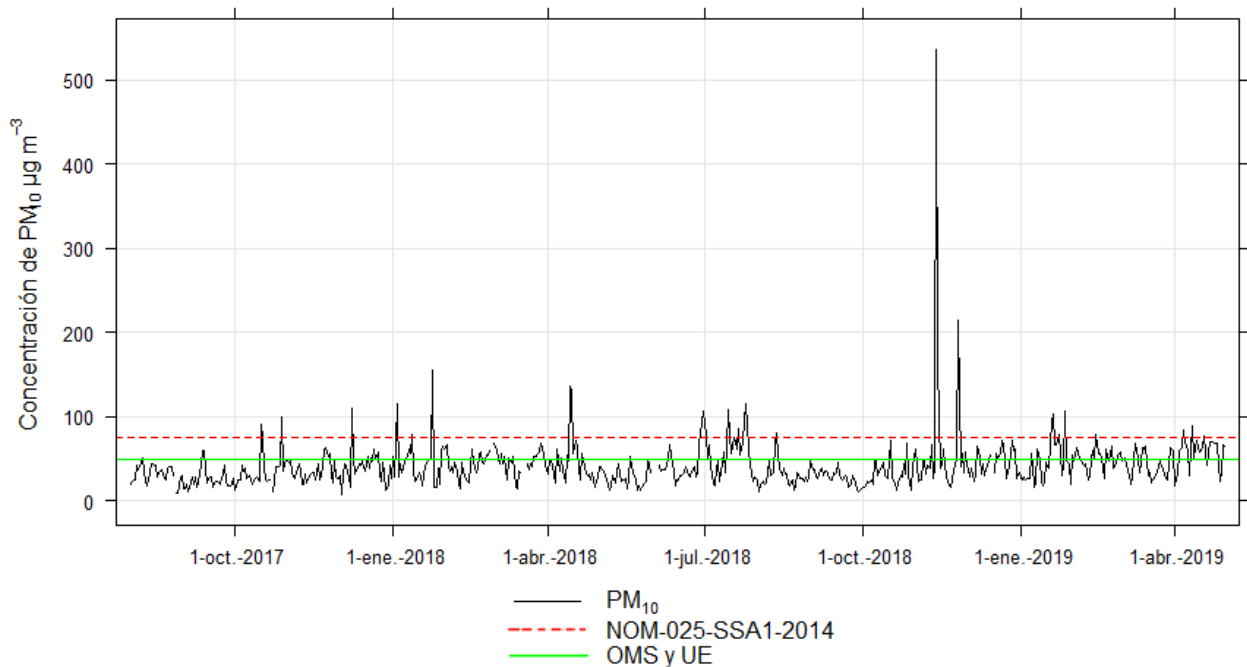


Figura 28. Variación de la concentración de PM<sub>10</sub> en el RPV.

En la figura anterior observamos que se rebaso por 31 días el límite de referencia de concentración de PM<sub>10</sub> por parte de la normatividad mexicana. Sí

tomamos con valor límite las recomendaciones de la UE y de la OMS, la cantidad de días aumenta a 172, debido a que sus valores de referencia son mas estrictos que en México.

Se realizaron las Figuras 29, 30 y 31, con la librería *openair*, del software *R estudio*. En ella se realizó un calendario con los valores de los promedios diarios de las concentraciones de partículas  $PM_{10}$  en el periodo entre agosto a diciembre del 2017, en el año completo del 2018 y en el periodo de enero a abril del 2019. En ella se observa de color blanco los días que no tuvieron suficiencia de datos para obtener un promedio. Observamos que en las tres gráficas los valores que superan el límite máximo permisible diario de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido en la NOM-025-SSA1-2014, vienen en negritas para una mejor visualización.

En la Figura 29 se observa de colores azul y verde los días de baja concentración, mientras que de colores amarillo naranja y rojo los días de alta concentración. Vemos que tres de los días que se superó la norma se encuentran en octubre mientras que en diciembre solamente uno.

Concentración de PM<sub>10</sub> en 2017

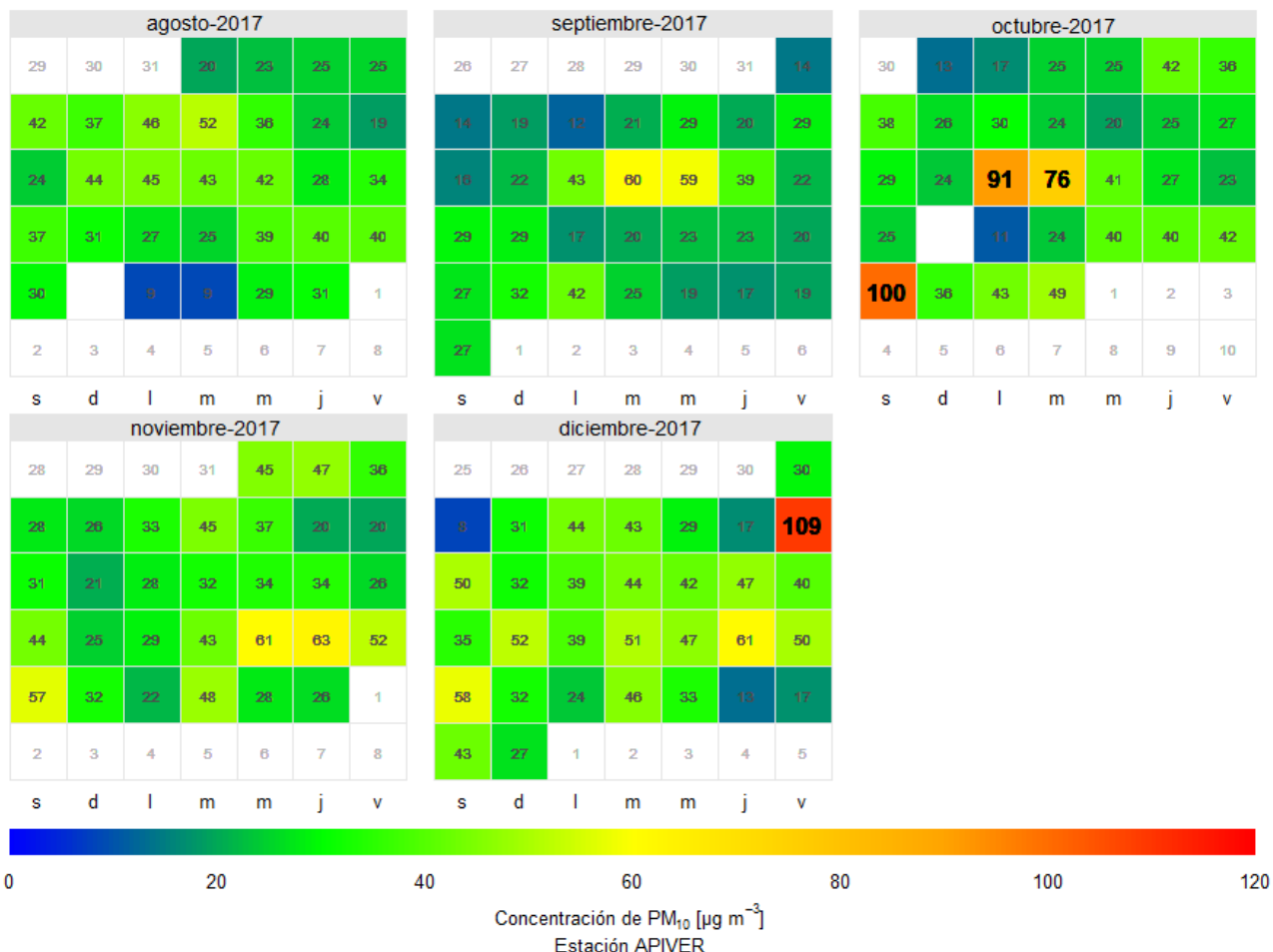


Figura 29. Concentración promedio diaria de PM<sub>10</sub> en el 2017

En la Figura 30 encontramos las concentraciones diarias de todo el 2018 siendo el único año completo que fue monitoreado. Aquí los días de baja concentración se encuentran en tonos azul y verde oscuro, mientras que de otros colores se muestran las concentraciones más altas. Vemos que en los meses que presentaron días que superaron la norma fueron enero, abril, junio, julio, agosto y noviembre. El mes donde más se presentaron eventos de contaminación fue en julio, mientras que en noviembre se presentaron las concentraciones más altas. La gráfica tiene como límite la concentración de 250 µg/m<sup>3</sup>, por lo que el día 13 de noviembre de 2018 marca una concentración con el valor mencionado, siendo que el promedio de concentración de ese día fue en realidad de 535.16 µg/m<sup>3</sup>. Esta

gráfica se realizó de esta manera para facilitar su visualización, ya que los demás valores de concentración anual son muy inferiores a este valor.

### Concentración de PM<sub>10</sub> en 2018

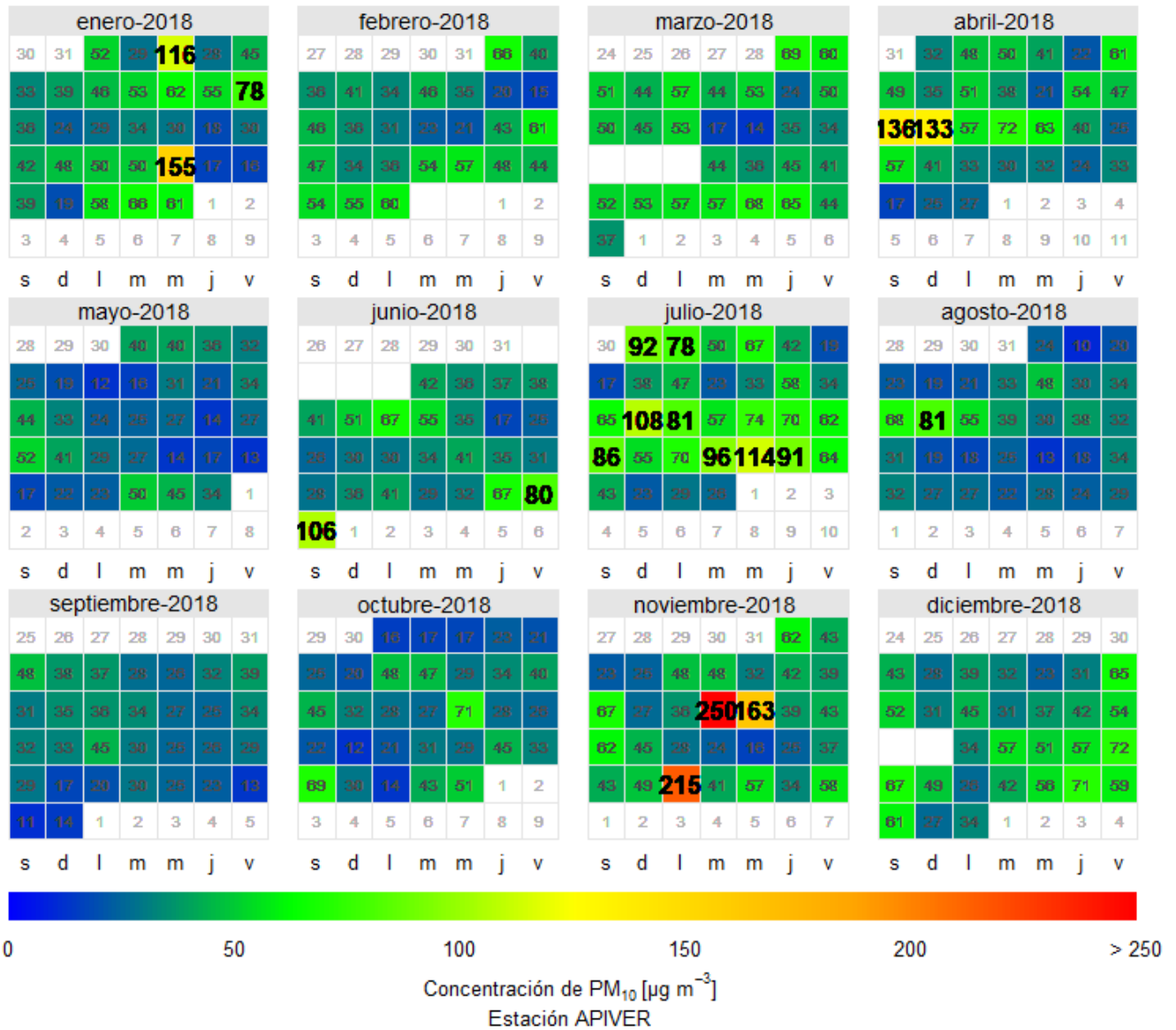


Figura 30. Concentración promedio diaria de PM<sub>10</sub> en el 2018

En la Figura 31 se muestran los resultados del monitoreo obtenidos en el 2019, abarcando únicamente hasta el mes de abril. En este gráfico se muestran de colores azul, verde y amarillo las concentraciones bajas, mientras que con

## Capítulo 4. Resultados

naranja y rojo las concentraciones altas. Se observa que solamente en marzo existieron días en los que no se superó la norma.

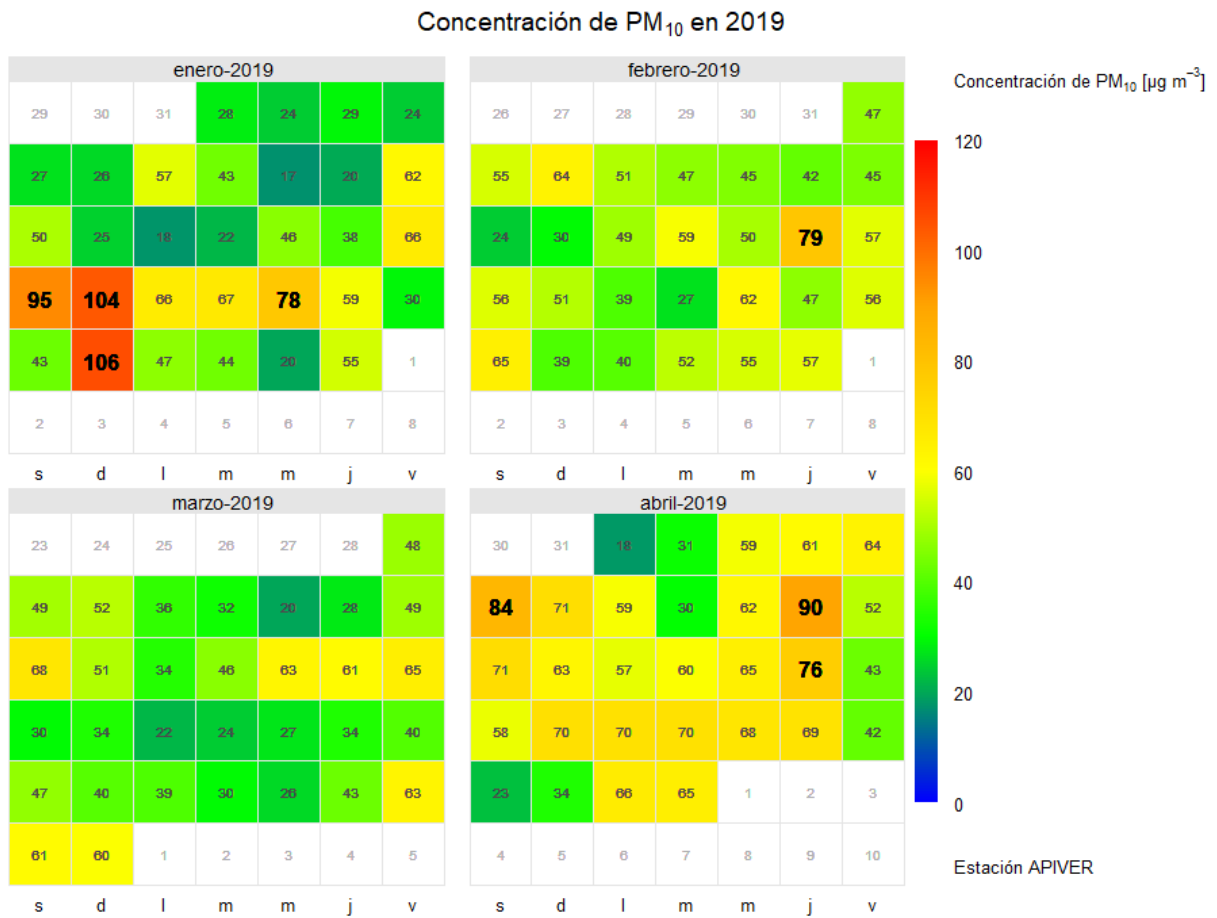


Figura 31. Concentración promedio diaria de PM<sub>10</sub> en el 2018

Para visualizar de una manera más resumida los días que se superó la norma de partículas PM<sub>10</sub>, se realizó la Tabla 12 que se muestra a continuación.

Tabla 12. Días que se superó la NOM-025-SSA1-2014

	Día	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>oct-17</b>	16	91.08
	17	76
	28	100.08
<b>dic-17</b>	8	109.46
<b>ene-18</b>	3	115.63
	12.	78.00
	<b>24</b>	<b>155.42</b>
<b>abr-18</b>	<b>14</b>	<b>136.17</b>
	<b>15</b>	<b>133.08</b>
<b>jun-18</b>	29	80.04
	30	105.83
<b>jul-18</b>	1	93.54
	2	79.17
	15	107.75
	16	81.25
	21	86.00
	24	96.00
	25	114.46
	26	91.29
<b>ago-18</b>	12	83.04
<b>nov-18</b>	<b>13</b>	<b>535.17</b>
	<b>14</b>	<b>163.25</b>
	<b>26</b>	<b>215.08</b>
<b>ene-19</b>	19	95.00
	20	103.96
	23	78.25
	27	105.88
<b>feb-19</b>	14	78.79
<b>abr-19</b>	6	83.54
	11	89.79
	18	76.29

En la misma tabla se observa que los 6 días con mayor concentración en la etapa de monitoreo, se remarcan con negritas.

Con los datos obtenidos en el año 2018 se calculó el promedio anual siguiendo la metodología de la norma NOM-025-SSA1-2014, el cual nos dio una

concentración de  $42.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esta supera ligeramente el límite anual establecido de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 4.2 Meteorología

A través de la estación meteorológica se recopilaron datos sobre variables como lo son la temperatura, radiación solar, dirección del viento entre otras variables. En la Figura 32 observamos el promedio diario de la variación de la velocidad del viento en un periodo de agosto del 2017 a diciembre del 2018. Se observa que las velocidades de viento más altas se presentan en los meses de octubre a abril, mientras que las velocidades más bajas se presentaron en los meses de mayo a septiembre.

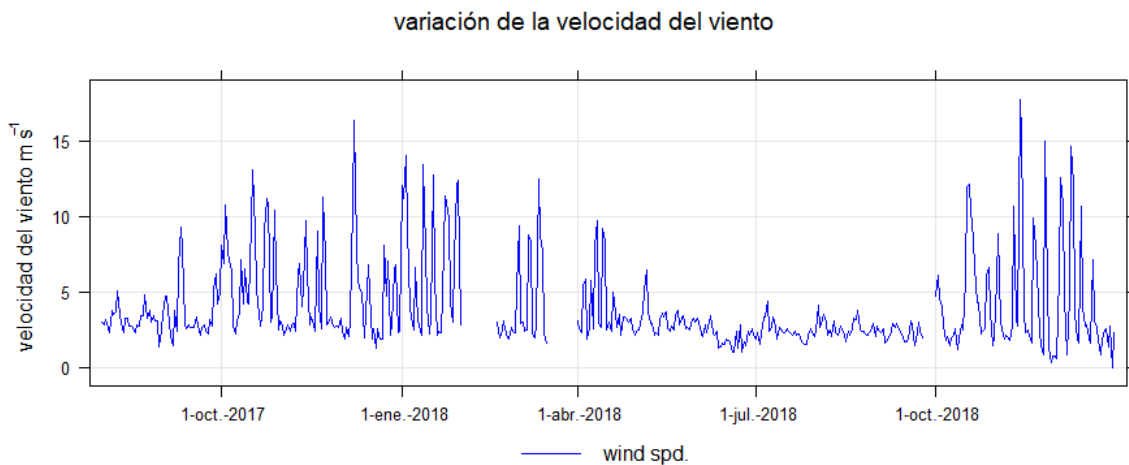


Figura 32. Variación de la velocidad del viento en el RPV (ago. 2017-dic 2018)

En la Figura 33 observamos la variación de la radiación solar en un periodo de agosto del 2017 a diciembre del 2018. Se observa que la radiación solar máxima estuvo en un rango aproximado de  $600$  a  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

En la Figura 34 observamos la variación por horas de la Temperatura en grados Celsius. Se observa que la zona es cálida dominando las temperaturas entre  $20$  y  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .



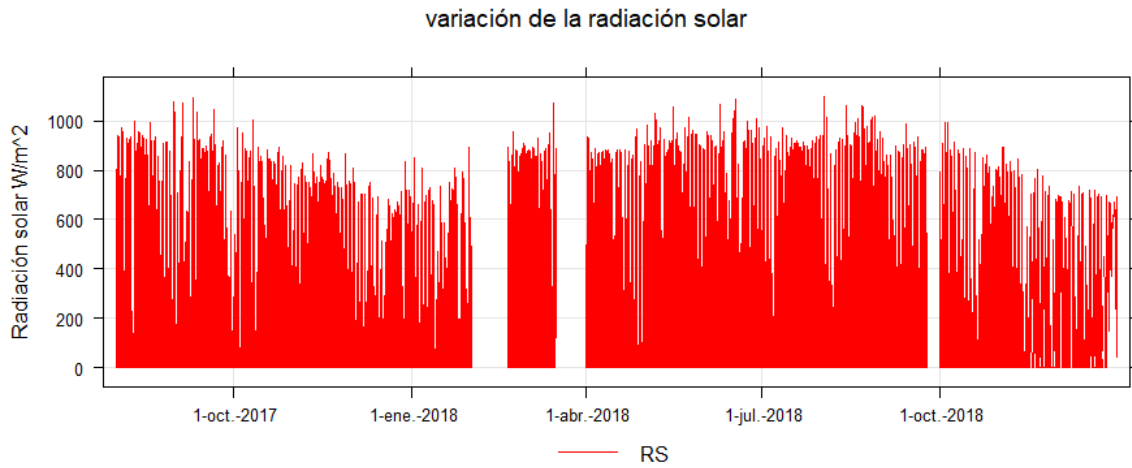


Figura 33. Variación de la radiación solar en el RPV (ago. 2017-dic 2018)

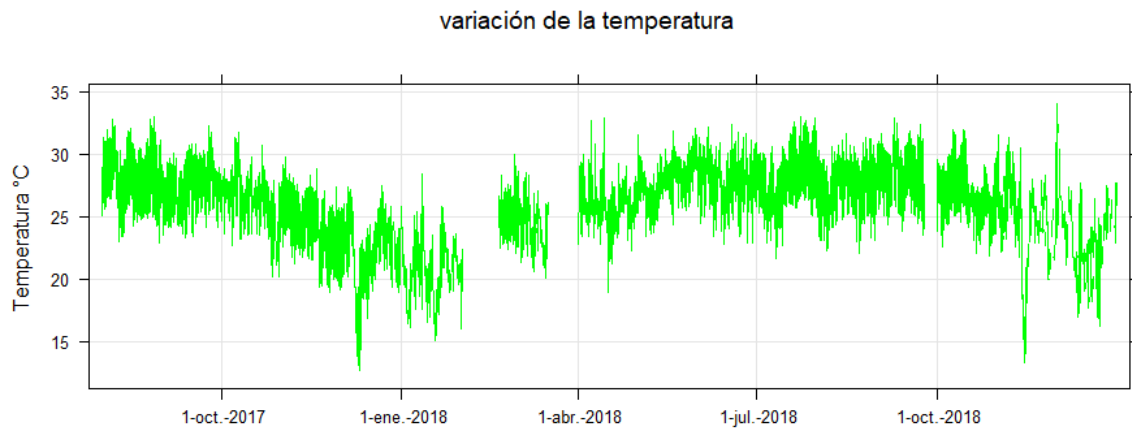


Figura 34. Variación de la temperatura en el RPV (ago. 2017-dic 2018)

Con los datos por hora de la dirección del viento se elaboraron rosas de vientos mensuales para los años 2017 y 2018. La rosa de vientos del año 2017 la podemos observar en la Figura 35. Se observa que los vientos dominantes provienen mayormente del norte llegando a velocidades de hasta 19.2 m/s.

Rosa de vientos 2017

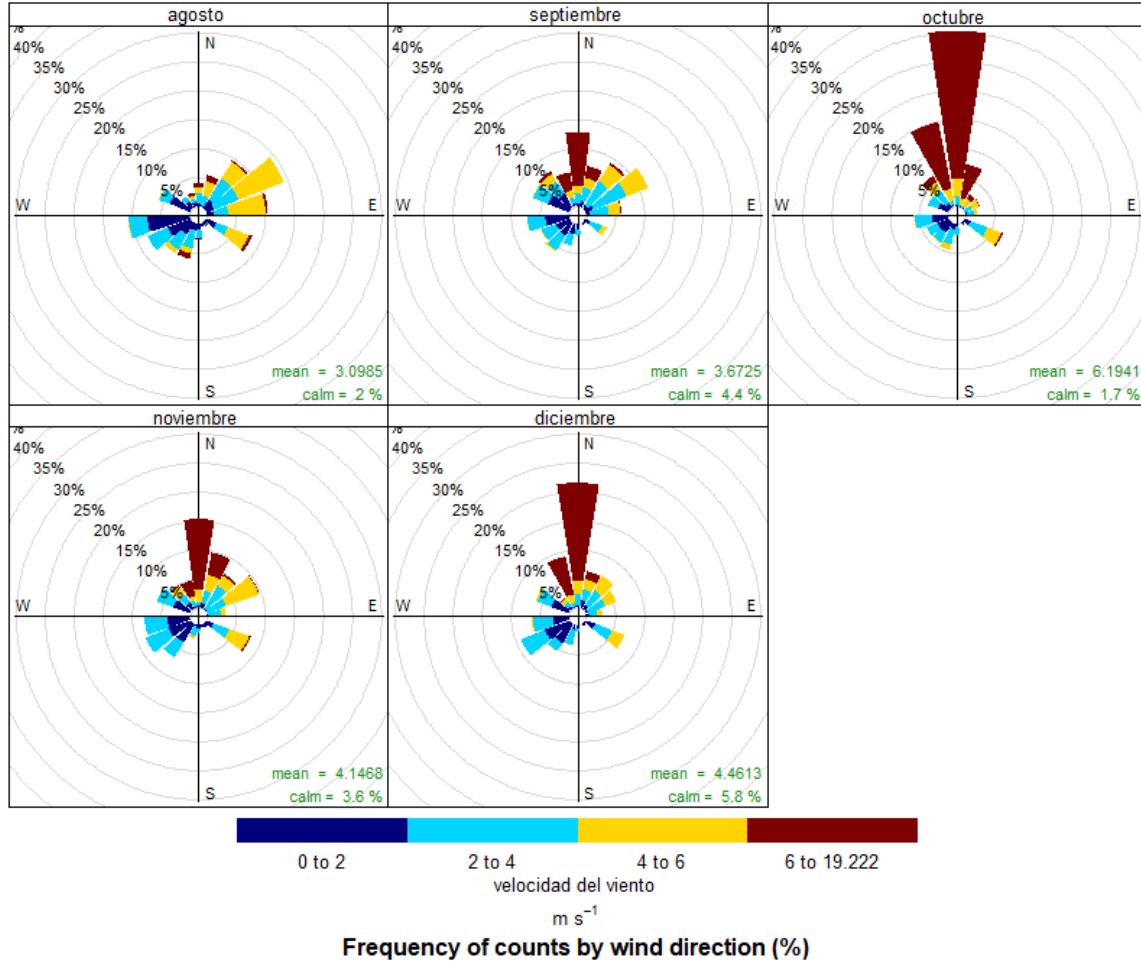


Figura 35. Rosa de vientos mensual 2017 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos del 2018 la podemos observar en la Figura 36. En ella podemos visualizar vientos dominantes del N, NNE y NE en la mayoría de los meses. Se observa que los meses con mayores vientos dominantes fueron en enero y marzo con vientos de hasta 21.9 m/s.

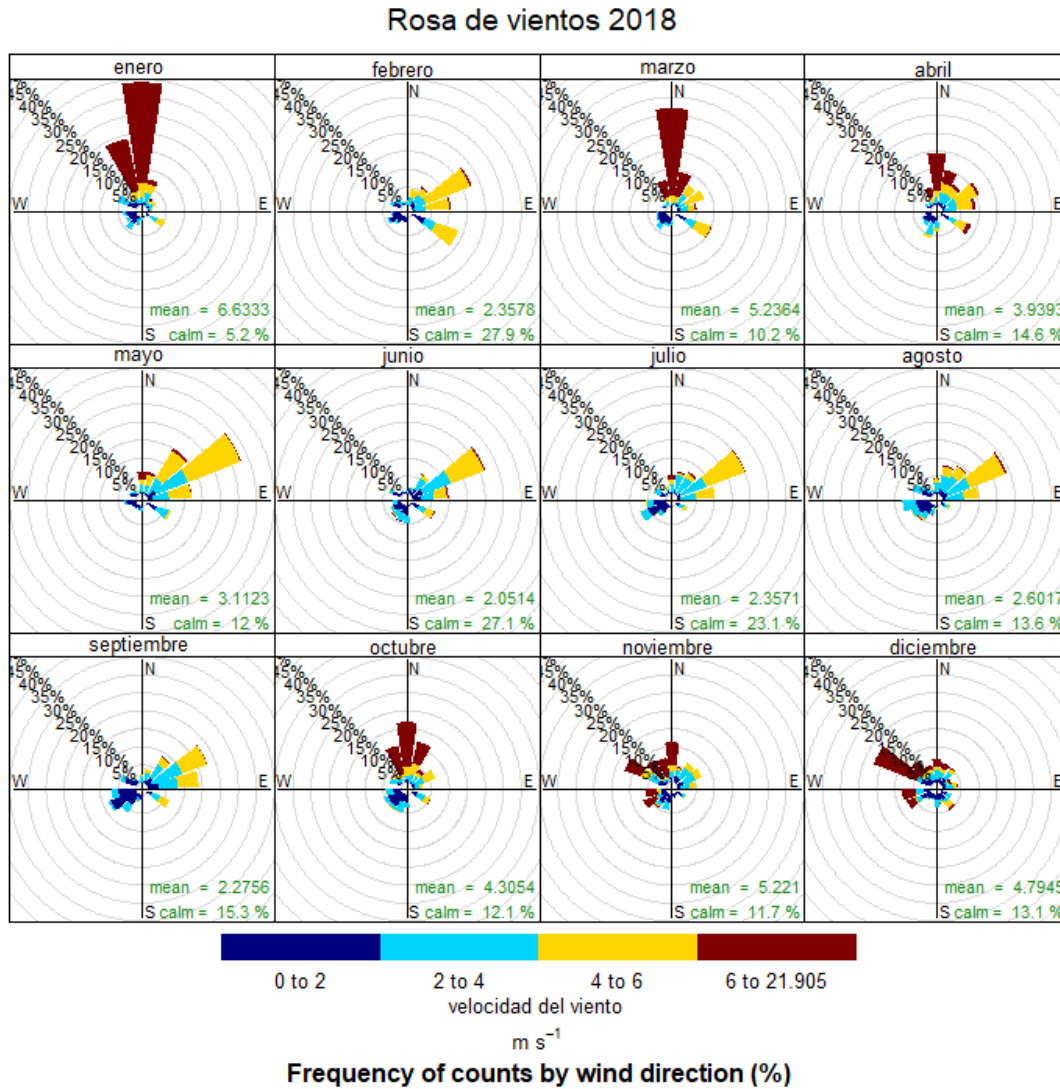


Figura 36. Rosa de vientos mensual 2018 en la estación de monitoreo del RPV

En la Figura 37 se observa la rosa de contaminantes del año 2017 donde observamos que el modelo propone que el origen de la contaminación proviene de diferentes orientaciones y no sólo en dirección a los vientos dominantes en cada mes. El mes que más resalta es octubre donde el mayor porcentaje de contaminación fue proveniente del NWN.

