



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

**PREVENCIÓN DEL DETERIORO SIGNIFICATIVO POR BIÓXIDO DE AZUFRE  
POR LA OPERACIÓN DEL RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ**

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

PRESENTA:  
IQ EDUARDO ZAMORA VARGAS

TUTOR PRINCIPAL:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

CENTRO DE CIENCIAS DE  
LA ATMÓSFERA

COMITÉ TUTOR:

DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ  
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDÉZ  
DRA. GEORGINA FERNANDEZ VILLAGÓMEZ  
M.C. VICENTE FUENTES GEA

FES CUAUTITLAN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

ENERO 2019

**JURADO ASIGNADO:**

|             |                               |
|-------------|-------------------------------|
| Presidente: | Fuentes Gea Vicente           |
| Secretario: | César Valdez Enrique          |
| 1er. Vocal: | Aguilar Márquez Armando       |
| 2do. Vocal: | Fernández Villagómez Georgina |
| 3er. Vocal: | Sosa Echeverría Rodolfo       |

Lugar donde se realizó la tesis:

SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL - CENTRO DE CIENCIAS DE LA  
ATMÓSFERA, UNAM

**TUTOR DE TESIS**

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

---

**FIRMA**

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme llegar a este punto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado para este proyecto.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por el apoyo otorgado al del proyecto “Evaluación del depósito atmosférico húmedo y seco en ZMCM y en la costa del golfo de México para la prevención del deterioro ambiental significativo” con clave IN116215 y al denominado “Establecimiento de la red nacional de depósito atmosférico” con clave IN112318.

A la Administración Portuaria Integral de Veracruz por su aportación en la información necesaria para la realización del proyecto.

A la memoria del Dr. Humberto Bravo Álvarez fundador de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por su incondicional apoyo y valioso tiempo empleado en mi formación.

A los integrantes del jurado por haber revisado el trabajo y aportar importantes observaciones para la mejora del mismo, Dr. Armando Aguilar Márquez, Dr. Enrique César Valdés, Dra. Georgina Fernández Villagómez y M.C. Vicente Fuentes Gea.

A la M. en I. Ana Luisa Alarcón y al Dr. Gilberto Fuentes García por su apoyo y amistad durante mi estancia en la sección.

A la QFB Maricarmen Torres, Dr. Elías Granados y Biol. Pablo Sánchez por el apoyo en la realización y revisión de este trabajo.

A mi buen amigo David, Marianita, Verónica, Ana Isa, Daimy, Milena y todos con quien compartí momentos en el posgrado y en la SCA.

A Fanny por el apoyo incondicional en esta importante etapa de nuestras vidas.

---

# Índice

|   |     |
|---|-----|
| Abreviaturas, siglas y acrónimos.....                             | I   |
| Índice de figuras.....  | III |
| Índice de tablas.....   | VI  |
| Resumen .....   | 1   |
| Abstract.....   | 3   |
| 1. Introducción .....   | 5   |
| 1.1. Justificación .....  | 5   |
| 1.2. Objetivo principal.....                                      | 6   |
| 1.3. Objetivos específicos .....                                  | 6   |
| 2. Antecedentes .....   | 7   |
| 2.1. Calidad del aire .....                                       | 7   |
| 2.2. Contaminantes atmosféricos.....                              | 7   |
| 2.3. Puerto de Veracruz .....                                     | 12  |
| 2.4. Puertos Verdes .....   | 28  |
| 2.5. Prevención del Deterioro Significativo.....                  | 30  |
| 3. Metodología .....  | 33  |
| 3.1. Descripción de la zona de estudio.....                       | 33  |
| 3.2. Establecimiento de la estación de monitoreo automático ..... | 37  |
| 3.3. Estimación de emisiones en el RPV.....                       | 43  |
| 3.4. Aplicación del modelo de dispersión .....                    | 50  |
| 4. Resultados y análisis .....                                    | 53  |
| 4.1. Calidad de la base de datos .....                            | 58  |
| 4.2. Monitoreo de parámetros meteorológicos .....                 | 58  |
| 4.3. Monitoreo de SO <sub>2</sub> .....                           | 64  |

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.4. | Inventario de emisiones de las actividades portuarias.....                    | 75 |
| 4.5. | Simulación de la dispersión de SO <sub>2</sub> por la operación del RPV ..... | 76 |
| 4.6. | Propuesta del PSD.....  | 82 |
| 5.   | Conclusiones y recomendaciones.....   | 85 |
| 5.1. | Conclusiones .....  | 85 |
| 5.2. | Recomendaciones .....   | 85 |
|      | Referencias.....  | 87 |
|      | Anexos.....   | 91 |

---

## Abreviaturas, siglas y acrónimos

|                   |  |
|-------------------|--|
| AE                | Motor Auxiliar   |
| APIVER            | Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A. de C.V:           |
| CAA               | Ley del Aire Limpio  |
| CCA               | Centro de Ciencias de la Atmósfera                                   |
| CH <sub>4</sub>   | Metano   |
| CO                | Monóxido de Carbono  |
| CO <sub>2</sub>   | Bióxido de Carbono   |
| COV's             | Compuestos Orgánicos Volátiles                                       |
| GT                | Arqueo Bruto   |
| HERMES            | Sistema de Modelado de Emisiones de Alta Resolución                  |
| HSD               | Motor Diesel de Alta Velocidad                                       |
| IMO               | Organización Marítima Internacional                                  |
| INEGI             | Instituto Nacional de Estadística y Geografía                        |
| LGEEPA            | Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente     |
| MARPOL            | Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques |
| MD                | Destilado Marino   |
| ME                | Motor Principal  |
| MIA-R             | Manifestación de Impacto Ambiental modalidad Regional                |
| MSD               | Motor Diesel de Media Velocidad                                      |
| NM                | Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano                             |
| NOM               | Norma Oficial Mexicana   |
| NO <sub>x</sub>   | Óxidos de Nitrógeno  |
| OMS               | Organización Mundial de la Salud                                     |
| PERS              | Sistema de Revisión Ambiental Portuaria                              |
| PM <sub>10</sub>  | Partículas con diámetro menor a 10 micrómetros                       |
| PM <sub>2.5</sub> | Partículas con diámetro menor a 2.5 micrómetros                      |
| PMDP              | Plan Maestro de Desarrollo Portuario                                 |
| PSD               | Prevención del Deterioro Significativo                               |

|                 |  |
|-----------------|--|
| PST             | Partículas Suspendidas Totales                                   |
| RO              | Combustóleo Residual   |
| RPV             | Recinto Portuario de Veracruz                                    |
| SCA             | Sección de Contaminación Ambiental                               |
| SCT             | Secretaría de Comunicaciones y Transportes                       |
| SEDEMA          | Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México             |
| SEMARNAT        | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales                |
| SO <sub>2</sub> | Bióxido de azufre  |
| SSD             | Motor Diesel de Baja Velocidad                                   |
| US EPA          | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América |
| UV              | Ultra Violeta  |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Efectos en la salud de contaminantes criterio .....         | 9  |
| Figura 2.2 Ubicación Puerto de Veracruz.....                           | 13 |
| Figura 2.3 Fuerte de San Juan de Ulúa.....                             | 15 |
| Figura 2.4 Sistema Portuario Nacional .....                            | 16 |
| Figura 2.5 Líneas de negocio de APIVER .....                           | 17 |
| Figura 2.6 Mapa portuario APIVER .....                                 | 18 |
| Figura 2.7 Distribución de cargas manejadas en APIVER.....             | 19 |
| Figura 2.8 Ampliación APIVER .....                                     | 26 |
| Figura 2.9 Principales obras en el Nuevo Puerto .....                  | 27 |
| Figura 3.1 Zona de estudio Fuente: Google, 2017 .....                  | 34 |
| Figura 3.2 Áreas que conforman un puerto Fuente: (Truyols, 2010) ..... | 35 |
| Figura 3.3 Fuentes de emisión APIVER, 2013 .....                       | 36 |
| Figura 3.4 Emisión global de contaminantes APIVER (2011).....          | 37 |
| Figura 3.5 Celda de reacción API T100.....                             | 42 |
| Figura 3.6 Esquema de estimación de emisiones por buques.....          | 45 |
| Figura 3.7 Componentes de CALPUFF.....                                 | 51 |
| Figura 4.1 Ubicación de la estación de monitoreo .....                 | 53 |
| Figura 4.2 Ubicación de la estación de monitoreo .....                 | 54 |
| Figura 4.3 Componentes estación de monitoreo 1 .....                   | 56 |
| Figura 4.4 Componentes estación de monitoreo 2 .....                   | 56 |
| Figura 4.5 Componentes estación de monitoreo 3 .....                   | 57 |
| Figura 4.6 Analizador Teledyne T100 .....                              | 57 |
| Figura 4.7 Variación de la temperatura, viento y radiación solar ..... | 59 |
| Figura 4.8 Rosas de viento Agosto 2017 y Septiembre 2017 .....         | 60 |
| Figura 4.9 Rosas de viento Octubre 2017 y Noviembre 2017 .....         | 61 |
| Figura 4.10 Rosas de viento Diciembre 2017 y Enero 2018.....           | 61 |
| Figura 4.11 Rosas de viento Febrero 2018 y Marzo 2018.....             | 62 |
| Figura 4.12 Rosas de viento Abril 2017 y Mayo 2018 .....               | 62 |
| Figura 4.13 Rosas de viento Junio 2018 y Julio 2018 .....              | 63 |



---

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.14 Calibraciones multipunto Teledyne API T100 .....   | 65  |
| Figura 4.15 Monitoreo de SO <sub>2</sub> en el periodo de estudio .....                              | 67  |
| Figura 4.16 Distribución de concentración de monitoreo de SO <sub>2</sub> .....                      | 67  |
| Figura 4.17 Análisis de variabilidad de SO <sub>2</sub> .....  | 68  |
| Figura 4.18 Concentración diaria de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) en la zona de estudio ..... | 69  |
| Figura 4.19 Rosas de SO <sub>2</sub> Agosto 2017 y Septiembre 2017 .....                             | 71  |
| Figura 4.20 Rosas de SO <sub>2</sub> Octubre 2017 y Noviembre 2017 .....                             | 71  |
| Figura 4.21 Rosas de SO <sub>2</sub> Diciembre 2017 y Enero 2018.....                                | 72  |
| Figura 4.22 Rosas de SO <sub>2</sub> Febrero 2018 y Marzo 2018.....                                  | 72  |
| Figura 4.23 Rosas de SO <sub>2</sub> Abril 2018 y Mayo 2018 .....                                    | 73  |
| Figura 4.24 Rosas de SO <sub>2</sub> Junio 2018 y Julio 2018 .....                                   | 73  |
| Figura 4.25 Rosa de SO <sub>2</sub> global.....  | 74  |
| Figura 4.26 Emisiones de SO <sub>2</sub> APIVER 2017-2018 .....                                      | 77  |
| Figura 4.27 Dominio de la modelación CALPUFF .....   | 80  |
| Figura 4.28 Caso de estudio CALPUFF 01/08/2017 .....   | 81  |
| Figura 4.29 Propuesta del incremento del PSD.....  | 83  |
| Figura 0.1 Caso de estudio CALPUFF 16/08/2017 .....  | 91  |
| Figura 0.2 Caso de estudio CALPUFF 24/08/2017 .....  | 92  |
| Figura 0.3 Caso de estudio CALPUFF 08/09/2017 .....  | 93  |
| Figura 0.4 Caso de estudio CALPUFF 13/09/2017 .....  | 94  |
| Figura 0.5 Caso de estudio CALPUFF 25/09/2017 .....  | 95  |
| Figura 0.6 Caso de estudio CALPUFF 07/10/2017 .....  | 96  |
| Figura 0.7 Caso de estudio CALPUFF 27/10/2017 .....  | 97  |
| Figura 0.8 Caso de estudio CALPUFF 31/10/2017 .....  | 98  |
| Figura 0.9 Caso de estudio CALPUFF 03/11/2017 .....  | 99  |
| Figura 0.10 Caso de estudio CALPUFF 14/11/2017 .....   | 100 |
| Figura 0.11 Caso de estudio CALPUFF 25/11/2017 .....   | 101 |
| Figura 0.12 Caso de estudio CALPUFF 04/12/2017 .....   | 102 |
| Figura 0.13 Caso de estudio CALPUFF 21/12/2017 .....   | 103 |
| Figura 0.14 Caso de estudio CALPUFF 31/12/2017 .....   | 104 |
| Figura 0.15 Caso de estudio CALPUFF 11/01/2018 .....   | 105 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Figura 0.16 Caso de estudio CALPUFF 21/01/2018 ..... | 106 |
| Figura 0.17 Caso de estudio CALPUFF 31/01/2018 ..... | 107 |
| Figura 0.18 Caso de estudio CALPUFF 01/02/2018 ..... | 108 |
| Figura 0.19 Caso de estudio CALPUFF 10/02/2018 ..... | 109 |
| Figura 0.20 Caso de estudio CALPUFF 20/02/2018 ..... | 110 |
| Figura 0.21 Caso de estudio CALPUFF 01/03/2018 ..... | 111 |
| Figura 0.22 Caso de estudio CALPUFF 14/03/2018 ..... | 112 |
| Figura 0.23 Caso de estudio CALPUFF 31/03/2018 ..... | 113 |
| Figura 0.24 Caso de estudio CALPUFF 12/04/2018 ..... | 114 |
| Figura 0.25 Caso de estudio CALPUFF 17/04/2018 ..... | 115 |
| Figura 0.26 Caso de estudio CALPUFF 30/04/2018 ..... | 116 |
| Figura 0.27 Caso de estudio CALPUFF 05/05/2018 ..... | 117 |
| Figura 0.28 Caso de estudio CALPUFF 18/05/2018 ..... | 118 |
| Figura 0.29 Caso de estudio CALPUFF 25/05/2018 ..... | 119 |
| Figura 0.30 Caso de estudio CALPUFF 05/06/2018 ..... | 120 |
| Figura 0.31 Caso de estudio CALPUFF 19/06/2018 ..... | 121 |
| Figura 0.32 Caso de estudio CALPUFF 30/06/2018 ..... | 122 |
| Figura 0.33 Caso de estudio CALPUFF 09/07/2018 ..... | 123 |
| Figura 0.34 Caso de estudio CALPUFF 15/07/2018 ..... | 124 |
| Figura 0.35 Caso de estudio CALPUFF 30/07/2018 ..... | 125 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 Equipo y maquinaria APIVER.....  | 20 |
| Tabla 2.2 Infraestructura para almacenaje .....  | 22 |
| Tabla 2.3 Áreas totales de APIVER .....  | 23 |
| Tabla 2.4 Ejemplo de incrementos del PSD .....   | 32 |
| Tabla 3.1 Categorías consideradas para la clasificación de buques .....                            | 46 |
| Tabla 3.2 Características de los buques .....  | 48 |
| Tabla 3.3 Factores de emisión y consumo de combustible para motor AE en la fase de hotelling ..... | 49 |
| Tabla 4.1 Resumen de datos de monitoreo.....   | 58 |
| Tabla 4.2 Inventario de emisiones APIVER 2017-2018.....  | 76 |
| Tabla 4.3 Casos de estudio en CALLPUFF.....  | 78 |

## **Resumen**

La contaminación ambiental en México es un problema grave que debe combatirse desde el punto de vista preventivo y es obligación del estado contar con las herramientas necesarias que permitan el desarrollo sustentable para el progreso de país.

En México se cuenta con leyes, reglamentos y normas para la protección ambiental, que establecen los lineamientos que se deben cumplir para mantener la calidad ambiental. En este trabajo se presenta la propuesta de implementación de un instrumento de gestión ambiental denominado plan de Prevención del Deterioro Significativo, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, que entre sus requisitos establece el estrecho contacto entre el ordenamiento ecológico y la evaluación de impacto ambiental para la evaluación y aprobación de proyectos que representen un impacto potencial en la calidad del aire en zonas de interés.

El Recinto Portuario de Veracruz es uno de los puertos más antiguos del país y con gran valor histórico y cultural, está rodeado por la zona urbana que se estableció ahí debido a las actividades económicas que se desarrollan y que desde 2014 se encuentra en proceso de ampliación en la zona norte que se prevé finalizará 2030, con la construcción de un nuevo puerto tres veces mayor al actual, con el objetivo de aumentar la productividad del transporte marítimo del país.

La construcción del Nuevo Puerto de Veracruz es considerada como la obra de infraestructura portuaria más importante en los últimos cien años en México y actualmente cuenta con el rompeolas más grande de América Latina. Este proyecto cuenta con la aprobación de la Manifestación de Impacto Ambiental por parte de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, pero sus efectos a largo plazo deben ser considerados para prevenir el deterioro.

El resultado final de este trabajo contempla el establecimiento de las bases con las que será posible evaluar el impacto potencial del Nuevo Puerto:

- Evaluación de la calidad del aire por SO<sub>2</sub> por un año (01/08/2017 - 31/07/2018)
- Desarrollo del Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por las actividades portuarias de 2017 a 2018.
- Simulación de la calidad del aire por SO<sub>2</sub> en la etapa final del proyecto.

Este antecedente permitirá definir la política ambiental para la prevención de la contaminación atmosférica del Puerto de Veracruz y establecer las medidas necesarias para prevenir el deterioro significativo.

Las emisiones estimadas por factores de emisión de SO<sub>2</sub> para las actividades portuarias presentaron un promedio de 23.21 Ton/mes.

Se observaron dos comportamientos de vientos dominantes, de septiembre a abril provenientes del norte y de mayo a agosto provenientes del noreste

De acuerdo a los datos de monitoreo, la concentración de SO<sub>2</sub> en la zona de estudio presentó un promedio anual de 2.3 µg/m<sup>3</sup> correspondiente al 3.4% de la norma anual.

Se realizaron 36 modelaciones en la zona de estudio, 3 días por mes, para estimar el impacto potencial por SO<sub>2</sub> en la calidad del aire mediante el modelo CALPUFF, obteniendo un valor máximo de 46.82 µg/m<sup>3</sup> en la zona sur del Recinto Portuario de Veracruz, lo que sugiere que la influencia de otras fuentes como el Nuevo Puerto.

La calidad del aire por SO<sub>2</sub> se encuentra por debajo de los límites permisibles, por lo que continuar con el PSD permitirá un desarrollo sustentable del puerto.

## **Abstract**

Environmental pollution in Mexico is a serious problem that must be combated from the prevention and it is the obligation of the state to have the necessary tools that allow sustainable development for the progress of the country.

In Mexico there are laws, regulations and standards for environmental protection, which establish the guidelines that must be met to maintain environmental quality. This paper presents the proposal for the implementation of an environmental management instrument called Significant Deterioration Prevention Plan, developed by the Environmental Protection Agency of the United States of America, which, among its requirements, establishes the close contact between ecological regulation and the evaluation of environmental impact for the evaluation and approval of projects that represent a potential impact in areas of interest (health or ecosystems mainly).

Veracruz Port is one of the oldest ports in the country with great historical and cultural value, is surrounded by the urban area that was established there due to the economic activities that are developed and since 2007 is in the process of expansion in the northern zone that is expected to end in 2024, with the construction of a new port three times larger than the current one, with the aim of increasing the productivity of the country's maritime transport.

The construction of the New Veracruz Port is considered the most important work of port infrastructure in the last hundred years in Mexico and currently has the largest breakwater in Latin America. This project has the approval of the Environmental Impact Statement by the Ministry of Environment and Natural Resources, but its long-term effects must be considered to prevent deterioration.

The final result of this work contemplates the establishment of the bases with which it is intended to evaluate the potential impact of the New Port:

- Air quality monitoring for SO<sub>2</sub> concentration from 01/08/2017 to 07/31/2018

- Development of the inventory of air pollutant emissions from port activities from 2017 to 2018.
- Simulation of air quality impacted by SO<sub>2</sub> in the final stage of the project.

This background will allow defining the environmental policy for the prevention of atmospheric pollution in the Port of Veracruz and establishing the necessary measures to prevent significant deterioration.

The emissions estimated by SO<sub>2</sub> emission factors for port activities presented an average of 23.21 Ton/month.

Two dominant wind behaviors were observed, from September to April from the north and from May to August from the northeast

According to the monitoring data, the SO<sub>2</sub> concentration in the study area presented an annual average of 2.3 µg/m<sup>3</sup> corresponding to 3.4% of the annual index.

36 scenarios were carried out in the study area, 3 days per month, to estimate the potential impact of SO<sub>2</sub> on air quality using the CALPUFF model, obtaining a maximum value of 46.82 µg/m<sup>3</sup> in the southern area of the RPV, which suggests that the influence of other sources such as NP.

The SO<sub>2</sub> concentration is below the permissible limits, so continuing with the PSD will allow a sustainable development of the port.

## **1. Introducción**

La metodología del plan de Prevención del Deterioro Significativo (PSD) fue establecida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA) con el fin de gestionar proyectos, lo referente a la contaminación atmosférica, sometiendo a evaluación del impacto en la calidad del aire a todas las propuestas que consideren la implementación de nuevas fuentes de emisión o la modificación de las existentes que liberen a la atmósfera más de 100 toneladas por año de compuestos regulados, los cuales pueden ser contaminantes criterio, compuestos tóxicos o gases de efecto invernadero con el fin de garantizar la concentración de los mismos por debajo de los límites permisibles de calidad del aire. Los parámetros para la aprobación del PSD consideran además de los índices de calidad del aire, el uso de suelo y el tipo de actividades que pueden desarrollarse y en qué medida.

### **1.1. Justificación**

Actualmente el puerto de Veracruz es uno de los principales puertos comerciales del país, debido a su ubicación estratégica se considera una importante puerta al comercio exterior, entre sus actividades se encuentra el movimiento de granel agrícola y mineral, vehículos, contenedores y fluidos no petroleros (APIVER, 2012).

Desde el año 2014 se realiza en este puerto un proyecto de expansión en la zona norte, específicamente en la bahía de Vergara, por lo que se busca que el impacto ambiental del aumento en las actividades portuarias sea compatible o moderado.

Estas actividades pueden causar impactos negativos que contribuyan al deterioro ambiental, ocasionando daños a la salud, a los ecosistemas y a sitios de interés. Una manera de proteger la salud de la población es a través del monitoreo de las condiciones ambientales antes, durante y después de la construcción y la operación de la nueva obra con el fin de proponer medidas de control de la contaminación atmosférica, con el objetivo de garantizar el cumplimiento de las normas aplicables.



## **1.2. Objetivo principal**

Establecer un programa preventivo para mantener la concentración de SO<sub>2</sub> en aire ambiente por debajo de los límites permisibles nacionales de calidad del aire, asociado a la operación actual del Recinto Portuario de Veracruz, mediante la metodología del PSD.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Actualizar el inventario de emisiones de SO<sub>2</sub> derivadas de las actividades portuarias, mediante factores de emisión.
- Cuantificar la concentración de SO<sub>2</sub> en el aire ambiente en un punto específico dentro del recinto portuario, utilizando equipo de monitoreo automático.
- Simular la calidad del aire en la zona adyacente al recinto portuario aplicando un modelo matemático de dispersión de SO<sub>2</sub> que permita establecer el área de influencia del puerto.
- Proponer medidas de prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica por SO<sub>2</sub> en la zona de estudio, considerando los resultados obtenidos del monitoreo.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Calidad del aire

Se denomina calidad del aire a las condiciones en las que se encuentra el aire ambiente en comparación con su composición natural, cuando existen otros compuestos o hay variación en las concentraciones normales se puede generar un desequilibrio ecológico. Se considera que existe mala calidad del aire cuando la presencia de compuestos denominados contaminantes puede generar efectos indeseables en los seres vivos o el ambiente.

La manera en que los contaminantes se liberan a la atmósfera se da por fuentes de emisión naturales o antropogénicas, siendo estas últimas asociadas a diversas actividades como la generación de energía eléctrica, los procesos industriales y las actividades logísticas.

El grado en el que se modifican las condiciones naturales de la atmósfera dependen principalmente del contaminante liberado, la cantidad y el tipo de fuentes de emisión, las características geográficas del área y las condiciones meteorológicas.

La calidad del aire es evaluada en la capa más baja de la atmósfera ya que es donde se pueden observar los efectos en los receptores, principalmente en la salud y en los ecosistemas, en los 5 kilómetros más próximos a la superficie se concentra la mitad de su masa total y es donde se presentan fenómenos meteorológicos y reacciones químicas que intervienen en la erosión y el ciclo hidrológico. La composición química y la temperatura de la atmósfera varían en función de la altura (SEMARNAT, 2013).

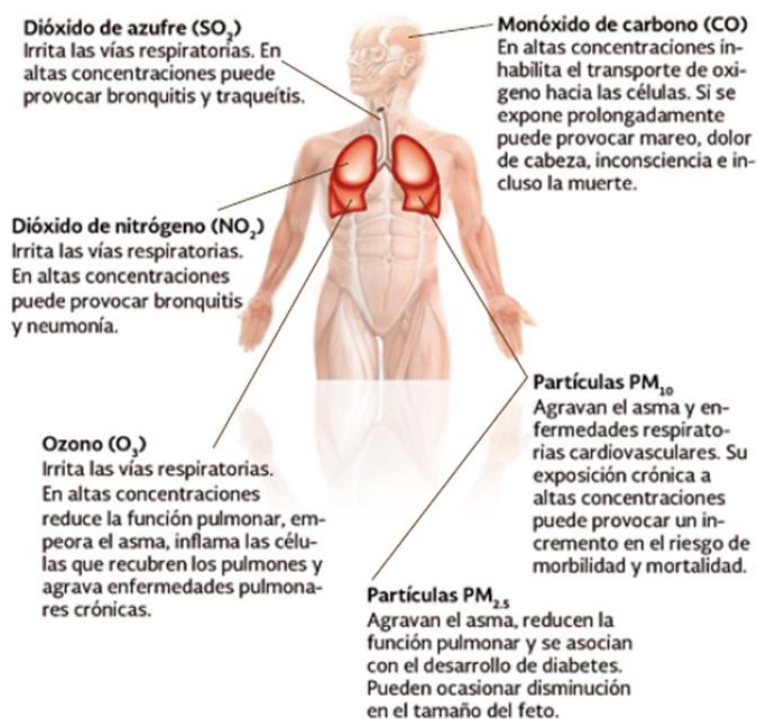
### 2.2. Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes pueden ser clasificados de acuerdo a su origen en (OMS, 2006):

- **Primarios:** Provenientes directamente de la fuente de emisión, entre los que destacan el plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC) y partículas (PM). Su concentración es mayor en zonas industriales o en regiones con alta densidad vehicular.
- **Secundarios:** Se forman por la interacción entre dos o más contaminantes primarios y los componentes naturales en la atmósfera como el ozono (O<sub>3</sub>), peroxiacetilnitrato (PAN), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), algunas partículas (PM), entre otros. Su concentración es mayor en regiones viento abajo de fuentes de emisión

### **2.2.1. Contaminantes criterio**

Se denominan contaminantes criterio a aquellos que ,de acuerdo con la evidencia científica, causan efectos en la salud (Figura 2.1), debido a esto, las principales agencias ambientales y responsables de la salud han establecido límites de exposición para garantizar el bienestar de la población (SEMARNAT, 2013).