Rosa de contaminación Ago-Dic 2017

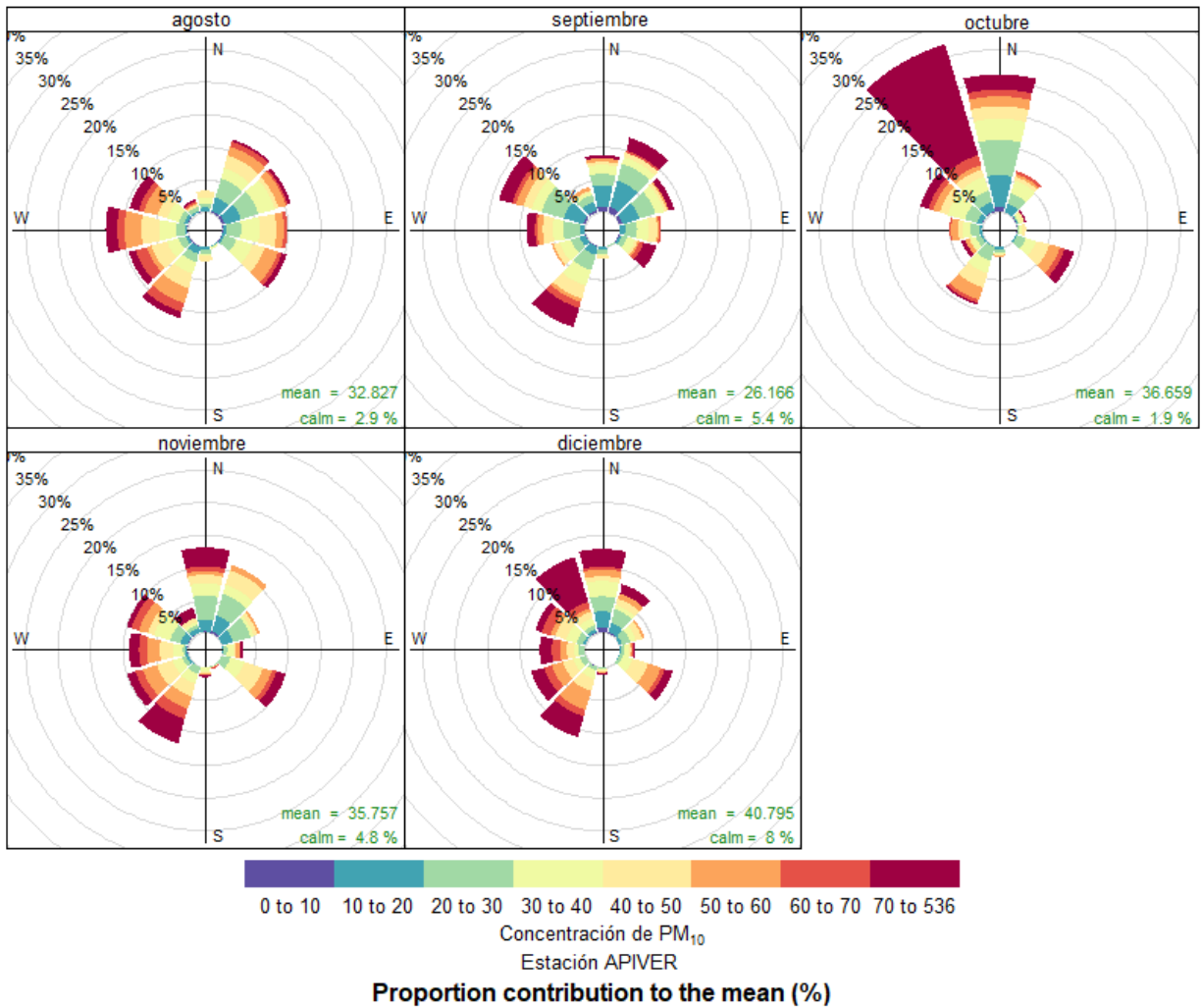


Figura 37. Rosa de contaminantes 2017 en la estación de monitoreo del RPV

En la Figura 38 se observa la rosa de contaminantes del año 2018 donde visualizamos que gran parte de la contaminación en la mayoría de los meses proviene de la dirección donde se ubican el actual puerto de Veracruz y el nuevo puerto de Veracruz. Sin embargo, no todas las altas concentraciones son provenientes de esos lugares.

### Rosa de contaminación del 2018

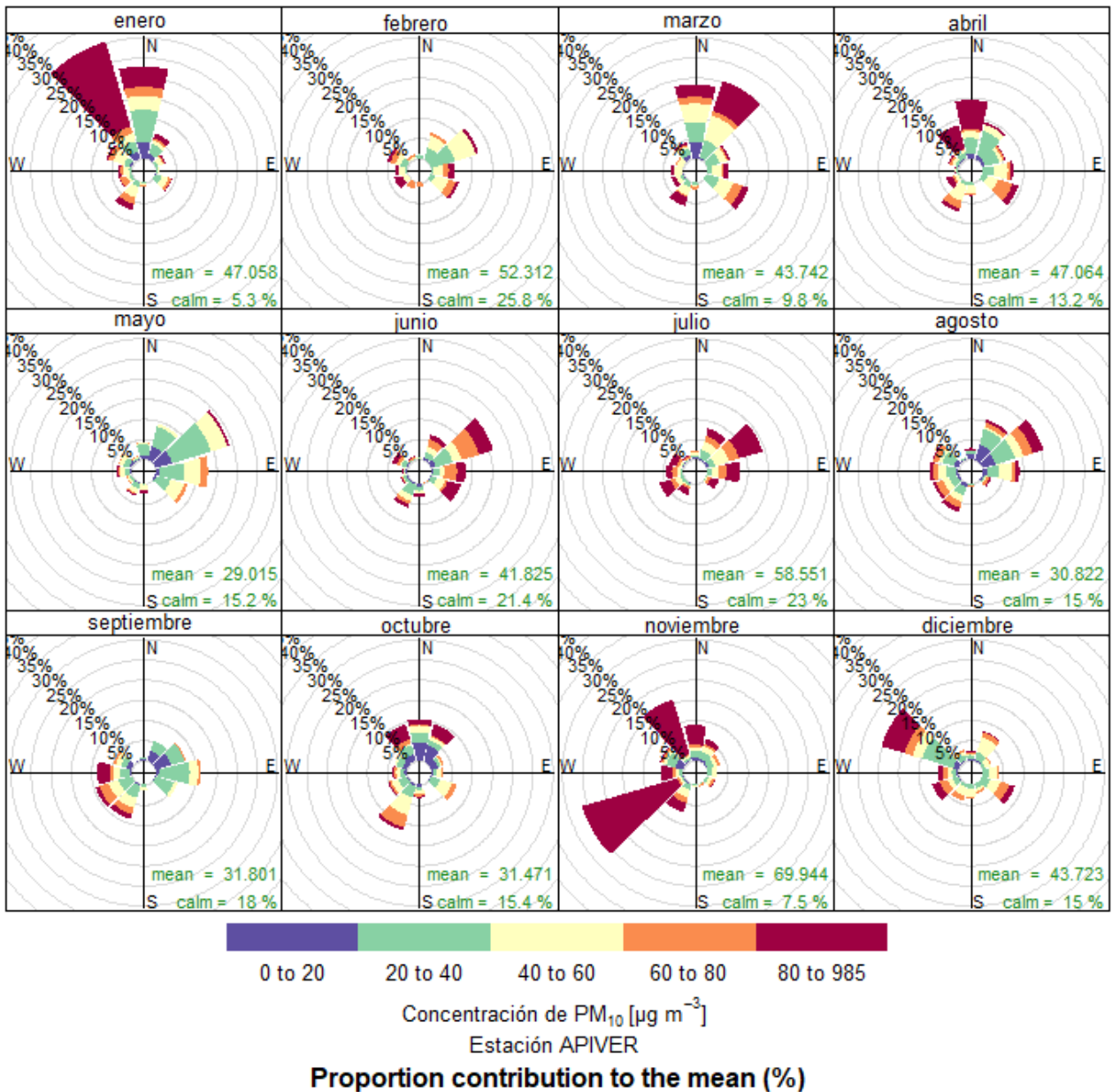


Figura 38. Rosa de Contaminantes 2018 en la estación de monitoreo del RPV

### 4.3 Variación temporal de las concentraciones de partículas

Se realizó un análisis de la variación temporal de las partículas  $\text{PM}_{10}$  para los años 2017 y 2018. En el 2017 (Figura 39) se observó que existe un pico de concentraciones ligeramente más altas los martes y sábados mientras que el domingo las concentraciones son mucho más bajas. En la variación de concentraciones

horarias se muestra una clara elevación de partículas poco antes de las 6 de la mañana hasta poco antes del mediodía. En la variación mensual se observa que el mes con concentraciones más altas es en diciembre mientras que en el mes de septiembre las concentraciones son más bajas.

En el 2018 (Figura 40) se observó que existe un pico de concentraciones ligeramente más altas los martes, miércoles y sábados mientras que los jueves, viernes y domingos las concentraciones son mucho más bajas. Mientras que para la variación de concentraciones horarias se repite la tendencia del 2017 donde hay elevación de partículas antes de las 6 de la mañana hasta poco antes del mediodía. En la variación mensual se observa que el mes con concentraciones más altas es en julio y noviembre. Las concentraciones más bajas se encuentran en mayo, agosto, septiembre y octubre.

En el 2019 (Figura 41) en el periodo enero a abril, se encontró con que existe un fenómeno parecido con la variación de horas, donde las más altas concentraciones se presentan entre las 6 de la mañana y un poco antes del mediodía. Los días con mayor concentración de contaminación son de jueves a domingo y el mes con más alta contaminación fue abril.

En la Figura 42 se muestra el boxplot con las concentraciones horarias de  $PM_{10}$  monitoreadas en los años 2017, 2018 y 2019. Se observa que existe un incremento en cada año, siendo que los valores de los rangos, así como las medianas van ascendiendo conforme avanza el tiempo. Otro dato por resaltar es que en el año 2018 se visualiza una mayor cantidad de datos fuera de rango comparada con los otros años.

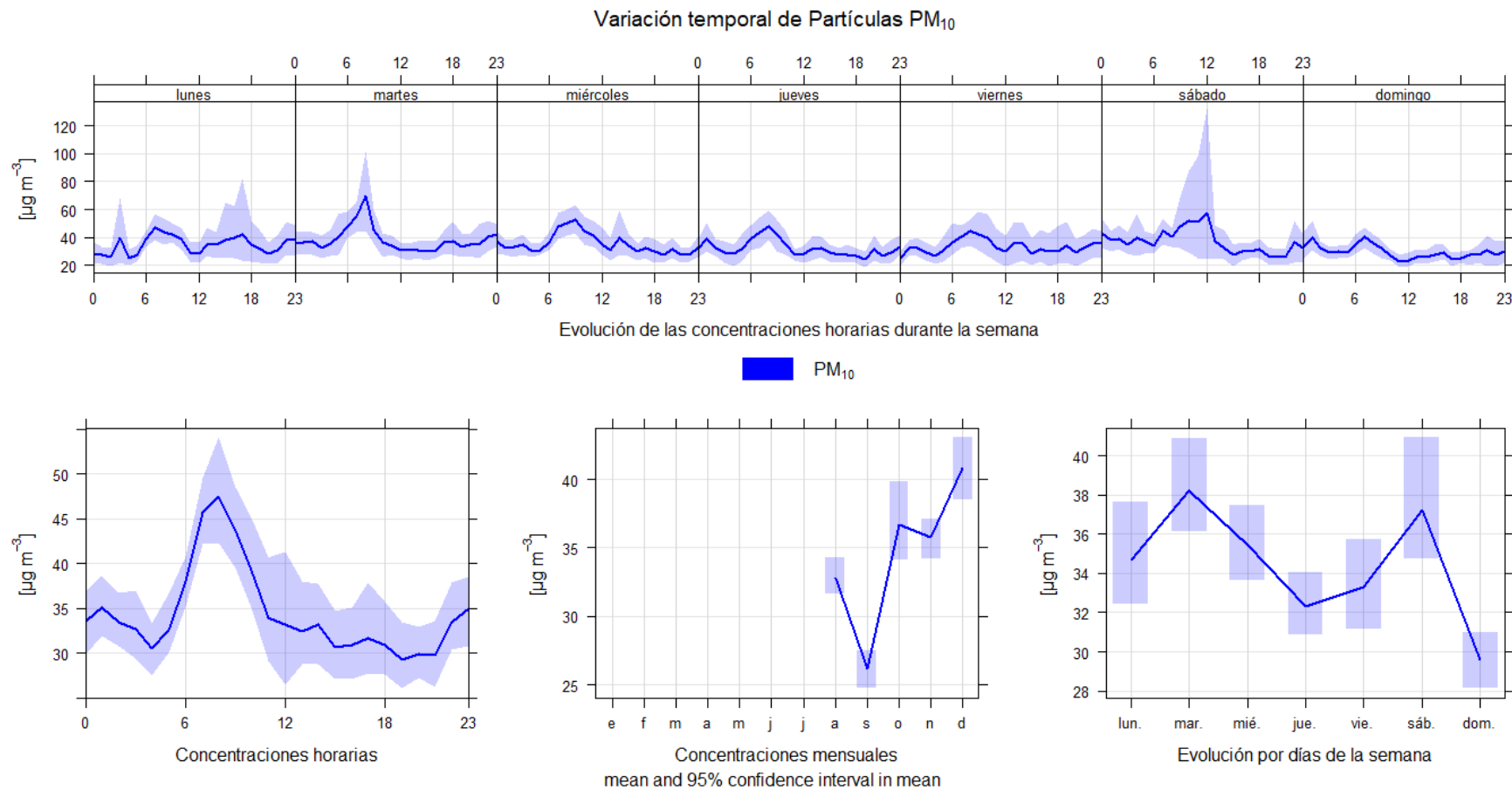


Figura 39. Variación temporal de PM<sub>10</sub> en el 2017 en la estación de monitoreo del RPV

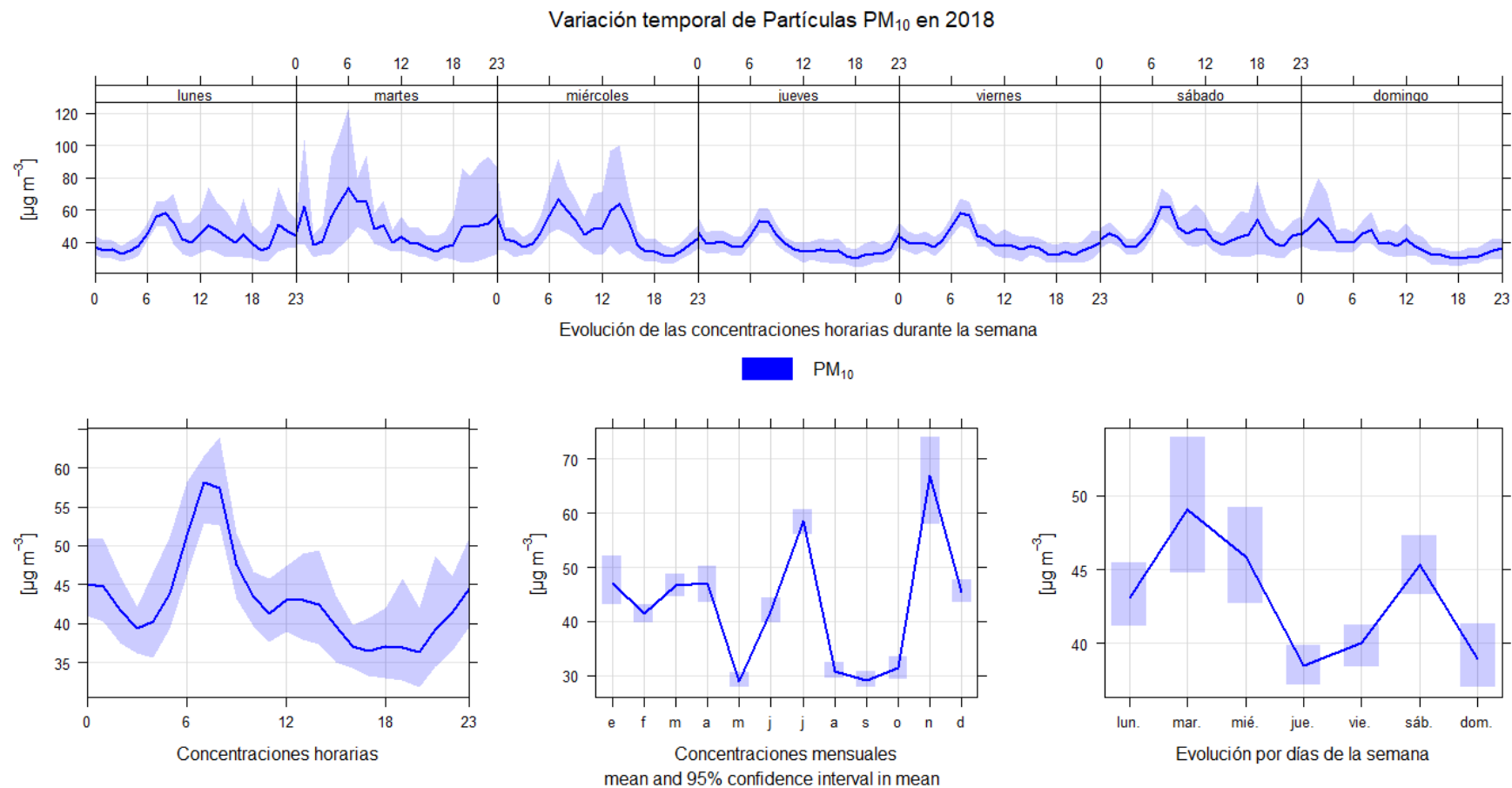


Figura 40. Variación temporal de PM<sub>10</sub> en el 2018 en la estación de monitoreo del RPV



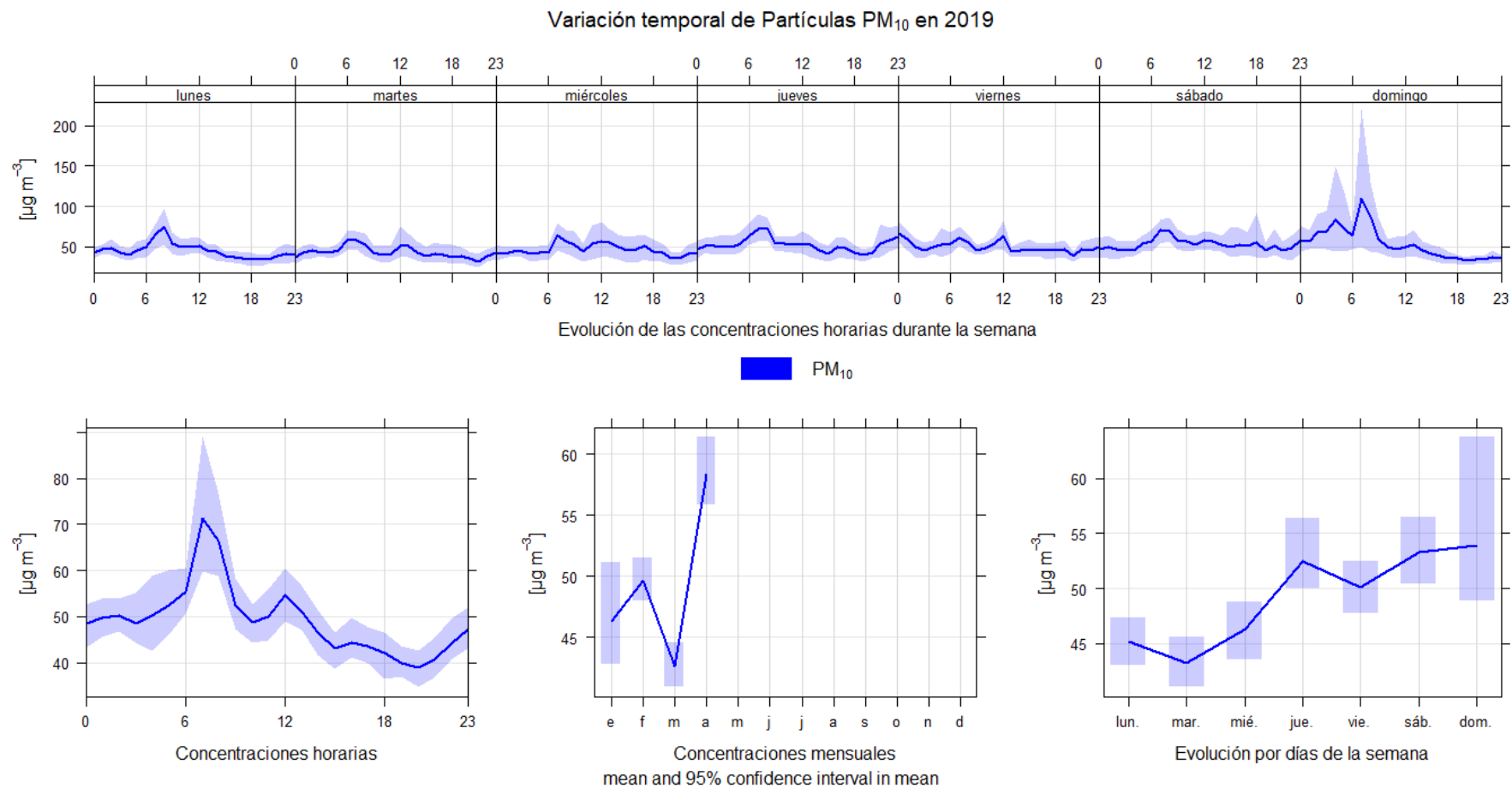


Figura 41. Variación temporal de PM<sub>10</sub> en el 2019 en la estación de monitoreo del RPV

### Distribución de los valores de PM10 por año

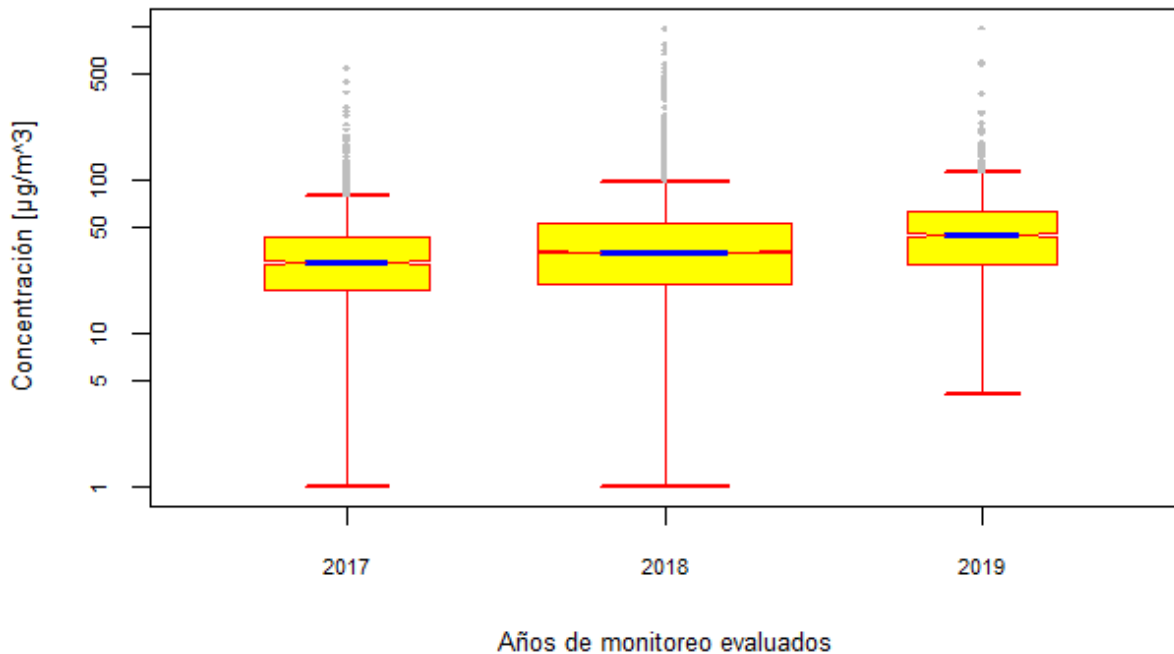


Figura 42. Caja de Tukey de las concentraciones de PM<sub>10</sub> en los años 2017 al 2019.

En la interpretación del boxplot podemos ver que el límite superior se encuentra aproximadamente en las concentraciones de 100 µg/m<sup>3</sup>, se observa que las cajas no son muy largas por lo que es menos dispersa la distribución de datos. La mediana se encuentra entre los 40 y 50 µg/m<sup>3</sup>. En los 3 años existen valores atípicos los cuales el software consideró a partir de los 100 µg/m<sup>3</sup>. El segundo cuartil se encuentra dentro de los valores 30 a 40 µg/m<sup>3</sup>, y el tercer cuartil se encuentra dentro de la concentración de 40 a 50 µg/m<sup>3</sup>.

#### 4.4 Inventario de emisiones

Se identificaron las emisiones de partículas de un periodo de mayo del 2018 a abril del 2019 mediante los factores de emisión propuestos por Cooper y Gustafsson. Los factores de emisión de la metodología A se basan en clasificar a los buques en función de su motor y del tipo de combustible, mientras que en la metodología B, los factores de emisión están en función del tipo de buque.

El inventario de emisiones de PST por actividad diaria de los buques se muestra en la Figura 43 con la metodología A, mientras que en la Figura 44 se

## Capítulo 4. Resultados

observa el inventario de PST con la metodología B. Se observa que la metodología B da valores más altos que la metodología A y que el promedio de la primera es 248.50 kg/día, para la segunda es 2059.82 kg/día. Los máximos para la metodología A es 576 kg/día, para la metodología B es 4195.20 kg/día.

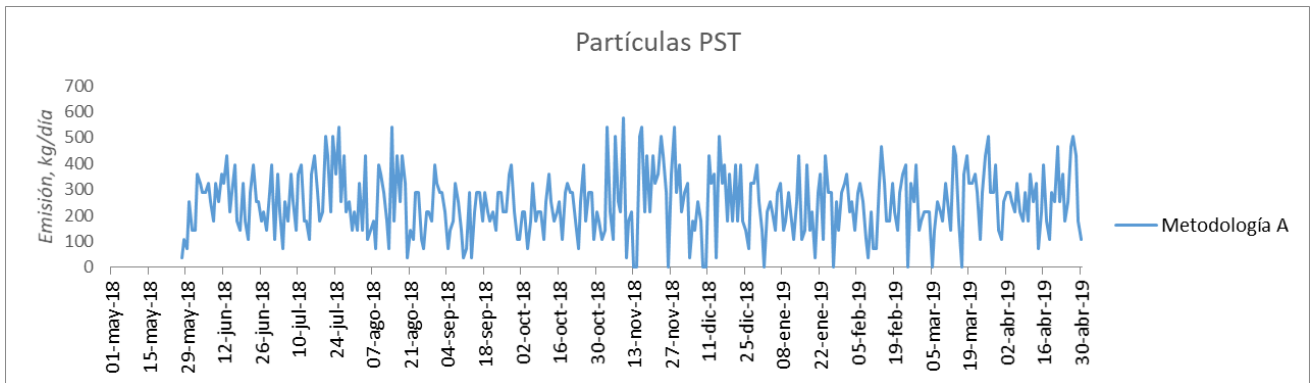


Figura 43. Inventario de emisiones de PST por actividades de los buques en el RPV con metodología A.