**Figura 2.1 Efectos en la salud de contaminantes criterio**

**Fuente: SEMARNAT, 2013**

En México, los contaminantes criterio han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente con el objetivo de proteger la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Entre ellos están: el ozono ( $O_3$ ), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), el plomo (Pb) y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). Para cada contaminante criterio se han desarrollado guías (recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos) y normas establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un período definido. Estos valores límite se determinan con un margen de protección ante los riesgos y tienen la finalidad de proteger la salud humana y el medioambiente (INECC, 2014).

## 2.2.2. Bióxido de azufre

El bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un contaminante primario que pertenece a la familia de los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), éstos representan la suma del SO<sub>2</sub> y el trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>).

El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro y de olor irritante que se produce de fuentes antropogénicas como la quema de combustibles fósiles que contienen azufre (el 85% del total de emisiones proviene de esta fuente), siendo las más importantes las instalaciones que utilizan combustóleo, carbón o diésel, así como los vehículos que utilizan diésel y gasolina. También se puede generar de fuentes naturales como las emisiones volcánicas, los incendios forestales o agrícolas y pueden tener una contribución importante en la concentración de este contaminante (SEDEMA, 2016).

En la atmósfera, ocurren reacciones químicas de oxidación de SO<sub>2</sub> mientras se desplaza de su fuente de origen formando SO<sub>3</sub>, que reacciona con el vapor de agua para formar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, uno de los principales componentes de la lluvia ácida. Cuando el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> reacciona con el amoníaco atmosférico o con las partículas minerales, se forman iones sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Los humanos pueden inhalar esta especie que al alojarse en los pulmones resulta sumamente perjudicial. Las partículas de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, por otra parte, contribuyen a la disminución de la visibilidad y alteran el albedo de la Tierra, es decir, el balance de radiación del planeta, lo que a su vez tiene un efecto en el clima (CCA, 2011).

En los sistemas de combustión, aproximadamente 95% del azufre presente en el combustible se convierte en SO<sub>2</sub>; de 1 a 5% se oxida aún más para formar SO<sub>3</sub>, y de 1 a 3% se emite en forma de partículas de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Cuando se llegan a condiciones de equilibrio en las calderas donde se lleva a cabo la combustión, el SO<sub>3</sub> formado a partir del azufre quemado se descompone en SO<sub>2</sub> y por lo tanto la cantidad de SO<sub>2</sub> que fluye por la chimenea es el 99% del SO<sub>x</sub> total (CORINAIR, 1996).

Existen varios efectos en el ambiente causados por el SO<sub>2</sub>, entre estos se encuentran (CCA, 2011):

- En el aire el SO<sub>2</sub> es un importante precursor de partículas finas de hollín. También contribuye a la disminución de la visibilidad y tiene efectos en la salud de los seres vivos.
- En agua reacciona para acidificar las aguas superficiales, lo que mata a los peces y otros organismos acuáticos pequeños. Ocasiona el fenómeno de lluvia ácida, el cual acelera la erosión de monumentos, edificios o estructuras metálicas.
- En el suelo se presenta la acidificación de éstos, reduciendo la fertilidad de la tierra. El proceso de acidificación también libera metales que pueden dañar a microorganismos del suelo responsables de la descomposición, a los musgos, líquenes, hongos, árboles y organismos que viven en el suelo.
- En plantas, el SO<sub>2</sub> ocasiona daños irreversibles en los tejidos, provocando la caída de sus hojas y la decoloración de las mismas. Alteran su metabolismo, afectando los procesos de fotosíntesis y la respiración.

## **2.3. Puerto de Veracruz**

El puerto de Veracruz se sitúa en las coordenadas 19° 12' 30" Latitud N y 96° 08'00" Longitud W. Municipio de Veracruz, Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (Figura 2.2). En el municipio de Veracruz el clima es tropical marítimo con temperatura promedio de 32°C en primavera, de 35°C en verano, de 32°C en otoño, y de 30°C a la sombra en invierno (SPC, 2011).

De acuerdo con la clasificación de Köpen, el clima de Veracruz se considera cálido húmedo con lluvia en verano (Aw) (CONABIO, 1998).

La temporada de lluvias comienza a fines de mayo y termina a principios de octubre, con máximos en julio y septiembre. De septiembre a mayo los vientos son dominantes del Norte y de abril hasta agosto son del Este. La época de ciclones se inicia en el Golfo de México con un campo depresionario en junio creciendo en intensidad con huracanes bien desarrollados, en agosto, septiembre y octubre. La temporada de Nortes abarca de mediados de octubre hasta principios de mayo, aproximadamente (SPC, 2011).

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Antecedentes**



**Figura 2.2 Ubicación Puerto de Veracruz**

**Fuente: Google Earth**



### **2.3.1. Historia**

Su historia comienza con la llegada de Juan Grijalva en 1518 a una isla que llamó San Juan de Ulúa, esto debido a una palabra que repetían los indígenas que lo recibieron. Posteriormente Hernán Cortés fondeó sus naves en la costa del actual puerto y frente a la isla fundó la Villa Rica de la Vera Cruz, misma que se trasladó en un par de ocasiones debido a las condiciones del sitio, hasta finales del siglo XVI donde se estableció de manera definitiva en el lugar que ocupa actualmente, convirtiéndose en la puerta comercial con el viejo continente (Pérez, 2004).

La ciudad fue amurallada en el siglo XVII debido a los embates por parte de piratas que buscaban saquear las mercancías que se exportaban. En el siglo XVIII los comerciantes lograron constituirse en el sector hegemónico propiciando la extensión de la ciudad fuera de los muros hacia Santo Cristo y San Sebastián.

Todavía amurallada, la ciudad vivió el proceso de la Independencia de México y hasta 1826 se izó la bandera de México en el fuerte de San Juan de Ulúa (Figura 2.3), la ciudad atravesó por dos invasiones más hasta la restauración de la República. En estas condiciones llegó la modernización del puerto a finales del siglo XIX, y en 1882 la compañía Pearson & Son colocó la primera piedra de la obra portuaria, que gracias a la combinación con el ferrocarril promovió el desarrollo de Veracruz (Ibídem).



*Figura 2.3 Fuerte de San Juan de Ulúa*

*Fuente: Recuentos de Veracruz, 2004*

Desde entonces, el puerto ha sido uno de los puntos clave para la llegada de mercancías y la exportación de productos; y debido al incremento en el intercambio comercial de las últimas décadas, se determinó ampliar su capacidad instalada con la construcción del Nuevo Puerto de Veracruz.

Figuras importantes que pasaron por este puerto a lo largo de su historia son Hernán Cortés, Maximiliano de Habsburgo y Carlota de Bélgica, Antonio López de Santa Anna y Porfirio Díaz (Pérez, 2004).

### **2.3.2. El Sistema Portuario Nacional (SPN)**

México cuenta con acceso a los océanos Pacífico y Atlántico a través del Golfo de México, por lo que a lo largo de su territorio se encuentran distribuidos un total de 117 puertos y terminales donde se desarrollan actividades logísticas enfocadas al comercio internacional (SCT, 2017).

El Sistema Portuario Nacional (Figura 2.4) se compone de 102 puertos y 15 terminales y las siguientes administraciones:

- Administraciones Portuarias Integrales Federales: Altamira, Coatzacoalcos, Dos Bocas, Ensenada, Guaymas, Lázaro Cárdenas, Manzanillo, Mazatlán, Progreso, Puerto Madero, Puerto Vallarta, Salina Cruz, Tampico, Topolobampo, Tuxpan y **Veracruz**.
- Administraciones Portuarias Integrales Estatales: Baja California Sur, Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Tamaulipas.
- Administraciones Portuarias Integrales FONATUR: Cabo San Lucas y Huatulco.
- Administraciones Portuarias Integrales Privadas: Acapulco.



**Figura 2.4 Sistema Portuario Nacional**

**Fuente: SCT, 2017**

### 2.3.3. Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A. de C.V.

La entidad encargada de gestionar la operación del Puerto en Veracruz es la Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A. de C.V. (APIVER), en donde se realizan diversas actividades como carga y descarga de mercancías de los barcos, almacenaje, inspección y control de mercancías por parte de las administraciones públicas (Figura 2.5), así como de otros servicios de gestión portuaria, en su conjunto estas actividades se conocen como actividades portuarias.

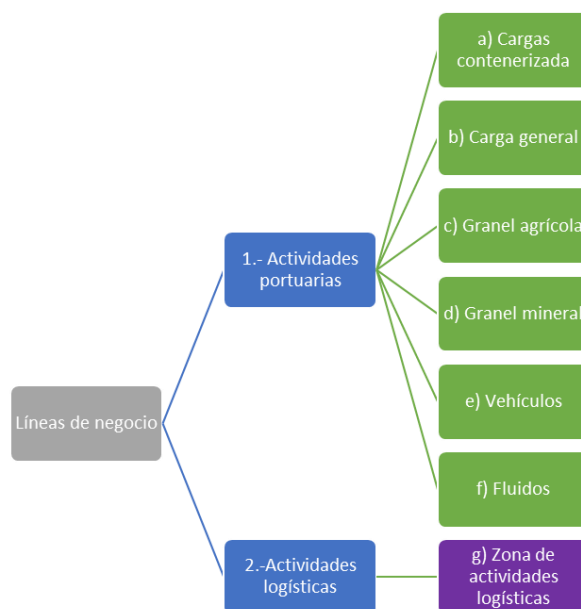


Figura 2.5 Líneas de negocio de APIVER

Fuente: APIVER, 2016

#### 2.3.3.1. Instalaciones

De forma generalizada la infraestructura del Recinto Portuario de Veracruz y su comunidad portuaria está integrada principalmente por cesionarios, prestadores de servicios, líneas navieras, autoridades portuarias, agentes aduanales, transportistas, instituciones y organismos vinculados con la actividad portuaria. En la Figura 2.6 se muestra la división por áreas de almacenamiento y cesionadas del puerto (APIVER, 2010).

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Antecedentes**



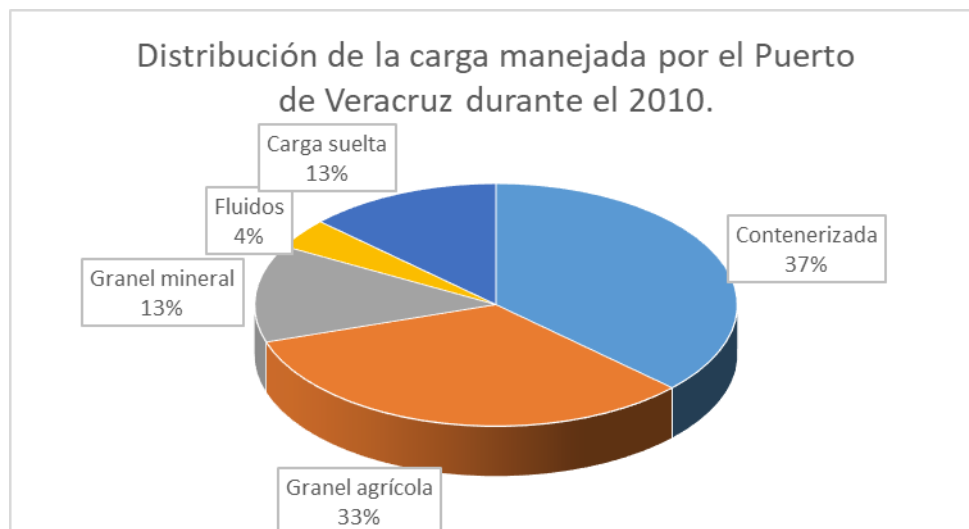
Figura 2.6 Mapa portuario APIVER

Fuente: APIVER, 2010

El puerto de Veracruz ha sido históricamente uno de los puertos más activos del país, sin embargo, también es uno de los más antiguos, su infraestructura está dividida en varias etapas de construcción y de ampliación o de modernización, que datan desde la época colonial, hasta nuestros días.

El puerto de Veracruz es el puerto comercial más importante del país siendo el único puerto que manipula el 100% de carga netamente comercial y el único que manipula de manera significativa los seis segmentos de carga más importantes a nivel nacional (Figura 2.7), como son (APIVER, 2010):

- Carga contenerizada
- Carga general
- Granel agrícola
- Granel mineral
- Vehículos
- Fluidos no petroleros



**Figura 2.7 Distribución de cargas manejadas en APIVER**

Veracruz es un puerto netamente comercial ya que la carga está destinada a un gran número de clientes no instalados en el puerto y que representan a la industria, tanto de la transformación como de servicios, de tal manera que en este puerto es

donde confluye la mayor variedad de cargas, la mayor gama de embarcaciones con características diferentes, la mayor variedad de servicios portuarios, de modos de transporte y otros. Esto hace al recinto de Veracruz un puerto con características especiales comparativamente con la mayor parte de los puertos del país (APIVER, 2016).

A nivel nacional, Veracruz es uno de los principales puertos del país por donde se mueven las mercancías del comercio exterior con alto valor comercial sin incluir el manejo de petróleo. Considerando el movimiento registrado en los puertos comerciales durante 2010, Veracruz participa con el 12% en tonelaje y el 11.26% en número de buques (sin incluir petróleo) a nivel nacional. Por otro parte su porcentaje de participación es del 30.6% en los puertos del Golfo de México y Mar Caribe.

Para realizar las principales operaciones de manejo de materiales, APIVER cuenta con el equipo y maquinaria instalada dentro del puerto, la descripción y cantidad se muestra en la Tabla 2.1

**Tabla 2.1 Equipo y maquinaria APIVER**

| <b>Equipo</b>                                      | <b>Cantidad</b> |
|--|-----------------|
| <b>Almejas</b>                                     | 70              |
| <b>Patrullas</b>                                   | 1               |
| <b>Básculas</b>                                    | 22              |
| <b>Cargadores frontales</b>                        | 23              |
| <b>Tractores</b>                                   | 44              |
| <b>Guías de más de 15 toneladas de capacidad</b>   | 40              |
| <b>Guías de menos de 15 toneladas de capacidad</b> | 8               |
| <b>Grúas puente</b>                                | 6               |
| <b>Montacargas en el patio</b>                     | 26              |
| <b>Camiones de cargas</b>                          | 27              |
| <b>Camiones de bomberos</b>                        | 6               |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Retroexcavadoras</b>                       | 3   |
| <b>Montacargas</b>                            | 191 |
| <b>Tractomóviles</b>                          | 7   |
| <b>Plataformas</b>                            | 87  |
| <b>Botes multiusos</b>                        | 10  |
| <b>Camiones de carga</b>                      | 34  |
| <b>Equipos de succión para carga a granel</b> | 2   |
| <b>Espátulas</b>                              | 2   |
| Fuente: (APIVER , 2016)                       |     |

- Vías de acceso

El Puerto se encuentra protegido por 4 rompeolas: SE, NE, NO y O, además de una pared interior. El canal de entrada se ubica entre el rompeolas SE y NE con una profundidad de 16 m. El canal de navegación con 16 metros. Dársena de ciaboga de 500 metros de diámetro y 16 metros de profundidad.

- Transporte

APIVER se encuentra comunicado por el Aeropuerto Internacional de Veracruz “Heriberto Jara Corona”, dos ferrocarriles privados de carga dentro del puerto y un sistema carretero.

- Importación y exportación

Los contenedores, automóviles, productos a granel agrícola, minerales a granel, líquidos y carga general como acero, tubería, aluminio, cobre, madera y otros.

- Servicio de tráfico de Barcos

El puerto cuenta con una red de radares que facilita la navegación en las zonas con gran densidad de tráfico marítimo que contribuye a mejorar la seguridad de éste, así como a proteger el medio ambiente marino.

- Pilotaje



El servicio de pilotos opera las 24 horas, los buques abordan normalmente cercada de la boya del mar situado en la posición Lat 19°11.4' N, Long 96°03.4'O.

- Remolque

Se cuenta con dos remolcadores, de 4,660 caballos de fuerza y barrera baliza para 47.30 toneladas métricas y 3.200 caballos de fuerza y barrera baliza para 43.15 toneladas respectivamente.

- Tráfico

Llegadas de barcos por año: 1,744

- Almacenaje

Actualmente APIVER cuenta con la infraestructura necesaria para el almacenaje de los distintos tipos de cargas, en la Tabla 2.2 se describe y se muestra la cantidad de servicios con los que se cuenta.

*Tabla 2.2 Infraestructura para almacenaje*

| <b>Infraestructura</b>  | <b>Cantidad</b> |
|---|-----------------|
| <b>Instalación en el puerto para usos múltiples</b>   | 1               |
| <b>Instalación especializada en almacenaje, refrigeración y manejo con bodega seca y fría</b>   | 1               |
| <b>Instalación especializada para carga en general de manejo con capacidad de refrigeración</b> | 1               |
| <b>Terminal especializada en manejo de automóviles (bodega de estacionamiento de 5 niveles)</b> | 1               |
| <b>Terminales especializadas en granos a granel</b>   | 3               |
| <b>Terminales especializadas en líquido a granel</b>  | 2               |
| <b>Terminal puerto especializado en el manejo y almacenaje de carga mineral (cemento)</b>       | 1               |
|   |                 |
| <b>Instalación de puerto especializado para el manejo y almacenaje de minerales a granel</b>    | -               |

|   |   |
|---|---|
| <b>Acondicionamientos para reparación de contenedores y servicios</b>   | - |
| <b>Astillero de dique seco y reparaciones flotantes, así como otras actividades relacionadas con la industria metalúrgica</b> |   |
| Fuente: (APIVER , 2016)   |   |

- Servicios

El puerto cuenta con servicios de combustibles pesados, provisiones, agua, recolección de basura, abastecimiento de alimentos, asistencia médica y atraque para barcos de hasta 73,819 dwt con 13 metros de calado HT y 304 metros LOA.

- Anexiones

El día 24 de abril de 2014, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el acuerdo por el que se modifica la delimitación y determinación del Recinto Portuario del Puerto de Veracruz, ubicado en el Municipio de Veracruz-Llave, en el Estado de Veracruz; con la finalidad de incluir las superficies del acceso carretero exclusivo para el puerto (Boulevard Portuario km 13.5), de las zonas de desarrollo portuario, del señalamiento marítimo y la zona de fondeo, siendo necesario el incluir estas áreas afectas al funcionamiento del puerto y que se encuentran incluidas en la descripción de Puerto, las áreas totales se muestran en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Áreas totales de APIVER**

| <b>Resumen de superficies del Recinto Portuario de Veracruz</b> |  | <b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b> |
|---|--|-----------------------------------|
| <b>Superficie de agua de mar territorial</b>                    |  | 72,817,117.204                    |
| <b>Terrenos de dominio público de la Federación</b>             |  | 4,411,565.342                     |
| <b>Área total del Recinto Portuario</b>                         |  | 77,228,682.546                    |
| Fuente: (APIVER , 2016)   |  |                                   |

- Calado

Se cuenta con un calado que va de los 9.5 m a los 12.8 m en los muelles turístico y en el de la Armada de México el calado es de 8.2 m.

### **2.3.4. El Nuevo Puerto de Veracruz**

Según la SCT, el Nuevo Puerto de Veracruz es el proyecto de infraestructura portuaria más importante en los últimos 100 años en México, el cual se construirá en terrenos ganados al mar considerando los procedimientos constructivos de los más altos estándares a nivel mundial, cuadruplicando la capacidad de carga comercial de 23 a 95 millones de toneladas, convirtiendo a Veracruz en el Puerto más importante de México (SCT, 2017).

El proyecto del Nuevo Puerto comenzó en 2013 y de acuerdo al Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018, se tenía previsto su conclusión en 2030, dando solución a la saturación del puerto actual, creando un puerto de clase internacional que permitirá mayores entradas marítimas y mayor movilidad de mercancías triplicando la capacidad de la infraestructura actual. Además, se consideró inicialmente que se liberaría el antiguo puerto para integrarlo a la parte histórica de la ciudad de Veracruz (APIVER, 2016).

Las actividades asociadas a la ampliación del Puerto de Veracruz corresponden a la construcción y operación de nuevas terminales en la zona norte del actual recinto, las cuales se encuentran en la MIA-R presentada a la SEMARNAT el 5 de septiembre de 2013, la aprobación de la misma se condicionó a la implementación de 92 medidas de mitigación para que APIVER llevara a cabo la obra.

Entre las medidas ambientales acordadas, se encuentra el establecimiento de un programa permanente de monitoreo y seguimiento ambiental en el sitio, antes, durante y después de la obra.

Para dar seguimiento se creó un comité técnico en julio de 2014, el acreditado ambiental coordinado por la Universidad Veracruzana, entre los que se encuentra la Sección de Contaminación Ambiental del CCA-UNAM, lugar donde se desarrolló este trabajo.

### **2.3.4.1. Etapas del proyecto**

De acuerdo al *Plan Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz 2001-2016*, el proyecto se divide principalmente en dos etapas (Figura 2.8):

- Primera etapa (2014-2018): Se construirá el rompeolas poniente con una longitud de 4.7 km, dos terminales de contenedores con 8 posiciones de atraque y 2.4 km de línea marginal de atraque y una terminal satélite con 5 posiciones de atraque, teniendo así mismo una profundidad de 18 m para recibir barcos de gran calado y 2 dársenas ciaboga con 800 y 600 m de diámetro cada una.
- Segunda etapa (2018-2030): Se terminarán las demás posiciones de atraque para terminales de autos, graneles, carga general y fluidos. Además de la construcción del rompeolas oriente con longitud de 3.5 km

Hasta el mes de julio de 2018, las principales actividades asociadas a la realización de la primera etapa (Figura 2.9) contemplaron:

- Dragado y rellenos
- Obras de protección
- Vialidades y accesos
- Infraestructura y servicios
- Terminales e instalaciones

El avance de la obra correspondiente a la primera etapa en el mes de agosto de 2018 fue de 85% y se estimó que culminará con la llegada del primer buque de gran eslora entre noviembre del 2018 y el próximo año



*Figura 2.8 Ampliación APIVER*

*Fuente: Modificado de VCP, 2017*

**Dragado**



**Obras de protección y vialidades**



**Relleno**



**Construcción de terminales e instalaciones**



**Figura 2.9 Principales obras en el Nuevo Puerto**

## **2.4. Puertos Verdes**

Se considera como Puerto Verde, a aquel que desempeña sus actividades portuarias causando el mínimo daño al medio ambiente y a la sociedad, aportando medidas de mejora y control de calidad de aire, agua, ruido y residuos.

Esta denominación se otorga a aquellos puertos que cumplan con la certificación Sistema de Revisión Ambiental Portuaria (PERS por sus siglas en inglés), es creada por ESPO/ECO PORT (Organización Europea de Puertos Marítimos-Puertos Ecológicos) y es una certificación avalada por la reconocida entidad certificadora Lloyd's Register, siendo el único sistema de gestión ambiental para el sector portuario en el mundo (POLB, 2014).

En México, el Puerto de Ensenada es el primero que se ha certificado como Puerto Verde, esta certificación hace constar que el puerto cuenta con las mejores prácticas ambientales y estándares de calidad en sus actividades portuarias, uniéndose al grupo de Puertos Verdes en el mundo, en su mayoría europeos.

Esta certificación internacional, se suma a las certificaciones ambientales con las que cuenta el Puerto: ISO 9001:2008, ISO 14001:2004 e Industria Limpia.

Buscando las mejores prácticas de sus actividades, el puerto de Veracruz considera la implementación de metodologías que permitan la obtención de esta denominación.

Algunas de las ventajas de la certificación de Puerto Verde son (Ibídem):

- El Puerto realiza sus actividades con los mejores estándares, promoviendo un comercio seguro, mejor competitividad, cumplimiento y eficiencia en sus operaciones portuarias.
- Entra a la cadena logística ambiental de empresas que solo realizan inversión y negocio con los puertos que están dentro del grupo de puertos certificados, de esta manera no solo se contribuye a la mejora del medio ambiente, sino que, además, trae beneficios económicos al Puerto.

- Los puertos certificados adquieren una reacción positiva en la atracción de nuevos clientes en el mercado.
- Ofrece una reducción de costos operativos.
- Este cambio de cultura hace que el puerto pueda seguir promoviendo el comercio y fomentando empleos.
- Las operaciones portuarias no tienen impacto adverso en la comunidad.
- Minimizar los impactos, hace que la sociedad apoye las iniciativas portuarias.
- Adquiere una reputación ambiental de los puertos a nivel mundial.

Con esta certificación, los puertos demuestran su compromiso con un manejo ambiental portuario efectivo, el cual se hace constar con sus acciones ambientales en torno a energía, agua, reciclaje de materiales, emisiones a la atmósfera y programas de conservación de fauna (POLB, 2014).

De la misma manera esta certificación hace que el Puerto interesado fortalezca su política ambiental, sus operaciones de manejo de carga y almacenamiento, así como las medidas de cumplimiento ambiental en las industrias portuarias, logrando un manejo ambientalmente sustentable.

Algunos países, como EE. UU., establecen medidas adicionales a la operación de buques oceánicos y grandes barcos. A través de Ley del Aire Limpio (CAA) regula los motores para embarcaciones de ignición por compresión (también llamados motores Diésel) nuevos o usados con bandera de los EE. UU., los buques que tengan dichos motores, las emisiones de dichos motores, así como el contenido de azufre en el combustible para uso marítimo. La estrategia de la US EPA para reducir las emisiones de todos los barcos que afectan la calidad del aire de los EE. UU. consiste en aplicar las normas de la CAA, así como también implementar y hacer cumplir las normas internacionales para motores para embarcaciones y su combustible, establecidas en el Anexo VI del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (tratado conocido como MARPOL) bajo la autoridad de la Ley de Prevención de la Contaminación Proveniente de Buques (US EPA, 2015).