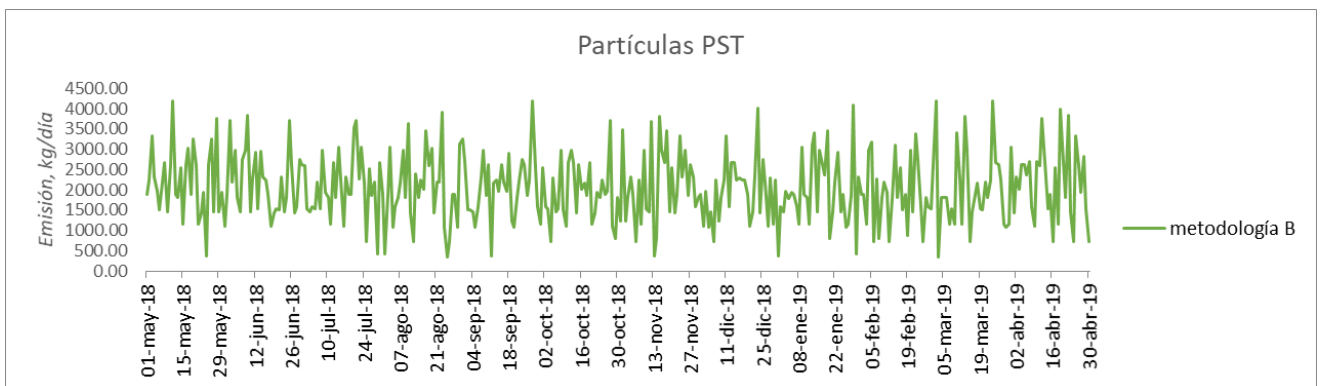


Figura 44. Inventario de emisiones de PST por actividades de los buques en el RPV con metodología B

Para la emisión de  $PM_{10}$  se repite la misma tendencia, disminuyendo su promedio en cada una de las metodologías usadas. El promedio de emisión de buques fue de 472.32 kg/día con la metodología A (Figura 45) y de 1689.05 kg/día de emisiones por buques en la metodología B (Figura 46). Los máximos para la metodología A es 576 kg/día, para la metodología B es 3440.06 kg/día.

## Capítulo 4. Resultados

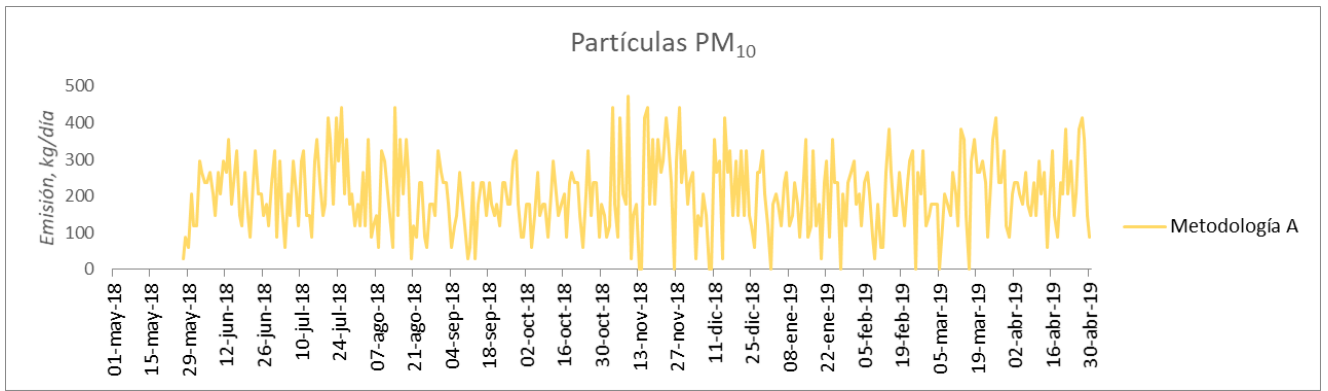


Figura 45. Inventario de emisiones de PM<sub>10</sub> por actividades de los buques en el RPV con metodología A

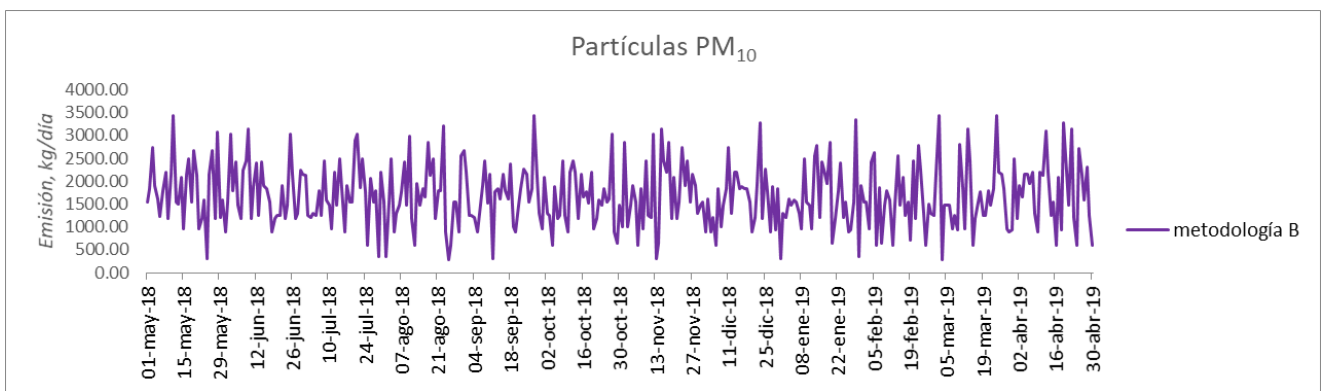


Figura 46. Inventario de emisiones de PM<sub>10</sub> por actividades de los buques en el RPV con metodología B

Para las PM<sub>2.5</sub> el promedio de emisión de buques fue de 187.47 kg/día con la metodología A (Figura 47) y de 1553.93 kg/día de emisiones por buques en la metodología B (Figura 48). Los máximos para la metodología A es 434.53 kg/día, para la metodología B es 3164.86 kg/día.

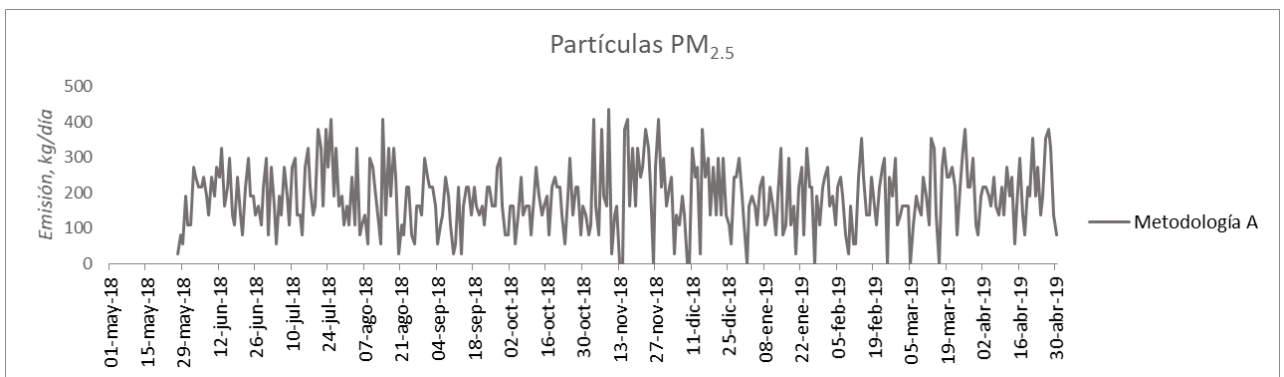


Figura 47. Inventario de emisiones de PM<sub>2.5</sub> por actividades de los buques en el RPV con metodología B

## Capítulo 4. Resultados

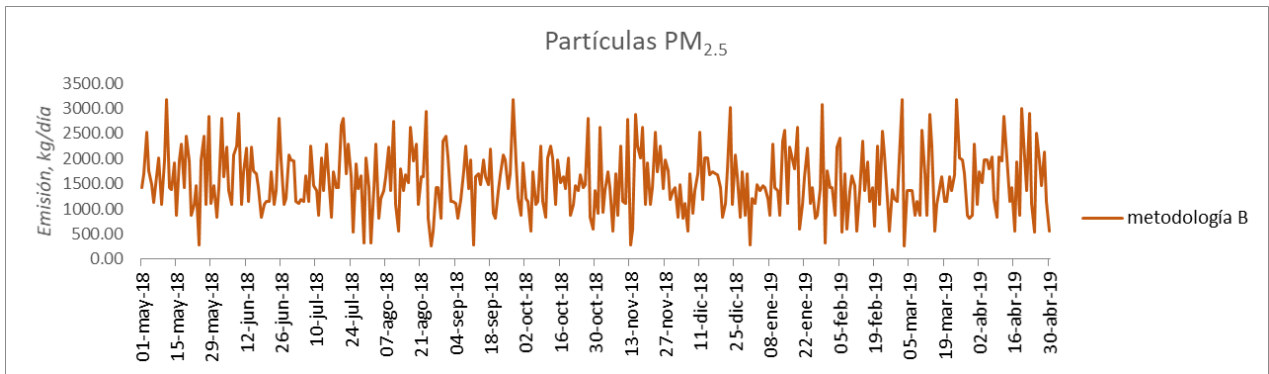


Figura 48. Inventario de emisiones de PM<sub>2.5</sub> por actividades de los buques en el RPV con metodología B

Analizando a través de la metodología B, se calculó la cantidad de emisiones que genera cada tipo de buques en un año, tiempo que se realizó el inventario de emisiones. En la Figura 50 se observa el número de buques que atracaron en el RPV durante un lapso de un año destacando la cantidad de contenedores especializados (449) sobre otros buques. En la Figura 51 se observa que eso es proporcional a las emisiones generadas, ya que los contenedores especializados son quienes emiten la mayor cantidad de emisiones de PM<sub>10</sub>, seguidas de los automóviles (Ro-Ro). El tipo de buque con emisiones más bajas son los que transportan carga a granel.

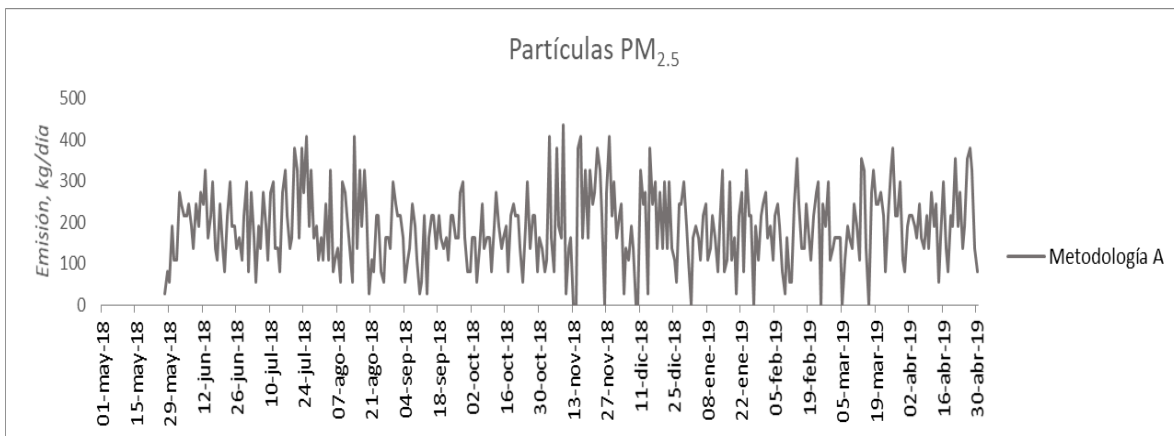


Figura 49. Comparación de emisiones entre diferentes combustibles marinos.

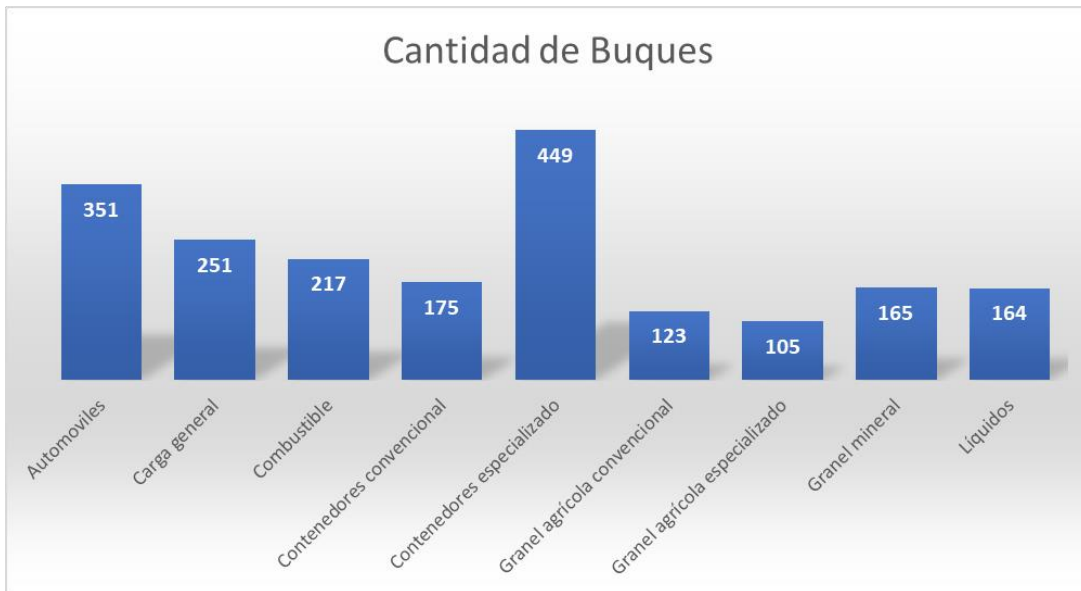


Figura 50. Cantidad de buques existentes en el puerto de Veracruz en el periodo mayo 2018 a abril 2019.

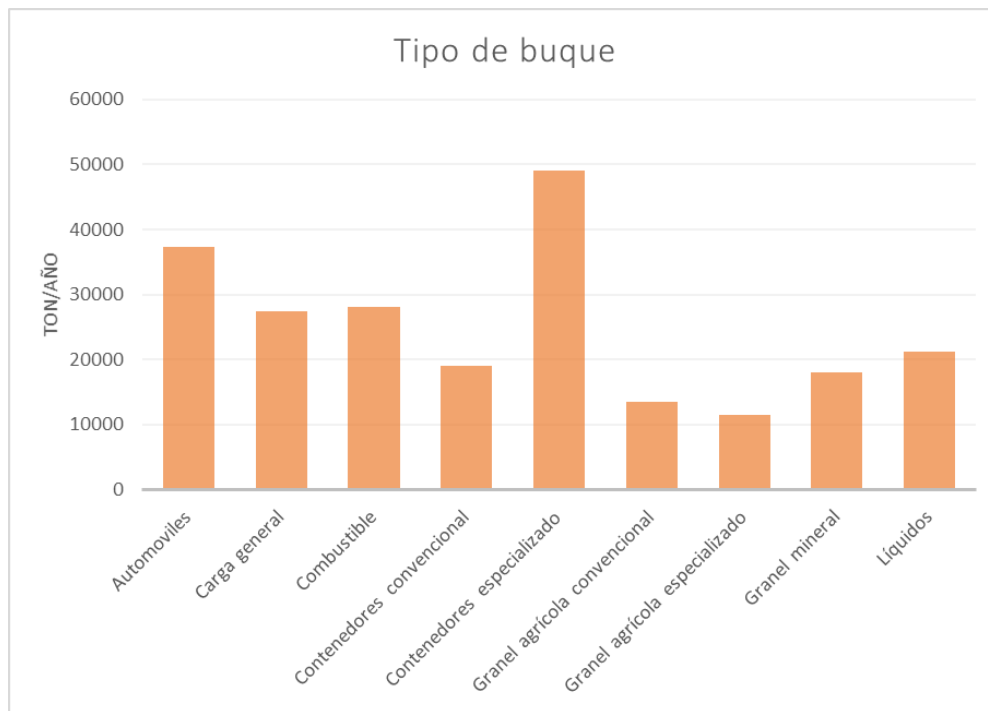


Figura 51. Emisiones anuales de  $PM_{10}$  generadas por tipo de buque de mayo del 2018 a abril del 2019.

Comparado con lo estimado por Tami (2014), ella señaló que la generación de  $PM_{10}$  en un año fue de 469.56 Toneladas. Cabe resaltar que fueron diferentes

metodologías por lo que no se puede afirmar un aumento de contaminación entre estos años. Con los inventarios de emisiones se señala que con la Metodología A se obtuvo 25,213 toneladas de  $PM_{10}$ , mientras que con la Metodología B se obtuvo 225,023.8 toneladas en total de  $PM_{10}$ .

Se encontró que con el empleo de la metodología B las emisiones son mayores con respecto a la metodología A, debido a que en la metodología B propone factores de emisión por tipo de buque representando una emisión más real, mientras que en la metodología A se realizan más suposiciones de las características de las fuentes de emisión, ya que solo se considera el tipo de motor y combustible del buque por lo que la metodología mas adecuada para realizar el inventario de emisiones del RPV es la metodología B.

### 4.5 Estudio de casos particulares

Se sobrepasó durante 31 días el límite máximo permisible establecido en la norma NOM-025-SSA1-2014, por lo que se decidió estudiar los 6 días con mayor concentración de  $PM_{10}$ , los cuales se muestran en la Tabla 12. Para un análisis más a fondo para estos días, se analizaron las concentraciones hora por hora de partículas, así como las condiciones meteorológicas. Con ello se realizaron las gráficas en función de la concentración vs tiempo. Se elaboró la rosa de vientos, la rosa de contaminantes y el análisis de dispersión con CALPUFF. Además, se analizaron otros 8 días los cuales se encuentran analizados a detalle en el Anexo 1.

#### Caso 24/01/18

El primer caso observado fue el día 24 de enero del 2018 donde el promedio de las 24 horas fue de  $155.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la variación por horas se observa en la Figura 52, donde se observa un incremento de  $PM_{10}$  a partir de las 9:00 horas, alcanzando el máximo de  $985 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 14:00 horas y disminuyendo a partir de ese punto.

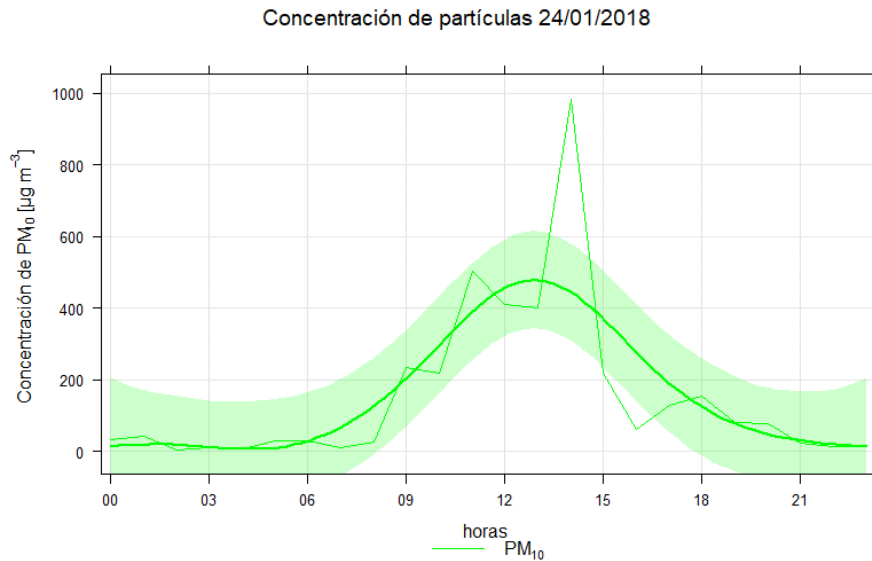


Figura 52. Variación de la concentración de PM<sub>10</sub> el 24/01/2018

Ese día, la estabilidad atmosférica se mantuvo neutral durante todo el día (Figura 53). Esto señala que la dispersión de contaminantes de una chimenea en el transcurso del día tendría una forma cónica, existiendo una dispersión de contaminantes a la altura de la chimenea.

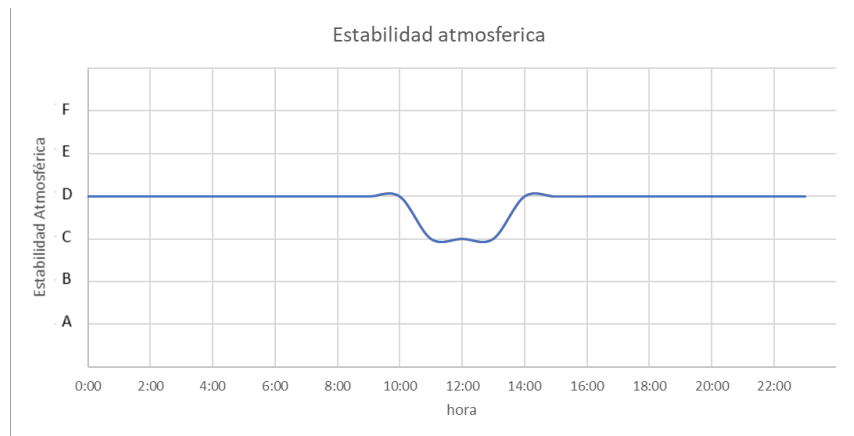


Figura 53. Estabilidad atmosférica 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos (Figura 54) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto. La rosa de contaminantes (Figura 55) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de PM<sub>10</sub> es en dirección NNW.



Rosa de vientos del 24 de enero del 2018

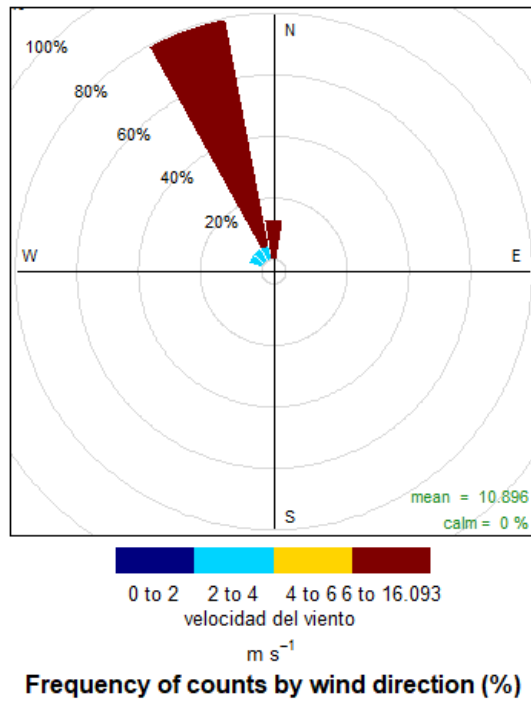


Figura 54. Rosa de vientos 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV

La Rosa de contaminantes señala que el origen de la contaminación proviene de la misma dirección que señala la rosa de vientos (NNW). Esto nos indica que la contaminación viene de la zona donde se construye el actual puerto de Veracruz, siendo posible un efecto causado por el dragado, la maquinaria de construcción entre otras actividades existentes.

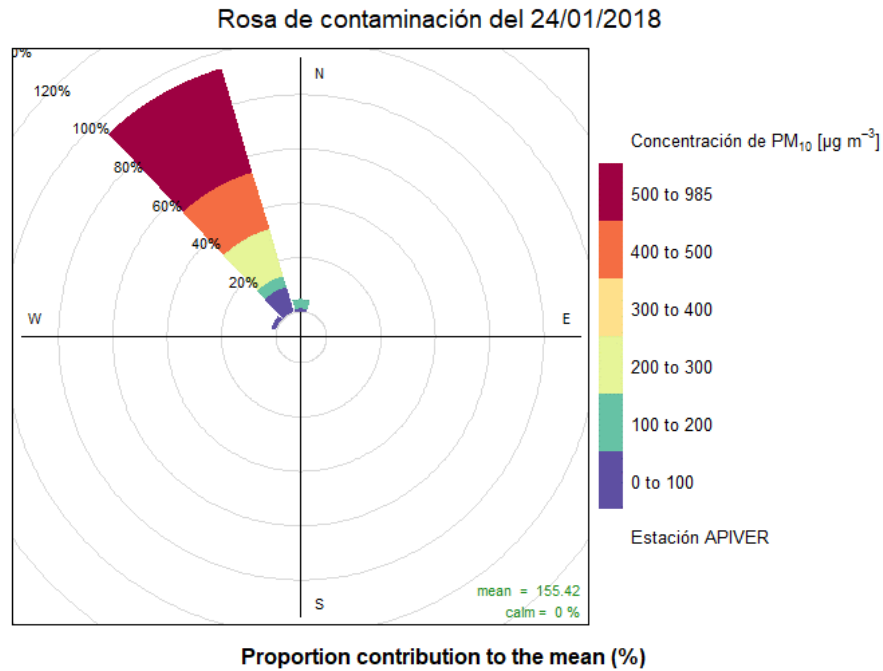


Figura 55. Rosa de contaminantes 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV

### Caso del 14/04/18 y 15/04/18

El segundo caso observado fue los días 14 y 15 de abril del 2018 donde el promedio diario fue de 136.17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 133.08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la variación horaria se observa en la Figura 56 donde se observa un incremento de  $\text{PM}_{10}$  a partir del mediodía del 14/04/18 y disminuyendo hasta el mediodía del 15/04/18 horas donde la máxima fue de 763  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 2:00 del día 15.

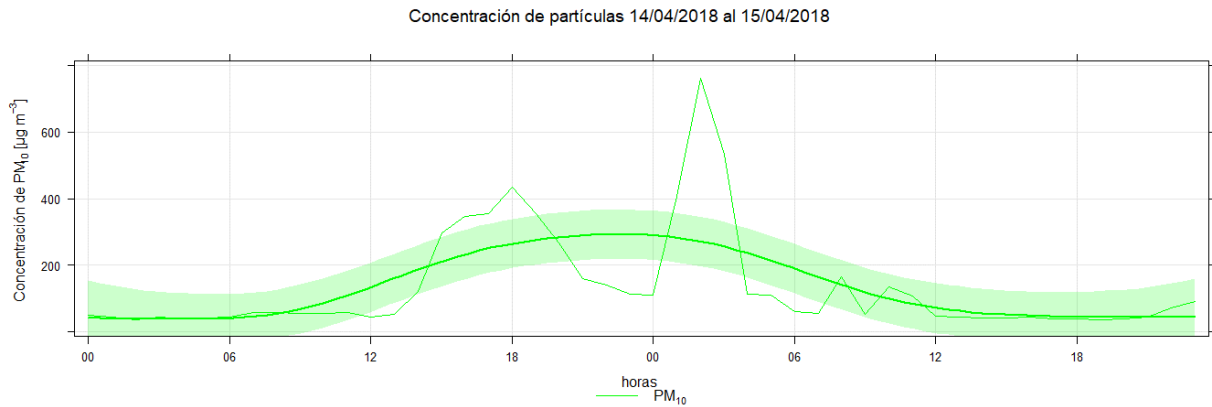
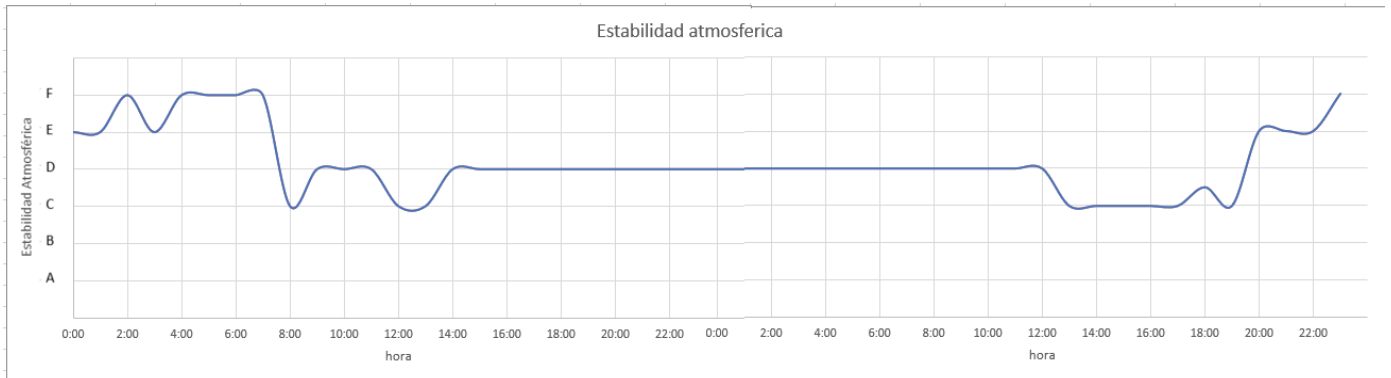


Figura 56. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  del 14 al 15 de abril del 2018

## Capítulo 4. Resultados

Esos días, la estabilidad atmosférica se mantuvo neutral durante el lapso en donde la concentración de  $PM_{10}$  se incrementó implicando que durante ese lapso la dispersión de contaminantes fue cónica. En el resto del tiempo tuvo una estabilidad del tipo E y F (Figura 57). Esto implica que la dispersión de contaminantes fue lineal, lo cual puede provocar que no llegara la contaminación al nivel de la estación de monitoreo.



La rosa de vientos (Figura 58) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección N y NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto, mientras que los vientos con velocidades bajas de 0 a 6 m/s provienen de la dirección S y SSW donde se encuentra la población del municipio.

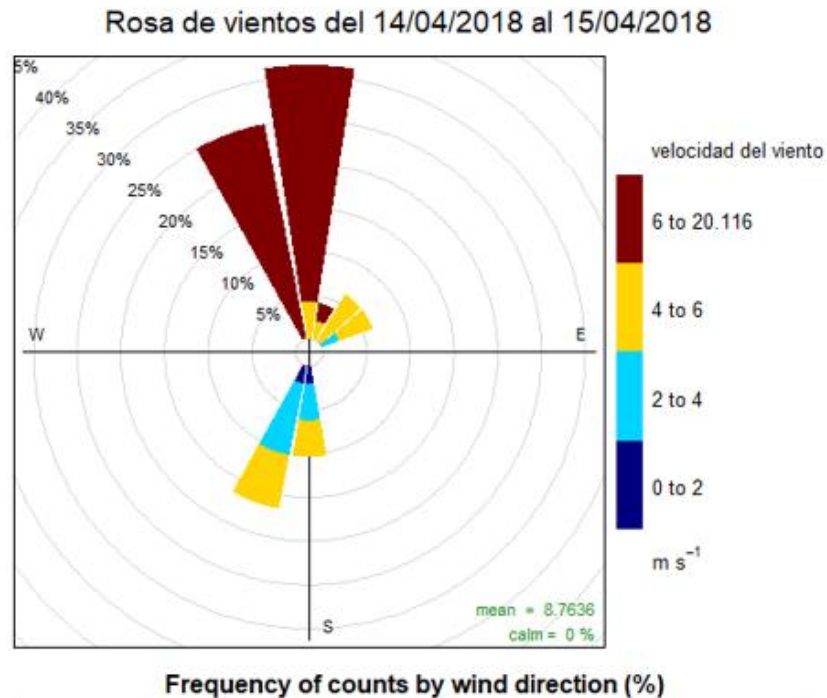


Figura 58. Rosa de vientos del 14 al 15 de abril del 2018 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de contaminantes (Figura 59) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección NNW y en dirección N. La cantidad de  $PM_{10}$  provenientes del área poblacional del municipio de Veracruz es mínima.