## 2.5. Prevención del Deterioro Significativo

El plan de prevención del deterioro significativo (PSD por sus siglas en inglés) es una herramienta de gestión ambiental que permite desarrollar actividades (normalmente industriales) que, a pesar de generar un impacto negativo en el medio ambiente, no representan un impacto significativo. Cuando el impacto es superior a lo permitido se deben incluir estrategias de control que permitan el cumplimiento de la normatividad, dando paso a un desarrollo sustentable.

Es aplicable a nuevas fuentes o a modificaciones en las ya existentes para las sustancias contaminantes donde el área de la fuente está clasificada de acuerdo a los Estándares Nacionales de la Calidad del Aire Ambiente y se requiere (US EPA, 2015):

- El uso de la Mejor Tecnología de Control Disponible.
- Análisis de Calidad del Aire.
- Análisis de impacto adicionales.
- Participación de la ciudadanía.

PSD no impide el aumento de emisiones de las fuentes, está diseñado para:

- Proteger la salud y el bienestar público.
- Preservar, proteger y mejorar la calidad del aire en los parques, áreas silvestres, monumentos, costas y otras áreas nacionales o regionales de especial valor natural, recreativo, escénico o histórico.
- Asegurar que el crecimiento económico se producirá de una manera compatible con la conservación de los recursos existentes de aire limpio.
- Asegurar que cualquier decisión que permita el aumento en la contaminación del aire en cualquier zona de aplicación se realiza sólo después de una cuidadosa evaluación de todas las consecuencias de tal decisión.

### **2.5.1. Requerimientos para la aplicabilidad del PSD**

En las zonas donde no se cuente con antecedentes sobre este estudio se considera como primer paso la evaluación de la calidad ambiental en las matrices que se considere podrían afectarse por el desarrollo del proyecto.

El objetivo de la evaluación es demostrar que las nuevas emisiones agregadas a las condiciones de fondo no representarán la violación de los índices ambientales en la zona de interés (US EPA, 2014).

De acuerdo con los lineamientos del PSD, la clasificación de las áreas depende del contaminante que pretenda evaluar, por lo que se debe considerar que no siempre se tiene una calidad buena en todos los parámetros, es decir el plan puede cumplir para SO<sub>2</sub> mas no así para otros contaminantes. En cada caso el responsable de implementar el plan debe establecer los límites de cada zona geográfica.

### **2.5.2. Clasificación del área de acuerdo a la propuesta del PSD**

Derivado de la evaluación inicial de las condiciones ambientales, existen tres clases de área en términos del crecimiento o desarrollo que puede permitirse llevar a cabo sin que exista un deterioro significativo, en este caso en la calidad del aire, un ejemplo de ello se observa en la Tabla 2.4, donde se determinó que los contaminantes a evaluar son SO<sub>2</sub>, PST y NO<sub>2</sub>. En este trabajo el objetivo fue únicamente el SO<sub>2</sub> debido a la disponibilidad de la información.

Las áreas clase I consideran un pequeño grado de deterioro, por lo que los incrementos permitidos serán los menores, la clase II permite un crecimiento debidamente controlado y las áreas clase III tienen los mayores incrementos, es decir, permiten una mayor cantidad de desarrollo. De acuerdo con esta metodología, en la clase I se encuentran parques nacionales y áreas protegidas ya que se busca mantener las condiciones ambientales (Ibídem).

**Tabla 2.4 Ejemplo de incrementos del PSD**

| <b>Incrementos permitidos en el PSD (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b> |                |                 |                  |
|---|----------------|-----------------|------------------|
|   | <b>Clase I</b> | <b>Clase II</b> | <b>Clase III</b> |
| <b>Bióxido de azufre</b>  |                |                 |                  |
| <b>SO<sub>2</sub> anual</b>   | 2              | 20              | 40               |
| <b>SO<sub>2</sub> 24 horas</b>  | 5              | 91              | 182              |
| <b>SO<sub>2</sub> 3 horas</b>   | 25             | 512             | 700              |
| <b>Partículas</b>   |                |                 |                  |
| <b>PST anual</b>  | 5              | 19              |                  |
| <b>PST 24 horas</b>   | 10             | 23              | 75               |
| <b>Bióxido de nitrógeno</b>   |                |                 |                  |
| <b>NO<sub>2</sub> anual</b>   | 2.5            | 25              | 50               |

Fuente: US EPA, 2014

### 3. Metodología

Se propuso el estudio de PSD para evaluar el impacto potencial en la calidad del aire por SO<sub>2</sub> derivado de la actividad del actual puerto de Veracruz, no se contó con información previa que permita el desarrollo del mismo por lo que los pasos seguidos fueron los siguientes:

- a) Diseño y establecimiento de una estación de monitoreo automático de SO<sub>2</sub>.
- b) Estudio de las actividades desarrolladas en el Recinto Portuario de Veracruz para la determinación de las fuentes de emisión de SO<sub>2</sub>.
- c) Aplicación de factores de emisión para la estimación de SO<sub>2</sub> en el RPV y actualización de otros contaminantes atmosféricos.
- d) Selección de un modelo de dispersión de contaminantes para determinar la zona de influencia del RPV.
- e) Propuesta de las bases para el establecimiento del PSD.

#### 3.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio está conformada por el Recinto Portuario de Veracruz (Figura 3.1), el cual a su vez incluye la zona de cesionarias encargadas del manejo de mercancías y a la zona urbana, que se estableció rodeando al puerto y de acuerdo al censo de población 2015 (INEGI, 2015) este municipio contaba con 609 964 habitantes.

En la ciudad se ubican puntos de interés turístico como la Fortaleza de San Juan Ulúa, el Acuario de Veracruz, el Museo Naval, el Malecón y Zócalo de la Ciudad.



*Figura 3.1 Zona de estudio*  
*Fuente: Google, 2017*

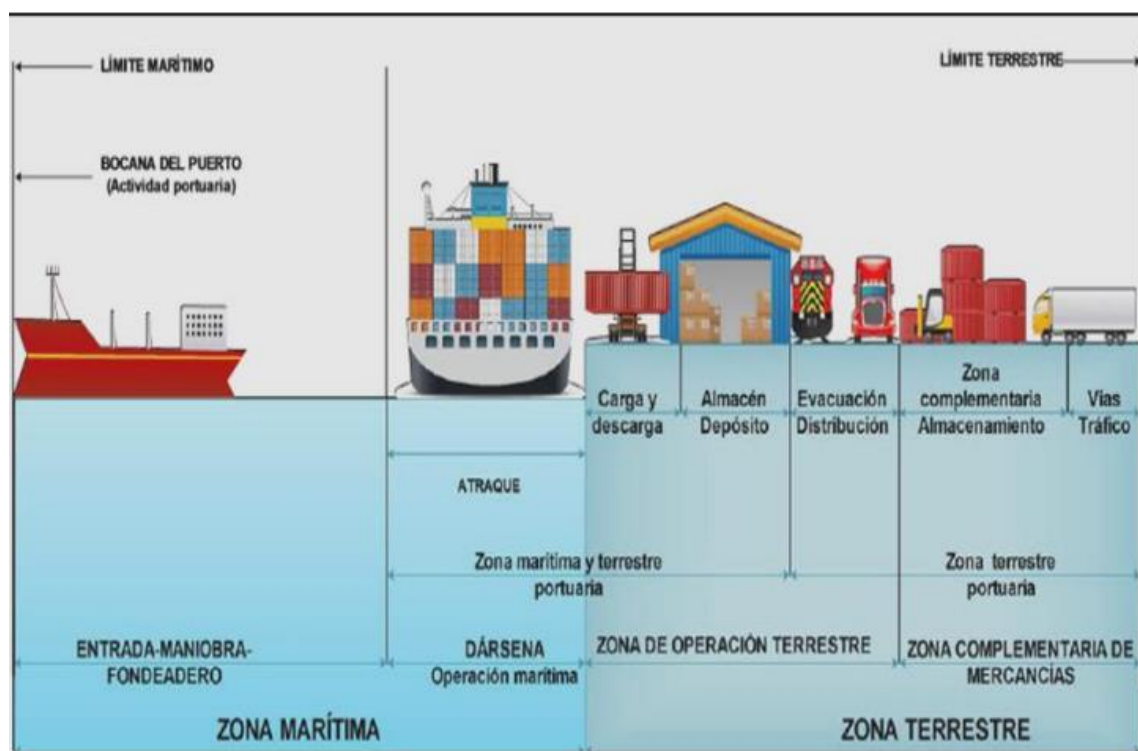
### 3.1.1. Descripción de las actividades en APIVER

Las zonas principales de un puerto son (Truyols, 2010):

- Zona marítima: Destinada al acceso de los buques, así como a sus actividades de maniobra, fondeo y de estiba-desestiba incluyendo áreas de fondeo y dársenas.
- Zona marítima y terrestre portuaria: Se conforma por la zona de atraque, carga y descarga, y la primera línea de almacenes o depósitos.
- Zona de operación terrestre portuaria: Conformada por la zona marítima y terrestre portuaria, además de la zona de evaluación o distribución de productos con los enlaces viales.
- Zona terrestre portuaria: Está formada por las zonas de almacenamiento inmediato para distribución terrestre y las vialidades de tráfico exteriores al puerto.

- Zona industrial: Se compone por los distintos polígonos industriales, industrias portuarias que se abastecen de materias primas o mercancías básicas recibidas en el puerto.

En la Figura 3.2 se observan las diferentes áreas que componen un puerto, para el caso de estudio en el Puerto de Veracruz se considerará únicamente la zona marítima, cuando los buques se encuentran en la fase de atraque durante sus operaciones.



**Figura 3.2** Áreas que conforman un puerto  
*Fuente: (Truyols, 2010)*

Derivado de las visitas previas realizadas en la zona de estudio (Tami, 2013), se determinaron algunas de las actividades portuarias relacionadas con emisiones atmosféricas de diferentes contaminantes, los cuales se describen en las siguientes figuras:

**Operación de buques**



**Ferrocarril**



**Grúas de marco**



**Transporte de personal APIVER**



**Incinerador**



**Comedores**



**Figura 3.3 Fuentes de emisión APIVER, 2013**

Como resultado del estudio desarrollado en 2013 por el Centro de Ciencias de la Atmósfera “Realización de Inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz”, se concluyó que la fuente principal de SO<sub>2</sub> (Figura 3.4) son los buques debido al consumo de combustible con contenido de azufre. Por esta razón el objetivo del estudio fue la operación de los

buques que realizan la carga y descarga de mercancías ya que estas actividades se realizan las 24 horas del día durante todo el año.

Para el año 2011 se estimaron las emisiones de SO<sub>2</sub> en el Puerto de 3693.5 ton, este valor se comparó con la metodología del nuevo inventario y se evaluó el aumento al año 2017.

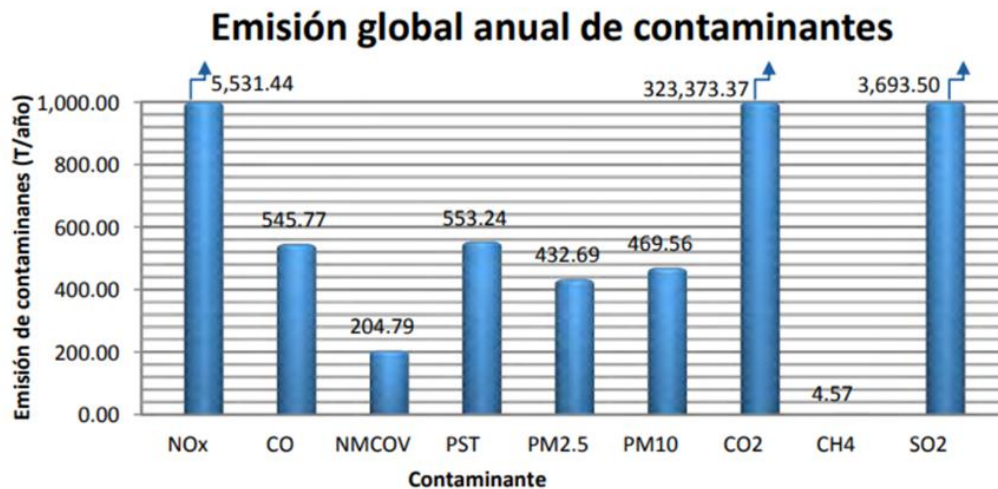


Figura 3.4 Emisión global de contaminantes APIVER (2011)

Fuente: Tami, 2013

### 3.2. Establecimiento de la estación de monitoreo automático

Con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, *Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire*, se determinaron las condiciones mínimas que deben ser observadas para la selección del periodo de estudio, el objetivo, la ubicación y se aseguró la calidad de la información obtenida.



### 3.2.1. Definición del sistema de monitoreo

Esta norma oficial mexicana rige en todo el territorio nacional y es de observancia obligatoria para los gobiernos locales, según corresponda, en aquellas zonas o centros de población que cuenten con alguna de las condiciones siguientes:

- Asentamientos humanos con más de quinientos mil habitantes
- Zonas metropolitanas
- Asentamientos humanos con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio a la atmósfera
- Conurbaciones
- Actividad industrial que por sus características se requiera del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos

Para el diseño del sistema de monitoreo, la norma especifica en el punto 6, que se deben definir los contaminantes a muestrear y monitorear en cada estación, en función de los objetivos del sistema de monitoreo. Para definir los contaminantes a muestrear y monitorear, y para ubicar cada estación, se realizan los estudios o trámites necesarios para obtener información de apoyo, como:

- Inventario de emisiones a la atmósfera
- Modelos de calidad del aire
- Información meteorológica de la región
- Características geográficas locales
- Información fisiográfica urbana
- Localización de asentamientos humanos
- Estudios preliminares de calidad del aire

### **3.2.1.1. Características básicas de los elementos de los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire**

Las características son las siguientes:

- Los sistemas de monitoreo estarán conformados por una o más estaciones de muestreo y monitoreo, las cuales pueden ser fijas, semifijas o móviles
- Las estaciones de monitoreo estarán equipadas con sistemas para la adquisición y transmisión continua de la información de calidad del aire
- En el caso de las estaciones de monitoreo, la captura de la información se realizará de manera directa en la memoria de los instrumentos o a través de un equipo externo que solicite al instrumento la información, ya sea por vía analógica o digital, y la deposite en un medio de almacenamiento
- En el caso de las estaciones de muestreo, los registros serán procesados y almacenados en el centro de cómputo del sistema de monitoreo de calidad del aire
- Se mantendrá un respaldo permanente de la información, en medios electrónicos y/o gráficos, del historial de los datos crudos y validados
- Los centros de cómputo y de control contarán con los sistemas de seguridad necesarios, para evitar pérdidas en el registro de información, en específico con lo siguiente:
  - Control ambiental interno, conforme a las especificaciones del fabricante
  - Planta de respaldo de energía eléctrica
  - Sistema contra incendios, conforme a las recomendaciones del fabricante y con base en la normatividad de la Secretaría de Trabajo y Previsión Social y, en su caso, la legislación local
  - Unidades automáticas de respaldo

### **3.2.1.2. Instalación de estaciones, operación, mantenimiento y calibración de equipos**

- Las estaciones de monitoreo serán resguardadas con sistemas de protección contra descargas eléctricas, puesta a tierra de la caseta y equipo de aire acondicionado en el interior de la estación para proteger los instrumentos y equipos de medición
- Las estaciones de monitoreo serán construidas con materiales resistentes y aislantes a las condiciones locales de cada sitio: climatológicas (temperatura, humedad, salinidad, entre otros) y socioeconómicas (vandalismo, mítines, vibraciones por transporte o industria, entre otros)
- Las estaciones de monitoreo tendrán espacio suficiente para el desarrollo de las actividades de mantenimiento básico e inspección.
- Las estaciones de monitoreo contarán con un espacio designado para los cilindros de gases de calibración
- Los equipos de monitoreo serán conectados a corriente regulada.
- La toma de muestra debe ser de material inerte a los parámetros a monitorear, y será colocada, de tal manera que se encuentre libre de obstáculos.
- La ubicación de la estación de monitoreo considerará los siguientes aspectos:
  - Las condiciones físicas de la zona a evaluar
  - Accesibilidad a la estación
  - Seguridad
  - Disponibilidad de corriente eléctrica
  - Facilidad para la instalación, manejo y funcionamiento de los instrumentos
  - Que las concentraciones medidas sean representativas de las condiciones de la zona

### **3.2.2. Selección del equipo**

La NOM-038-SEMARNAT-1993, *Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición*, fue la referencia de los criterios para seleccionar la marca y características del equipo de monitoreo automático.

Esta norma establece la Pararrosanilina como método de referencia y describe el procedimiento para la determinación; debido a que se requirió un sistema automático, el método equivalente aprobado por la US EPA es el de Fluorescencia UV.

Estas condiciones permitieron la selección del equipo y del proveedor considerando costos, asistencia técnica, disponibilidad y experiencia.

#### **3.2.2.1. Teledyne API T100**

El equipo que cumplió con las características definidas por la normatividad fue el *Teledyne API - T100 UV Fluorescence SO<sub>2</sub> Analyzer*.

Este modelo se compone de un analizador controlado por un microprocesador que determina la concentración de SO<sub>2</sub> en una muestra gaseosa en la celda de reacción (Figura 3.5), mediante la exposición a luz ultravioleta, la molécula absorbe la energía en una longitud de onda específica y pasa su estado excitado, de este modo cuando regresa a su nivel normal, la energía irradiada por la molécula se mide por un detector. La energía es directamente proporcional a la concentración de SO<sub>2</sub> en la muestra (Teledyne, 2011).

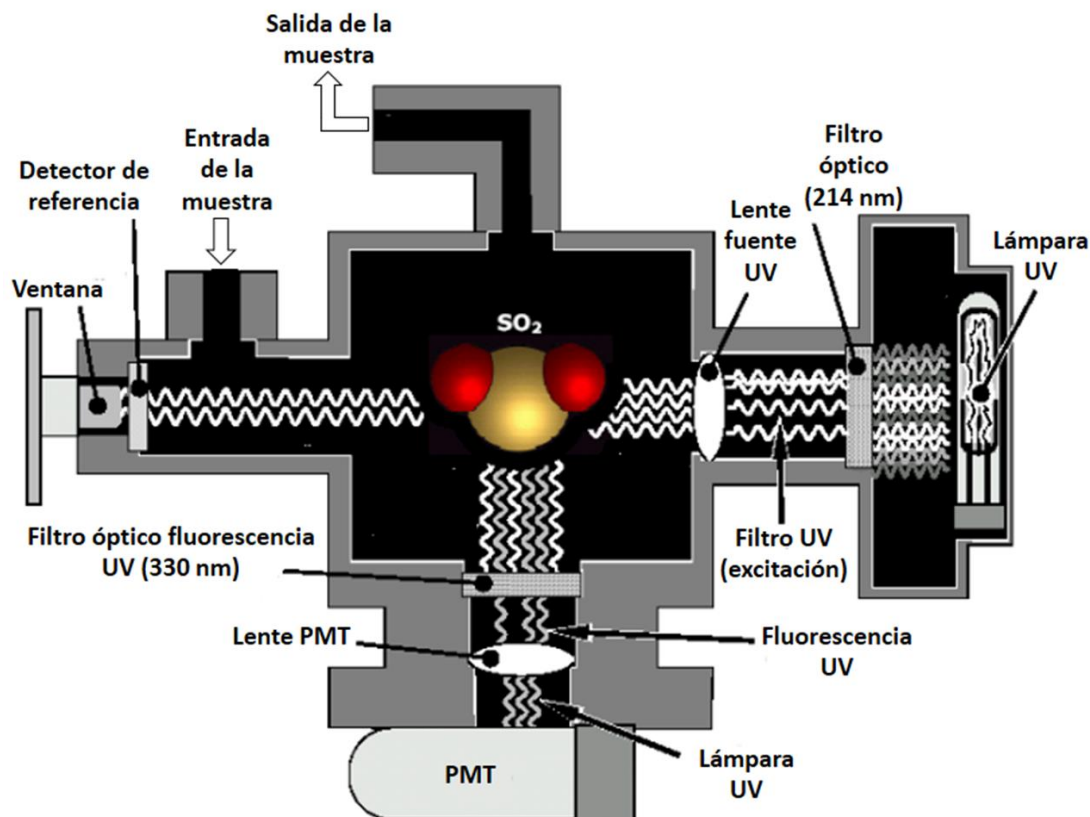


Figura 3.5 Celda de reacción API T100

Fuente: Manual de operación Teledyne API T100

La instalación del equipo se llevó a cabo por la empresa distribuidora, entre los servicios incluidos está el soporte técnico y mantenimiento preventivo para asegurar el correcto funcionamiento con base en las especificaciones del equipo. Como parte del equipo de trabajo se tomó el curso de capacitación para la operación del equipo.

### 3.2.3. Tratamiento de los resultados

Con el aseguramiento y control de calidad de los datos de concentración de SO<sub>2</sub> por parte del equipo de monitoreo y cumpliendo con los lineamientos de la NOM-156-SEMARNAT-2012, los datos se archivaron de manera automática en la memoria del equipo y se transmiten por medio de un adquisidor de datos a un sistema de cómputo que se monitorea remotamente en tiempo real desde la Sección

de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera, con el objetivo de tomar medidas de manera oportuna en caso de que se presenten problemas en el sistema.

De acuerdo a la NOM-022-SSA1-2010, *Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al dióxido de azufre. Valor normado para la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población*, se determinaron los valores de concentración horaria para realizar los promedios en los intervalos especificados (24 horas, 8 horas y anual).

Estos promedios se compararon con los límites establecidos en la norma y se consideraron para establecer los incrementos permisibles en el PSD. La validación de los datos se basa en el análisis estadístico ajustado por las calibraciones del equipo para evitar desviaciones, además del establecimiento de banderas o valores límite entre los que pueden tomar los datos.

Para considerar un estudio representativo se considera contar con mediciones de concentración en todas las estaciones del año, es decir mínimo un año. La validez del estudio depende del cumplimiento de al menos el 75% de los datos válidos en este intervalo.

### **3.3. Estimación de emisiones en el RPV**

La evaluación de un estudio integral de calidad del aire considera el desarrollo de un inventario de emisiones para establecer cuáles son los contaminantes de prioridad para mantener la calidad ambiental. En este caso se contó con información previa obtenida en la zona de estudio (Tami, 2013), la cual fue de utilidad para la actualización en este trabajo, por lo que debido a la disponibilidad de los datos por parte de APIVER, se seleccionó como objetivo del inventario a las actividades portuarias por la presencia de buques. Estas actividades se realizan los 365 días del año, las 24 horas.

### **3.3.1. Determinación de las actividades desarrolladas dentro del puerto**

Una vez definido el objetivo de estudio, los buques oceánicos encargados del transporte marítimo del Puerto de Veracruz realizan tres actividades principales:

- **Crucero:** Cuando el buque está en ruta y su velocidad es mayor.
- **Maniobra:** El buque realiza movimientos previos a la llegada al muelle, por lo que requiere que aumente la potencia utilizada.
- **Hotteling:** El buque se encuentra fijo utilizando energía únicamente para mantener los servicios auxiliares.

Para el cálculo de las emisiones se utilizaron factores de emisión desarrolladas por las principales agencias ambientales y organizaciones marítimas, estos factores se obtienen asignando valores representativos a la actividad de los buques mediante muestreo y métodos estadísticos, estas consideraciones se ilustran en la Figura 3.6.

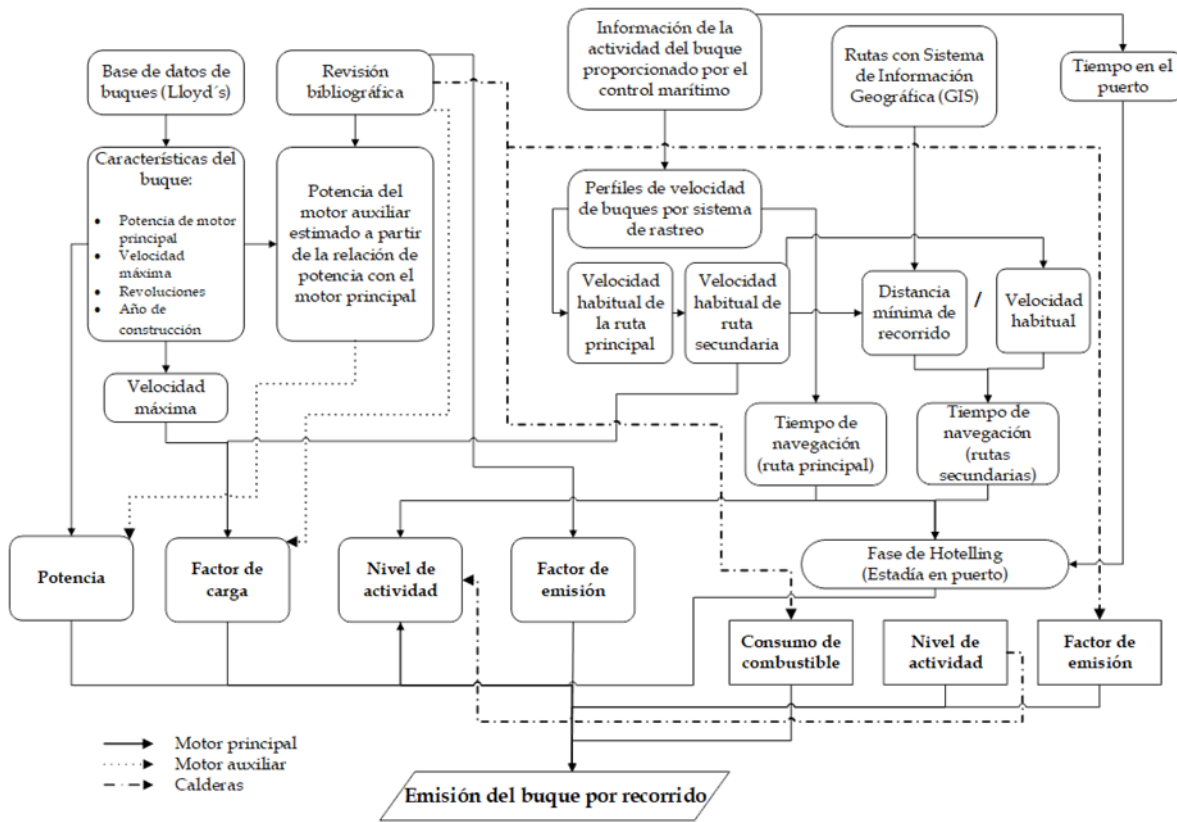


Figura 3.6 Esquema de estimación de emisiones por buques

Fuente: Trozzi, 2010

Los principales contaminantes asociados a las operaciones marítimas son NO<sub>x</sub>, CO, COV's y partículas (estos contaminantes dependen del tipo de combustión interna), además de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, metales y otro tipo de partículas (son función del tipo de combustible utilizado).