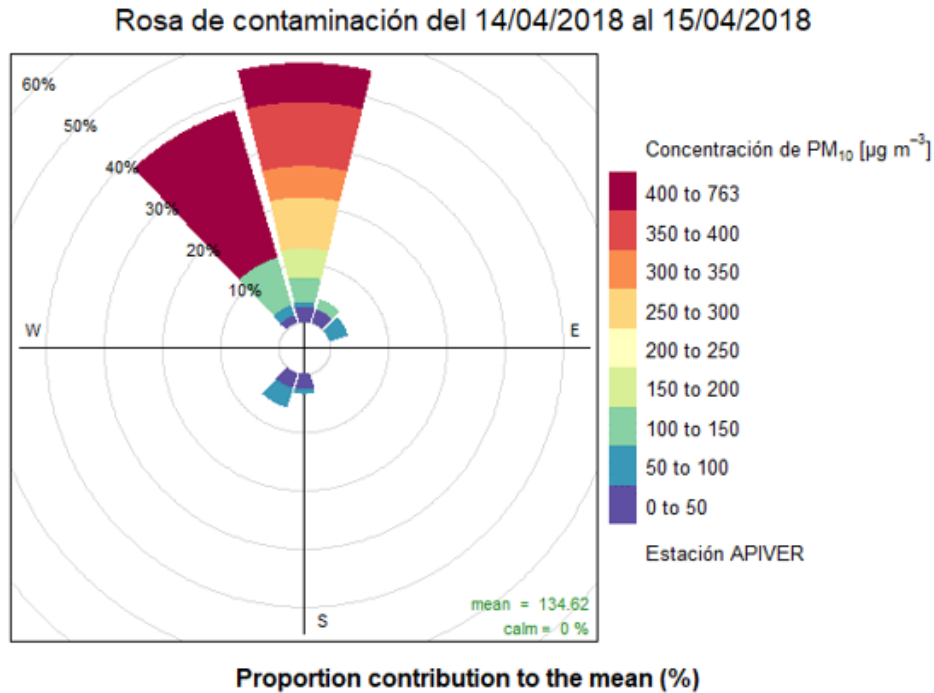


Figura 59. Rosa de contaminantes del 14 al 15 de abril del 2018 en la estación de monitoreo del RPV

#### Caso del 13/11/18 y 14/11/18.

El tercer caso son los días 13 y 14 de noviembre del 2018 donde el día 13 fue el registro con mayor promedio de contaminación del periodo de monitoreo con una concentración de  $535.17 \mu g/m^3$ . Ese día se puede observar en la Figura 60 una concentración de hasta  $985 \mu g/m^3$  en la mañana y en la tarde, además de que en el transcurso del día ninguna concentración horaria fue menor a los  $75 \mu g/m^3$ .

El día siguiente el promedio diario de  $PM_{10}$  fue de  $163.25 \mu g/m^3$ . Se observa que las concentraciones horarias fueron disminuyendo, teniendo un pico de

## Capítulo 4. Resultados

concentraciones entre las 7 y 8 de la mañana. A partir del mediodía, las concentraciones fueron menores a los  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

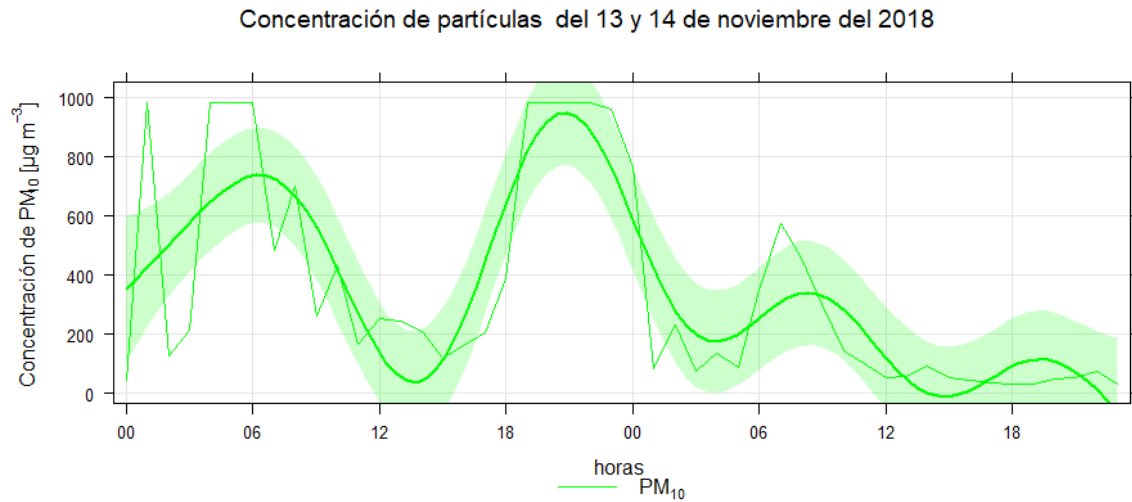


Figura 60. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  del 13 y 14 de noviembre del 2018

La estabilidad atmosférica durante esos días fue mayormente neutra como se observa en la Figura 61, lo cual indica una dispersión de contaminantes cónica.

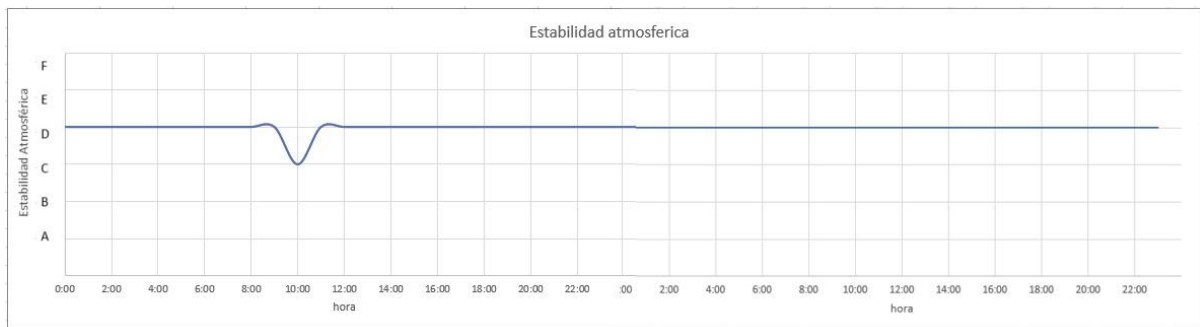


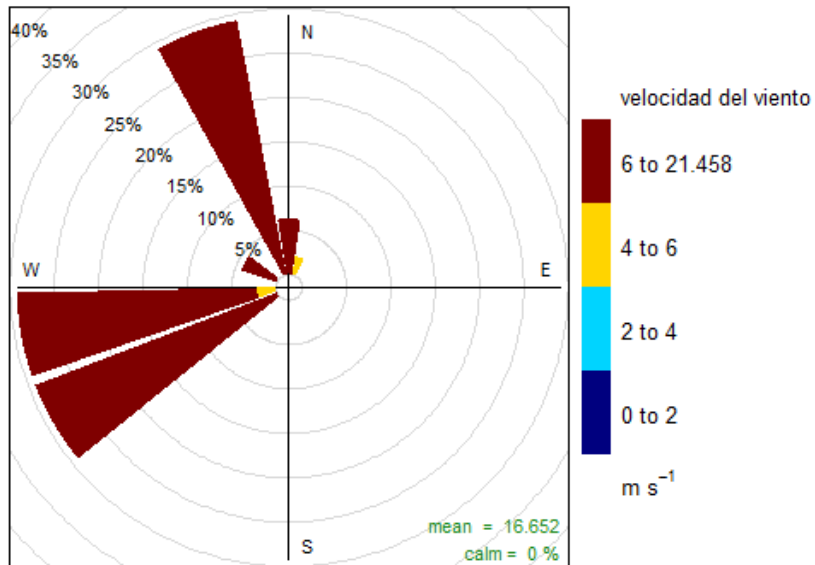
Figura 61. Estabilidad atmosférica del 13 y 14 de noviembre del 2018 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos (Figura 62) de ese par de días señala que los vientos dominantes fueron principalmente de 3 direcciones; NNW, WSW y WS, lo cual es un evento diferente a la tendencia de que la mayoría de los vientos suelen provenir del norte.

La rosa de contaminantes (Figura 63) señala que las concentraciones altas de partículas que superan los  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  provienen de las direcciones NNW y WSW, lo cual indica que la actividad contaminante de ese día emanó de la construcción del nuevo puerto de Veracruz y en mayor cantidad de la zona urbana del municipio

de Veracruz. Sin embargo, todos los datos anteriores no señalan el evento que sucedió el día 13 y 14 de noviembre, en el cual se presentó el evento “Norte” el cual arrastro partículas de la brisa oceánica y vientos extremadamente fuertes, lo cual provocó la suspensión de actividades en el RPV esos días. Este evento también pudo haber afectado la veleta y con ello las rosas de vientos y contaminantes. Agregando a esto, el día 12 de noviembre llegaron 10 buques, los cuales generaron una emisión de 3022.85 kg/día.

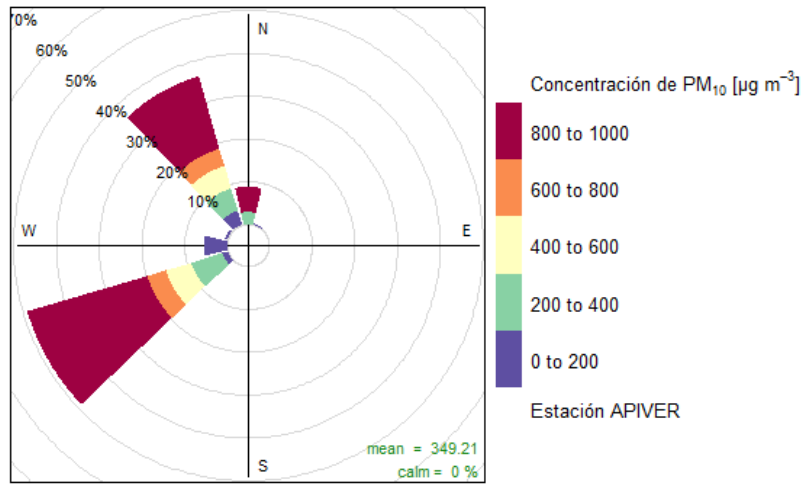
Rosa de vientos del 13 y 14 de noviembre del 2018



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 62. Rosa de vientos del 13 y 14 de noviembre del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.

Rosa de contaminación del 13 y 14 de noviembre del 2018



Proportion contribution to the mean (%)

Figura 63. Rosa de contaminantes del 13 y 14 de noviembre del 2018 en la estación de monitoreo del RPV.

**Caso del 26/11/18.**

El cuarto caso se presentó el 26 de noviembre del 2018. Ese día se presentó una concentración diaria de 215.08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se observa en la Figura 64 a partir de las 8 am las concentraciones horarias se elevaron a cantidades que superaban los 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y esta concentración se mantuvo alta hasta el final del día. La concentración máxima fue de 547  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Concentración de partículas 26 de noviembre del 2018

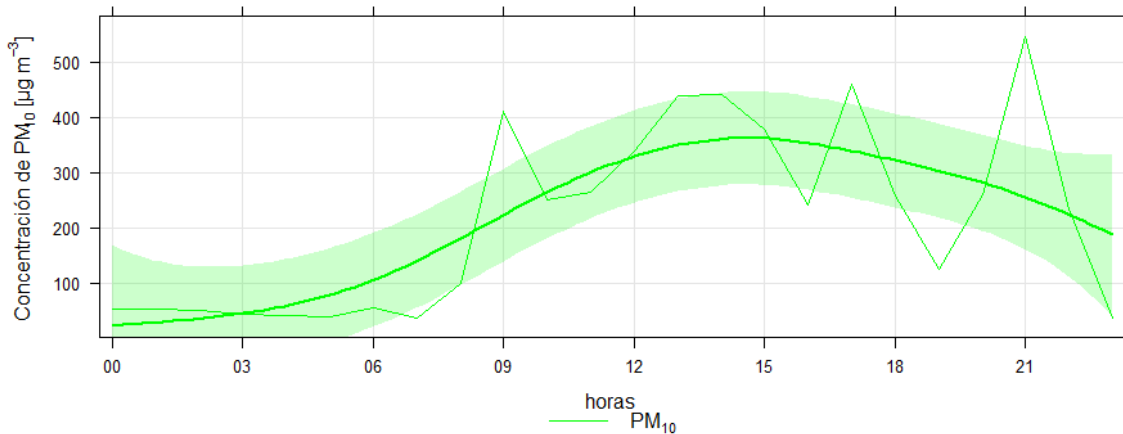


Figura 64. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  del 26 de noviembre del 2018

Se observa en la Figura 65, que la estabilidad atmosférica fue en mayormente neutra en el transcurso del día, siendo poco inestable alrededor del mediodía.

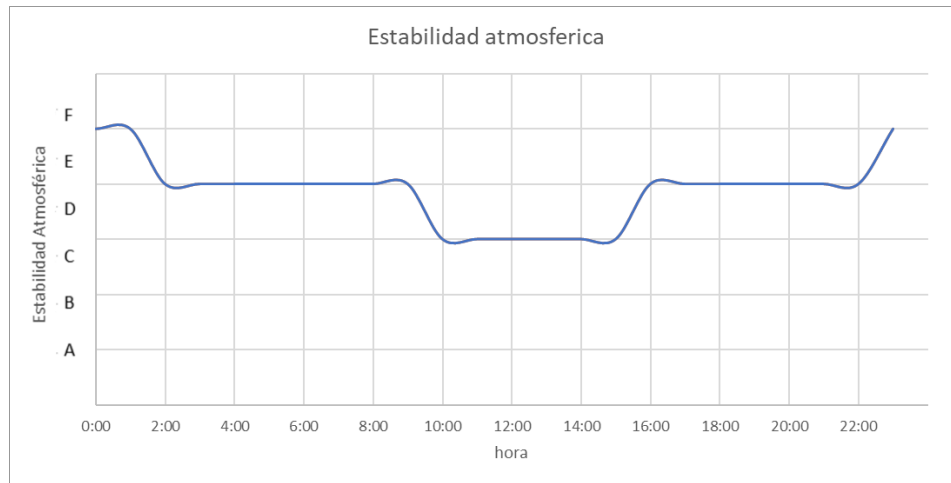
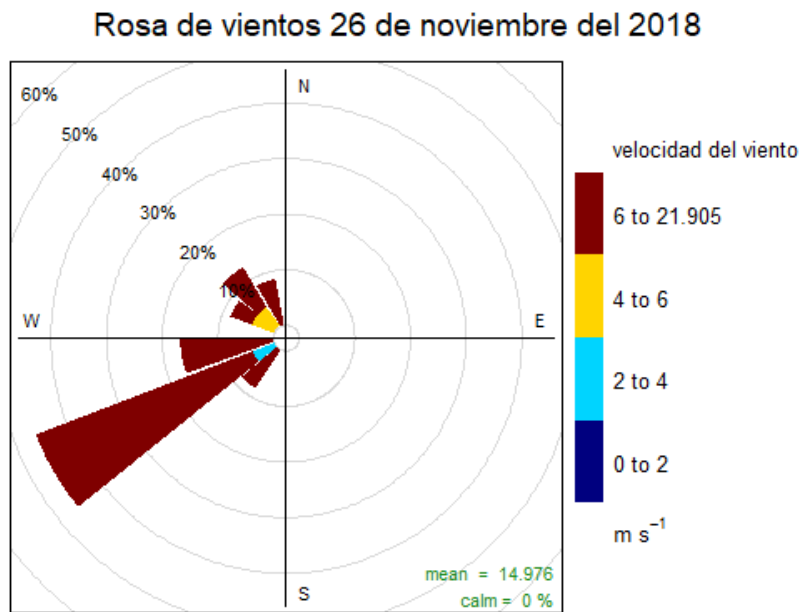


Figura 65. Estabilidad atmosférica el 26 de noviembre del 2018

La rosa de vientos (Figura 66) señala que el origen de la contaminación proviene principalmente de la dirección SW, al igual que la rosa de contaminantes (Figura 67). Sin embargo, este día también se presentó el evento “Norte” el cual causó que los niveles de  $PM_{10}$  se elevaron en el monitoreo de ese día, una vez que pasará ese evento.



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 66. Rosa de vientos del 26 de noviembre del 2018



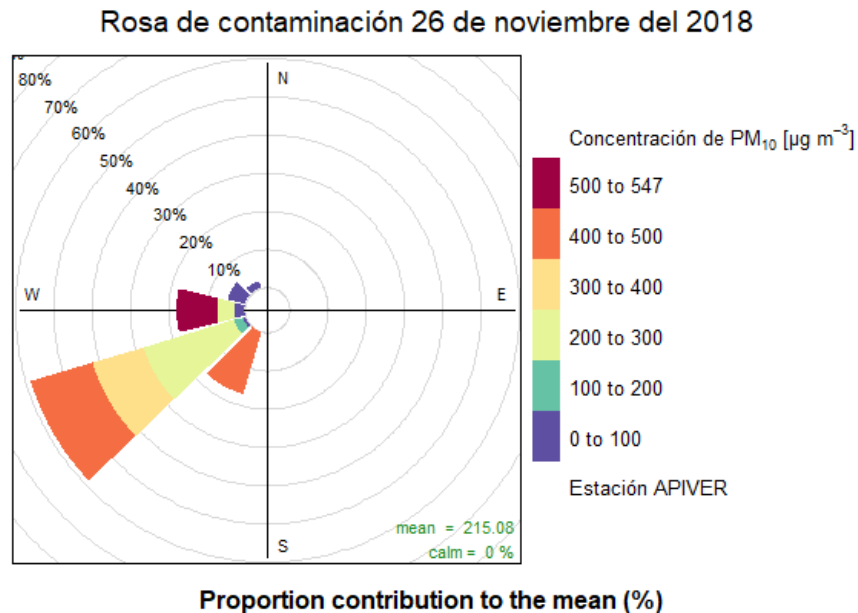


Figura 67. Rosa de contaminantes del 26 de noviembre del 2018

De acuerdo con lo observado en los casos particulares, 8 de los días que se sobrepasó la norma, el origen fue en donde se está construyendo el nuevo puerto de Veracruz. Esto basado en las rosas de contaminantes hechas para cada uno de esos días. Eso puede suponer que las actividades de construcción junto con las características meteorológicas de esos días provocaron que se registraran altas concentraciones de partículas  $PM_{10}$ . Otra característica de ello también fue que estos registros ocurrieron en el periodo de octubre del 2017 a abril del 2018.

Los otros 5 casos donde se sobrepasó la norma fueron principalmente en dirección al actual puerto de Veracruz. Una de las características de estos días fue que los registros del equipo de partículas no se registraron concentraciones que superaran los  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en comparación con los casos anteriores donde se encontraron concentraciones de hasta  $985 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por lo anterior podemos afirmar que la actividad del RPV genera un impacto en el aire por partículas  $PM_{10}$ .

#### 4.6 Aplicación del Modelo de dispersión CALPUFF

Con los datos obtenidos en el inventario de emisiones con ambas metodologías de Cooper & Gustafsson se usó el modelo de dispersión con algunos de los días donde se sobrepasó la norma. Esto se realizó con el propósito de

observar la dirección y el alcance que tienen las partículas debido a las actividades realizadas en el Recinto Portuario de Veracruz. Es de gran importancia señalar que las concentraciones máximas obtenidas con el modelo son inferiores a las registradas en el monitoreo debido a que sólo se consideró la actividad de los buques sin tomar en cuenta las otras actividades del puerto o de la población en ese día, lo cual representa una limitante en la etapa de modelación.

Los días seleccionados fueron el 15, 24 y 25 de Julio, además del 29 y 30 de Junio. Esto debido a que cumplen con la característica de estar dentro del rango de tiempo en el cual se realizó el inventario de emisiones (Mayo 2018 a Abril 2019) y ese día presentar concentraciones que exceden la norma de  $PM_{10}$ . Casos como el 13, 14 y 26 de noviembre que tuvieron las concentraciones más altas, no fueron modelados debido a que esos días se presentó el evento norte, lo cual hizo que se suspendieran actividades en el puerto y por ende, no se registraran buques en la base de datos oficial del puerto de Veracruz (<https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/tramites-y-servicios/historico-de-buques/>), con los cuales se elaboró el inventario de emisiones. Asimismo, se presenta el transporte, dispersión y concentración para  $PM_{10}$  de otros 5 días en el Anexo 2.

El primer caso fue el del 30 de junio del 2018. Este día fue el segundo de un conjunto de días donde las concentraciones de  $PM_{10}$  fueron superiores de lo permitido en la normatividad mexicana del 29 de junio al 2 de julio del 2018. Ese día la concentración de  $PM_{10}$  fue de  $105.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se observa en la Figura 68 la simulación con la metodología A, que ese día la concentración máxima fue de  $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con el anclaje de 11 buques. Ese día las concentraciones más altas se distribuyeron en dirección E del RPV sobre el oceano y en dirección NW del RPV afectando un area poblada del territorio de Veracruz.

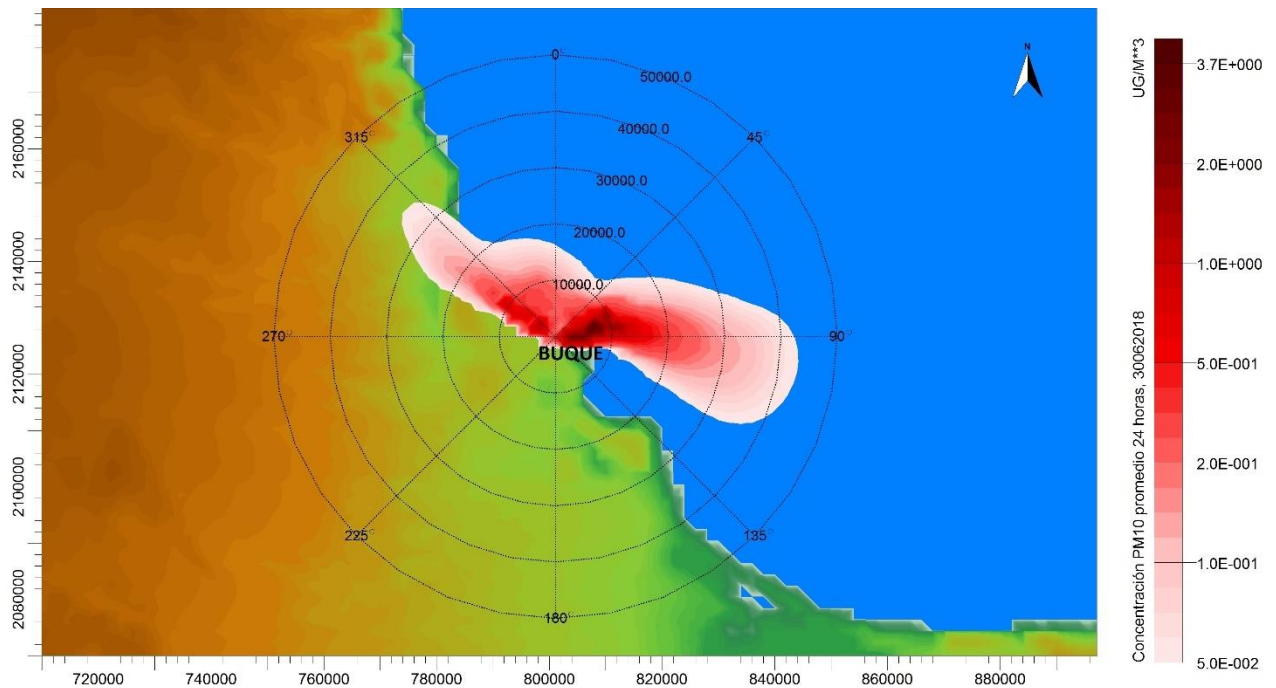


Figura 68. Distribución de partículas PM<sub>10</sub> en el RPV el día 30/06/2018.

El segundo caso es el del 1 de julio del 2018. Ese día la concentración de PM<sub>10</sub> fue de 93.54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con el anclaje de 3 buques. Observamos en la Figura 69 que la concentración de partículas con la metodología A fue de 0.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  siendo su distribución de estas en dirección a ENE, NE sobre el golfo de México también en direcciones del NW hasta el SSE afectando los municipios alrededor del puerto de Veracruz como M. F. Altamirano, Medellín, Boca del Río, La Antigua, entre otros.

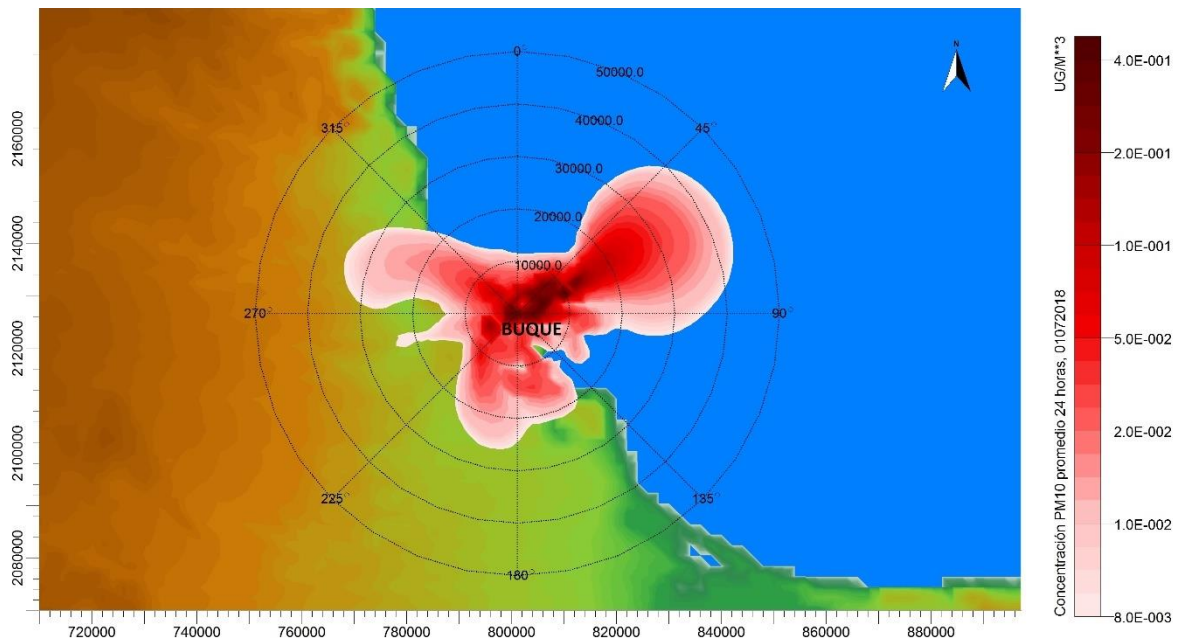


Figura 69. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 01/07/2018.

En la Figura 70 se observa la simulación del mismo día, pero con la metodología B. en ella se observa un incremento de la concentración más alta de  $PM_{10}$  a  $9.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con la llegada a la zona portuaria de 7 buques los cuales fueron de granel (2), contenedores (1), combustible (1), y automóviles (3). La ubicación de los buques fue en función de los diferentes muelles a los cuales atracaron que en este caso fueron los muelles 4 SP, 6 N, 7E, contenedores S, Pemex P y muelle de cementos. Además, para esta modelación se consideró la existencia de 10 buques que sería un valor estimado de la cantidad de buques arribando en el Nuevo Puerto de Veracruz cuando esté operando. Se observa un cambio de dirección de la distribución de partículas siendo ahora la dirección NW la afectada por la distribución de  $PM_{10}$ . Con esto se observa que la concentración máxima se incrementó de 0.4 a  $9.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

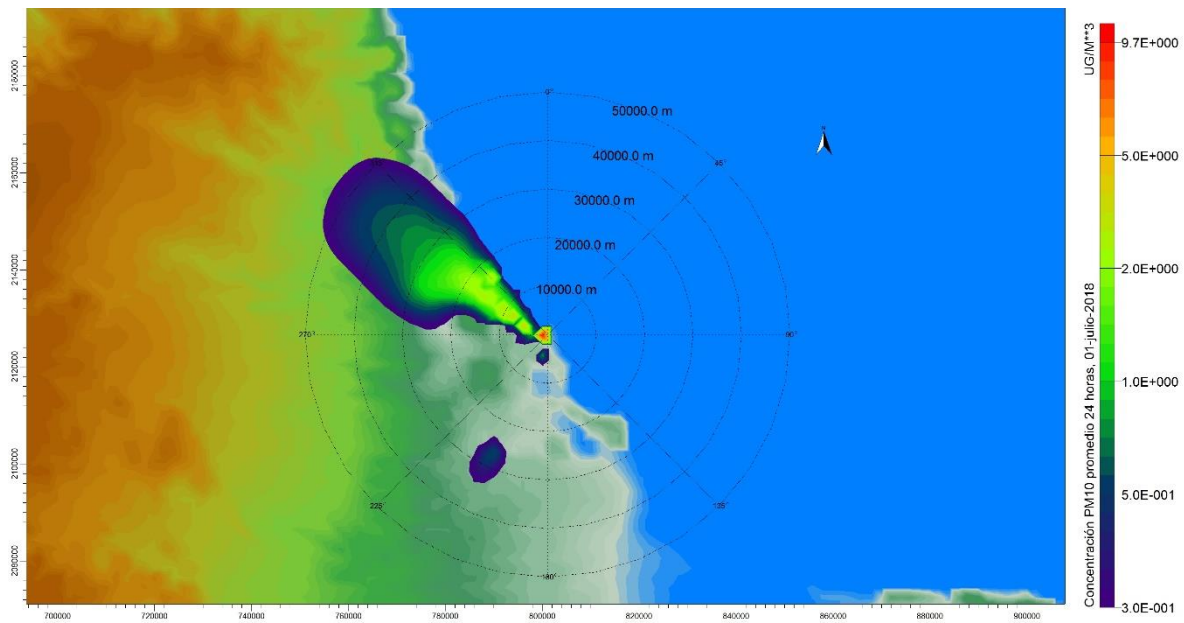


Figura 70. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 01/07/2018 con la metodología B.