En este trabajo sólo se considera la estimación de SO<sub>2</sub> ya que el objetivo es relacionar las mediciones obtenidas en la estación de monitoreo con la actividad del actual Puerto de Veracruz y determinar el impacto potencial en la calidad del aire por la construcción del Nuevo Puerto.

### 3.3.2. Selección de factores de emisión

En el desarrollo del inventario se consideraron las siguientes referencias:

- HERMES 2004: Metodologías Bottom-up \_ Emisiones en puertos



- *HERMES-CAN 07/08: SNAP0804. Emisiones en puertos.*

Se consideró para el cálculo de este inventario las emisiones diarias que derivan de los procesos de combustión interna de los motores auxiliares de los buques marítimos en la operación hotelling para SO<sub>2</sub>.

La etapa de hotelling considera la estancia del buque en el muelle, durante la cual se llevan a cabo operaciones de carga y descarga, abastecimiento de combustible y otras actividades requeridas en la embarcación. Aunque el buque no requiere energía para propulsión, sí es necesario generarla para alimentar los sistemas eléctricos, de calefacción, ventilación, bombas, etc.

El tipo de buques presentes en los puertos tienen diferentes características por lo que se clasifican de acuerdo a (Trozi, 2010) la Tabla 3.1.

*Tabla 3.1 Categorías consideradas para la clasificación de buques*

| Tipo de buque          | Código | Descripción   |
|------------------------|--------|---|
| Tanques                | TA     | Barcos dedicados al transporte de mercancías líquidas. También se denominan graneleros líquidos.  |
| Graneleros             | GR     | Barcos usados para el transporte de productos a granel como minerales, fertilizantes, madera, o grano.  |
| Carga General          | CG     | Barcos destinados a transportar mercancías como hierro, comida paletizada y mercancía pesada.   |
| Ro-Ro mercancías       | RR     | Barcos destinados a transportar carga rodada así como equipos todo terreno, trailers o vagones de tren. Ro-Ro es un acrónimo de "roll-on/roll off". |
| Cruceros               | CR     | Barcos destinados al transporte de pasajeros, cruceros.   |
| Ferries                | FR     | Buques de alta velocidad que enlazan dos puntos transportando pasajeros en horarios programados (transbordador).                                    |
| Ro-Ro mixto            | RM     | Barcos destinados a transportar mercancía rodada así como pasajeros.  |
| Porta Contenedores     | PC     | Barcos que transportan mercancías dentro de containeres de tamaño estandarizado.  |
| Pesqueros              | PE     | Barcos destinados a la pesca.   |
| Remolcadores           | RE     | Barcos destinados al remolque de otros barcos, principalmente para ayudar en las maniobras de entrada y de salida de los puertos.                   |
| Barcos de guerra       | BG     | Barcos con actividades militares  |
| Otros buques mercantes | OT     | Engloba buques mercantes que entran a puerto para su reparación, dragas, salvación marítima, artefactos flotantes y otras actividades               |

A partir de esta clasificación se reunió la información disponible para el Puerto de Veracruz, obtenida de los reportes mensuales con información por buque con fecha de entrada, estadía, tipo de carga, Gross Tonnage (GT) principalmente. Esta información se encuentra disponible en la página de la Administración Portuaria Integral de Veracruz, este puerto opera las 24 horas, durante todo el año y cuenta con 12 muelles para los diferentes tipos de mercancía.

El siguiente paso para el cálculo fue la caracterización de cada tipo de buque que se maneja en el puerto por tipo de motor y combustible empleado para el cálculo de la potencia de cada buque, obteniendo las categorías mostradas en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Características de los buques**

| Tipo de buque           | Tipo motor ME | Combustible ME | Tipo motor AE | Combustible AE     | Ratio AE/ME | FS AE en hotelling | Potencia (KW) a partir del GT/<br>correlación         |
|-------------------------|---------------|----------------|---------------|--------------------|-------------|--------------------|---|
| Tanque                  | SSD           | RO             | MSD/HSD       | MD                 | 0.35        | 40%                | $ME(kW) = 14.602 \cdot GT^{0.6278}$<br>$R^2 = 0.9012$ |
| Granelero               | SSD           | RO             | MSD/HSD       | MD                 | 0.39        | 20%                | $ME(kW) = 47.115 \cdot GT^{0.504}$<br>$R^2 = 0.6755$  |
| Carga General           | SSD           | RO             | MSD/HSD       | MD                 | 0.35        | 20%                | $ME(kW) = 1.2763 \cdot GT^{0.9154}$<br>$R^2 = 0.8215$ |
| Ro-Ro                   | MSD           | RO             | MSD/HSD       | RO                 | 0.39        | 20%                | $ME(kW) = 45.7 \cdot GT^{0.5237}$<br>$R^2 = 0.7012$   |
| Porta contenedores      | SSD           | RO             | MSD/HSD       | RO                 | 0.27        | 20%                | $ME(kW) = 1.0839 \cdot GT^{0.9617}$<br>$R^2 = 0.9177$ |
| MD Destilado Marino     |               |                |               | ME Motor principal |             |                    |   |
| RO Combustible Residual |               |                |               | AE Motor auxiliar  |             |                    |   |
| Fuente: ENTEC, 2007     |               |                |               |                    |             |                    |   |

El cálculo de la potencia para el motor principal corresponde a las curvas presentadas en la Tabla 3.2.

A partir de estas ecuaciones y con el Ratio (AE/ME) presentado en la Tabla 3.2 se determinó la potencia de los motores auxiliares para cada buque, se considera también que dentro de la fase de hotelling son únicamente los que se encuentran operando.

La última consideración es que los motores auxiliares no se encuentran operando a toda su capacidad, por lo que se requiere considerar un factor denominado de solicitud para esta etapa.

**Tabla 3.3 Factores de emisión y consumo de combustible para motor AE en la fase de hotelling**

| <b>FASE: HOTELLING</b> | <b>Consumo de combustible</b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>PM<sub>10</sub></b> |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Tipo de buque</b>   | <b>(kg/kWh)</b>               | <b>(g/kg comb)</b>    |                        |
| Tanque                 | 0,217                         | 1,95                  | 1,13                   |
| Granelero              | 0,217                         | 1,95                  | 1,13                   |
| Carga General          | 0,217                         | 1,95                  | 1,13                   |
| Ro-Ro                  | 0,227                         | 29,32                 | 1,81                   |
| Porta contenedores     | 0,227                         | 29,3                  | 1,8                    |

Para la selección de la expresión que permitió realizar el cálculo de las emisiones se consideraron las recomendaciones de guías (SEMARNAT, 2001) para los cálculos diarios de los contaminantes, obteniendo la siguiente expresión:

$$E_{i,hotelling}^{AE}(dia) = \sum_b P_b^{ME}(GT_b) * R_b^{AE} * N_b * FC_b^{AE} * CC_{ct} * T_b * FE_{ict}$$

$E_{i,hotelling}^{AE}(dia)$  Emisiones diarias del contaminante i debidas a los AE en la fase de hoteling (kg/dia)

$P_b^{ME}(GT_b)$  Potencia máxima de los ME por tipo de buque b (kW) en función del GT por tipo de buque.

$R_b^{AE}$  Ratio para calcular la potencia de los AE a partir de la de los ME por tipo de buque b

|             |  |
|-------------|--|
| $N_b$       | Número de buques por tipo de buque $b$   |
| $FC_b^{AE}$ | Factor de carga de los AE por tipo de buque $b$ en <i>Hotelling</i>  |
| $CC_{ct}$   | Consumo de combustible (g/kWh) por tipo de combustible usado $c$ ( <i>RO</i> o <i>MD</i> ) y motor $t$ ( <i>SSD</i> , <i>MSD</i> , <i>HSD</i> ). |
| $T_b$       | Tiempo empleado por tipo de buque $b$ en hotelling (h)   |
| $FE_{ict}$  | Factor de emisión por tipo de contaminante $i$ , combustible $c$ , motor $t$ (g/kg combustible consumido)  |

### 3.4. Aplicación del modelo de dispersión

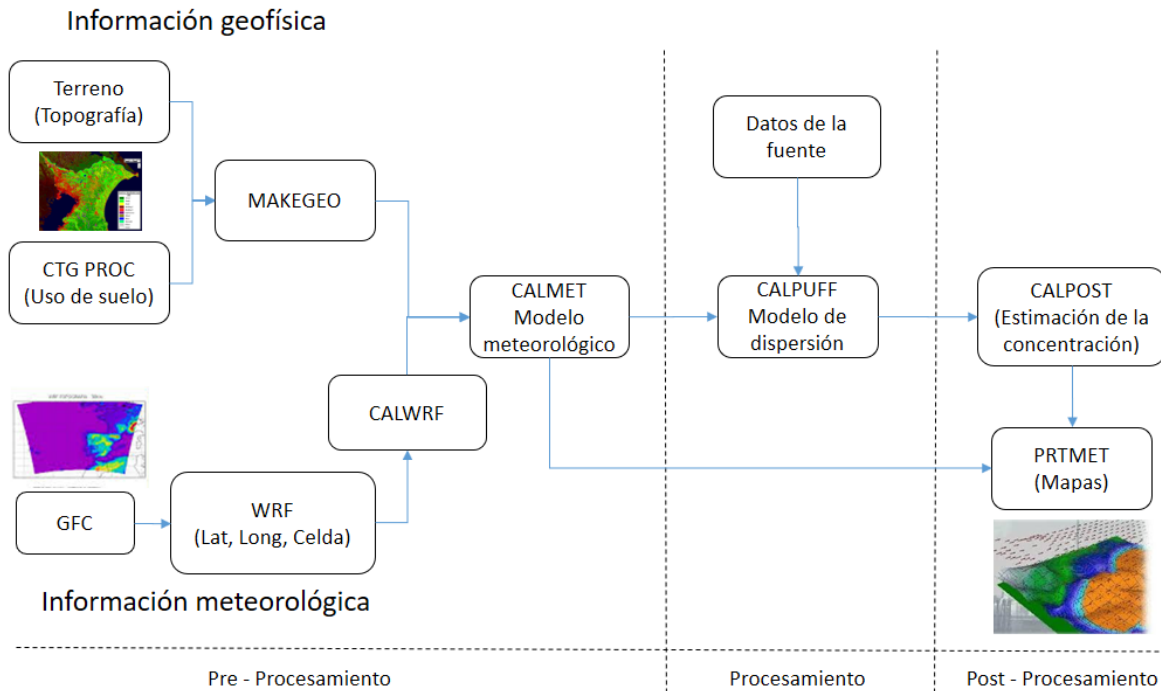
En este estudio se estableció el uso del modelo CALPUFF ya que permite la simulación de la dispersión de SO<sub>2</sub> considerando la variabilidad de las condiciones meteorológicas a diferentes alturas y en todas las direcciones con el fin de identificar las zonas que se prevé serán potencialmente impactadas por la operación del puerto en todo el periodo de estudio.

#### 3.4.1. Descripción del modelo y opciones

CALPUFF fue diseñado por Sigma Research Corporation y California Air Resources Board. Está clasificado como tipo Lagrangiano-Gaussiano, es decir, un modelo de estado no estacionario, que permite simular los efectos en tiempo y espacio de las variaciones de los parámetros meteorológicos en el transporte, transformación y remoción de algún contaminante.

Es un modelo que trata las emisiones como “puffs” o nubes que pueden experimentar procesos de transformación química al mismo tiempo que se van desplazando a través de un campo meteorológico tridimensional. Puede ser aplicado para transporte de emisiones provenientes de fuentes de tipo puntual, de área, y de volumen, en distancias de fuente-receptor de decenas de metros a cientos de kilómetros y tiene la capacidad de generar datos de concentración de algún contaminante (Scire et al., 2000).

CALPUFF funciona a diferentes escalas o capas de la atmósfera, que ayudan a simular la dispersión, reacción química, depósito atmosférico y efecto de visibilidad para algún contaminante, además se pueden ingresar los contaminantes que se desean simular, por ello se dice que es un modelo multicapa y de multiespecies. El sistema de modelación consta de tres componentes principales: CALMET, CALPUFF y CALPOST (Figura 3.7).



**Figura 3.7 Componentes de CALPUFF**

**Fuente: Scire, 2010**

- CALMET es un modelo meteorológico, el cual genera campos de viento, identifica los efectos cinemáticos de terreno (plano y complejo), tiene la capacidad de interpolar los datos de meteorología disponibles sobre superficie y capas superiores en un dominio de estudio. Adicionalmente, posee un módulo de micrometeorología que calcula los parámetros de turbulencia vertical y horizontal. Asimismo, determina campos de viento y temperatura horarios en una malla 3D para un dominio establecido, asocia en 2D diagramas de altura de mezcla, características de la superficie y las propiedades de la dispersión influenciadas por los campos de viento.

- CALPUFF es un modelo de dispersión que simula el transporte y transformación de algún contaminante producto de una fuente puntual, lineal, de área o volumen; la simulación depende de los campos de viento generados en CALMET. El modelo CALPUFF es un modelo de nube que simula la dispersión del aire referente a una pluma de emisión (bocanada). Incorpora algoritmos para efectos de corto alcance (corriente descendente por objetos, elevación de la pluma, penetración parcial de la pluma) y largo alcance (remoción de contaminantes por depósito húmedo y seco, transformación química, transporte sobre superficies de agua e interacción costera. El módulo CALPUFF incluye un modelo fotoquímico (CALGRID) para simular el transporte y transformación de un contaminante en particular, el cual integra módulos de advección y difusión (vertical y horizontal) y deposición seca. También integra el modelo Kinematic Simulation Particle (KSP), usado para simular la deposición, dispersión y transporte de partículas.
- CALPOST es un programa de post-procesamiento de lectura y extracción de datos, desde CALPUFF; es decir, en esta etapa, se puede determinar: el periodo de procesamiento de los datos, los promedios de concentración (1, 8 ó 24 horas) de algún contaminante en uno o varios receptores, especies químicas, flux de concentración y depósito, parámetro de visibilidad, gráficos (isolíneas de concentración). CALPOST también identifica el primer y segundo valor mayor de concentración encontrado en toda el área de un dominio, junto con sus coordenadas UTM. La información anterior se utiliza para generar los resúmenes reportados en diferentes formatos, por ejemplo: cuadros de concentraciones de mayor a menor, cuadros de valores que rebasaron la norma (especificada por el usuario) y archivos con datos en formato de matriz para visualizarlos en programas especializados (Zuk et al, 2005).

## 4. Resultados y análisis

Como resultado del análisis y los recorridos en la zona del RPV, se evaluaron los posibles sitios para la estación de monitoreo, seleccionando como el sitio más viable para el establecimiento, un edificio de APIVER (Figura 4.1). En este sitio se contó con las condiciones necesarias de servicios, infraestructura para la instalación del equipo, seguridad, fácil acceso y no cuenta con obstáculos alrededor.

También se consideraron las condiciones meteorológicas de la zona ya que se ubicó viento arriba del actual puerto para obtener datos de fondo de  $SO_2$  y poder establecer las condiciones iniciales antes de la construcción y operación del nuevo puerto. En la Figura 4.2 se observa la ubicación exacta de la estación de monitoreo, en la zona noroeste del puerto actual y la zona sur de la construcción del nuevo puerto.



*Figura 4.1 Ubicación de la estación de monitoreo*



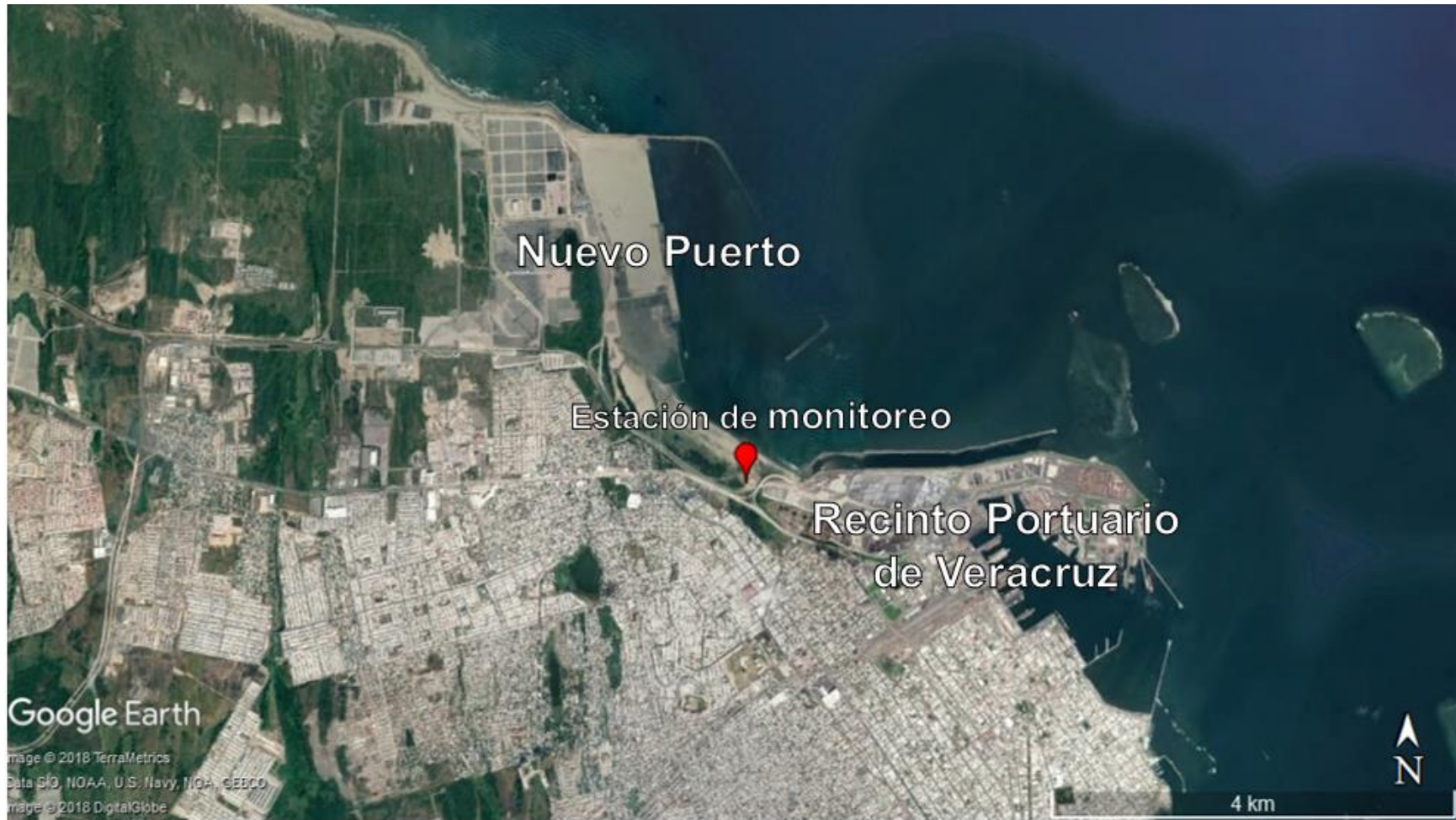


Figura 4.2 Ubicación de la estación de monitoreo

El edificio donde se encuentra la estación se compone de varios cubículos y oficinas, en uno de ellos se llevó a cabo el acondicionamiento e instalación de los instrumentos y equipo necesario para cumplir con los requisitos establecidos para una correcta operación.

Se contó con todos los lineamientos para el correcto funcionamiento de los equipos como aire acondicionado, equipo de protección de descarga eléctrica, equipo de calibración y adquisición de datos, gases de referencia, equipo de cómputo y la toma de muestra en una ubicación idónea, procurando el aseguramiento y control de calidad de los datos obtenidos por el equipo de monitoreo (Figura 4.3 - Figura 4.6).

El periodo de estudio se determinó considerando la correcta operación de la estación, por lo que va del 01/08/2017 al 31/07/2018 para cumplir con un año de datos.

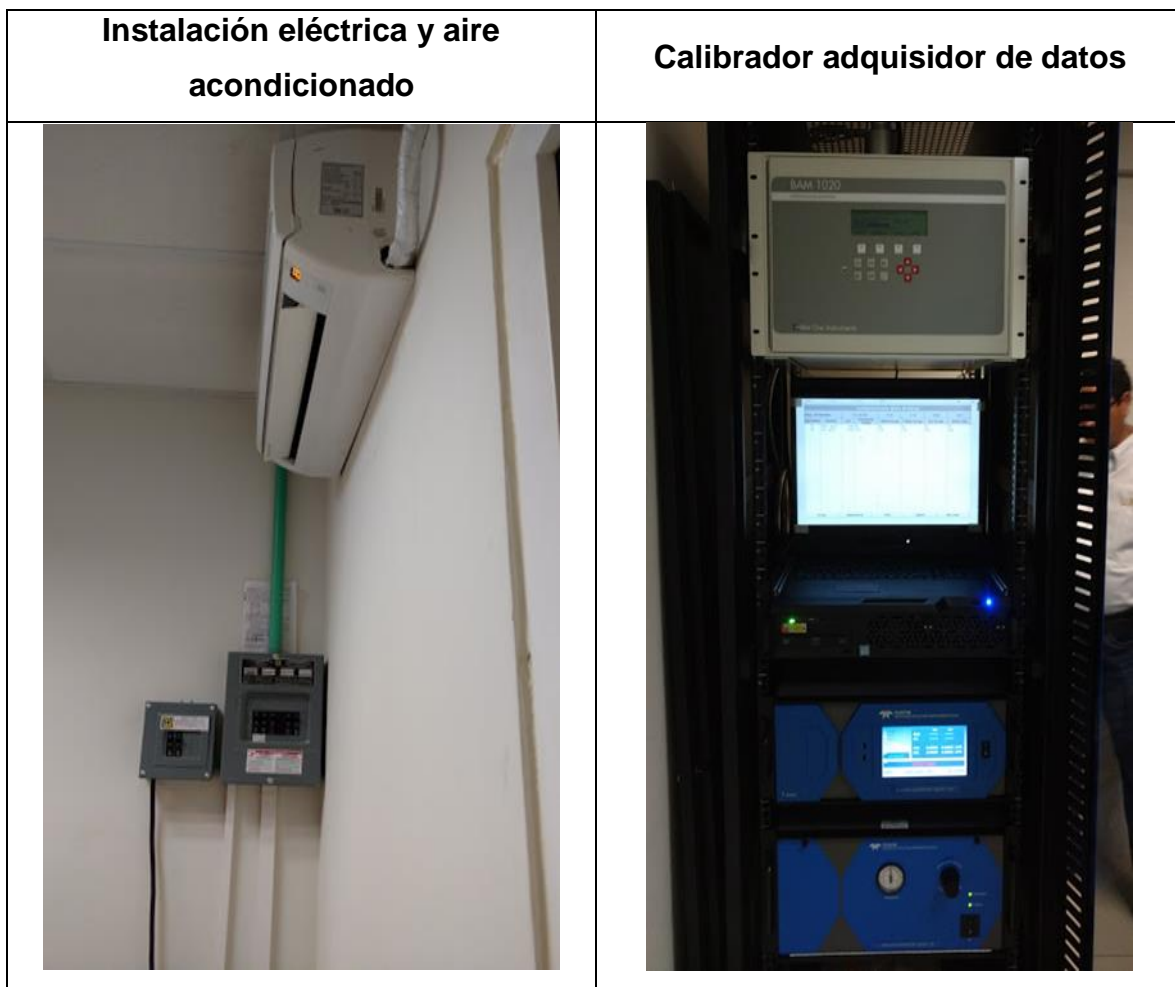


Figura 4.3 Componentes estación de monitoreo 1

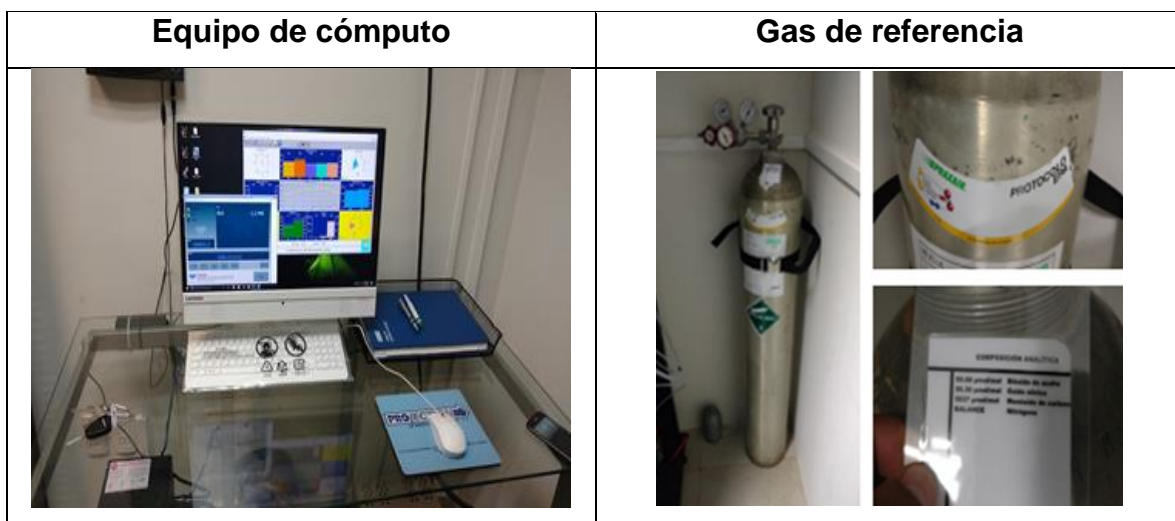


Figura 4.4 Componentes estación de monitoreo 2



| Equipo meteorológico  | Tomas de muestreo  |
|---|--|
|  |  |

Figura 4.5 Componentes estación de monitoreo 3


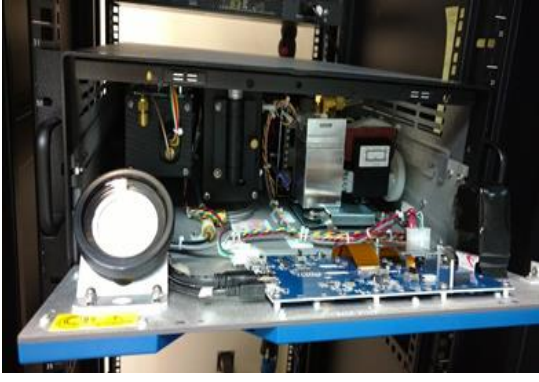
| Analizador de SO <sub>2</sub> (carátula)   | Analizador de SO <sub>2</sub> (interior)  |
|--|---|
|  |  |

Figura 4.6 Analizador Teledyne T100

## 4.1. Calidad de la base de datos

Durante el periodo de estudio se determinaron los siguientes parámetros para analizar el comportamiento y caracterizando las condiciones climáticas locales en todas las estaciones del año y la concentración de SO<sub>2</sub>, el intervalo establecido es de 1 hora.