El tercer caso es el 15 de julio del 2018, el cual se observa en la Figura 71. Esta modelación con la metodología A nos indica que la concentración máxima fue de  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  distribuyéndose mayormente en dirección E, mientras que en menor cantidad fue en dirección S y E, afectando poco el área de Veracruz. Este día la cantidad de buques que anclaron fue de 10.

En la Figura 72 se observa la modelación del mismo día, con la metodología B. En este caso se observa que la distribución de partículas se extiende en dirección NW, siendo la concentración máxima  $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para la simulación se ingresó el anclaje de 6 buques al RPV los cuales fueron de automóviles (2), contenedores (2), granel (1) y líquidos (1). Los muelles a los cuales anclaron fueron 7E, 7S, 8P, cementos, y contenedor S. En esta modelación también se consideró un arribo de 10 buques al nuevo puerto de Veracruz con lo que el incremento en la concentración máxima fue de 308.33%.

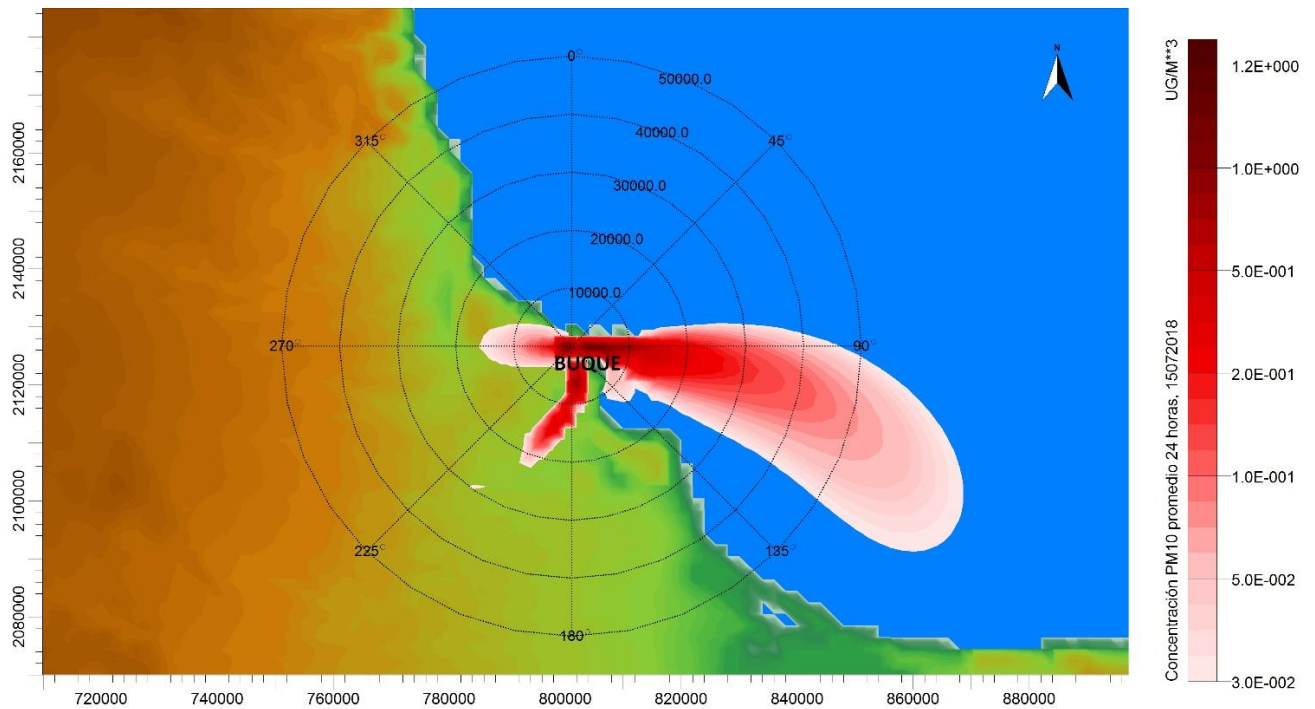


Figura 71. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 15/07/2018 con la metodología A.

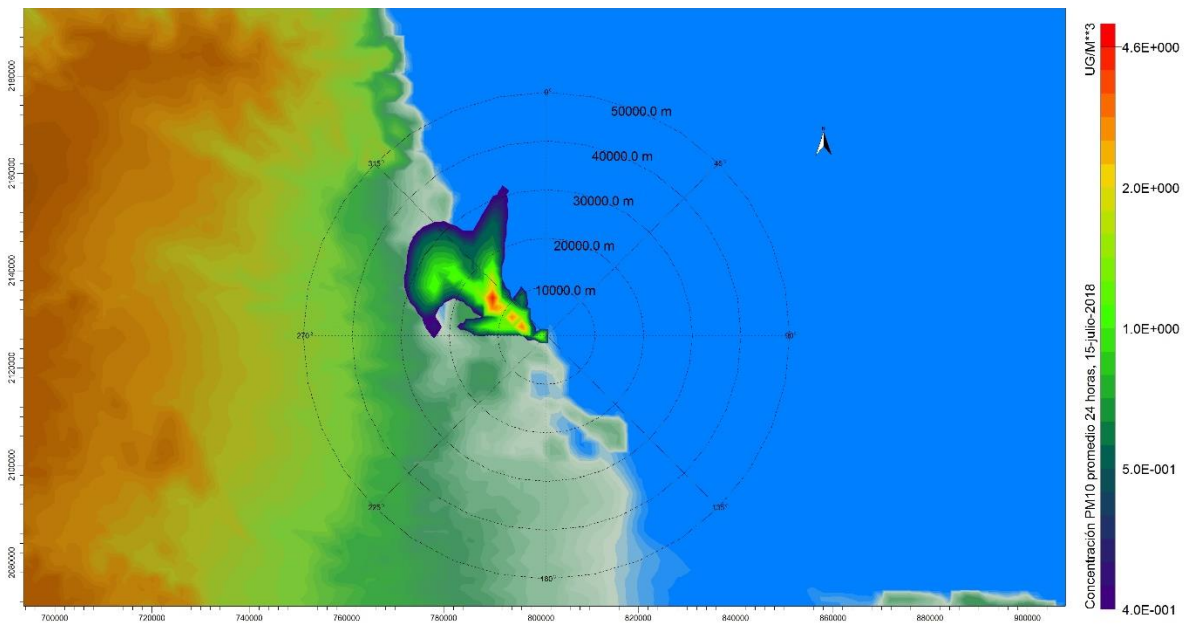


Figura 72. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 15/07/2018 con la metodología B.

El siguiente caso (Figura 73) se observa el 24 de julio del 2018 donde observamos a través de la metodología A que la distribución de  $PM_{10}$  fue en dirección NNE, y en dirección NW afectando parte del territorio veracruzano y parte del golfo de

México. La concentración máxima fue de  $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con el anclaje de 10 buques registrados ese día.

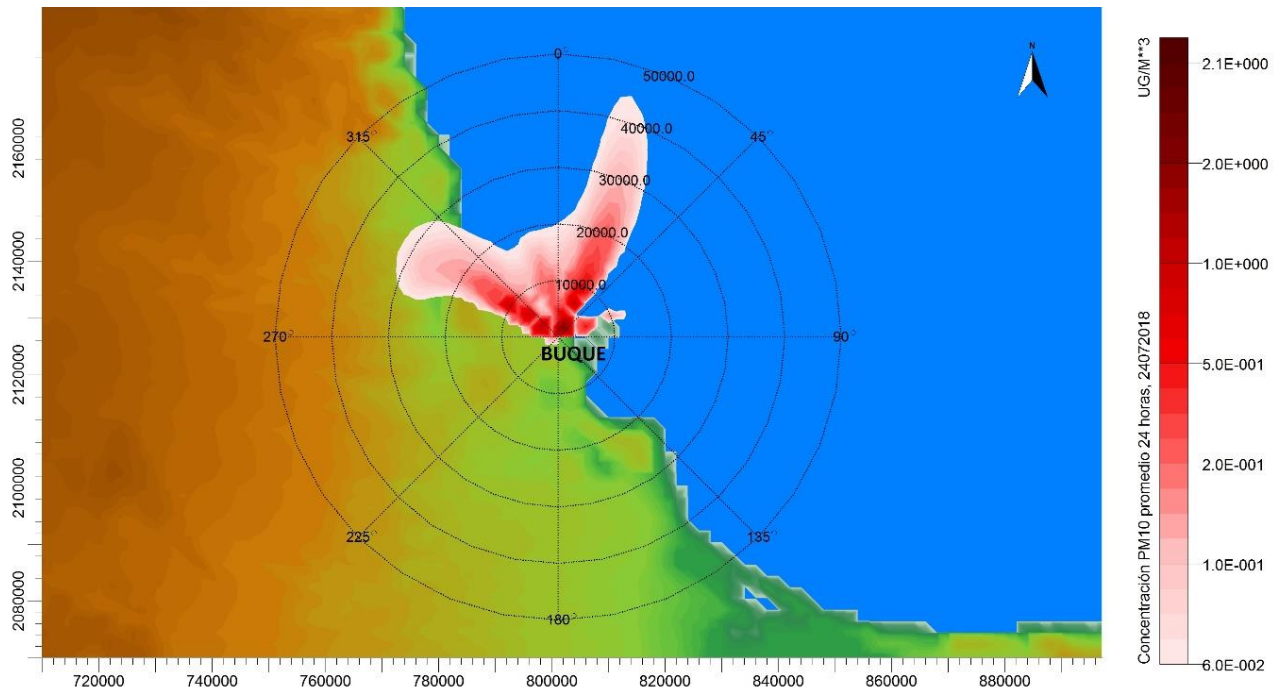


Figura 73 Distribución de partículas  $\text{PM}_{10}$  en el RPV el día 24/07/2018 con la metodología A.

La metodología B (Figura 74) nos indica que el área de impacto fue el territorio veracruzano en dirección NW. Observamos una concentración máxima de  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En esta modelación no se afectó el golfo de México. Para esta simulación se ingresó la cantidad de 6 buques que arribaron ese día al RPV los cuales consistieron en buques de automóviles (2), carga general (1) y contenedores (3), Estos anclaron en los muelles 1N, 4E, 7E, 7S, Y contenedores S. El incremento de concentración entre ambas metodologías fue de 90.5%.

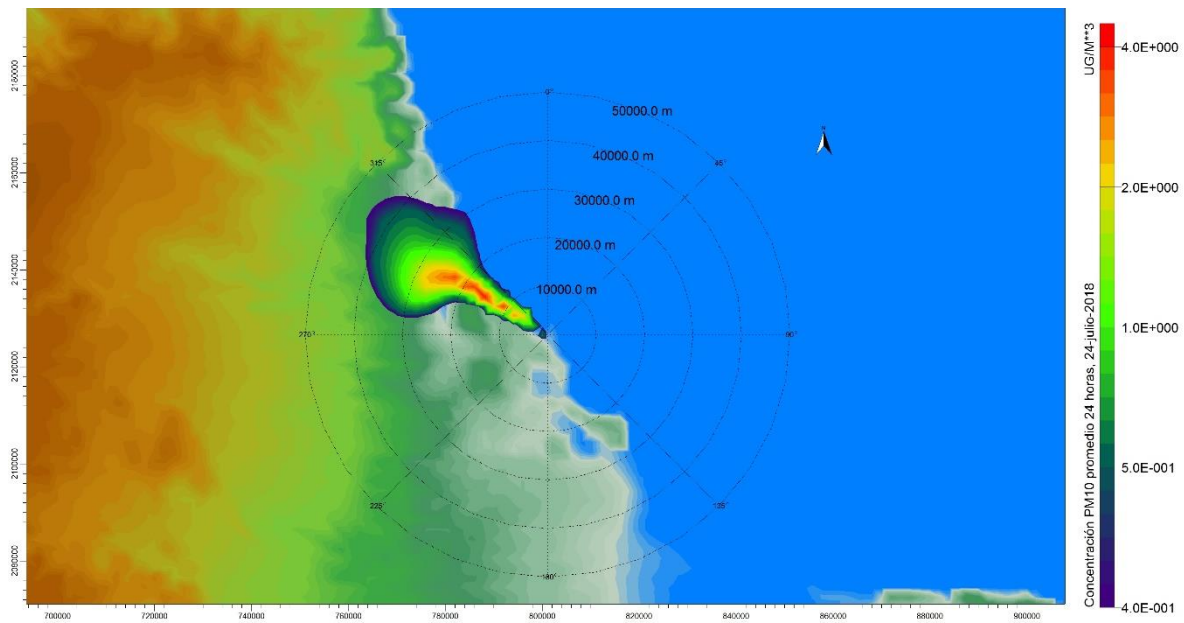


Figura 74. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 24/07/2018 con la metodología B.

En la Figura 75 se observa la distribución de  $PM_{10}$  el día 25 de julio del 2018. Ese día las concentraciones en la estación de monitoreo fueron de  $114.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en la simulación observamos con la metodología A, que la concentración máxima generada por la actividad de buques es de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , además observamos las  $PM_{10}$  se distribuyen hacia las direcciones N, NNW, NW y NNE, abarcando el área del Golfo de México y los municipios de La Antigua, Paso de Ovejas, Puente Nacional, entre otros. La cantidad de buques registrados que anclaron ese día fueron 15, los cuales se ingresaron a la simulación.

En la Figura 76 se observa la simulación con la metodología B donde se ingresó el arribo de 2 buques los cuales fueron uno de automóviles anclado en el muelle 6 N y un granelero anclado en el muelle 2N. Para esta modelación también se agregó el ingreso de los 10 buques operando en el Nuevo Puerto de Veracruz. Ese día las concentraciones más altas se distribuyeron en dirección NW y WNW afectando los mismos municipios simulados en la metodología A. En esta modelación la concentración máxima de partículas es de  $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El incremento en la concentración entre ambos modelos fue de 60%.



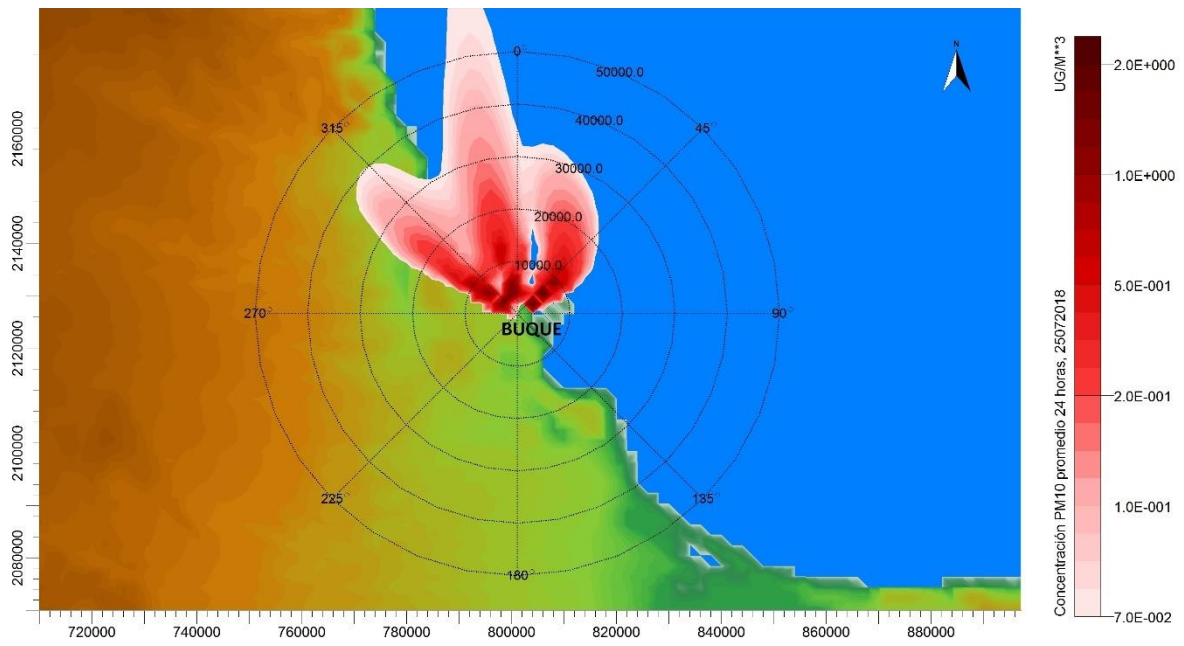


Figura 75. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 25/07/2018.

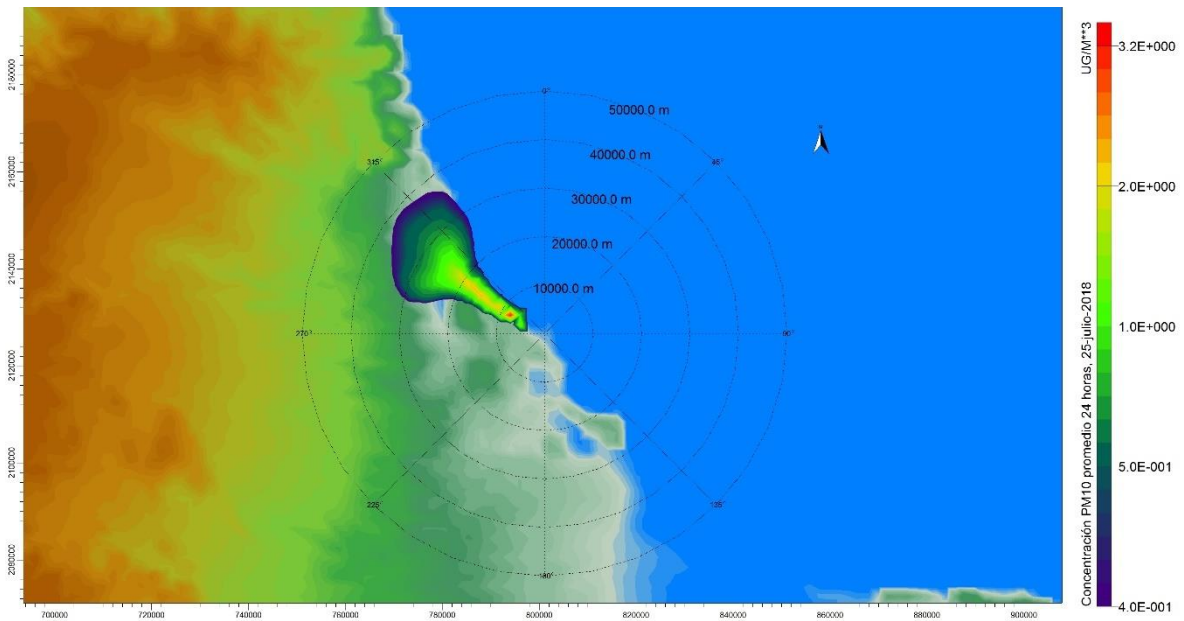


Figura 76. Distribución de partículas  $PM_{10}$  en el RPV el día 25/07/2018.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

De acuerdo con la base de datos obtenida del monitoreo de  $PM_{10}$ , para el periodo comprendido de agosto del 2017 a abril del 2019, se encontró que se llegó a rebasar la concentración de referencia que establece la NOM-025-SSA1-2014 por 31 días, por 172 para la OMS y la UE promedio 24 horas, asimismo la concentración de referencia para el periodo anual del 2018 también fue excedida, indicando que la calidad del aire no fue satisfactoria.

En los días donde se llegó a superar los límites de referencia establecidos en la normatividad mexicana de partículas, se presentaron estabilidades atmosféricas neutrales y ligeramente inestables, lo cual favoreció el incremento de las concentraciones de  $PM_{10}$ .

El origen de las  $PM_{10}$  proviene de la ampliación del Nuevo Puerto de Veracruz, del actual Recinto Portuario de Veracruz y la zona urbana de acuerdo con la dirección de origen observado en las rosas de viento y de contaminantes.

La llegada de buques, la actividad de dragado en la zona y la ampliación del Puerto de Veracruz causaron un incremento en la concentración de  $PM_{10}$ . Este incremento fue más notorio entre las 7 y 10 horas para todo el periodo de estudio de acuerdo con lo observado en el análisis de la variación temporal de partículas.

De acuerdo con el inventario de emisiones se encontró que la mayor emisión de  $PM_{10}$  es originada por buques de contenedores, Ro-Ro y tanques.

La concentración que resultó del modelo CALPUFF señala que en el sitio no se rebasa la norma de calidad del aire en un periodo 24 horas para  $PM_{10}$ . Esto se debe a que solamente se consideró a los buques como fuente de emisión.

## 5.2 Recomendaciones

Continuar con el monitoreo de partículas  $PM_{10}$  e incorporar el monitoreo de partículas  $PM_{2.5}$  con el propósito de considerar estudios de efectos a la salud de las personas. Otra de las razones para continuar con su monitoreo es con respecto a la ampliación del puerto de Veracruz, el cual inicio actividades a partir del 01 de julio de 2019 y su etapa de construcción concluirá hasta el año 2030.

Aumentar el número de estaciones de monitoreo de la calidad del aire en las zonas aledañas al RPV debido a que los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de dispersión CALPUFF se observó que las concentraciones generadas por la actividad de buques llegan a otros municipios del estado. Además, se deben monitorear otros contaminantes criterio y tóxicos.

Se sugiere la colaboración entre los tres niveles de gobierno, local, estatal y federal, para realizar monitoreo de la calidad del aire en el municipio de Veracruz y zonas aledañas, para poder detectar en tiempo real el momento en que la calidad del aire sea desfavorable para la población del sitio y con ello tomar las medidas necesarias para la población

Es necesario que en México ratifique el convenio MARPOL en restricción de emisiones y con ello se comprometa a prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques. Esto aportaría una postura en favor del ambiente por parte de nuestro país y aportaría un mejor enfoque a la política de “puertos verdes” implementada por APIVER.

Considerar la factibilidad de un cambio en los combustibles en buques de Diésel marino a Gas marino logrando con ello reducir las emisiones de partículas,  $SO_2$ , entre otros contaminantes.

Continuar con el modelo de dispersión CALPUFF considerando los tiempos de llegada de los buques, la ubicación del muelle en el que atracan, el tipo de buque, su potencia y su tiempo de estadía, con el propósito de obtener datos más cercanos a la realidad, tanto para el actual puerto como para la nueva ampliación. Además se sugiere ingresar una mayor cantidad de fuentes de emisión como lo son las grúas, montacargas, y fuentes móviles.

## Capítulo 6. Bibliografía

- Aguilar, M., & Ortiz, J. (2011). *Historia General de Veracruz*. (U. Veracruzana, Ed.). Xalapa.
- Anglo Belgian Corporation. (n.d.). *MARINE ENGINES Power & propulsion solutions*. Retrieved May 22, 2018, from <https://www.abc-engines.com/uploads/files/Marine-Engines-Power-propulsion-solutions.pdf>
- APIVER. (2015). Concepto Portuario - Nuevo Puerto de Veracruz. Retrieved March 22, Jun 2019, from <https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/nuevopuertoveracruz/index.php/concepto-portuario/>
- APIVER (2016a). Programa Maestro de Desarrollo Portuario del Puerto de Veracruz 2016-2021. SCT.
- APIVER. (2016b). Publicación informativa de la construcción del nuevo puerto de Veracruz. *Manos a La Obra SCT*.
- APIVER. (2017). Puerto de Veracruz-Infraestructura-mapa-de-instalaciones. Retrieved 30 Sep 2017, from <http://www.puertodeveracruz.com.mx/infraestructura/mapa-de-instalaciones/>
- APIVER. (2019). APIVER - Administración Portuaria Integral de Veracruz. Resumen mensual. Retrieved March 21, 2019, from <https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/estadisticas-2/resumen/>
- ASC. (2016). Inicia etapa del Nuevo Puerto de Veracruz; dragado costará mil 247 mdp. *Excelsior*.
- Baldasano, J. M., Güereca, L. P., López, E., Gassó, S., & Jimenez-Guerrero, P. (2008). Development of a high-resolution (1km×1km, 1h) emission model for Spain: The High-Resolution Modelling Emission System (HERMES). *Atmospheric Environment*, 42 (31), 7215-7233. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.026>
- Biologistik. (2019). Tipos de buque según la carga que transportan - Biologistik. Retrieved June 21, 2019, from <https://www.biologistik.com/blog/tipos-buque-segun-carga/>
- Bravo, H., Sosa, R., Sanchez, P., Fuentes, G., & Tami, L. (2014). Green Port in

- México: Development of combustion emission inventory in the Port of Veracruz, México. *A&WMA's 107th Annual Conference & Exhibition*, 1-14.
- Browning, L., & Bailey, K. (2006). *Current Methodologies and Best Practices for Preparing Port Emission Inventories*. Retrieved 13, jul, 2018 from <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei15/session1/browning.pdf>
- Casellas, O. J. (n.d.). *Modelo de pronóstico meteorológico mesoscalar: fundamentos, configuración y estudios de sensibilidad*. Retrieved 14, jul, 2018 from <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6836/07Ojc07de12.pdf?sequence=7&isAllo wed=y>
- Cooper, D., & Gustafsson, T. (2004a). *Report series SMED and SMED&SLU Nr 4 2004 Swedish Methodology for Environmental Data Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors Assignment for Swedish Environmental Protection Agency*. Retrieved from [www.smed.se](http://www.smed.se)
- Cooper, D., & Gustafsson, T. (2004b). *Report series SMED and SMED&SLU Nr 5 2004 Swedish Methodology for Environmental Data Methodology for calculating emissions from ships: 2. Emission factors for 2004 reporting*. Retrieved from [www.smed.se](http://www.smed.se)
- Cruz, C. (2012). Aduana en México, Puertos de cabotaje y altura mexicanos. Retrieved 17 oct, 2017 from <https://aduaenmexico.wordpress.com/2011/03/15/puertos-de-cabotaje-y-altura-mexicanos/>
- ENTEC. (2002). *2.2 Ship Movement Analysis 2.2.1 Details of database used in ship movement analysis*. Retrieved 10 ene, 2019 from [http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2\\_ship\\_emissions.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2_ship_emissions.pdf)
- ECOSLC. (2019). Ecoports Network in Mexico with PERS certified. Retrieved 25 sep, 2019, from <https://www.ecoslc.eu/network>
- EPA. (2010). Module 3: Characteristics of Particles - Aerodynamic Diameter. Retrieved 13 feb, 2018, from <https://archive.is/H56R#selection-155.2-155.63>
- EPA. (2012). Summary of the Clean Air Act. Retrieved 13 feb, 2018, from <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>
- EPA. (2016). Modelos de calidad del aire | TTN - Centro de soporte para el modelado regulatorio atmosférico | EPA de los Estados Unidos. Retrieved April

- 1, 2019, from <https://www3.epa.gov/scram001/aqmindex.htm>
- EPA. (2017). Criterial Air Pollutants. Retrieved October 17, 2017, from <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- EPA. (2018). *UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY LIST OF DESIGNATED REFERENCE AND EQUIVALENT METHODS*. Retrieved April 1, 2019 from [www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html](http://www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html)
- European Commission. (2017). Air Quality Standards. Retrieved September 22, 2017, from <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.html>
- García, P. (2018). Evento de “Norte”, fenómeno meteorológico recurrente en invierno y otoño. Retrieved June 25, 2019, from <https://www.meteored.mx/noticias/actualidad/evento-de-norte-en-mexico.html>
- Geogia Tech, & ITESM. (2011). Trade & Logistics Innovation Center. Retrieved October 8, 2017, from <http://www.ciltec.com.mx/es/infraestructura-logistica/puertos-maritimos>
- Guevara, M. (2010). *Inventario de emisiones atmosféricas de puertos y aeropuertos de España para el año 2008*. Barcelona. Retrieved September 22, 2017, from [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10640/PFC\\_Memoria.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10640/PFC_Memoria.pdf)
- Hart, D., & Hart --, D. (2009). *Keys to Obtaining High Quality Particulate Data Keys to Obtaining High Quality Particulate Data Using a PM Using a PM 2.5 2.5 Federal Equivalent Method Federal Equivalent Method*. Retrieved from [www.metone.com](http://www.metone.com)
- IDEAM. (n.d.). *Monitor de Particulas Metone-1020*. Retrieved September 22, 2017, from <http://www.ideam.gov.co/documents/41590/242303/BAM1020.pdf/143d8be3-c517-4453-8834-990eff047a85>
- INECC. (n.d.). *Equipos para la Medición de la Calidad del Aire*. Retrieved 13 feb, 2018, from [www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html](http://www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html).
- Katz, M. (2011). *Guía didáctica Capítulo 2 Aire Materiales y materias primas*. Retrieved 13 feb, 2018, from <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/aire.pdf>
- Lippman, M., Ito, K., Nádas, A., & Burrennet, R. (2000). *Association of particulate matter components with daily mortality and morbidity in urban populations*. (S.

- of R. R. 95., Ed.).
- Masters, G. M., & Ela, W. P. (2008). Capitulo 7. Contaminación atmosférica. In *Introducción a la Ingeniería Medioambiental* (3ra ed., p. 752). Arizona: Pearson.
- Mateos, E. (2016). *Emisiones a la atmósfera por consumo de combustóleo y por cambio a gas natural en una central termoeléctrica de interés*. Tesis de licenciatura en ingeniería química, UNAM.
- Moroz, W. (1999). Contaminación del aire. In *Ingeniería Ambiental* (pp. 942-566). México: Pearson.
- NCAR. (2001). Weather Research and Forecasting Model | MMM: Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory. Retrieved June 18, 2019, from <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- OCDE. (2015). Better Life Index. Retrieved 13 feb, 2018, from <http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=BLI>
- Office of the Federal Register (United States). (2006). 40 CFR Appendix D\_to\_part\_58 - Network Design Criteria for Ambient Air Quality Monitoring | CFR | US Law | LII / Legal Information Institute. In *Office of the Federal Register (United States)*. USA. Retrieved from [https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-D\\_to\\_part\\_58](https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-D_to_part_58)
- OMI. (2019a). Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL). Retrieved March 22, 2019, from [http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- OMI. (2019b). Estado jurídico de los convenios. Retrieved May 29, 2019, from <http://www.imo.org/es/About/Conventions/StatusOfConventions/Paginas/Default.aspx>
- OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra. Retrieved 18 jun, 2018, from [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf;jsessionid=6887AAC6DEA5334164C5D253DB68A33C?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=6887AAC6DEA5334164C5D253DB68A33C?sequence=1)
- OMS. (2016). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Retrieved 18 jun, 2018 from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

- Parker, A. (1983). *Contaminación del aire por la industria*. Editorial Reverté.
- Pasquill, F. (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *Australian Meteorological Magazine*, 90 (1063), 33-49. Retrieved 5, may, 2019 from [https://www.researchgate.net/publication/231221906\\_The\\_Estimation\\_of\\_the\\_Dispersion\\_of\\_Windborne\\_Material](https://www.researchgate.net/publication/231221906_The_Estimation_of_the_Dispersion_of_Windborne_Material)
- Rojas, E. (2016). *Estimación de emisiones de partículas por manejo de granel mineral en recintos portuarios : caso de estudio: recinto portuario de Veracruz*. Tesis de licenciatura en ingeniería química, UNAM.
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model*. Retrieved 6, may, 2019 from [http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF\\_UsersGuide.pdf](http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf)
- SCT. (2014). .:Portal SCT::: Ratifica México adhesión al convenio de la OMI para prevenir contaminación por buques. Retrieved March 22, 2019, from <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/ratifica-mexico-adhesion-al-convenio-de-la-omi-para-prevenir-contaminacion-por-buques/>
- SCT. (2017). Sistema Portuario Nacional, Puertos y Marina. Retrieved January 6, 2017, from <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- SEGOB. (2013). DOF - Diario Oficial de la Federación. Retrieved March 22, 2019, from [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5323174&fecha=25/11/2013](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5323174&fecha=25/11/2013)
- SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida*. Mexico D.F. Retrieved 3 april, 2018, from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- SEMARNAT. (2015). Con la Certificación a Ensenada como Puerto Verde, México crece de manera sustentable. In C. de P. N. 164/15 (Ed.). Ensenada, B.C.
- SEMARNAT, & INE. (2011). *Gobierno Federal Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM 2.5*. Retrieved 1 dic, 2017, from [www.semarnat.gob.mx/www.ine.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx/www.ine.gob.mx)
- Seoáñez, M. (2002). *Tratado de la contaminación atmosférica. Problemas tratamiento y gestión*. (Mundi-Prensa, Ed.). Madrid, España.
- Stock Logistic. (2016). Tipos de buques- Stock Logistic. Retrieved June 21, 2019, from <https://www.stocklogistic.com/que-es-roll-roll/>



- Tami, L. (2014). *Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz*. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental- UNAM.
- ThermoFisher. (2018). Muestreadores de aire de gran volumen. Retrieved March 26, 2019, from <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/HVAIR100>
- ThermoScientific. (2007). *TEOM 1405*. Retrieved March 26, 2019 from <http://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/EPM-TEOM1405-Manual.pdf>
- Turner, D. B. (1969). *Workbook of Atmospheric Diffusion Estimates*. North Carolina. Retrieved 7, march, 2019 from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101GKEZ.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior+to+1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&>
- UNAM. (2010). *CINÉTICA QUÍMICA*. Retrieved 11 jul, 2019, from [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/PRACTICA6ESPECTROFOTOMETRIA\\_21576.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/PRACTICA6ESPECTROFOTOMETRIA_21576.pdf)
- UNESCO. (1987). *Desarrollo Sostenible*. Bruntland.
- US EPA, O. (n.d.). Particulate Matter (PM) Basics. Retrieved 3 oct, 2017, from <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- Wilson, W. E., & Suh, H. H. (1997). Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47 (12), 1238-1249. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10464074>
- Woodward, J. L. (1998). *Estimating the flammable mass of a vapor cloud*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Estimating+the+Flammable+Mass+of+a+Vapor+Cloud-p-9780816907786>
- Zamudio, I. (2019, July 1). Nuevo Puerto de Veracruz: llega el primer barco. Retrieved from <https://www.milenio.com/negocios/nuevo-puerto-de-veracruz-llega-el-primer-barco>

## ANEXO 1. Análisis de calidad del aire y meteorología para los días en que se excedió la concentración de referencia de la NOM-SSA1-025-2014

### Caso 16/10/17

El primer caso observado fue el día 16 de octubre del 2017 donde el promedio diario fue de  $91.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La variación por horas se observa en la Figura 77 donde se observa un incremento de  $\text{PM}_{10}$  a partir de las 12:00 horas en adelante.

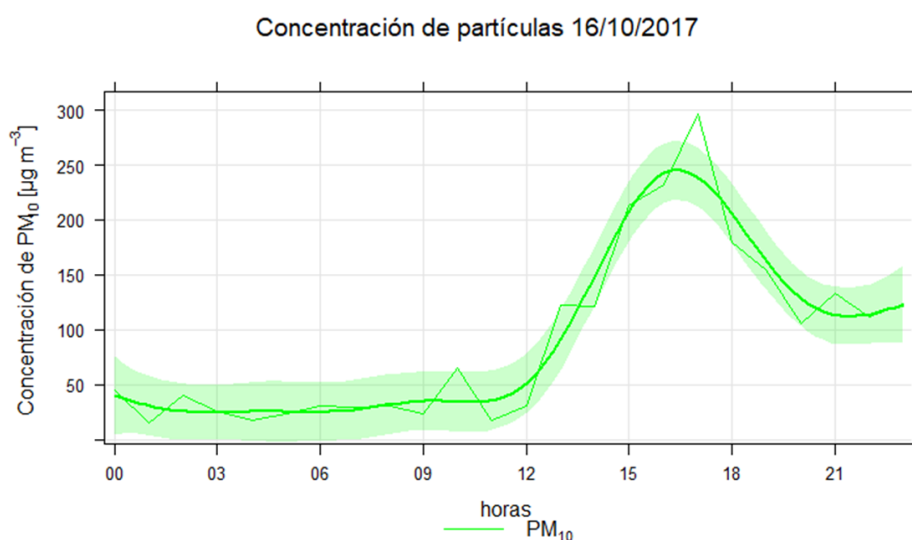


Figura 77. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  el 16/10/2017 en la estación de monitoreo del RPV

En ese mismo día, se observa que la estabilidad atmosférica (Figura 78) fue volviéndose inestable, hasta el mediodía, donde el aumento de partículas comenzó, y la estabilidad atmosférica a partir de ese lapso se volvió neutral.

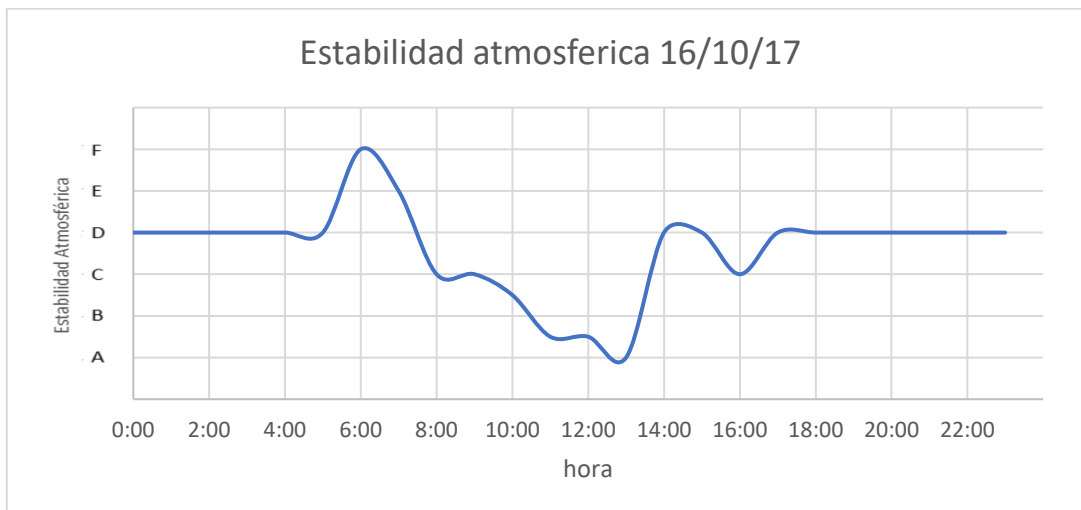


Figura 78. Estabilidad atmosférica 16/10/17 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos (Figura 79) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección N, y NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto. La rosa de contaminantes (Figura 80) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección NNW.

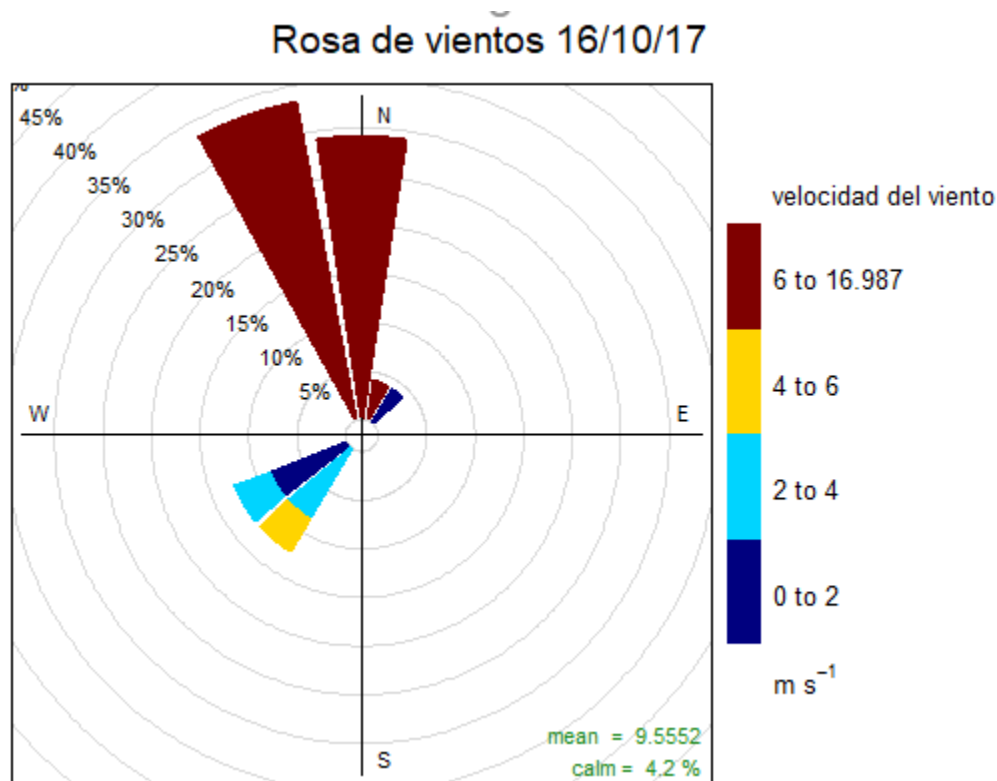


Figura 79. Rosa de vientos 16/10/17 en la estación de monitoreo del RPV

## Rosa de contaminación del 16/10/2017

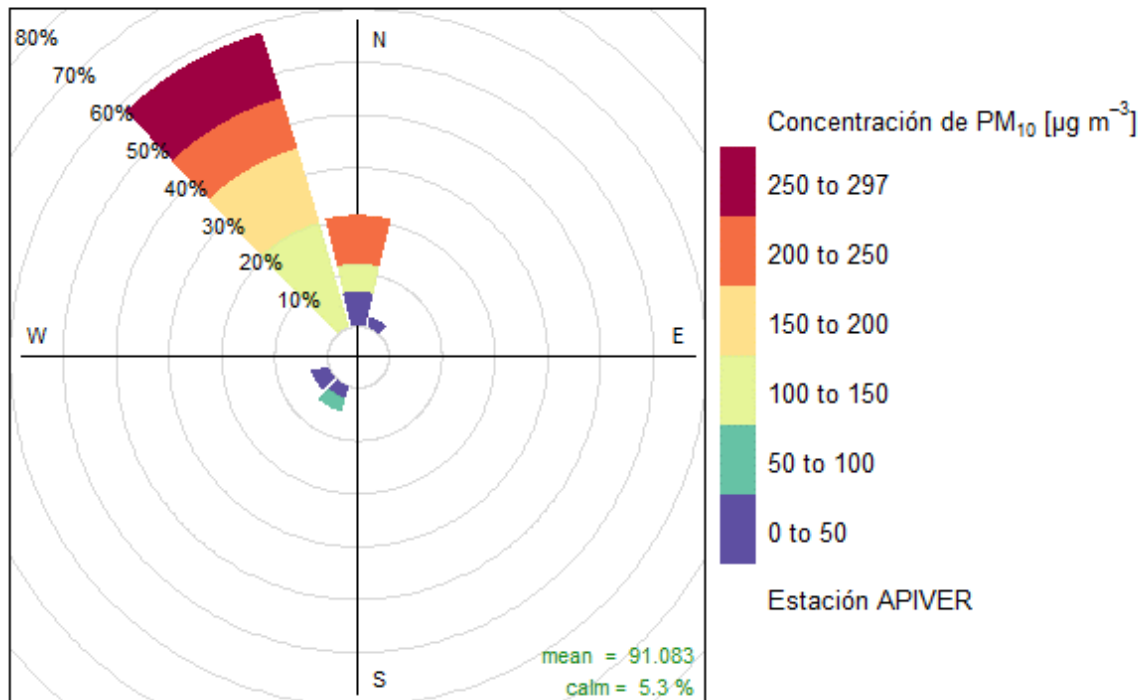


Figura 80. Rosa de contaminantes 16/10/17 en la estación de monitoreo del RPV

## Caso 28/10/17

El segundo caso observado fue el día 28 de octubre del 2017 donde el promedio diario fue de  $100.01 \mu\text{g/m}^3$ . En la variación por horas se observa en la Figura 81 donde se observa un incremento alto de PM<sub>10</sub> a partir de las 7:00 horas y continuo con niveles altos hasta las 15:00 horas.

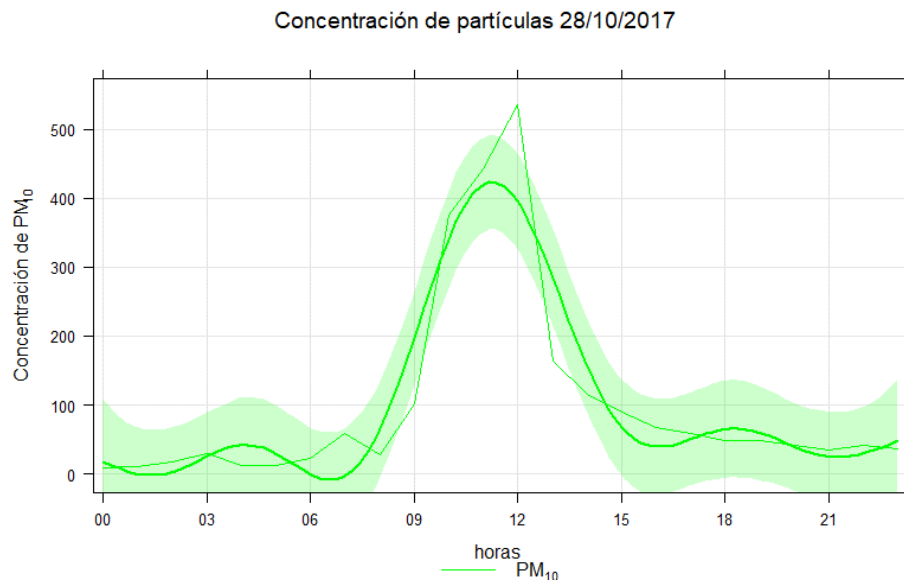


Figura 81. Variación de la concentración de PM<sub>10</sub> el 28/10/2017 en la estación de monitoreo del RPV

Ese día, la estabilidad atmosférica se mantuvo en ligeramente inestable y neutral en las horas de alta concentración (Figura 82).

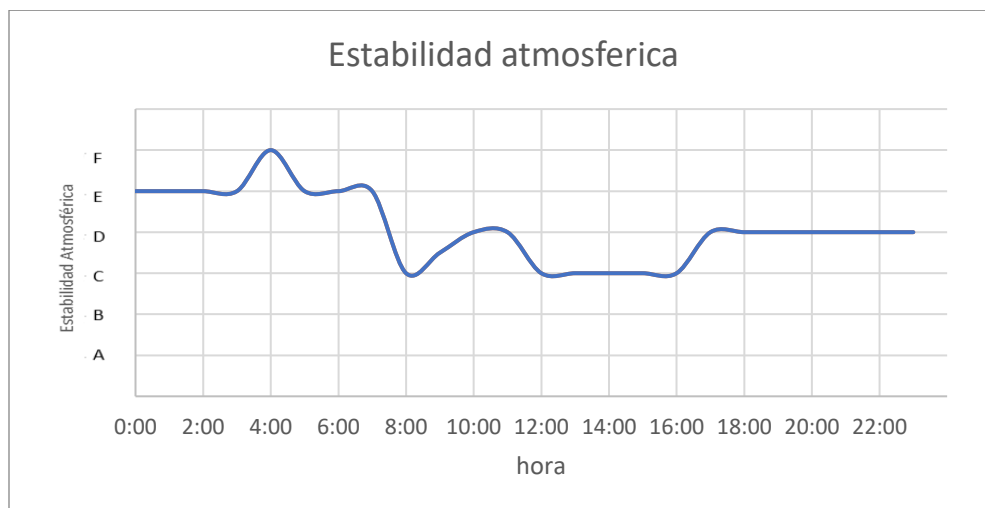


Figura 82. Estabilidad atmosférica 28/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.

La rosa de vientos (Figura 83) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección N, y NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto. La rosa de contaminantes (Figura 84) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de PM<sub>10</sub> es en dirección NW.

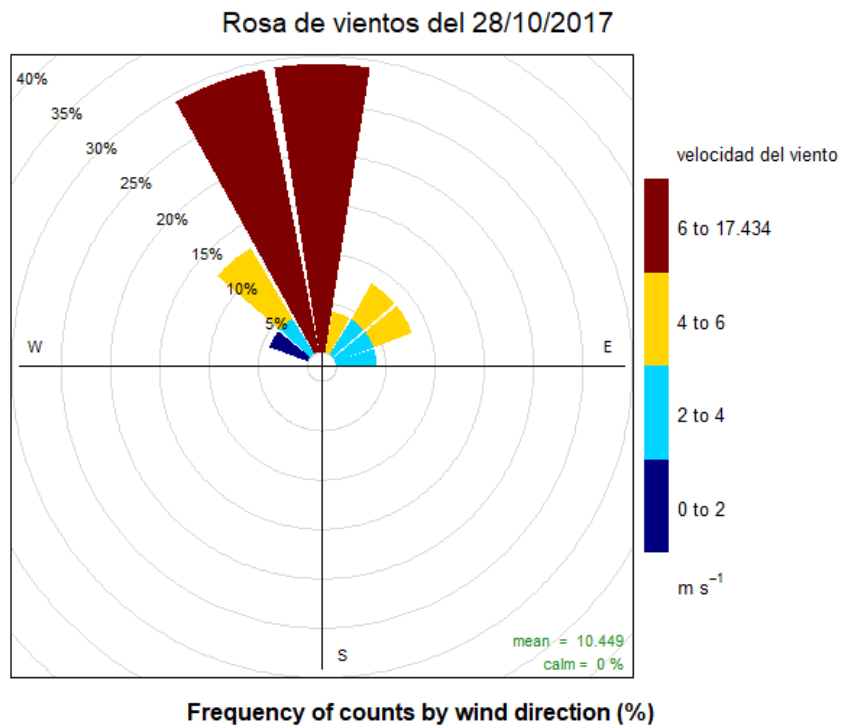


Figura 83. Rosa de vientos 28/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.

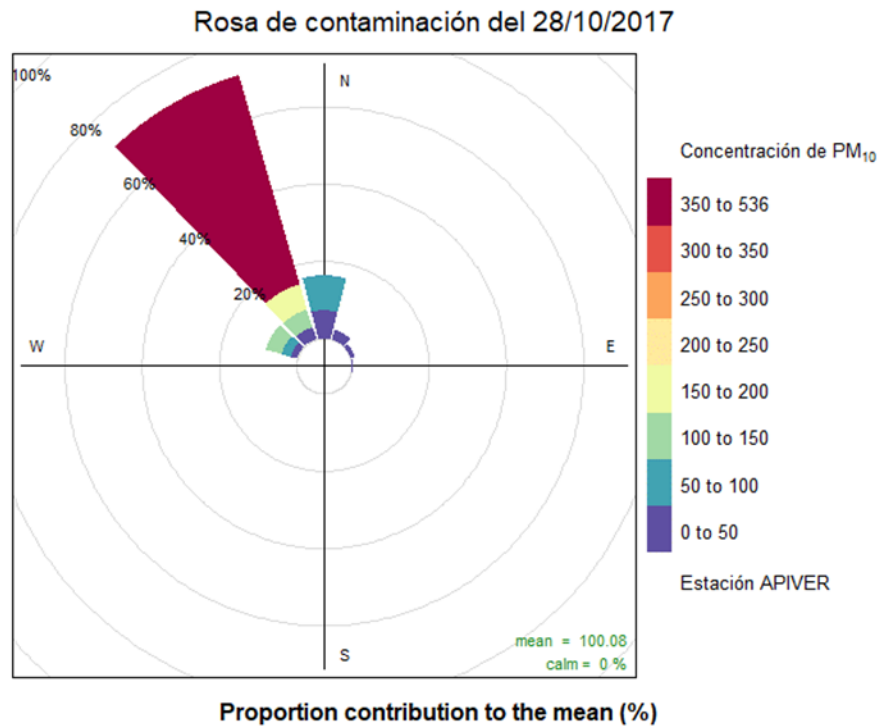


Figura 84. Rosa de contaminantes 28/10/17 en la estación de monitoreo del RPV.

### Caso 8/12/17

El tercer caso observado fue el día 8 de diciembre del 2017 donde el promedio diario fue de  $109.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la variación por horas se observa en la Figura 85 donde se observa un incremento variado de  $\text{PM}_{10}$  a partir de las 5:00, llegando a su máximo a las 13:00 horas y a partir de ahí disminuyendo un poco.

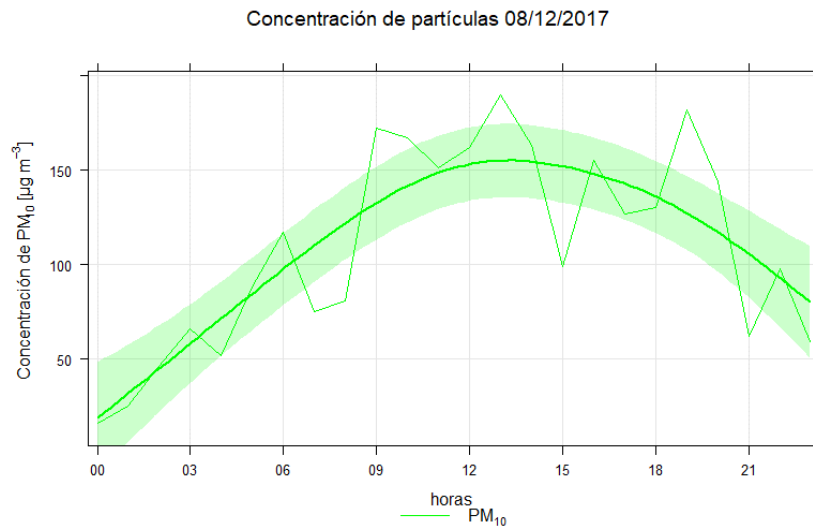


Figura 85. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  el 8/12/2017

Ese día, la estabilidad atmosférica se mantuvo neutral durante todo el día. (Figura 86). Esto provoca que la dispersión de contaminantes tenga una tendencia lineal.

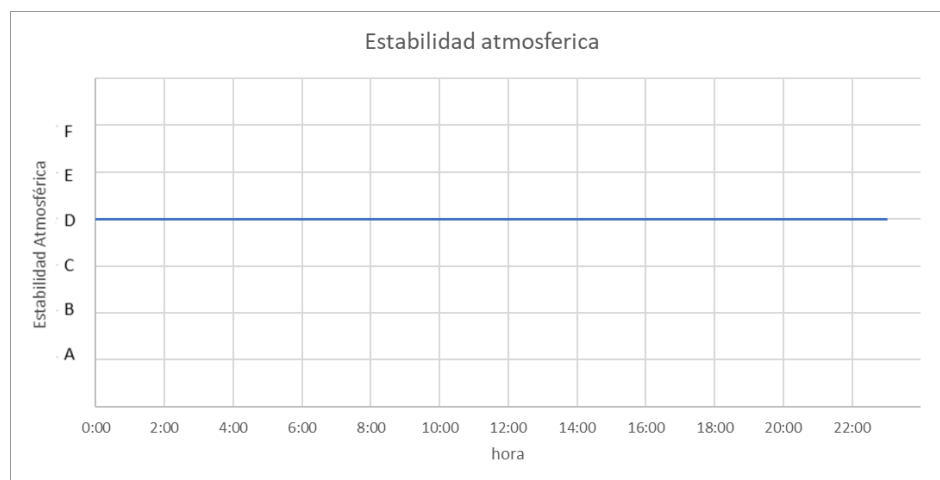


Figura 86. Estabilidad atmosférica 8/12/17

La rosa de vientos (Figura 87) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto. La rosa de contaminantes (Figura 88) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección NNW y unas cuantas en dirección N.

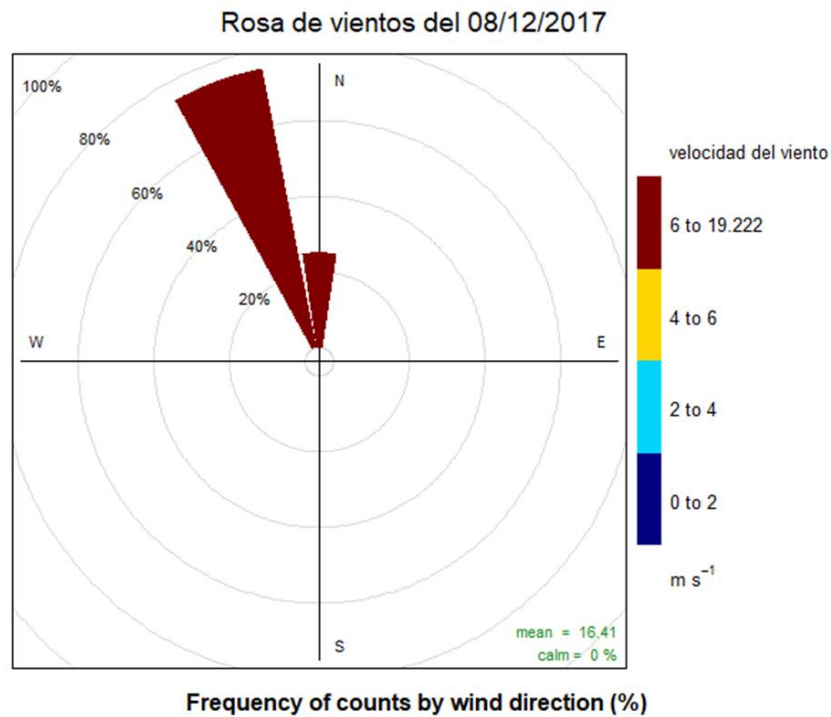


Figura 87. Rosa de vientos 8/12//17 en la estación de monitoreo del RPV.



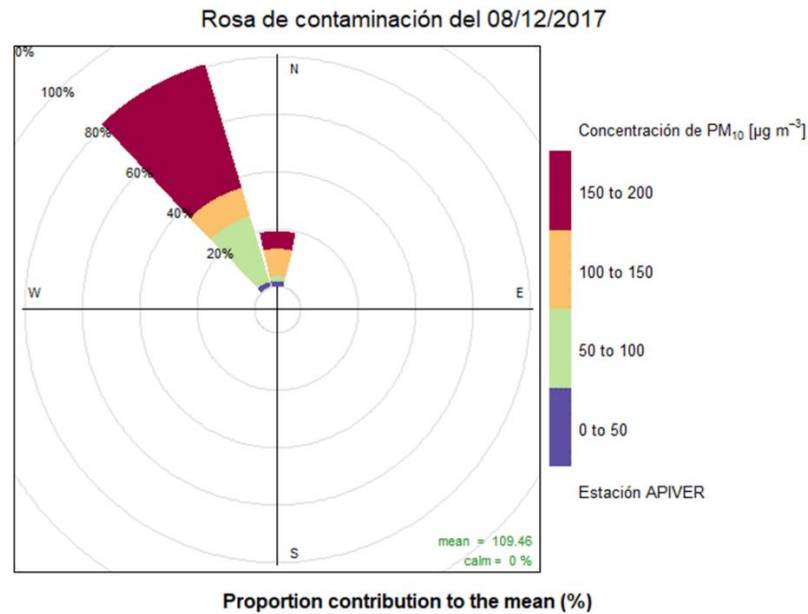


Figura 88. Rosa de contaminantes 8/12/17 en la estación de monitoreo del RPV.

### Caso 3/01/18

El cuarto caso observado fue el día 3 de enero del 2018 donde el promedio diario fue de  $115.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la variación por horas se observa en la Figura 89 donde se observa un incremento de  $\text{PM}_{10}$  a partir de las 10:00 y disminuyendo hasta las 18:00 horas.

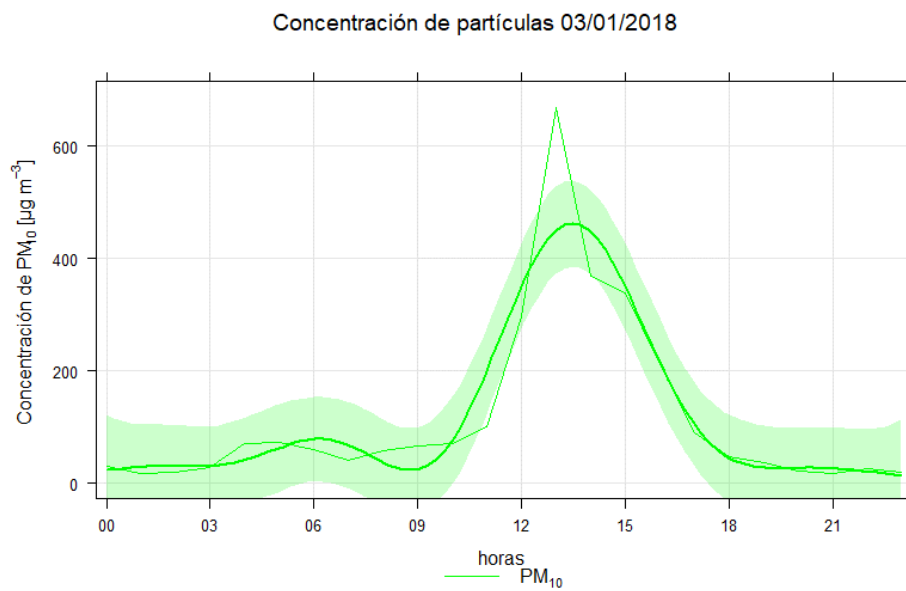


Figura 89. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  el 03/01/2018

Ese día, la estabilidad atmosférica se mantuvo neutral durante casi todo el día. (Figura 90).