La base de datos se encuentra por encima del 75% de datos válidos disponibles, la menor cantidad de datos corresponde a la concentración de SO<sub>2</sub> debido a problemas técnicos del equipo analizador.

Tabla 4.1 Resumen de datos de monitoreo

| 01/08/17-<br>31/07/18 | Conc.<br>SO <sub>2</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> ) | Temp<br>(°C) | Vel.<br>Viento<br>(m/s) | Dir. de<br>viento (°) | Presió<br>n (bar) | Rad<br>(w/m <sup>2</sup> ) | Den.<br>Aire |
|-----------------------|--|--------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| <b>Datos</b>          | 7863   | 8309         | 8313                    | 7748                  | 8313              | 8309                       | 8313         |
| <b>% Total</b>        | 89.8   | 94.9         | 94.9                    | 88.4                  | 94.9              | 94.9                       | 94.9         |
| <b>Promedio</b>       | 2.3  | 25.8         | 4.0                     | NA                    | 1013.6            | 209.4                      | 1.2          |
| <b>Máx</b>            | 85.8   | 33.1         | 20.1                    | NA                    | 1030.8            | 1093.0                     | 1.2          |
| <b>Min</b>            | 0.0  | 12.7         | 0.0                     | NA                    | 1001.8            | 0.0                        | 1.1          |
| <b>Desv. Std</b>      | 4.1  | 3.2          | 3.6                     | NA                    | 4.5               | 296.9                      | 0.0          |

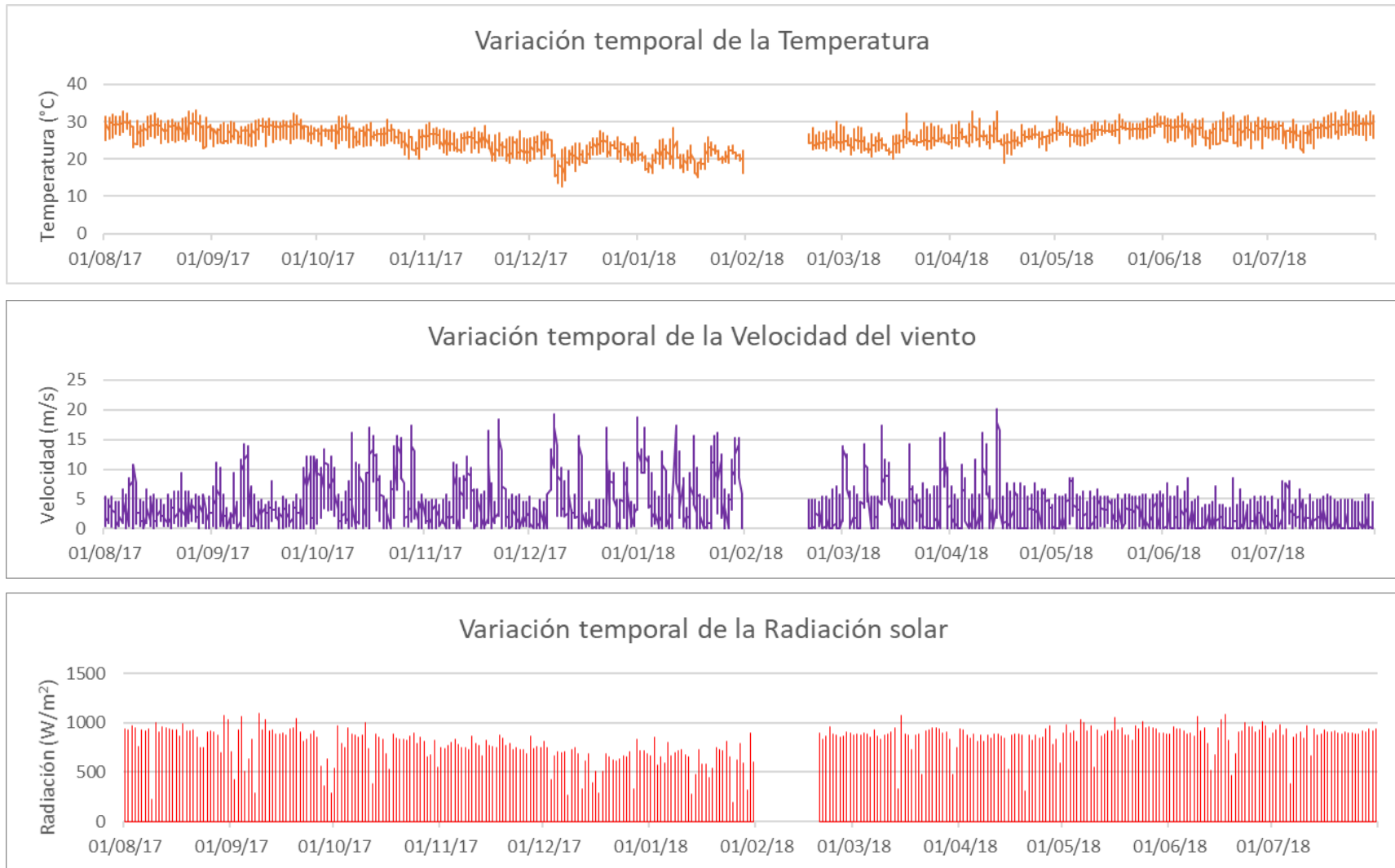
## 4.2. Monitoreo de parámetros meteorológicos

En la Figura 4.7 se observan los datos obtenidos en el periodo de estudio, destacando un sesgo en la información del 01/02/18 al 19/02/18 debido a fallas eléctricas del equipo meteorológico.

El promedio de temperatura es 25.8°C, mostrando un descenso entre diciembre de 2017 y febrero de 2018.

La velocidad promedio fue de 4 m/s, se observó un comportamiento constante de mayo a julio de 2018, cercano a los 5 m/s.

Finalmente, la radiación promedio fue de 209.4 W/m<sup>2</sup>, presentando entre diciembre de 2017 y enero de 2018 los valores más bajos.



**Figura 4.7** Variación de la temperatura, viento y radiación solar

### 4.2.1. Rosas de viento

Para la determinación de los vientos dominantes a partir de datos obtenidos en la estación de monitoreo, se realizaron rosas de viento mensuales (Figura 4.8 - Figura 4.13).

De acuerdo a las rosas obtenidas se observan dos componentes principales de vientos, de septiembre a abril, los vientos provienen de la dirección norte entre 6 y 20.1 m/s y de mayo a agosto hay una transición de la dirección noreste mayoritariamente de 4 a 6 m/s.

El mes de febrero en este caso presenta un comportamiento diferente a enero y marzo debido a que se cuenta con pocos días con datos válidos.

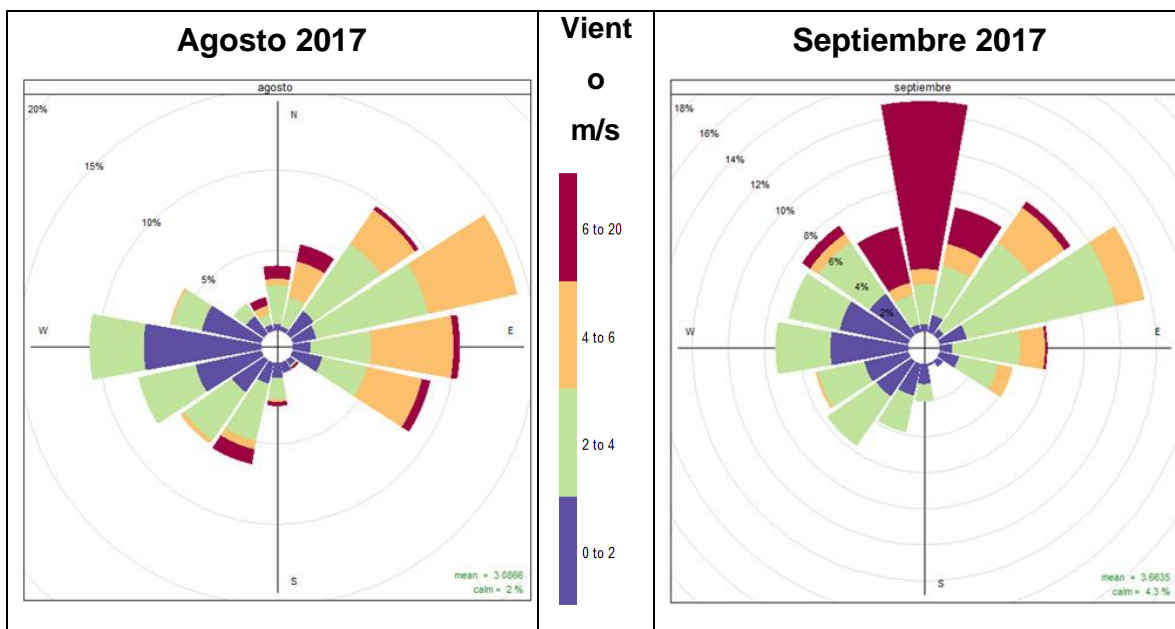
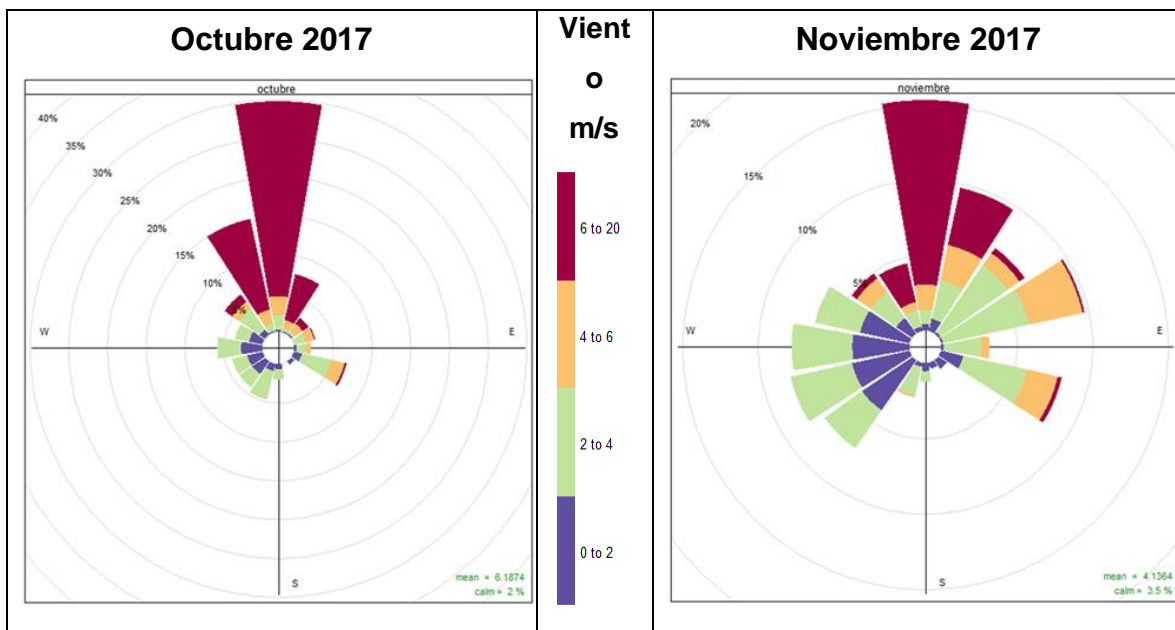
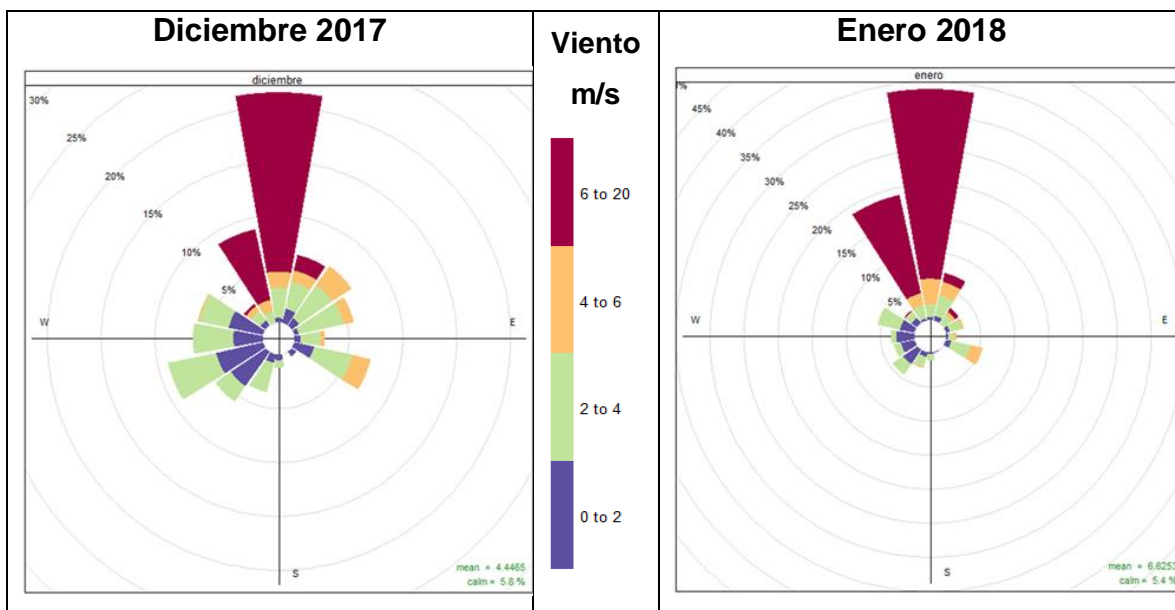


Figura 4.8 Rosas de viento Agosto 2017 y Septiembre 2017

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Resultados y análisis**



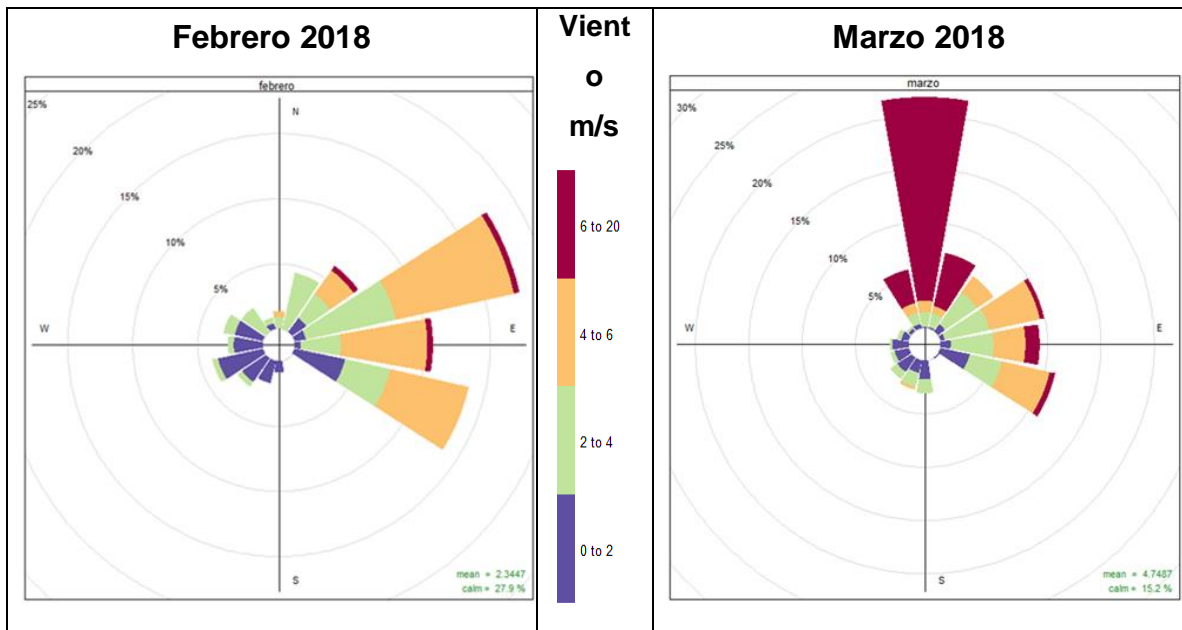
**Figura 4.9 Rosas de viento Octubre 2017 y Noviembre 2017**



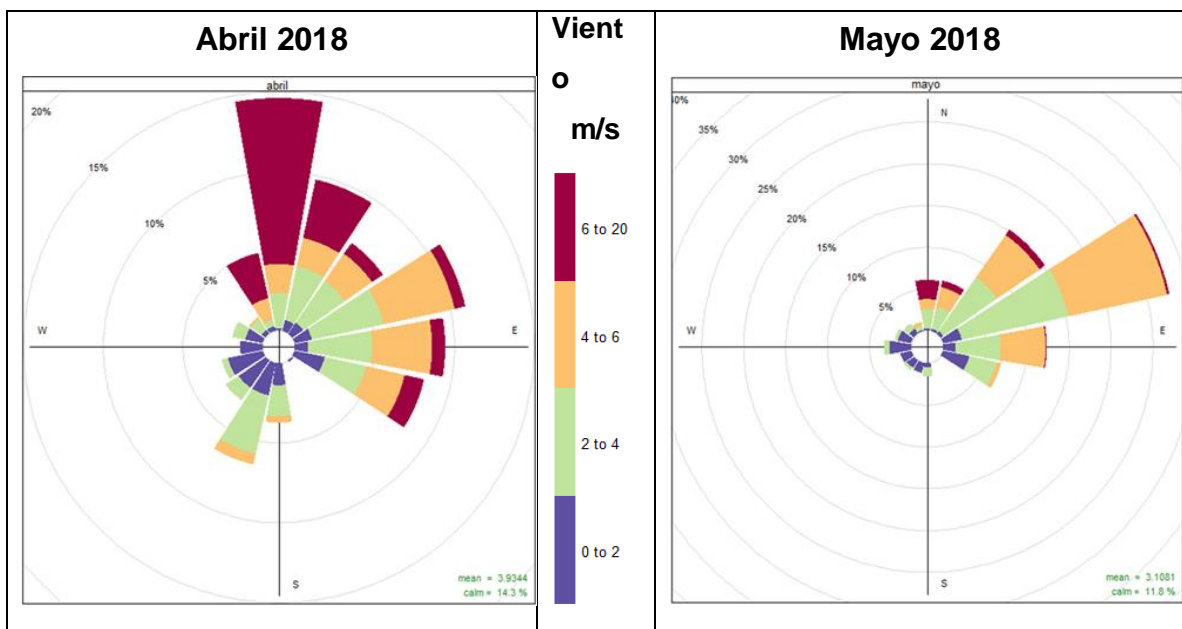
**Figura 4.10 Rosas de viento Diciembre 2017 y Enero 2018**



Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Resultados y análisis**



**Figura 4.11 Rosas de viento Febrero 2018 y Marzo 2018**



**Figura 4.12 Rosas de viento Abril 2017 y Mayo 2018**

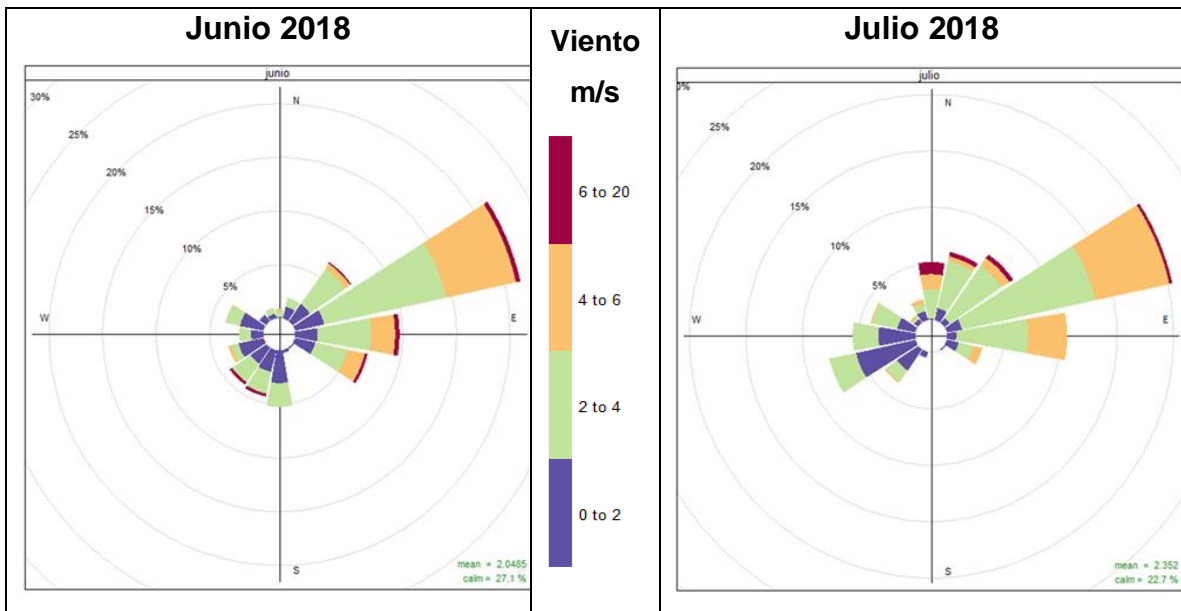


Figura 4.13 Rosas de viento Junio 2018 y Julio 2018

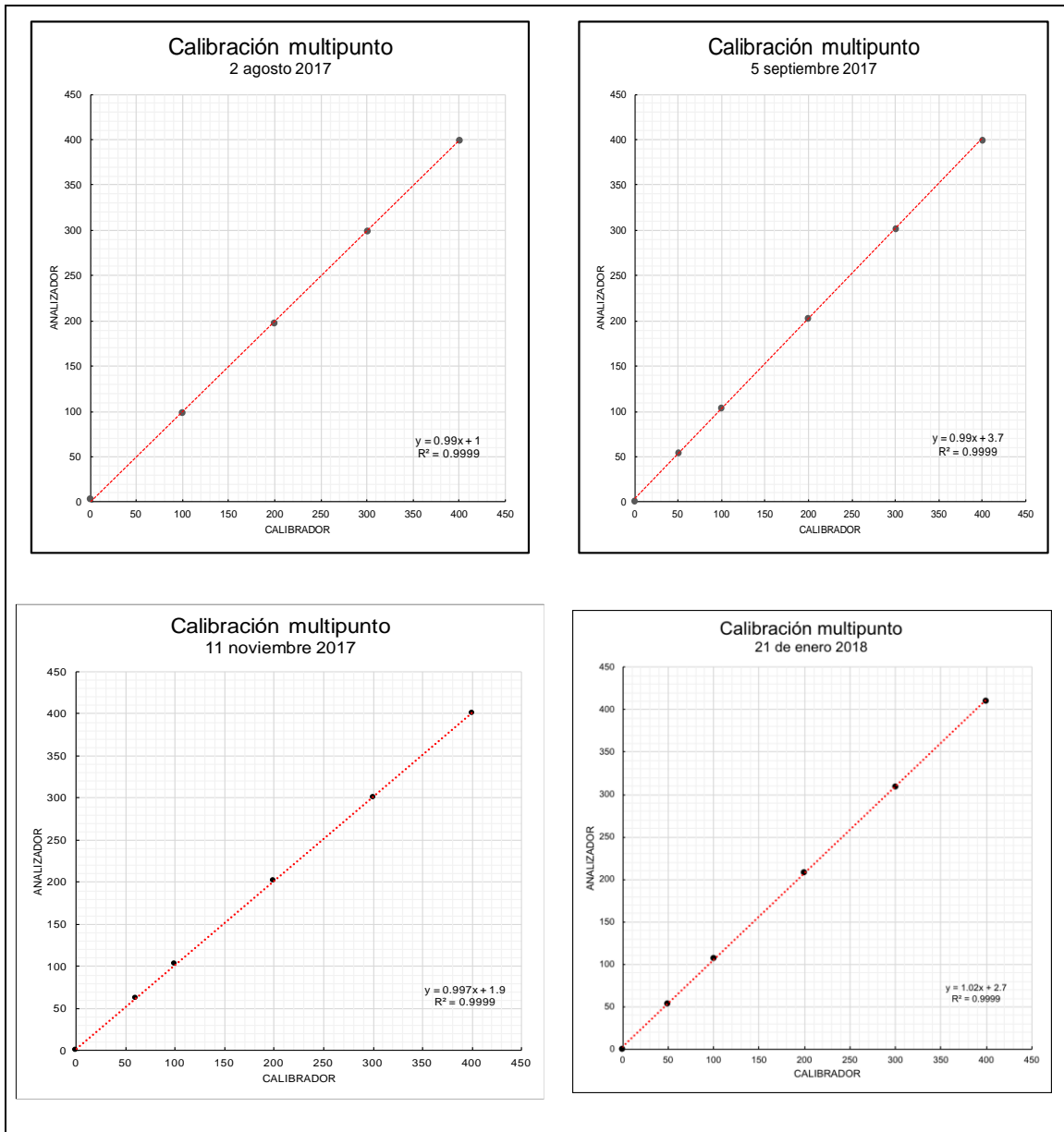
### 4.3. Monitoreo de SO<sub>2</sub>

El periodo de estudio se estableció del 01/08/2017 al 31/07/2018, durante este periodo se determinó de manera horaria la concentración de SO<sub>2</sub> en el aire ambiente desde la estación de monitoreo ubicada dentro de la zona de estudio.