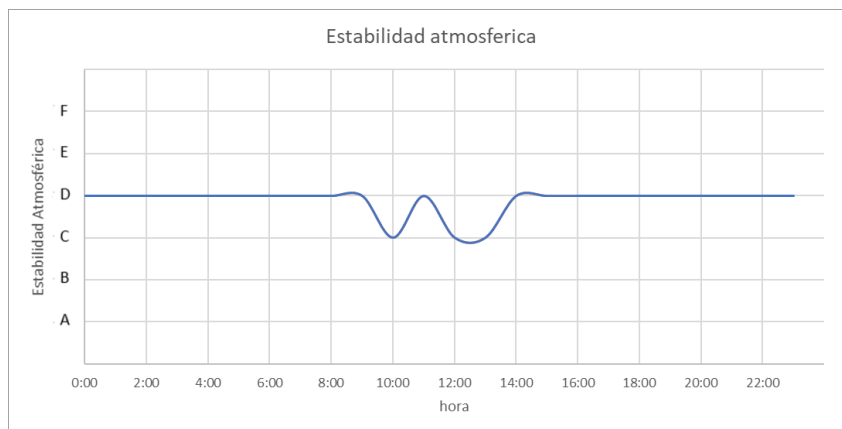


Figura 90. Estabilidad atmosférica 03/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.

La rosa de vientos (Figura 91) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto. La rosa de contaminantes (Figura 92) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección NNW.

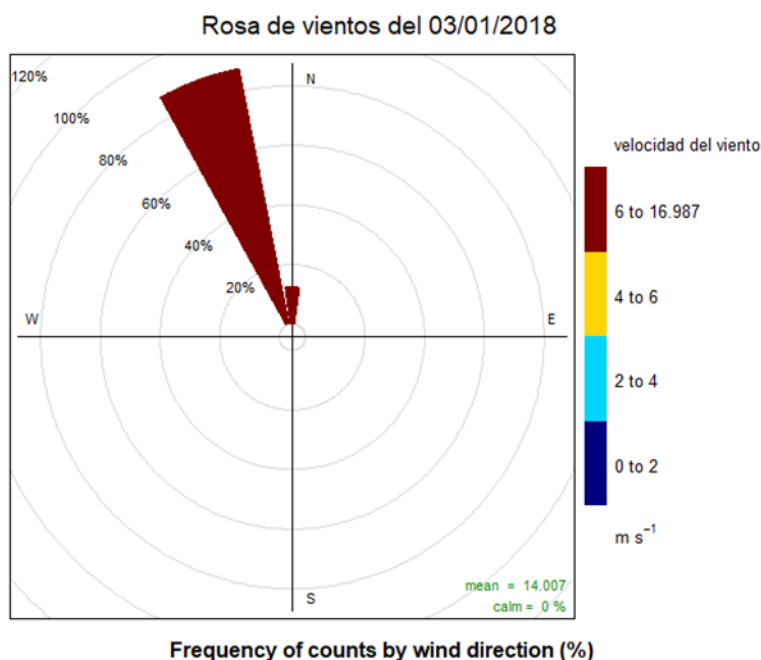


Figura 91. Rosa de vientos 03/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.

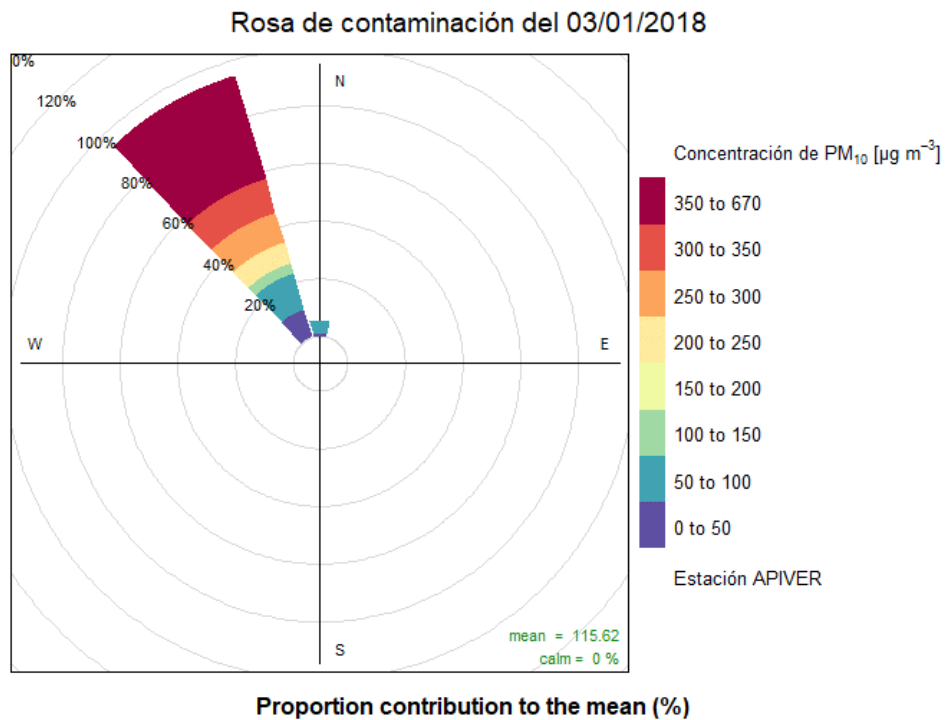


Figura 92. Rosa de contaminantes 03/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV.

### Caso 24/01/18

El quinto caso observado fue el día 24 de enero del 2018 donde el promedio diario fue de 155.42 µg/m<sup>3</sup>. En la variación por horas se observa en la Figura 93, donde se observa un incremento de PM<sub>10</sub> a partir de las 8:00 y disminuyendo hasta las 18:00 horas.

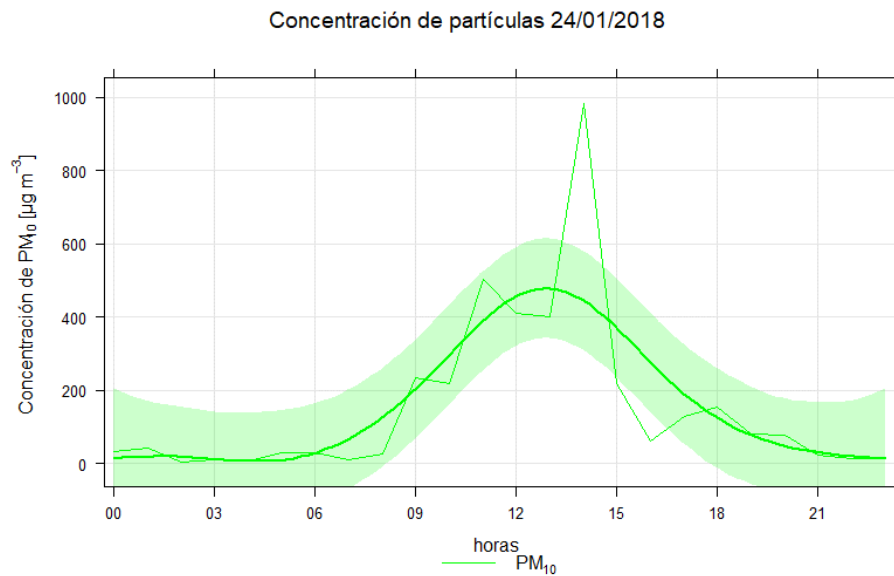


Figura 93. Variación de la concentración de  $PM_{10}$  el 24/01/2018

Ese día, la estabilidad atmosférica se mantuvo neutral durante todo el día. (Figura 94).

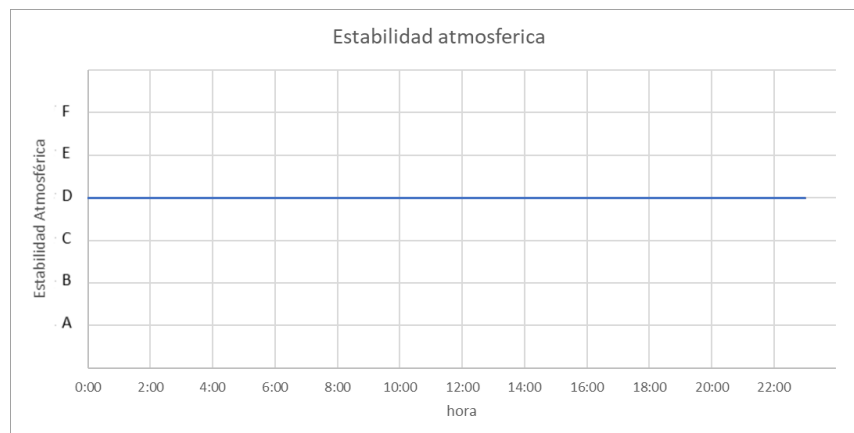


Figura 94. Estabilidad atmosférica 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos (Figura 95) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección NNW, donde se encuentra la construcción del nuevo puerto. La rosa de contaminantes (Figura 96) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección NNW.

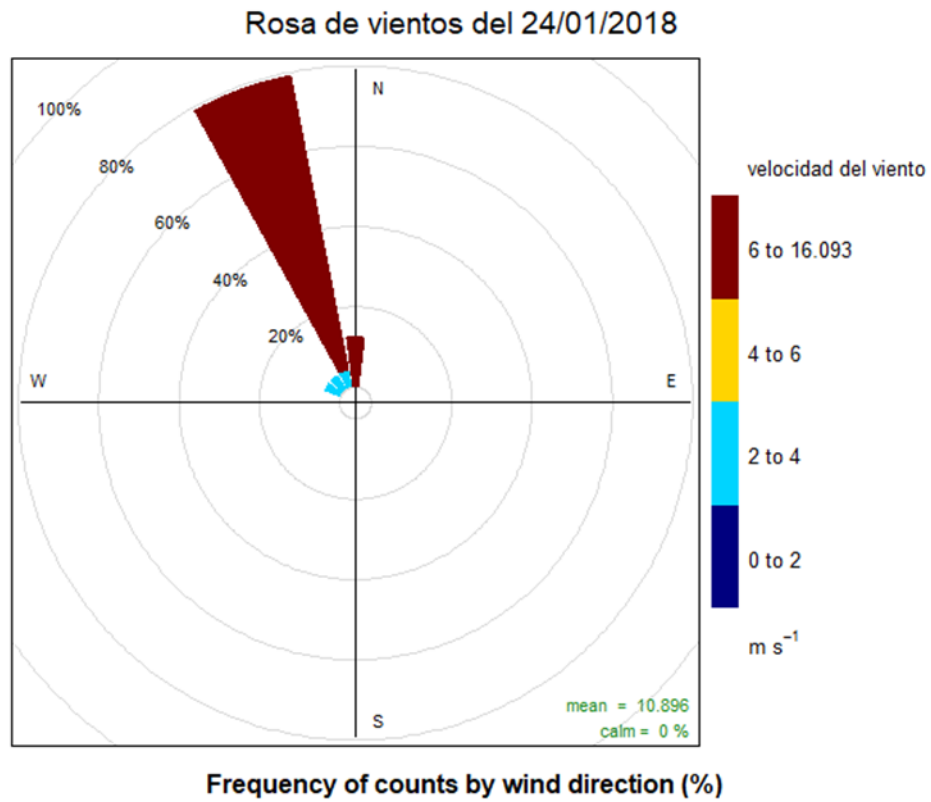


Figura 95. Rosa de vientos 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV

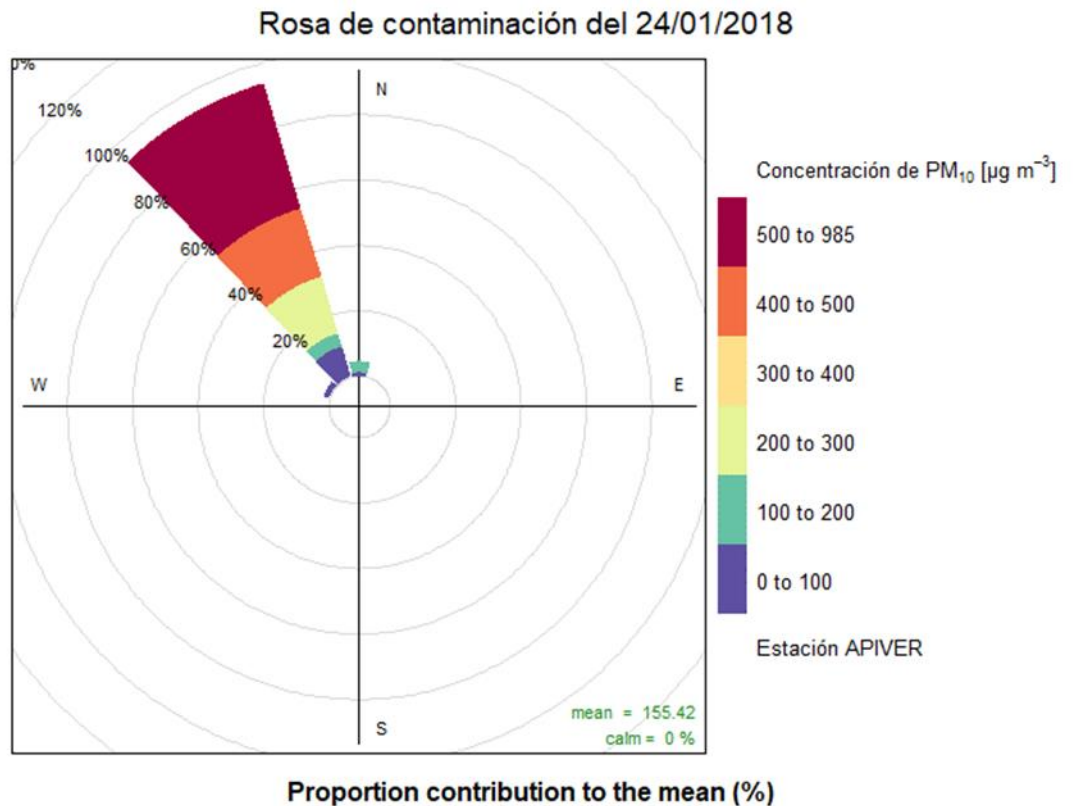


Figura 96. Rosa de contaminación 24/01/2018 en la estación de monitoreo del RPV

### Caso del 29/06/18 al 02/07/18

El octavo caso observado fue del 29 de junio al 2 de julio del 2018 donde los promedios diarios fueron de 80.04 µg/m<sup>3</sup>, 105.83 µg/m<sup>3</sup>, 93.54 µg/m<sup>3</sup> y 79.16 µg/m<sup>3</sup>. En la variación por horas se observa en la Figura 97, que existe un incremento de PM<sub>10</sub> a partir del mediodía del 29/06/18 y disminuyendo hasta la tarde del 02/07/18 madrugada del día 15. de PM<sub>10</sub> a partir del mediodía del 29/06/18 y disminuyendo hasta la tarde del 02/07/18 madrugada del día 15. Vemos que, aunque se superó la norma, las concentraciones fueron menores a 120 µg/m<sup>3</sup> y no existieron picos significativos como en otros días.

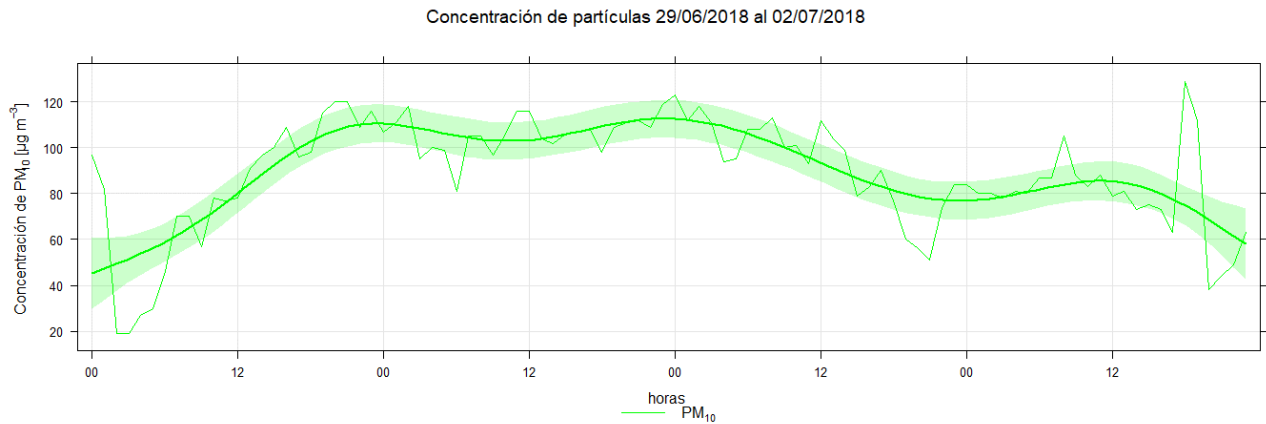


Figura 97. Concentraciones de partículas del 29 de junio al 2 de julio del 2018.

Esos días, la estabilidad atmosférica se mantuvo muy inestable durante el día y estable en la noche (Figura 98).

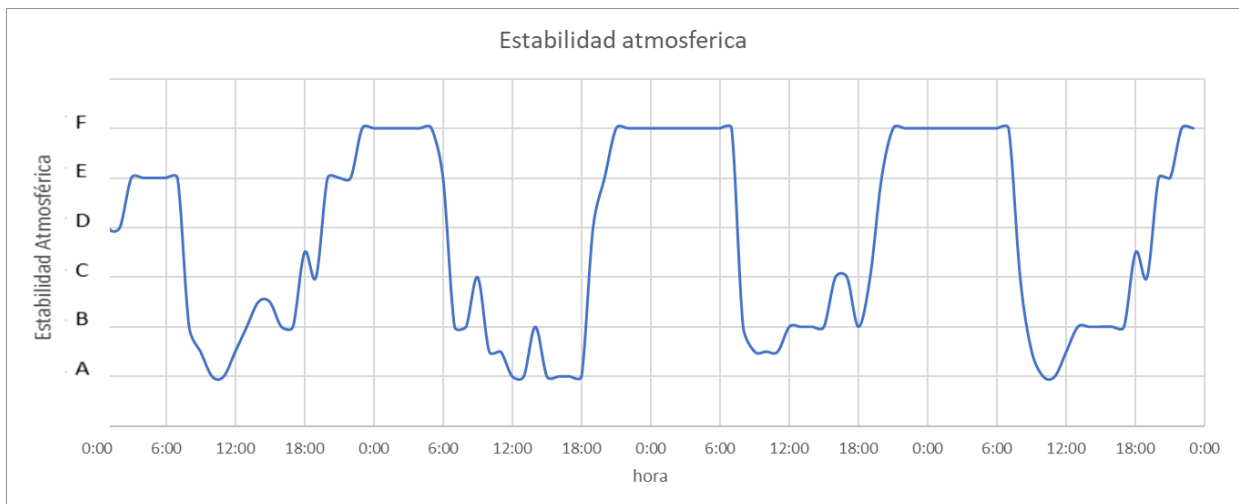
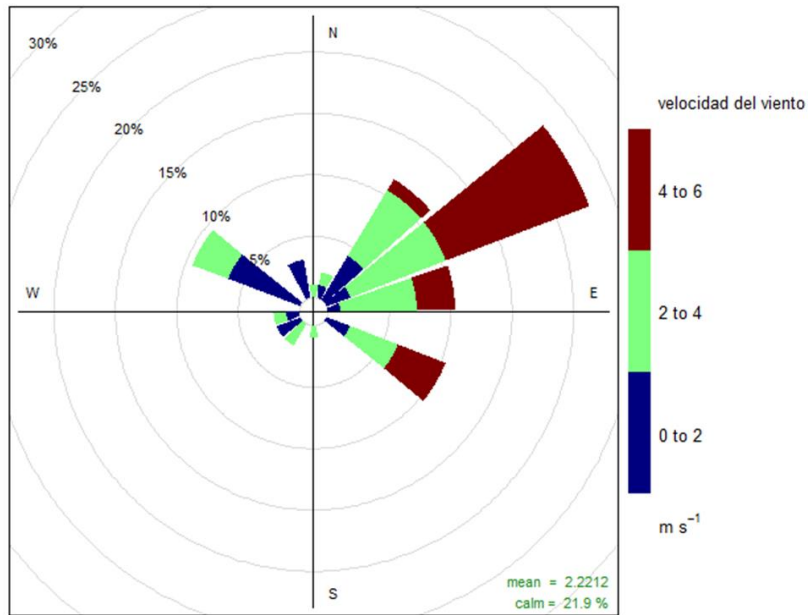


Figura 98. Estabilidad atmosférica del 29 de junio al 2 de julio del 2018 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos (Figura 99) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección ENE donde se ubica el actual puerto de Veracruz, aunque también hay vientos en menor cantidad provenientes de la dirección E, NE, SE, y NW, estos vientos tienen una velocidad muy baja. La rosa de contaminantes (Figura 100) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección ENE, E, ESE, coincidiendo en que el origen de las partículas puede ser por la actividad del actual puerto de Veracruz.

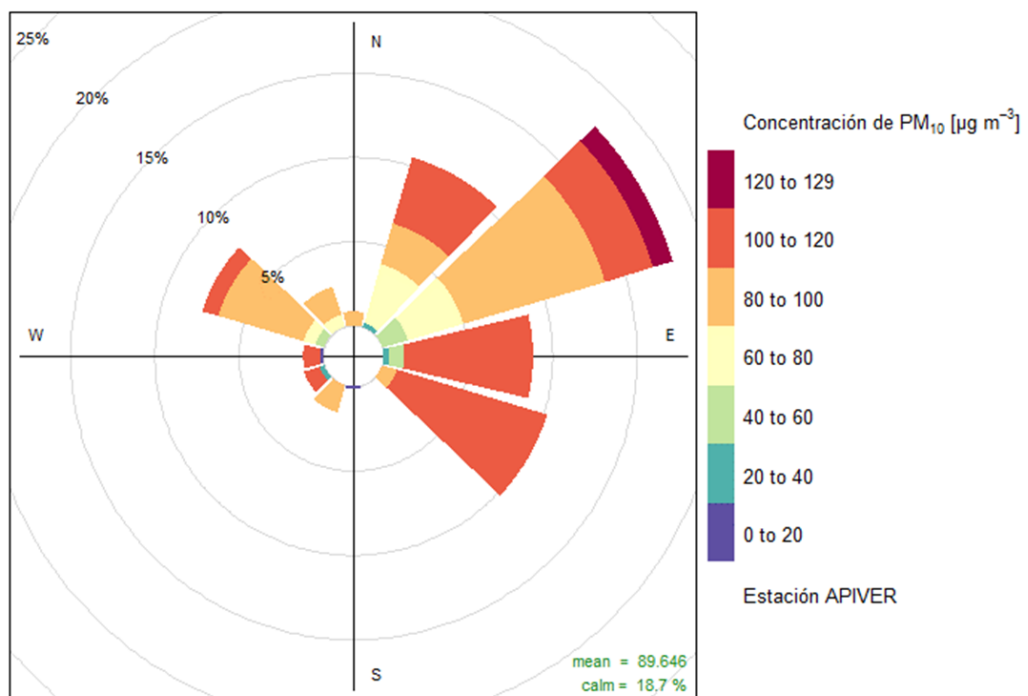
Rosa de vientos del 29/06/2018 al 02/07/2018



Frequency of counts by wind direction (%)

Figura 99. Rosa de vientos del 29 de junio al 2 de julio del 2018.

Rosa de contaminación del 29/06/2018 al 02/07/2018



Proportion contribution to the mean (%)

Figura 100 Rosa de contaminantes del 29 de junio al 2 de julio del 2018.



**Caso 15/07/18 y 16/07/18**

El siguiente caso es del 15 y 16 de Julio del 2018 en el cual las concentraciones fueron de 107.75 y de 81.25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la Figura 101 se observa que las altas concentraciones mayores a 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  comenzaron desde el mediodía del 14 de julio y descendieron en la noche del 16 de julio.

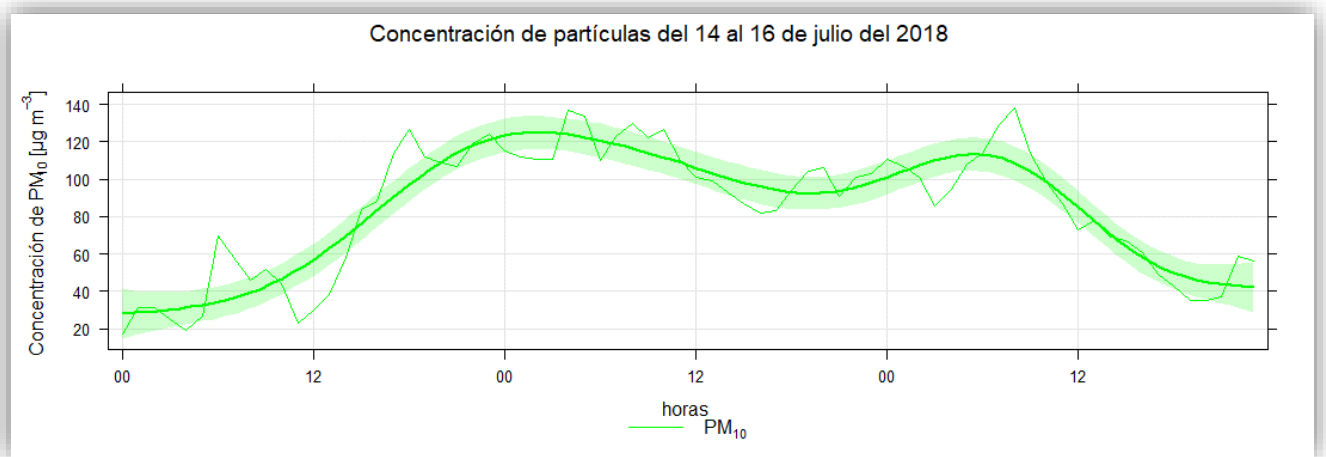
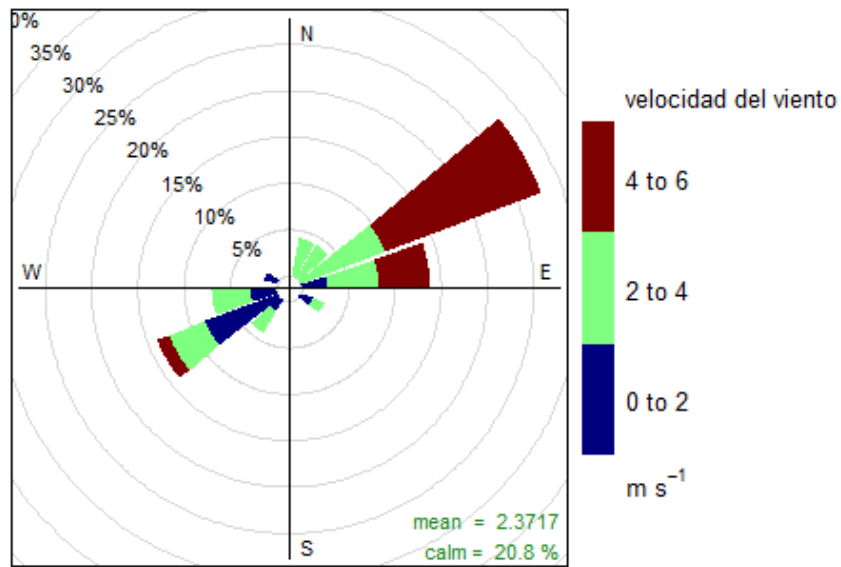


Figura 101. Concentraciones de partículas del 14 al 16 de julio del 2018.

Observamos en la rosa de contaminantes y de viento (Figura 102) que la dirección de viento es proveniente en un porcentaje mayor de la dirección ENE, y en menor proporción la dirección E y la dirección WSW. La rosa de contaminantes (Figura 103) señala lo mismo para el origen de la contaminación de  $\text{PM}_{10}$ , por lo que podemos suponer gran influencia del RPV y de la zona urbana.

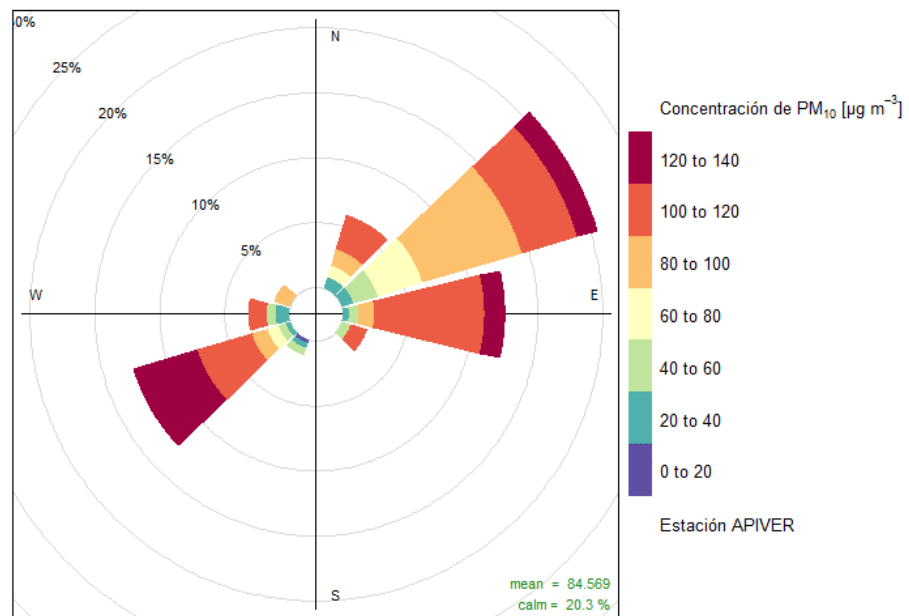
### Rosa de vientos del 14 al 16 de julio del 2018



**Frequency of counts by wind direction (%)**

*Figura 102. Rosa de vientos de los días 14 al 16 de julio del 2018.*

### Rosa de contaminación del 14 al 16 de julio del 2018



**Proportion contribution to the mean (%)**

*Figura 103. Rosa de contaminantes de los días 14 al 16 de julio del 2018.*

### Caso 12/08/18

El noveno caso observado fue el día 12 de agosto del 2018 donde el promedio diario fue de  $83.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la variación por horas se observa en la Figura 104, donde la concentración de  $\text{PM}_{10}$  fue alto desde la medianoche.