Con el fin de asegurar la correcta operación del analizador de SO<sub>2</sub> se implementaron acciones para el control y aseguramiento de la calidad, que incluyen la verificación continua de la respuesta del instrumento con aire cero denominada “línea base”, la verificación de un punto para la evaluación de la precisión y calibración multipunto. La calibración multipunto se realiza una vez cada dos meses, cuando la variación de la respuesta del punto de precisión se encuentra fuera del intervalo de  $\pm 10\%$ , o cuando se aplique un mantenimiento mayor al instrumento. Periódicamente se verifican los parámetros operativos del instrumento para anticipar cualquier desviación en el desempeño.

Se realizaron cuatro calibraciones multipunto, la primera al arranque del periodo de estudio, 2 de agosto de 2018 (realizada por el proveedor del equipo), la segunda el 5 de septiembre, la tercera el 11 de noviembre y la más reciente el 21 de enero, realizadas por el personal del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Figura 4.14).

En ninguna de las calibraciones fue necesario realizar ajustes a la respuesta en el punto alto o puntos intermedios de la calibración, lo cual indica un buen desempeño del instrumento durante el periodo de estudio.



**Figura 4.14 Calibraciones multipunto Teledyne API T100**

En la Figura 4.15 se observa que la concentración de SO<sub>2</sub> se comporta de manera irregular, con datos de altas concentraciones en marzo de 2017, con una disminución aparentemente cercana a cero a partir de junio de 2018. Algunos días la concentración alcanzó valores de hasta 86 µg/m<sup>3</sup>.

Para facilitar el análisis de los resultados se ordenaron los datos de menor a mayor (Figura 4.16) destacando que el 90% de los datos totales se encuentra por debajo

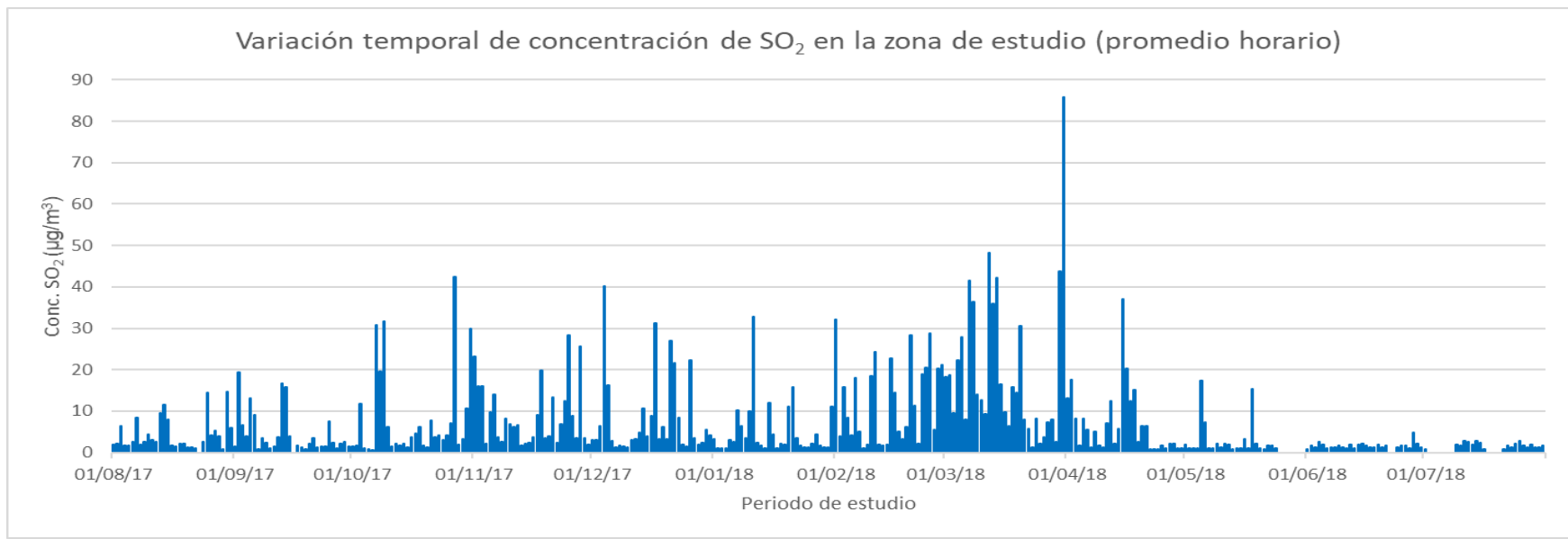
de 4.5 µg/m<sup>3</sup>, el 97% por debajo de 12.9 µg/m<sup>3</sup>, atribuyendo únicamente el 3% del total a eventos en los que las concentraciones fueron más altas de lo normal, atribuyéndolos a actividades alrededor de la estación de monitoreo.

Con el fin de establecer en qué condiciones se dieron estos casos de mayor concentración se realizaron análisis correspondientes a la variación temporal del contaminante, para así delimitar las posibles fuentes de emisión de SO<sub>2</sub>.

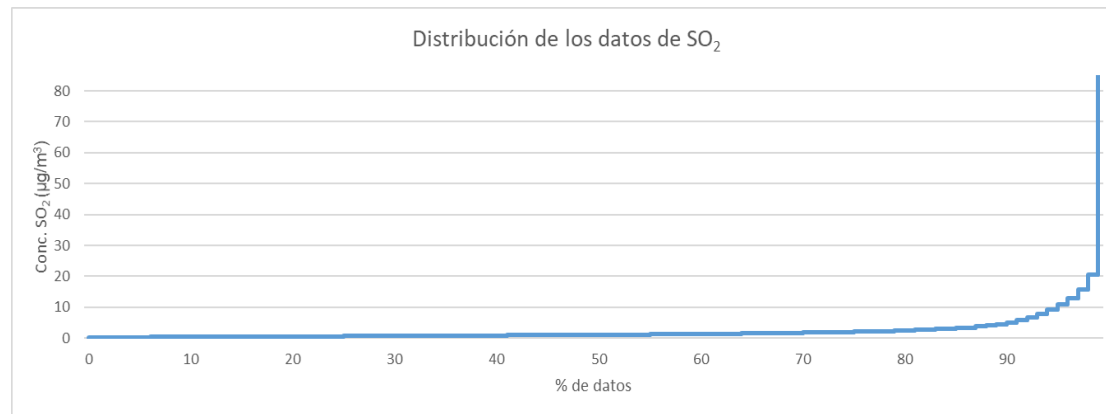
En la Figura 4.17 se presentan los análisis correspondientes al comportamiento global en todo el periodo de estudio, en la parte superior se encuentran agrupados los días de la semana donde de manera general para todos los días las concentraciones aumentan a partir de las 12 horas, obteniendo un máximo 8 µg/m<sup>3</sup>.

En la esquina inferior izquierda el análisis corresponde a la variación horaria donde el patrón es claro con una baja concentración antes de las 6 horas y aumentando hasta su nivel máximo a las 16 horas. El análisis mensual muestra un nivel máximo en el mes de marzo, a partir del cual disminuye drásticamente hasta julio. Finalmente, la variación diaria muestra una tendencia clara los domingos, donde se encuentra el nivel mínimo. Para evaluar los patrones analizados se utilizaron las variables meteorológicas de viento con el fin de analizar la dirección e intensidad en los casos de mayor concentración.

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Resultados y análisis**



**Figura 4.15 Monitoreo de SO<sub>2</sub> en el periodo de estudio**



**Figura 4.16 Distribución de concentración de monitoreo de SO<sub>2</sub>**

### Variación de SO<sub>2</sub> (promedio horario)

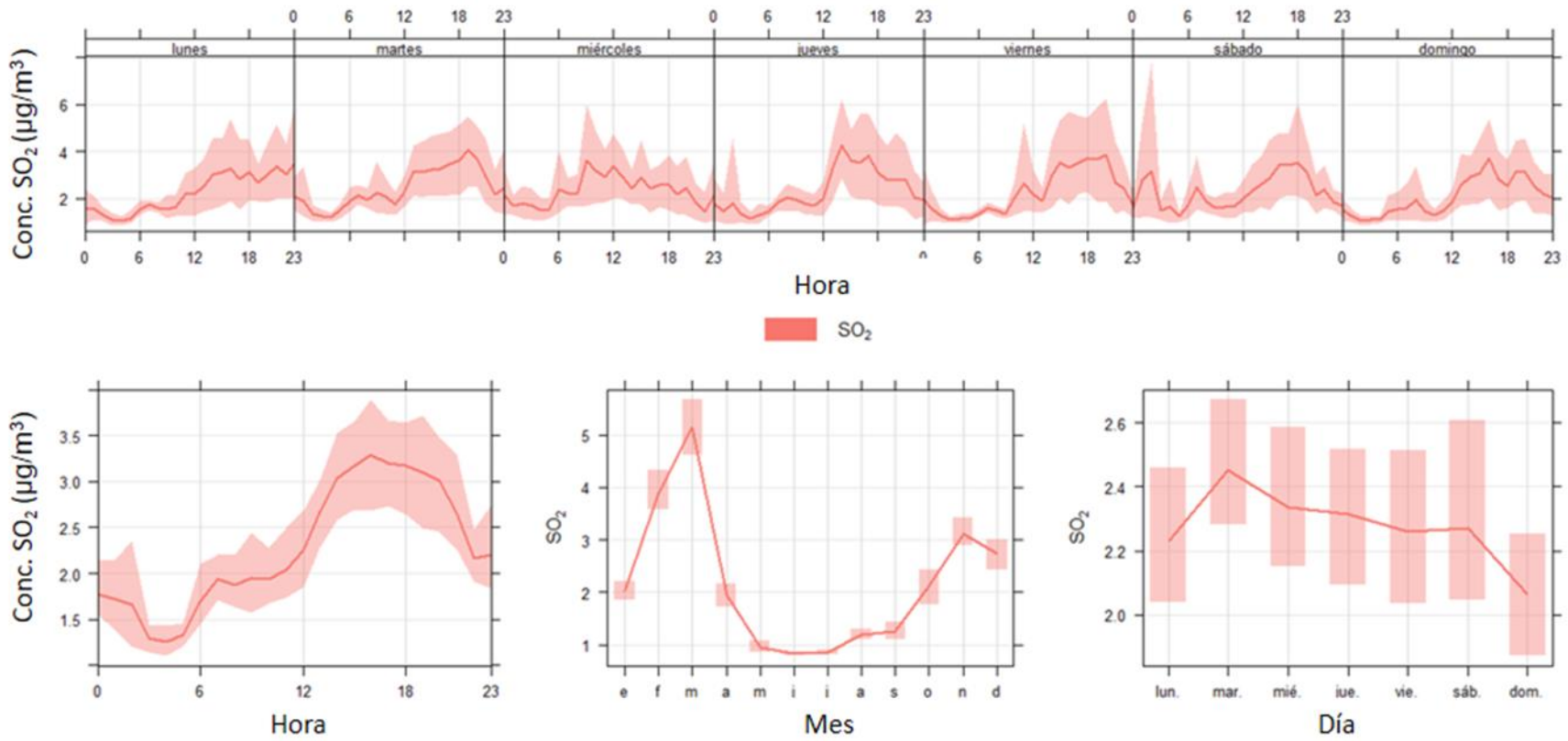


Figura 4.17 Análisis de variabilidad de SO<sub>2</sub>

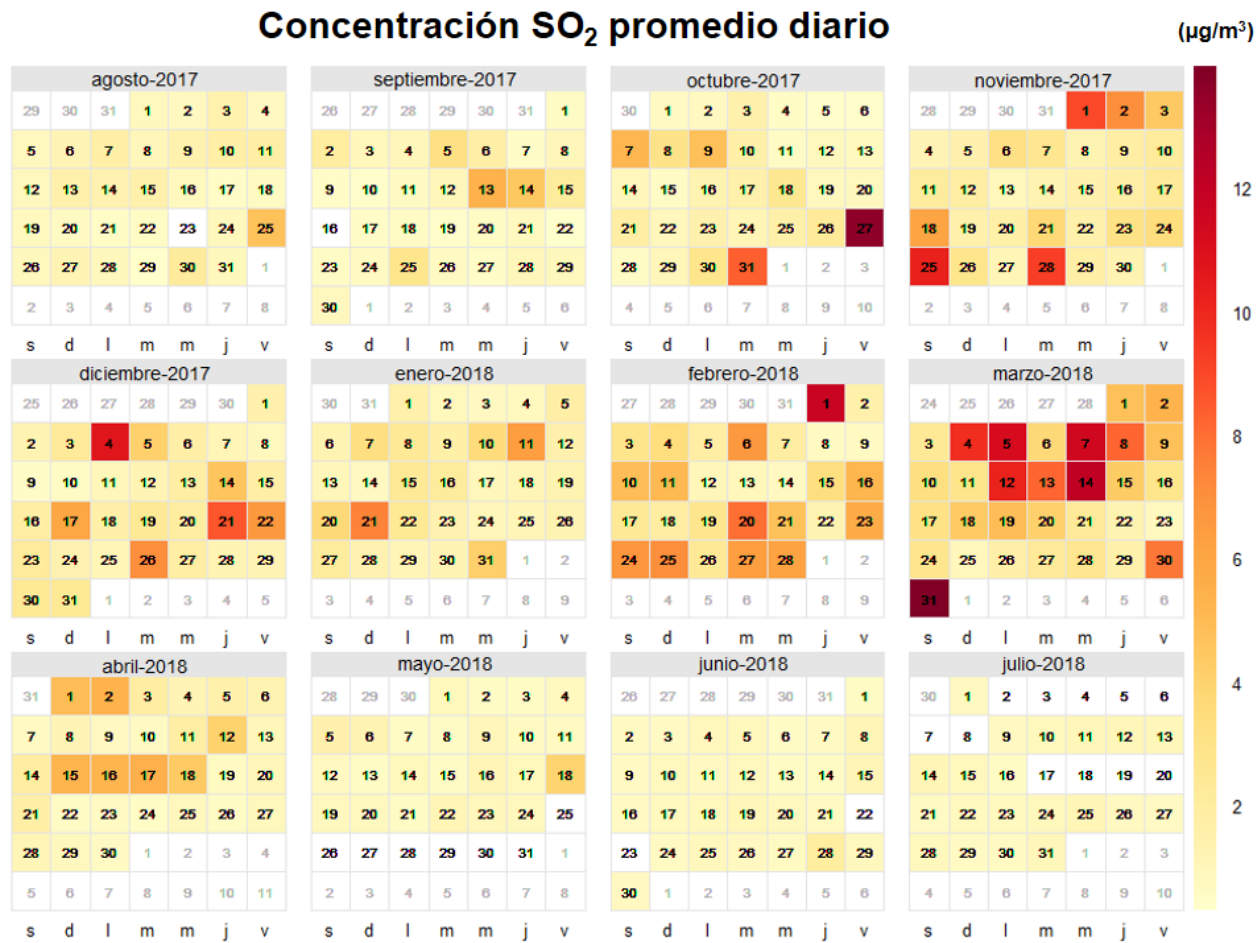


Figura 4.18 Concentración diaria de SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en la zona de estudio



### **4.3.1. Rosas de SO<sub>2</sub>**

Una herramienta útil para evaluar el origen de las fuentes de los contaminantes es la llamada Rosa de contaminantes, se elaboran e interpretan de manera idéntica a la Rosa de viento, la única diferencia es que, en vez de graficar la velocidad del viento, se utiliza la concentración del contaminante, permitiendo evaluar cuál fue la dirección o direcciones desde las que proviene la mayor concentración.

Se realizaron observaciones derivadas de los análisis de las rosas mensuales de SO<sub>2</sub> (Figura 4.19 - Figura 4.24):

Los meses de agosto, septiembre y octubre de 2017 presentan una mayor contribución de SO<sub>2</sub> proveniente de la dirección sureste, el mes de noviembre muestra concentraciones altas provenientes de la dirección norte, noreste y sureste.

Diciembre de 2017 y enero de 2018 vuelven a mostrar un comportamiento mayor proveniente de la dirección sureste, febrero y abril de 2018 comparten concentraciones altas del sureste, este y noreste, este último con una fuerte contribución de la zona norte al igual que abril de 2018.

A partir de mayo y hasta julio de 2018 disminuyen las concentraciones altas, y la dirección que más se presenta es del noreste.

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
Resultados y análisis

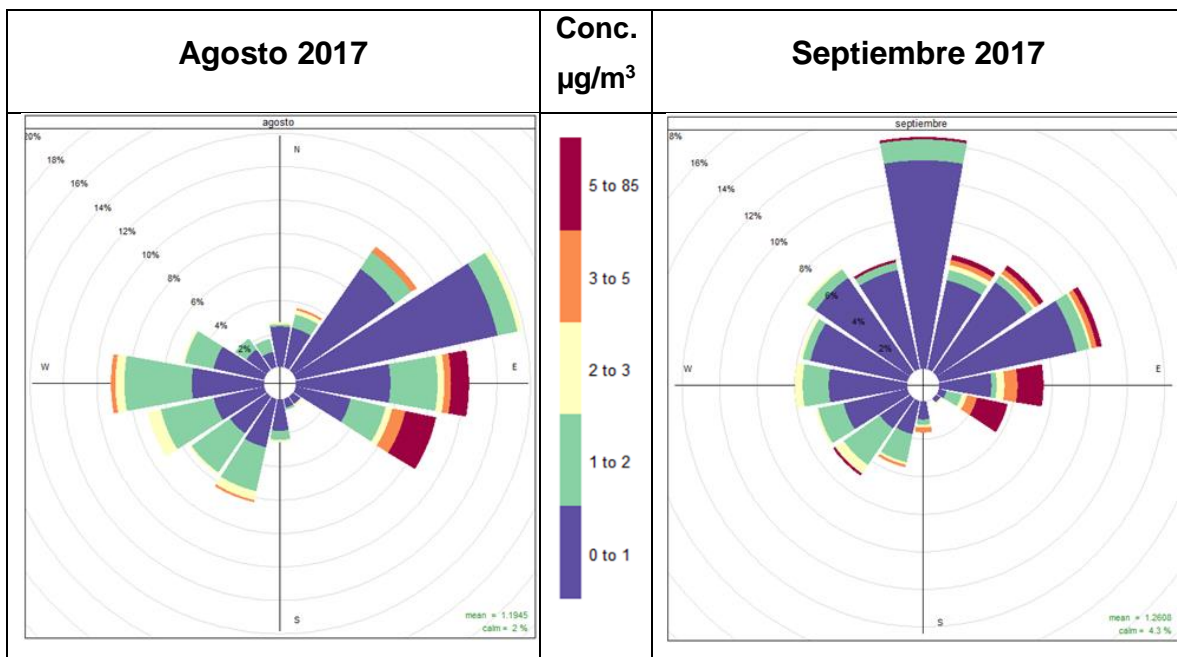


Figura 4.19 Rosas de SO<sub>2</sub> Agosto 2017 y Septiembre 2017

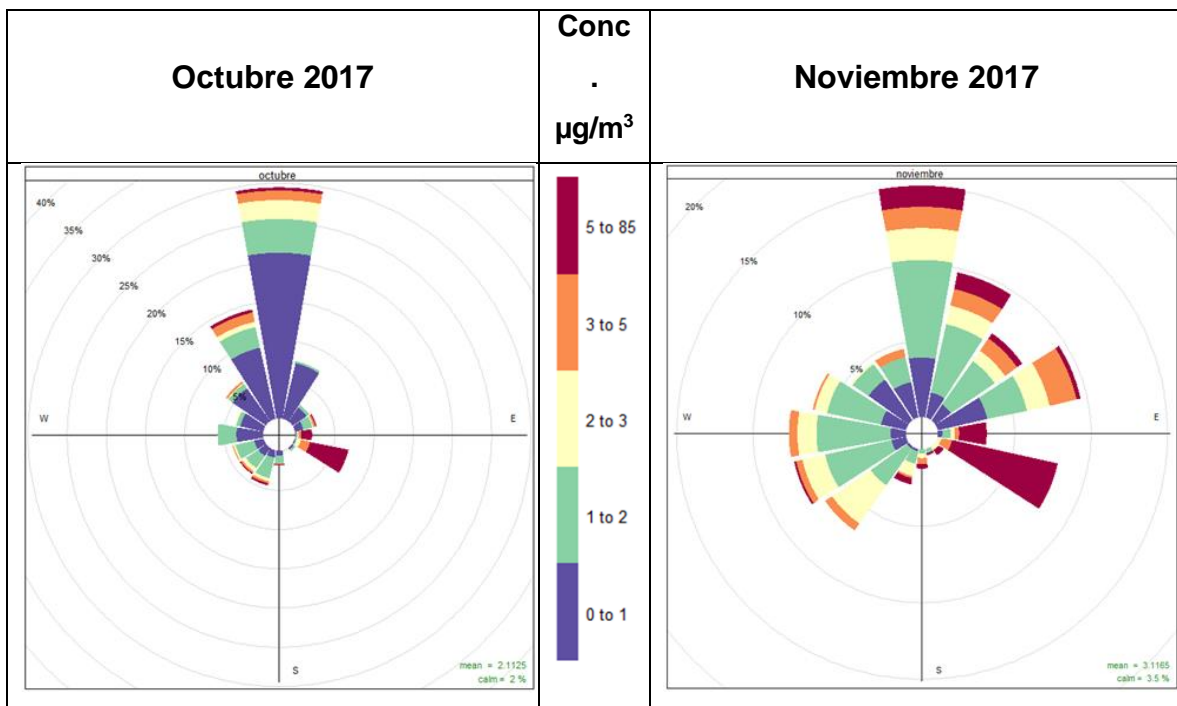
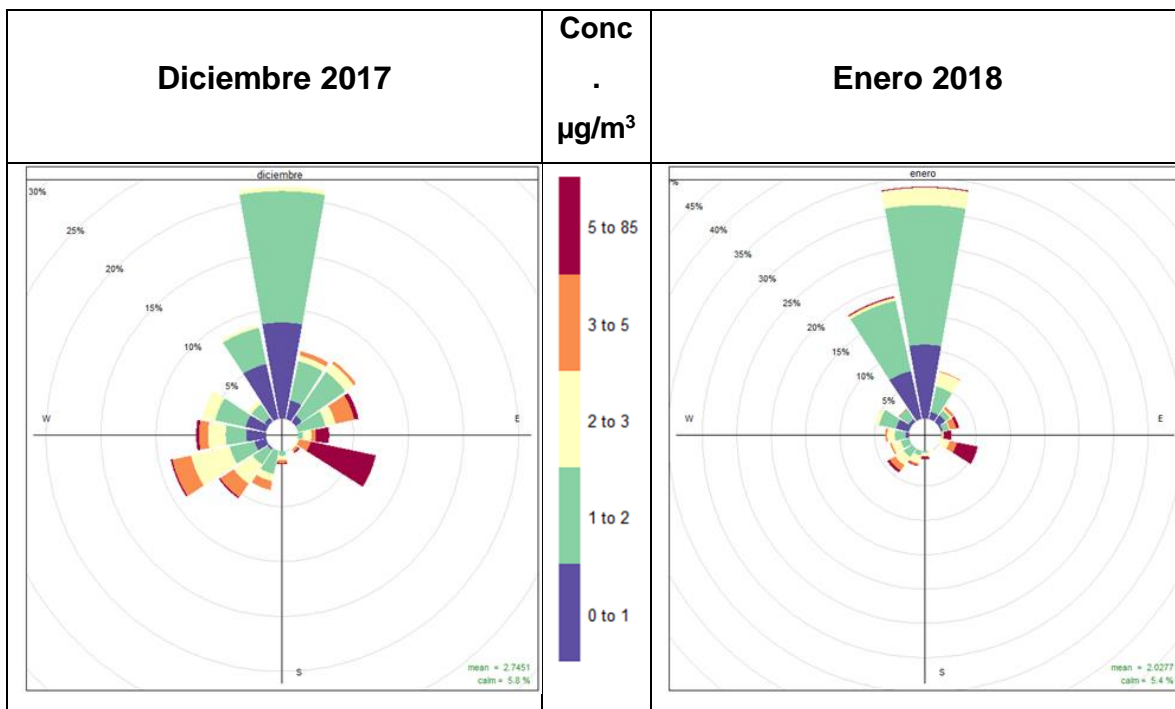
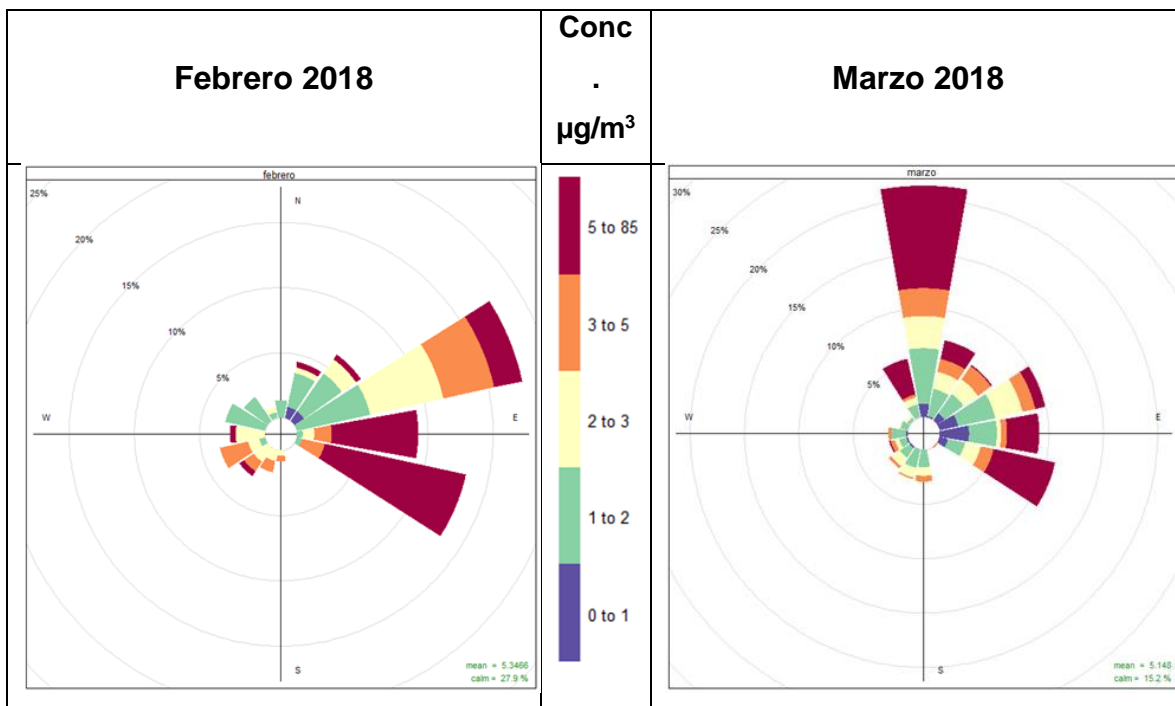