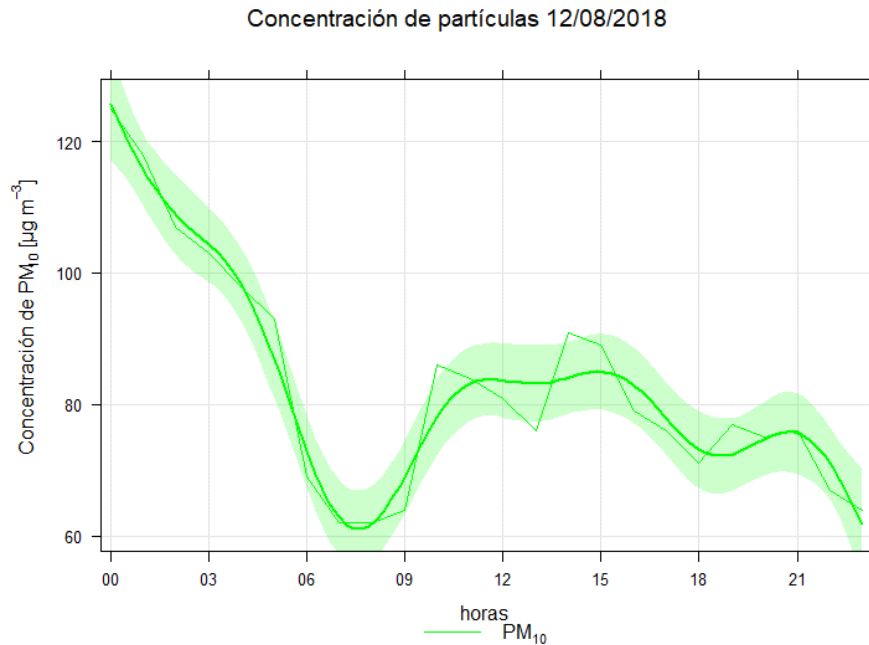


Figura 104. Variación de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  el 12/08/2018

Ese día, la estabilidad atmosférica se mantuvo estable durante la madrugada. (Figura 105). Cuando disminuyó la concentración de  $\text{PM}_{10}$ , la estabilidad fue inestable.

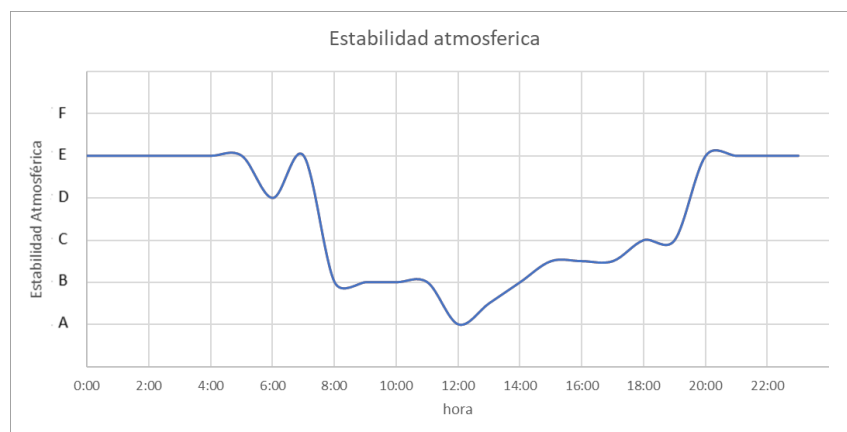


Figura 105. Estabilidad atmosférica 12/08/2018 en la estación de monitoreo del RPV

La rosa de vientos (Figura 106) señala que la mayor velocidad del viento proviene de la dirección ENE, donde se encuentra el actual puerto, sin embargo, también hay vientos provenientes de otras áreas. La rosa de contaminantes (Figura 107) señala que la dirección de donde provienen las más altas concentraciones de  $PM_{10}$  es en dirección W, donde se encuentra la población del municipio.

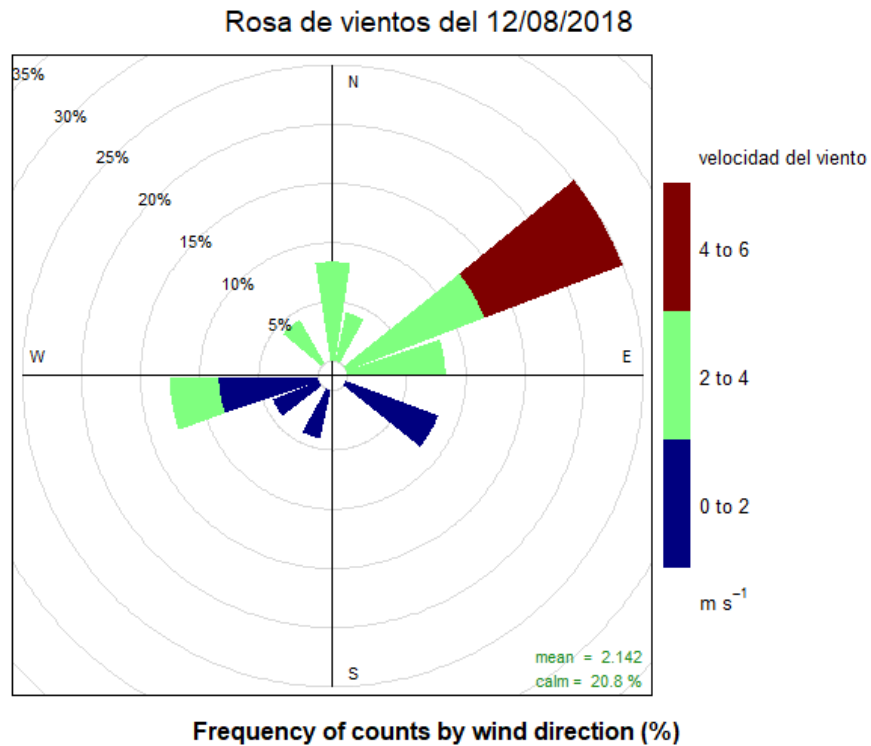


Figura 106. Rosa de vientos el 12/08/2018 en la estación de monitoreo del RPV.

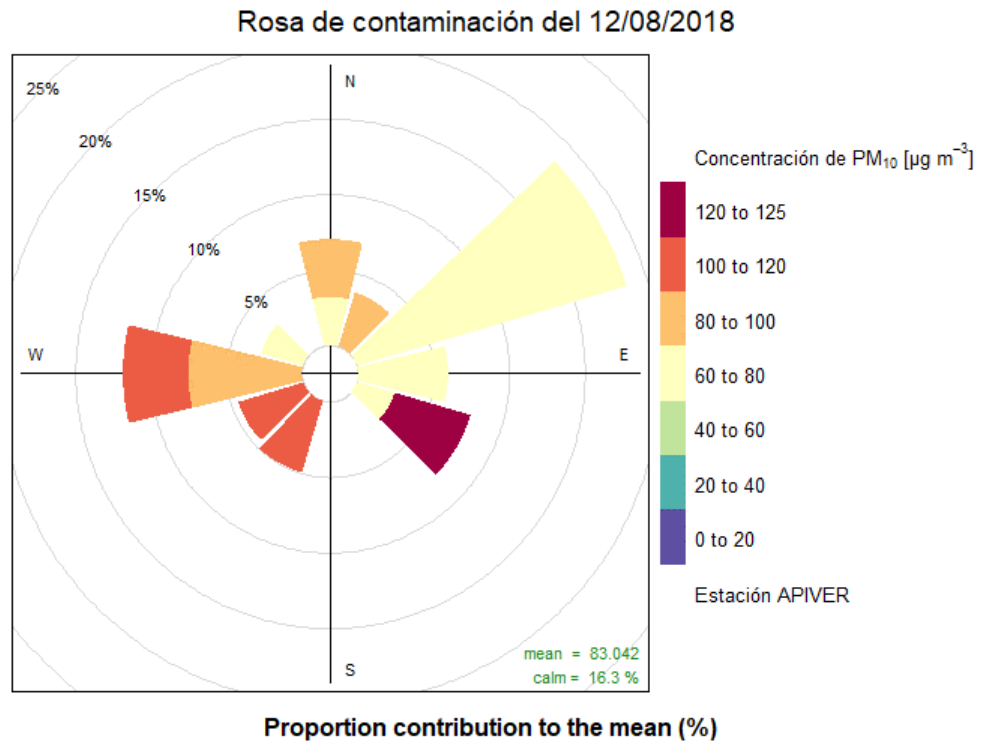


Figura 107. Rosa de contaminantes el 12/08/2018 en la estación de monitoreo del RPV

## Anexo 2. Transporte, dispersión y concentración de $PM_{10}$ en el Puerto de Veracruz.

A continuación, se muestran más modelaciones con la metodología A, de los días en los cuales se excedió los LMP de la normatividad mexicana. La Figura 108 se observa una máxima concentración de  $0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Y una distribución en dirección SE y NW. La Figura 109 se observa una concentración máxima de  $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y se distribuyó en dirección W y SE. La Figura 110 se observa una concentración máxima de  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y una distribución de  $PM_{10}$  en dirección ESE y WNW. La Figura 111 muestra una concentración de  $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y una distribución en dirección NW hasta ENE. Finalmente la Figura 112 nos muestra una concentración máxima de  $0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y esta se distribuye en dirección ESE y WNW.

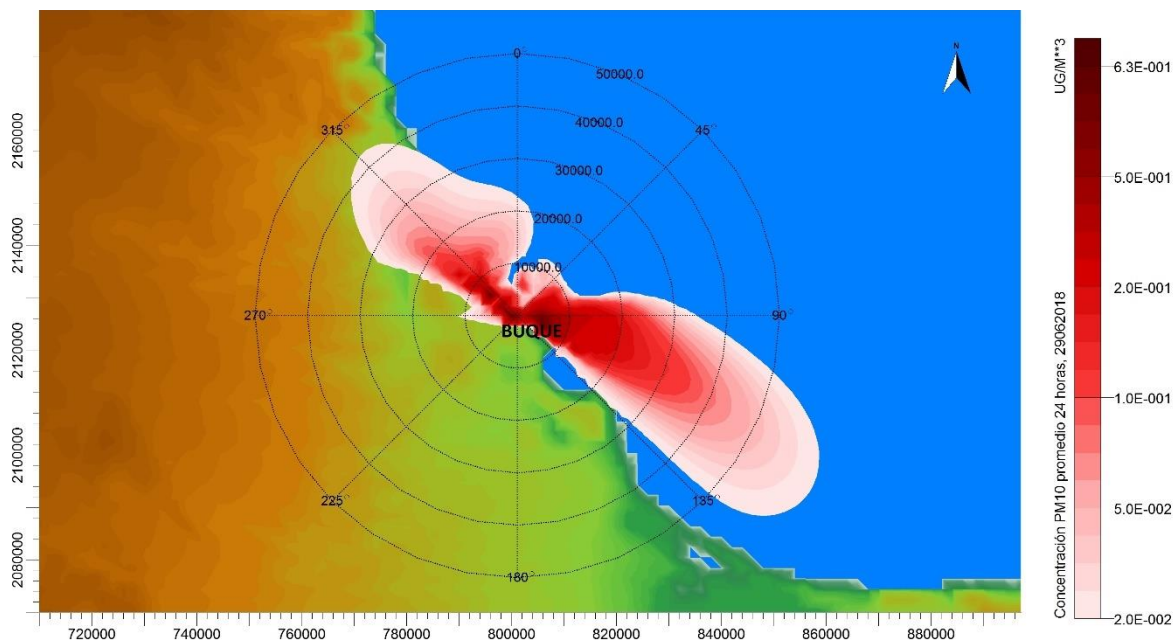


Figura 108. Modelación de  $PM_{10}$  el día 29/06/18 con la metodología A.

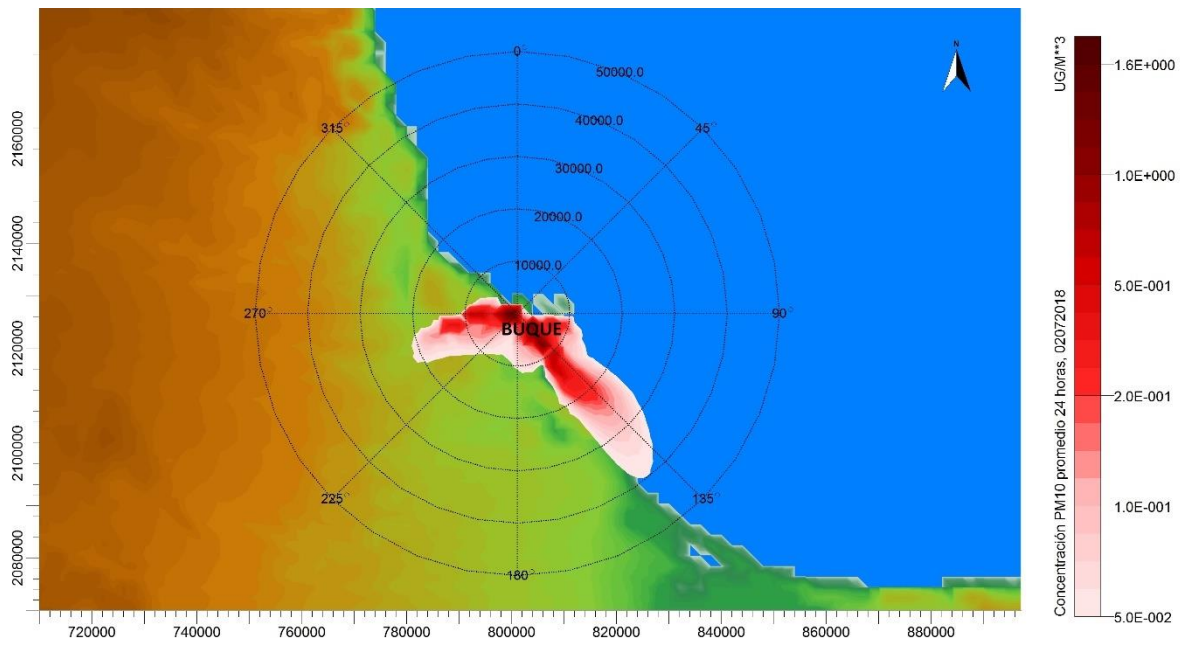


Figura 109. Modelación de PM<sub>10</sub> el día 02/07/18 con la metodología A.

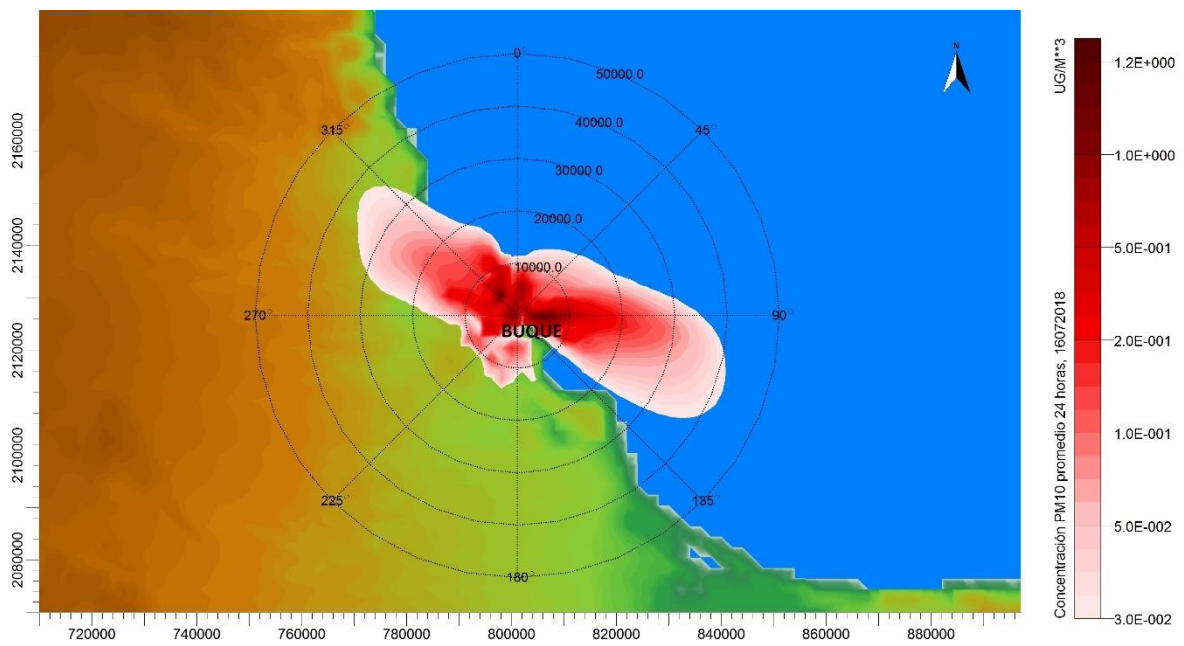


Figura 110. Modelación de PM<sub>10</sub> el día 16/07/18 con la metodología A.

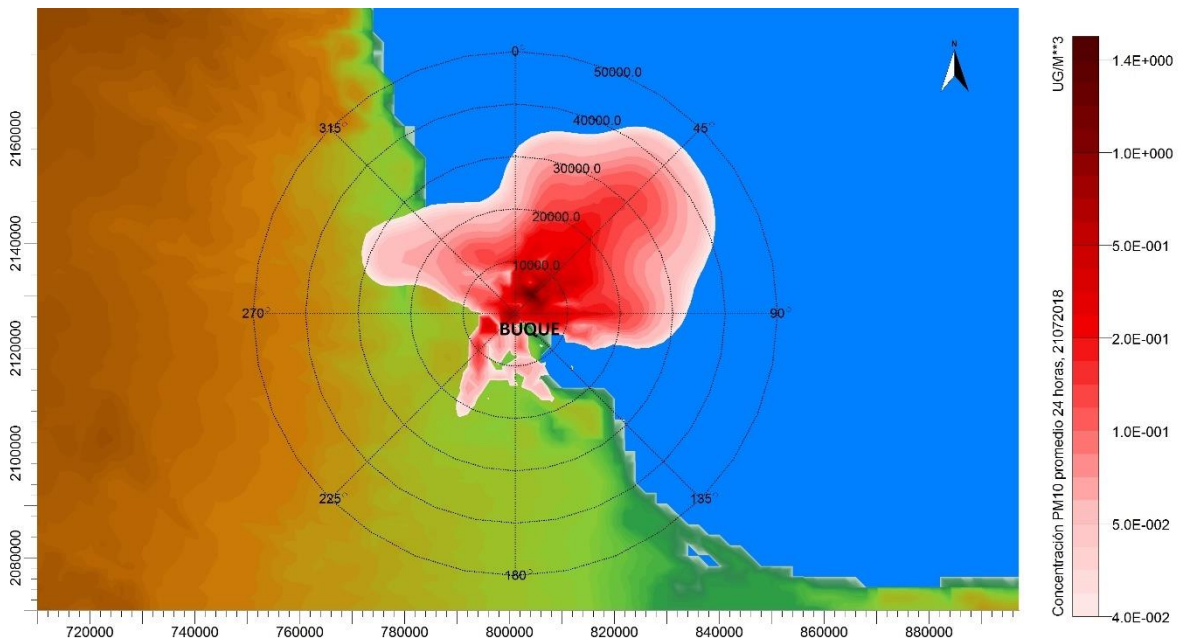


Figura 111. Modelación de  $PM_{10}$  el día 21/07/18 con la metodología A.

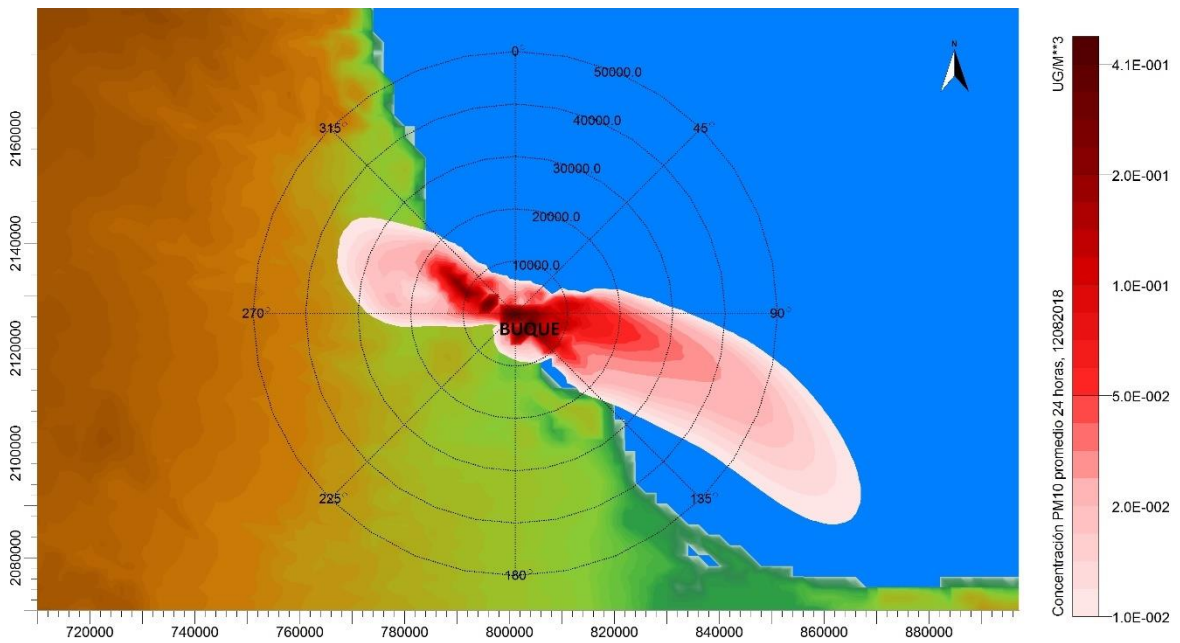


Figura 112. Modelación de  $PM_{10}$  el día 12/08/18 con la metodología A.

Las Figuras 113, 114 y 115 representan 3 casos en los que se presentó el evento Norte lo cual provocó que las partículas se dispersaran en dirección sur. En estas 3 últimas modelaciones solo se consideraron los buques que se quedaron



atracados en el puerto, por lo que solo se modelo con la metodología B. La concentración máxima en estos días fueron  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

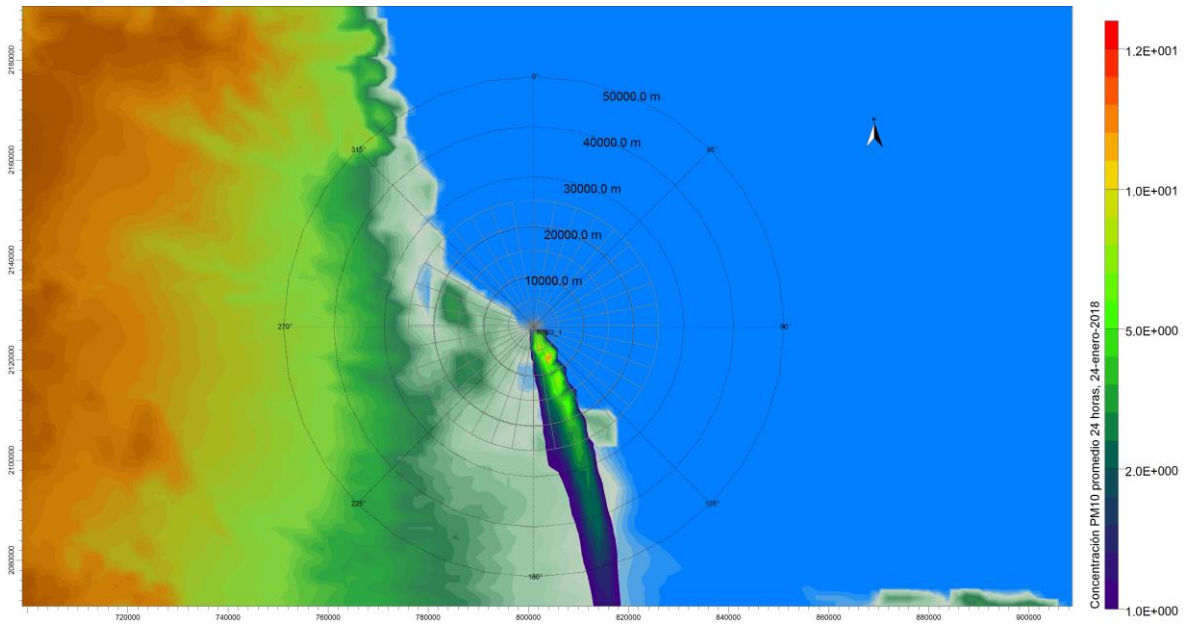


Figura 113. Modelación de  $\text{PM}_{10}$  el día 24/01/18 con la metodología B.

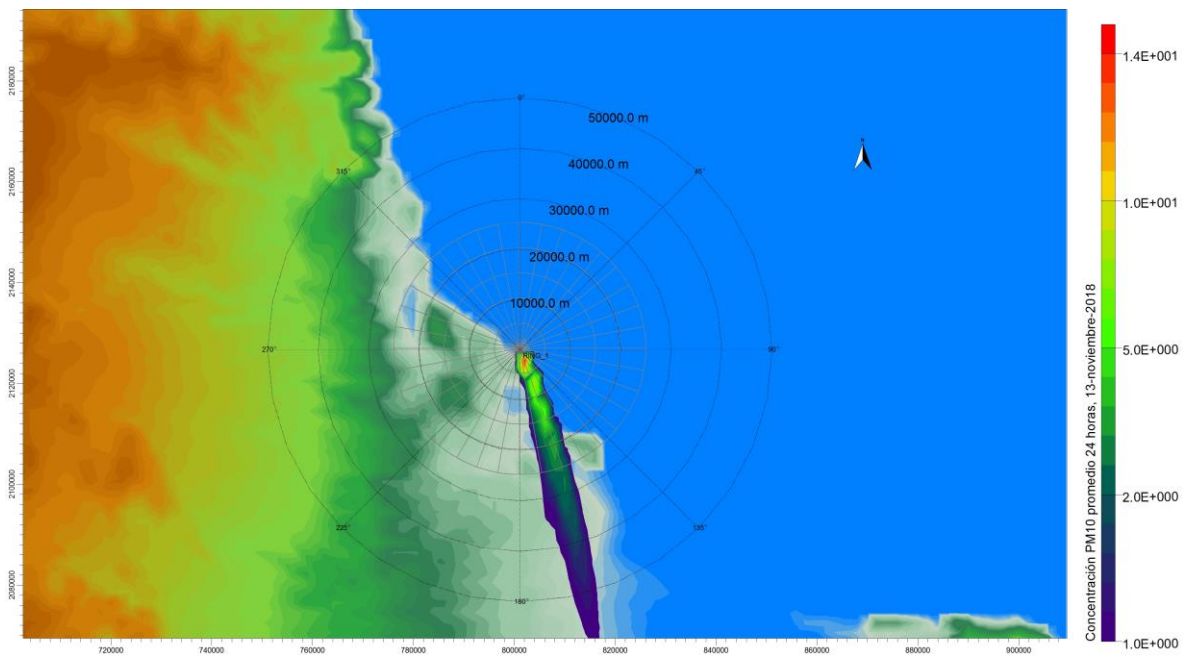


Figura 114. Modelación de  $\text{PM}_{10}$  el día 13/11/18 con la metodología B.

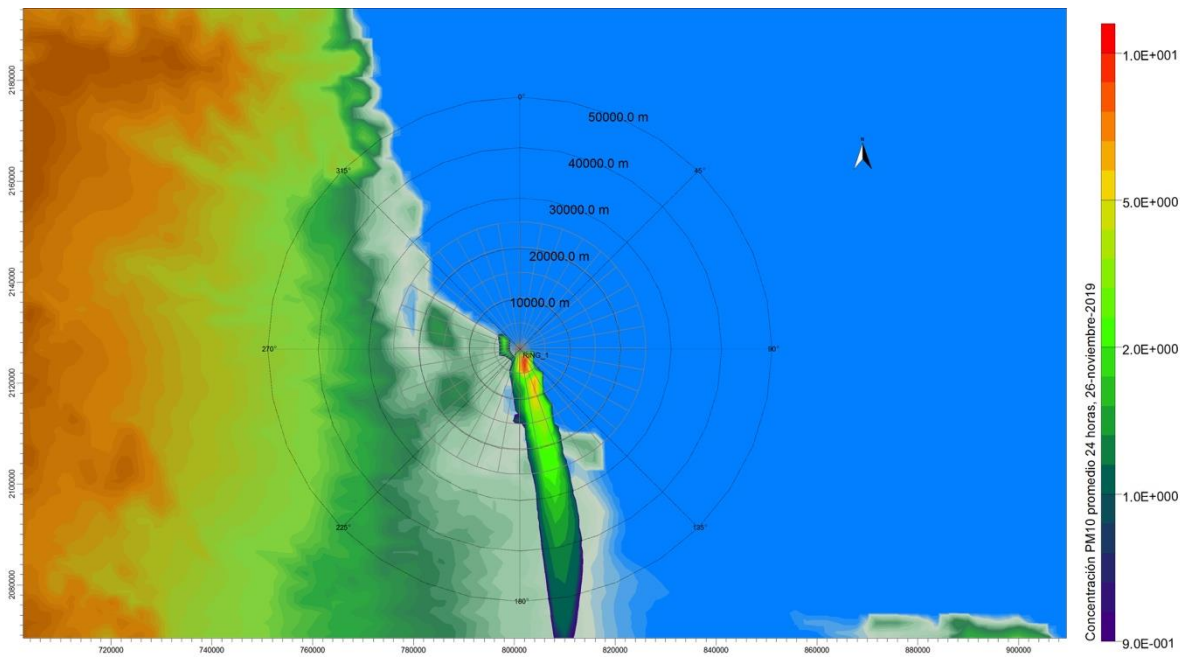


Figura 115. Modelación de PM<sub>10</sub> el día 26/11/18 con la metodología B.