Figura 4.20 Rosas de SO<sub>2</sub> Octubre 2017 y Noviembre 2017

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Resultados y análisis**



**Figura 4.21 Rosas de SO<sub>2</sub> Diciembre 2017 y Enero 2018**



**Figura 4.22 Rosas de SO<sub>2</sub> Febrero 2018 y Marzo 2018**

Prevención del deterioro significativo por SO<sub>2</sub> por la operación del Recinto Portuario de Veracruz  
**Resultados y análisis**

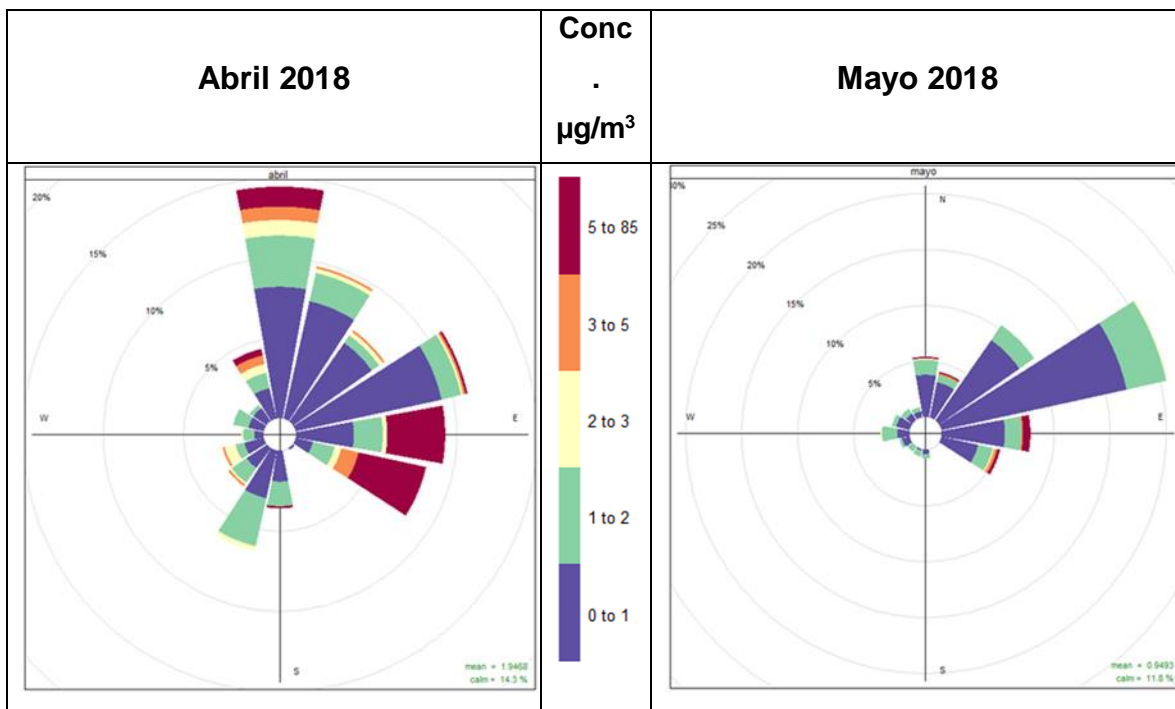


Figura 4.23 Rosas de SO<sub>2</sub> Abril 2018 y Mayo 2018

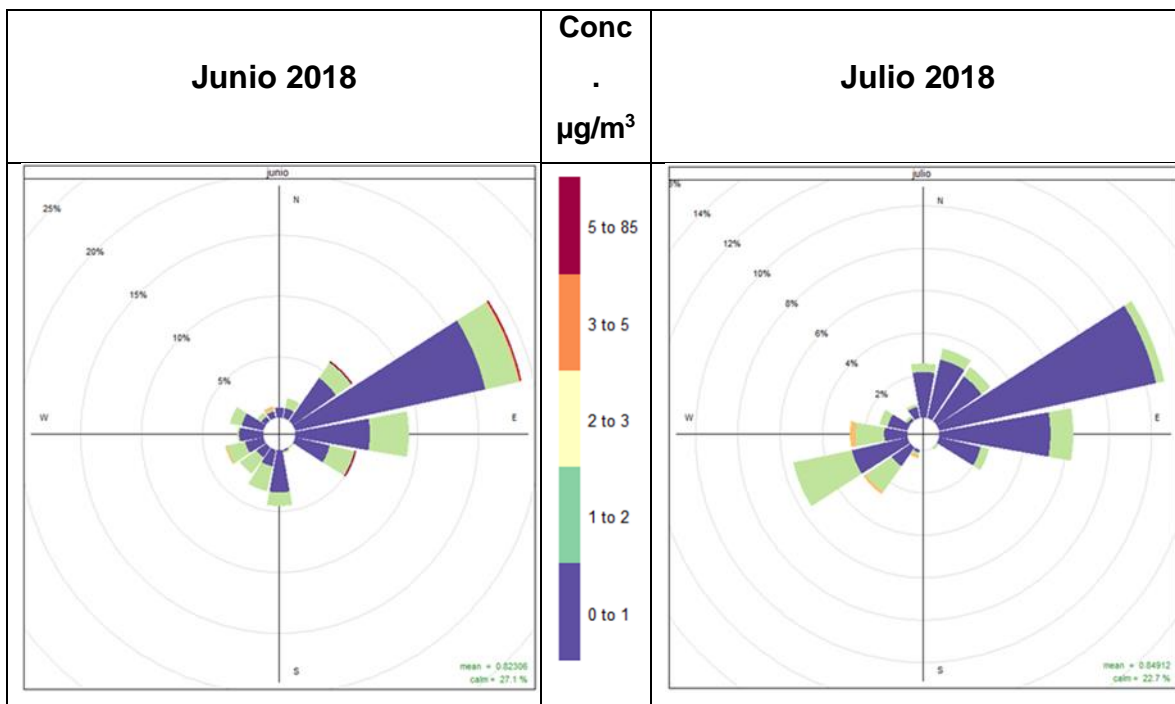
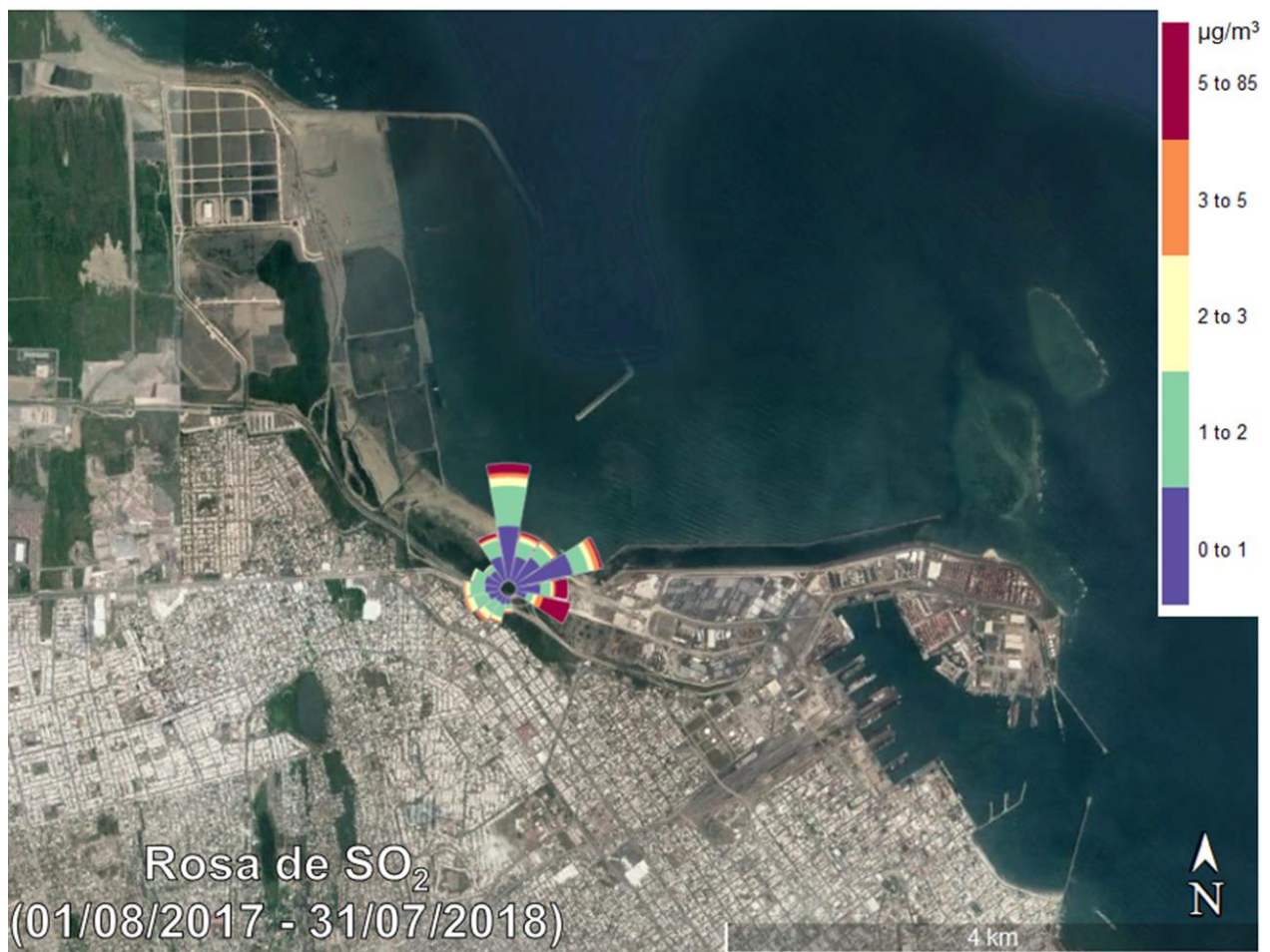


Figura 4.24 Rosas de SO<sub>2</sub> Junio 2018 y Julio 2018

Para sintetizar los resultados de las Rosas mensuales de viento, se realizó una Rosa de SO<sub>2</sub> global (Figura 4.25) que considera todo el periodo de estudio y se muestra en el mapa del RPV, en este ejercicio se observa que las concentraciones mayores provienen de la dirección norte, justo de donde se realizan actividades de construcción del nuevo puerto, así como de la dirección sureste, en donde se ubica el puerto actual que opera de manera normal.

Derivado del resultado se solicitó a APIVER el registro de actividades relacionadas con la emisión de SO<sub>2</sub> en la zona de construcción del puerto nuevo, obteniendo que se encuentra en operación un buque realizando dragado de manera continua al menos a un kilómetro de distancia de la estación de monitoreo, por lo que ésta contribución puede estar relacionada con la actividad de dragado.



**Figura 4.25 Rosa de SO<sub>2</sub> global**

## 4.4. Inventario de emisiones de las actividades portuarias

Las emisiones estimadas en el RPV corresponden a la disponibilidad de datos, que en este caso fue la base de datos mensual de entrada y salida de buques, es decir se estableció como una fuente a la operación de los buques cuando realizan maniobras de carga y descarga de mercancías, o bien, se encuentren en reparación o espera de suministros. Además, para el estudio de calidad del aire, esta etapa es la que más tiempo se desarrolla dentro de la zona de estudio.

Para cumplir con el objetivo del estudio se calcularon las emisiones en la etapa de hotelling, aproximando el resultado de acuerdo a las características de los buques, tiempo de estadía, el peso de la carga y se realizó de manera individual por buque.

Los datos considerados se encuentran disponibles en los reportes estadísticos de la página electrónica de [APIVER](#).

En la Tabla 4.2 se muestra el resumen mensual de las emisiones calculadas para los contaminantes: óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles no metano, bióxido de azufre, partículas suspendidas totales, partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros, bióxido de carbono y metano.

Las emisiones principales derivadas de esta actividad son de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> respectivamente y muestran un comportamiento uniforme.

**Tabla 4.2 Inventario de emisiones APIVER 2017-2018**

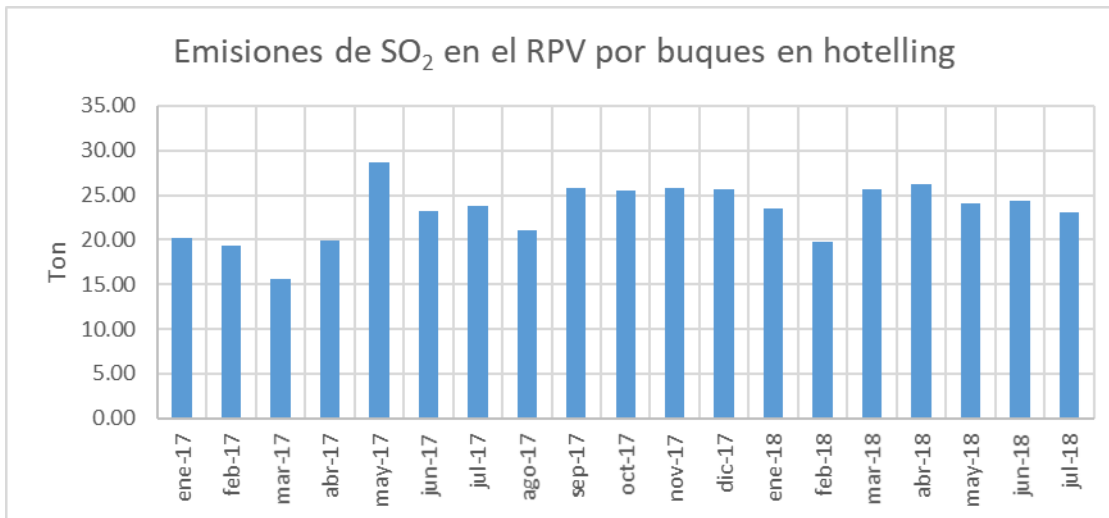
| MES               | Buques | Ton/mes         |      |      |                 |      |                  |                   |                 |                 |
|-------------------|--------|-----------------|------|------|-----------------|------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                   |        | NO <sub>x</sub> | CO   | NM   | SO <sub>2</sub> | PST  | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |
| ene-17            | 168    | 103.43          | 7.53 | 2.82 | <b>20.24</b>    | 2.97 | 2.43             | 2.25              | 5675.93         | 0.05            |
| feb-17            | 172    | 95.52           | 6.98 | 2.60 | <b>19.32</b>    | 2.76 | 2.26             | 2.10              | 5243.00         | 0.05            |
| mar-17            | 185    | 113.78          | 8.04 | 3.11 | <b>15.56</b>    | 3.06 | 2.50             | 2.32              | 6229.29         | 0.06            |
| abr-17            | 173    | 108.73          | 7.87 | 2.96 | <b>19.89</b>    | 3.08 | 2.52             | 2.34              | 5963.90         | 0.06            |
| may-17            | 189    | 126.99          | 9.39 | 3.45 | <b>28.73</b>    | 3.76 | 3.08             | 2.86              | 6977.25         | 0.07            |
| jun-17            | 171    | 110.34          | 8.09 | 3.00 | <b>23.15</b>    | 3.21 | 2.63             | 2.44              | 6058.35         | 0.06            |
| jul-17            | 184    | 120.86          | 8.81 | 3.29 | <b>23.77</b>    | 3.47 | 2.84             | 2.64              | 6632.60         | 0.06            |
| ago-17            | 172    | 118.75          | 8.57 | 3.24 | <b>21.11</b>    | 3.34 | 2.74             | 2.54              | 6512.23         | 0.06            |
| sep-17            | 167    | 119.73          | 8.80 | 3.25 | <b>25.73</b>    | 3.50 | 2.87             | 2.66              | 6575.35         | 0.06            |
| oct-17            | 159    | 118.87          | 8.74 | 3.23 | <b>25.53</b>    | 3.48 | 2.85             | 2.64              | 6528.10         | 0.06            |
| nov-17            | 165    | 121.55          | 8.93 | 3.31 | <b>25.78</b>    | 3.55 | 2.91             | 2.69              | 6674.75         | 0.06            |
| dic-17            | 169    | 119.69          | 8.80 | 3.25 | <b>25.63</b>    | 3.50 | 2.87             | 2.66              | 6573.03         | 0.06            |
| ene-18            | 144    | 105.70          | 7.80 | 2.87 | <b>23.54</b>    | 3.12 | 2.56             | 2.37              | 5807.02         | 0.05            |
| feb-18            | 145    | 90.38           | 6.66 | 2.45 | <b>19.78</b>    | 2.66 | 2.18             | 2.02              | 4964.34         | 0.05            |
| mar-18            | 165    | 108.05          | 8.03 | 2.93 | <b>25.69</b>    | 3.24 | 2.65             | 2.46              | 5939.61         | 0.06            |
| abr-18            | 172    | 112.71          | 8.36 | 3.06 | <b>26.19</b>    | 3.36 | 2.75             | 2.56              | 6194.34         | 0.06            |
| may-18            | 183    | 128.22          | 9.30 | 3.49 | <b>24.00</b>    | 3.64 | 2.99             | 2.76              | 7033.86         | 0.07            |
| jun-18            | 174    | 112.65          | 8.29 | 3.06 | <b>24.37</b>    | 3.30 | 2.71             | 2.51              | 6186.86         | 0.06            |
| jul-18            | 176    | 120.90          | 8.78 | 3.29 | <b>23.00</b>    | 3.45 | 2.82             | 2.62              | 6632.98         | 0.06            |
| <b>PROMEDIO</b>   |        | 113.52          | 8.30 | 3.09 | <b>23.21</b>    | 3.29 | 2.69             | 2.50              | 6231.73         | 0.06            |
| <b>MAX</b>        |        | 128.22          | 9.39 | 3.49 | <b>28.73</b>    | 3.76 | 3.08             | 2.86              | 7033.86         | 0.07            |
| <b>MIN</b>        |        | 90.38           | 6.66 | 2.45 | <b>15.56</b>    | 2.66 | 2.18             | 2.02              | 4964.34         | 0.05            |
| <b>DESV. STD.</b> |        | 9.97            | 0.73 | 0.27 | <b>3.18</b>     | 0.29 | 0.24             | 0.22              | 546.81          | 0.01            |

## 4.5. Simulación de la dispersión de SO<sub>2</sub> por la operación del RPV

El modelo de dispersión permite establecer relaciones entre fuentes de emisión y receptores, los cuales pueden ser coordenadas específicas o toda una zona determinada. Para este trabajo se caracterizó a todas las fuentes emisoras como una sola de tipo puntual, es decir, que todas las emisiones de SO<sub>2</sub> de cada buque se liberan por la misma fuente.

La información necesaria para realizar este estudio fue la siguiente:

- Información meteorológica, proveniente de datos de re análisis de la zona de estudio, procesados en el programa MM5 o WRF para el modelo CALMET. Esta información fue facilitada por colaboradores de la SCA.
- Información geofísica, descargada directamente por el procesador de CALPUFF.
- Información de la fuente, considerada como la suma de todos los buques en hotelling en el RPV determinada en el inventario de emisiones (Figura 4.26).



**Figura 4.26 Emisiones de SO<sub>2</sub> APIVER 2017-2018**



Para determinar si la operación del RPV impacta en la calidad del aire, se aplicó el modelo de dispersión CALPUFF a 3 casos representativos en cada mes, seleccionando 36 días en los que se representaran los casos mínimo, promedio y máximo, los cuales se presentan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Casos de estudio en CALLPUFF**

| <b>Días seleccionados para su modelación en CALPUFF</b> |    |    |                 |    |    |              |    |    |
|---|----|----|-----------------|----|----|--------------|----|----|
| Agosto 2017   |    |    | Septiembre 2017 |    |    | Octubre 2017 |    |    |
| 1   | 16 | 24 | 8               | 13 | 25 | 7            | 27 | 31 |
| Noviembre 2017  |    |    | Diciembre 2017  |    |    | Enero 2018   |    |    |
| 3   | 14 | 25 | 4               | 21 | 31 | 11           | 21 | 31 |
| Febrero 2018  |    |    | Marzo 2018      |    |    | Abril 2018   |    |    |
| 1   | 10 | 20 | 1               | 14 | 31 | 12           | 17 | 30 |
| Mayo 2018   |    |    | Junio 2018      |    |    | Julio 2018   |    |    |
| 5   | 18 | 24 | 5               | 19 | 30 | 9            | 15 | 30 |

Para la caracterización de la fuente se ingresó un valor promedio para las emisiones de SO<sub>2</sub> y las características se especificaron considerando las condiciones normales de emisión de un buque:

- Tipo de fuente de emisión: Puntual
- Ubicación: En el centro del RPV (19°12'41.02"N, 96° 8'2.37"O).
- Altura de la fuente: 30 m.
- Diámetro de la fuente: 1 m.
- Temperatura de emisión: 227 °C
- Emisión de SO<sub>2</sub>: Promedio mensual del inventario de emisiones.

Las condiciones del área de simulación son las siguientes:

- Centro del dominio de simulación: 19°10'59.94"N, 96°10'13.78"O.
- Tamaño del dominio: 40 km x 40 km.
- Tamaño de celda: 1 km x 1 km.

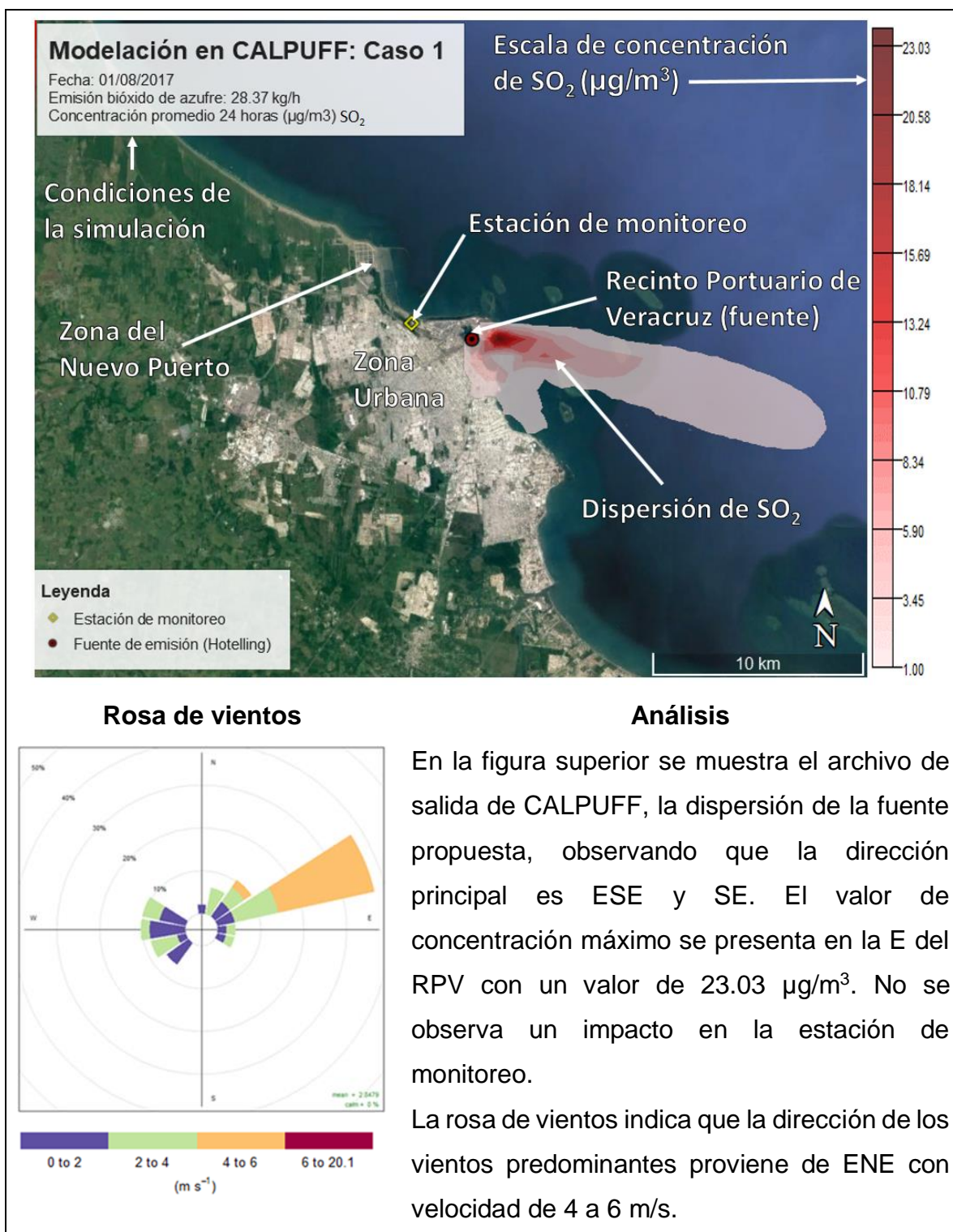
En la Figura 4.27 se observa el dominio de simulación, la ubicación de la estación de monitoreo en el indicador de color rojo y la estación de monitoreo con el indicador blanco. El tamaño del dominio se seleccionó con el objetivo determinar el área de influencia del RPV, además de que se recomienda el uso del modelo a grandes distancias.

Se presenta el resultado de la simulación por el programa CALPUFF para cada caso de estudio, donde se especifica la fecha simulada en periodos de 24 horas, ubicación de la fuente de emisión y de la estación de monitoreo y la escala de colores para la concentración de SO<sub>2</sub>.



*Figura 4.27 Dominio de la modelación CALPUFF*

A continuación, se muestran los 36 casos de estudio seleccionados a lo largo del periodo para analizar de manera representativa la dispersión de SO<sub>2</sub>, además se muestra la rosa de vientos del mismo día obtenida de los datos de monitoreo para comparar la dirección de vientos predominantes a 10 metros con respecto a la información global de re análisis procesada en WRF para la aplicación del modelo CALPUFF.



**Figura 4.28 Caso de estudio CALPUFF 01/08/2017**

Los casos de estudio se encuentran en la sección de anexos para su revisión detallada, a manera de resúmenes se observa que la zona urbana que rodea al RPV no se ve afectada de forma significativa por la fuente propuesta de SO<sub>2</sub> ya que de acuerdo a las simulaciones con el modelo CALPUFF la concentración máxima se encuentra en el caso 23 con un valor de 48.82 µg/m<sup>3</sup>. El radio máximo de influencia fue de 20 km mar adentro en la dirección NE.

Además, se compararon en cada caso los parámetros meteorológicos medidos en la estación de monitoreo con las dispersiones simuladas con el modelo, concluyendo que existen diferencias para los casos 2 y 9 principalmente en la dirección del viento debido a que los datos ingresados al modelo se interpolan a través del modelo CALMET, por lo que predominan las corrientes sinópticas. A pesar de las diferencias en la dirección de viento, en ambos casos se observa el fenómeno de brisa mar-tierra, lo que indica que el modelo representa correctamente la dispersión por la operación del Puerto de Veracruz.

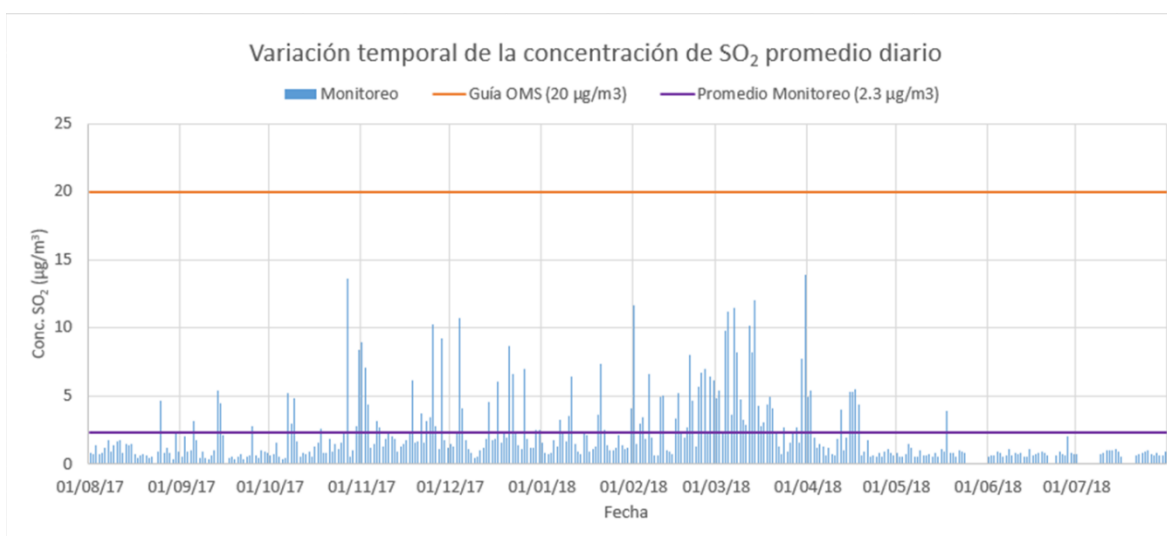
#### **4.6. Propuesta del PSD**

Los resultados indican que el promedio anual de la concentración horaria de SO<sub>2</sub> en la zona de estudio, medido en la estación de monitoreo para el periodo de 01/08/2017 a 31/07/2018 fue de 2.3 µg/m<sup>3</sup>, además la distribución de los datos indicó que el 90% de los datos se encuentran por debajo de 4.5 µg/m<sup>3</sup>, el 10% restante toma valores de hasta 85.8 µg/m<sup>3</sup>. Estos resultados son la base para establecer los incrementos del PSD, de acuerdo a los requisitos se requiere que la zona de estudio cumpla con los índices nacionales de calidad del aire, en este caso la NOM-022-SSA1-2010 y posteriormente se establece un límite inferior que garantice las condiciones óptimas.

La OMS establece índices de calidad del aire que denomina como guías ya que son de carácter voluntario, usualmente debajo de las normas internacionales fundamentados en estudios recientes. Para el SO<sub>2</sub> actualmente la guía del valor máximo recomendado es de 20 µg/m<sup>3</sup> promedio diario (OMS, 2006).

En México los índices de calidad del aire se proponen con el objetivo de proteger la salud de la población, únicamente se cuenta con este tipo de normatividad, pero en otros países se cuenta además con índices secundarios encaminados a la protección de los ecosistemas, es por esta razón que se propone este estudio para mantener por debajo de los límites máximos las condiciones ambientales por SO<sub>2</sub>.

Se tomó como referencia para establecer el PSD el valor de 20 µg/m<sup>3</sup> como se indicó anteriormente es lo recomendado por la OMS y de acuerdo a estos resultados se puede cumplir cabalmente ya que los niveles de SO<sub>2</sub> en esta zona están por debajo de la norma (Figura 4.29).



**Figura 4.29 Propuesta del incremento del PSD**

Es importante considerar que los valores de concentración obtenidos en la estación de monitoreo representan en promedio los valores de fondo y que permitirán evaluar en las siguientes etapas del proyecto la evolución de la calidad del aire en la zona. El siguiente paso del PSD establece el establecimiento de una red de monitoreo para caracterizar de manera integral a la zona de estudio y así prevenir el deterioro significativo por SO<sub>2</sub>.

Se llevó a cabo la actualización del inventario de emisiones en el periodo de enero de 2017 a julio de 2018 por medio de factores de emisión para la operación de

buques, considerados como las fuentes principales de emisión de SO<sub>2</sub>, obteniendo un promedio de 23.21 Ton/mes.

Se realizó la selección, diseño, instalación y operación de la estación de monitoreo de SO<sub>2</sub> cumpliendo con la normatividad mexicana y con estándares internacionales, asegurando así la calidad de los datos y la validez del estudio. La concentración de SO<sub>2</sub> máxima horaria fue de 85.20 µg/m<sup>3</sup>, mientras que la concentración máxima promedio diario fue de 13.95 µg/m<sup>3</sup> para el día 31/03/2018.

Con respecto a la NOM-022-SSA1-2010 el límite máximo diario de concentración de SO<sub>2</sub> en aire ambiente está establecido en 288 µg/m<sup>3</sup>, la concentración medida en la zona de estudio es 4.84% del valor de la norma.

Se realizó la simulación de la concentración de SO<sub>2</sub> en CALPUFF para 36 días del año, observando una relación entre la actividad portuaria actual en la calidad del aire del RPV con un máximo de 48.82 µg/m<sup>3</sup>.

El incremento permisible para el PSD se estableció considerando el valor guía para este contaminante por la OMS, quedando en 17 µg/m<sup>3</sup> promedio diario, con el fin de mantener la calidad del aire en un estado satisfactorio.

El uso del PSD como política ambiental facilita la toma de decisiones para permitir el desarrollo sustentable en zonas con actividades económicas, considerando los efectos potenciales que representan los proyectos en el deterioro de las condiciones ambientales, por lo que su aplicación representa un avance enfocado a la prevención.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- Se realizó la aplicación del PSD alrededor del recinto portuario de Veracruz como herramienta de política ambiental que facilite la toma de decisiones en proyectos de desarrollo económico que se llevarán a cabo en los próximos años con el fin de preservar la calidad ambiental permitiendo el desarrollo sustentable en la zona.
- El desarrollo del inventario de emisiones derivadas de las actividades portuarias permitió complementar y actualizar las fuentes que se presentan en puertos con actividades económicas importantes, destacando para el caso de estudio, las asociadas al uso de combustibles fósiles en buques y tiempos de operación.
- El monitoreo automático permitió evaluar la concentración SO<sub>2</sub> en el aire ambiente en un periodo representativo, observando que la zona portuaria no presenta valores que excedan los límites máximos permisibles para SO<sub>2</sub>, obteniendo concentraciones mínimas o de fondo.
- Se observó que el sistema planteado mediante el modelo de dispersión presentó dos comportamientos específicos debido al efecto de la brisa tierra mar.

### 5.2. Recomendaciones

- Continuar con el monitoreo automático para la evaluación del impacto potencial derivado de las actividades de ampliación que se desarrollarán en los próximos años para establecer medidas preventivas de la contaminación por SO<sub>2</sub>.



- Aplicar la metodología del PSD a los contaminantes criterio y establecer límites en los incrementos para preservar la calidad del aire en un programa integral.
- Uso de tecnologías recientes para el control de la contaminación en la zona de estudio ya que se prevé un desarrollo importante debido al crecimiento del puerto.
- Realizar un estudio integral de emisiones no solo en la zona del RPV, sino en toda la ciudad ya que se realizan actividades que impactan en la calidad del aire.
- Solicitar información precisa a APIVER para la incorporación de fuentes de emisión a la atmósfera de contaminantes normados y contribuir a la política de puertos verdes.
- Aumentar el número de estaciones dentro del RPV y al interior de la zona urbana con el fin de asegurar la calidad del aire.
- Promover medidas existentes para reducción de emisiones de buques como el uso de energías renovables, hacer más eficiente las operaciones portuarias para disminuir el tiempo de operación en puertos y llevar a cabo el mantenimiento de buques.

## Referencias

- APIVER (2010). Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A de C.V. *Manual de políticas, bases y lineamientos, en materia de obras públicas y servicios relacionados con las mismas, de la Administración Portuaria Integral de Veracruz, S.A. de C.V.* Recuperado el 13 de agosto de 2016 de: [https://nanopdf.com/download/manualdepoliticaspdf\\_pdf](https://nanopdf.com/download/manualdepoliticaspdf_pdf)
- APIVER. (2012). *Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A DE C.V.* Recuperado el 2 de mayo de 2016, de <http://www.puertodeveracruz.com.mx/apiver/quienes-somos>
- APIVER. (2016). *Administración Portuaria Integral de Veracruz S.A DE C.V. Plan Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz 2011- 2016.* Recuperado el 20 de noviembre de 2016, de <http://www.puertodeveracruz.com.mx/wp-content/uploads/2016/10/PMDP-2011-2016.pdf>
- CCA. (2011). Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. *Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte.* Québec, Canadá. Octubre. 61 pp.
- CONABIO. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. *Climas.* Recuperado el 20 de noviembre de 2016, de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/clima1mgw>
- CORINAIR. (1996). Core and Inventory Air Emissions. *Combustion in energy & transformation industries: Emission Inventory Guidebook.* Combustion plants as point sources. European Environment Agency. Pp 59.
- Entec UK Limited. (2007), *Ship Emissions Inventory Mediterranean Sea, Final Report.* Concawe.
- INECC. (2014). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Contaminantes criterio.* Recuperado el 20 de 02 de 2014, de <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>
- INEGI. (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Veracruz de Ignacio de la Llave. Recuperado de

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/poblacion/default.aspx?tema=me&e=30>

- OMS (2006). Organización Mundial de la Salud. *Guías de calidad de aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Actualización mundial 2005. Resumen de la evaluación de riesgos. Ginebra, Suiza. 21
- Pérez, R. (2004). *485 años de la fundación del Puerto de Veracruz*. Revista Archipiélago, UNAM. Pp. 25-26.
- POLB. (2014). *Port of Long Beach*. Recuperado el 2 de mayo de 2016 de <http://spanish.polb.com/about/default.asp>
- SSA. (2010). Secretaría de Salud. Norma Oficial Mexicana. *NOM-022-SSA1-2010, Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al dióxido de azufre. Valor normado para la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población*. México.
- SCT. (2017). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Sistema Portuario Nacional*. Recuperado el 4 de mayo de 2017 de <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- Scire, J., Strimaitis, D., Yamartino, R. (2000). *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model*. Earth Tech, Inc. Concord, MA.
- SEDEMA (2016). Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX. *Calidad del aire en la Ciudad de México Informe Anual 2015*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Julio. 177 pp.
- SEMARNAT. (2001). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisión de contaminantes*. ISBN:9688175072 México.
- SEMARNAT. (2013). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Calidad del aire: Una práctica de vida*. Recuperado el 5 de noviembre de 2016, de

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>

- SEMARNAT. (1993). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana. *NOM-038-SEMARNAT-1993, Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.* Mexico.
- SEMARNAT. (2012). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana. *NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.* México.
- SPC. (2011). Secretaría de Protección Civil. *Atlas municipal de riesgos nivel básico, Veracruz.* Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, México,
- Tami, L. (2013). *Realización de Inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz.* México: Tesis Maestría en Ingeniería, UNAM.
- Teledyne. (2011). *UV Fluorescence SO<sub>2</sub> Analyzer Model T100.* Recuperado el 30 de agosto de 2017 de [http://www.teledyne-ml.com/pdfs/T100\\_SO2\\_Rev\\_A.pdf](http://www.teledyne-ml.com/pdfs/T100_SO2_Rev_A.pdf).
- Trozzi, C. (2010). *Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation Techne Consulting report.* ETC.EF.
- Truyols M. (2010). *Economía, ingeniería y logística portuaria.* Delta publicaciones. Madrid. 2º Edición.
- US-EPA. (2015). United States Environmental Protection Agency. *Leyes y normas sobre el aire.* Recuperado el 16 de noviembre de 2016 de <https://espanol.epa.gov/espanol/implementacion-de-las-leyes-y-normas-sobre-el-aire>
- US-EPA. (2014). United States Environmental Protection Agency. *Prevención del Deterioro Ambiental Significativo.* Recuperado el 2016 de mayo de 2, de <https://www.epa.gov/nsr/prevention-significant-deterioration-basic-information>

- US EPA (2015). United States Environmental Protection Agency. *New Source Review Workshop Manual PSD*. Recuperado el 2016 de mayo de 2 de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/1990wman.pdf>
- VCP. (2017). Veracruz Comunidad Portuario. El nuevo puerto de Veracruz. Recuperado el 3 de julio de 2017 de <http://veracruzcomunidadportuaria.com.mx/el-nuevo-puerto/>
- Zuk, M., López, M., Garibay, V., Tzintun, G, Iniesta, R., Fernández, A. (2005). *Health impacts from power plant emissions in México*. *Atmospheric Environment*, 39(7). 1199-1209.

## Anexos

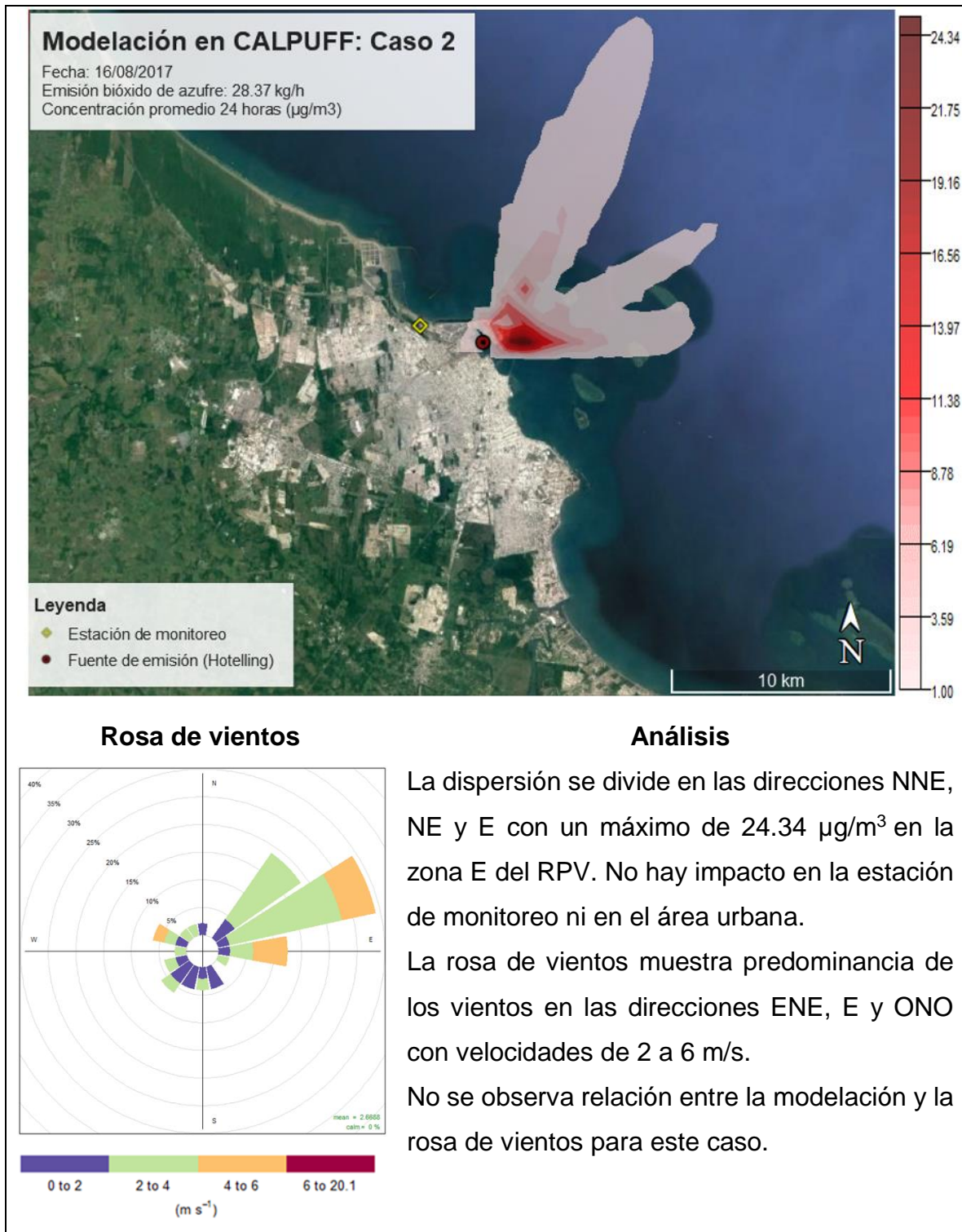


Figura 0.1 Caso de estudio CALPUFF 16/08/2017

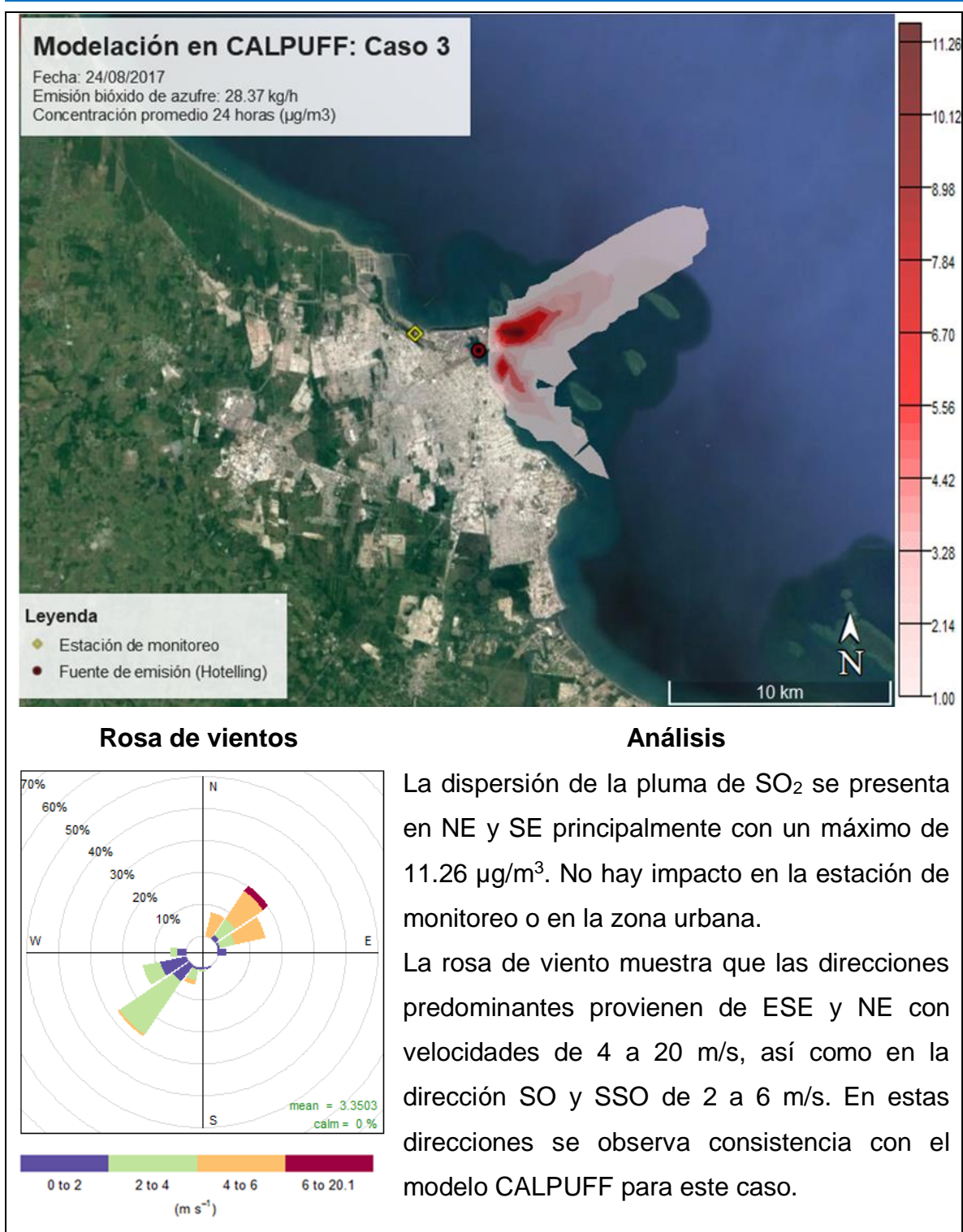


Figura 0.2 Caso de estudio CALPUFF 24/08/2017

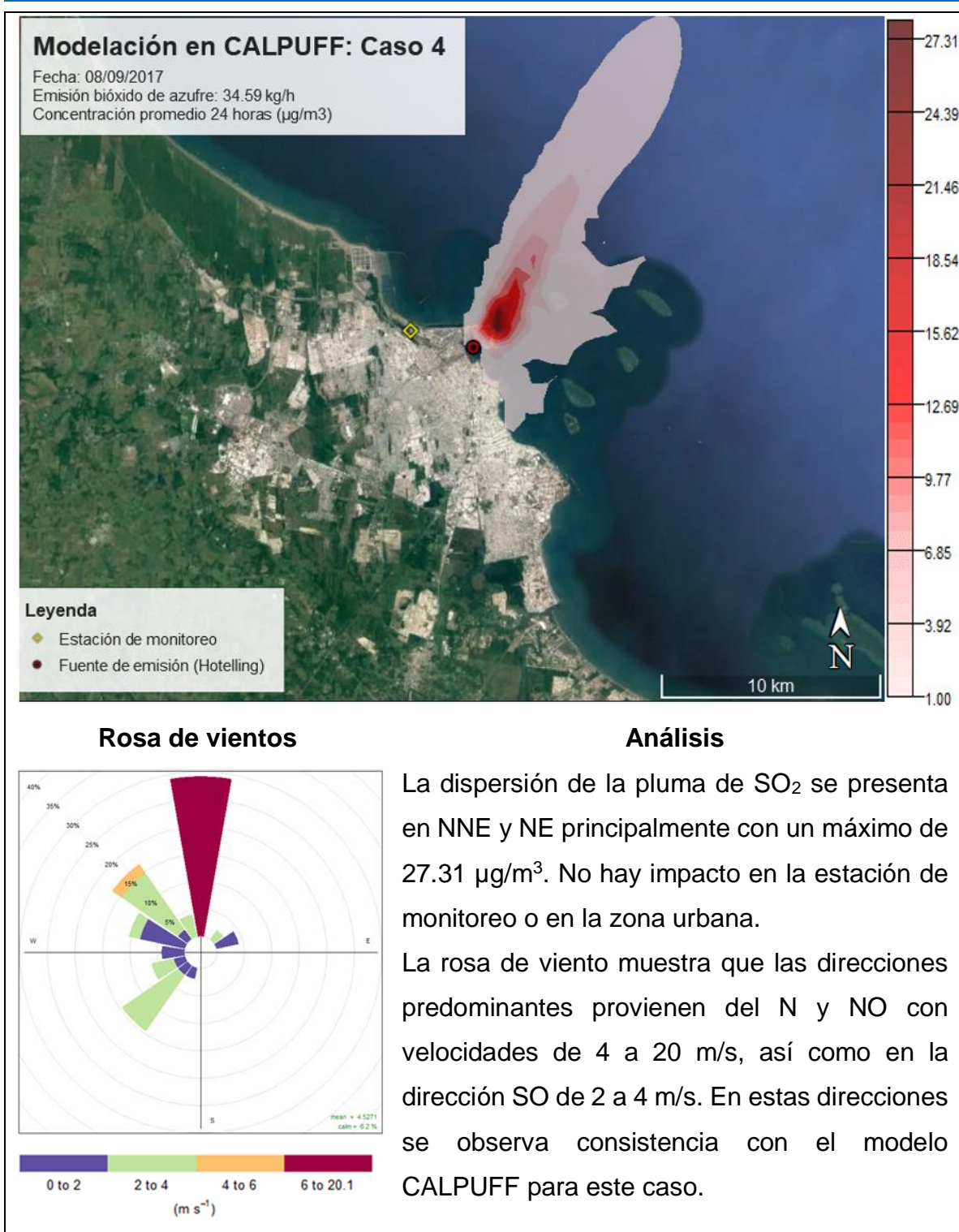


Figura 0.3 Caso de estudio CALPUFF 08/09/2017



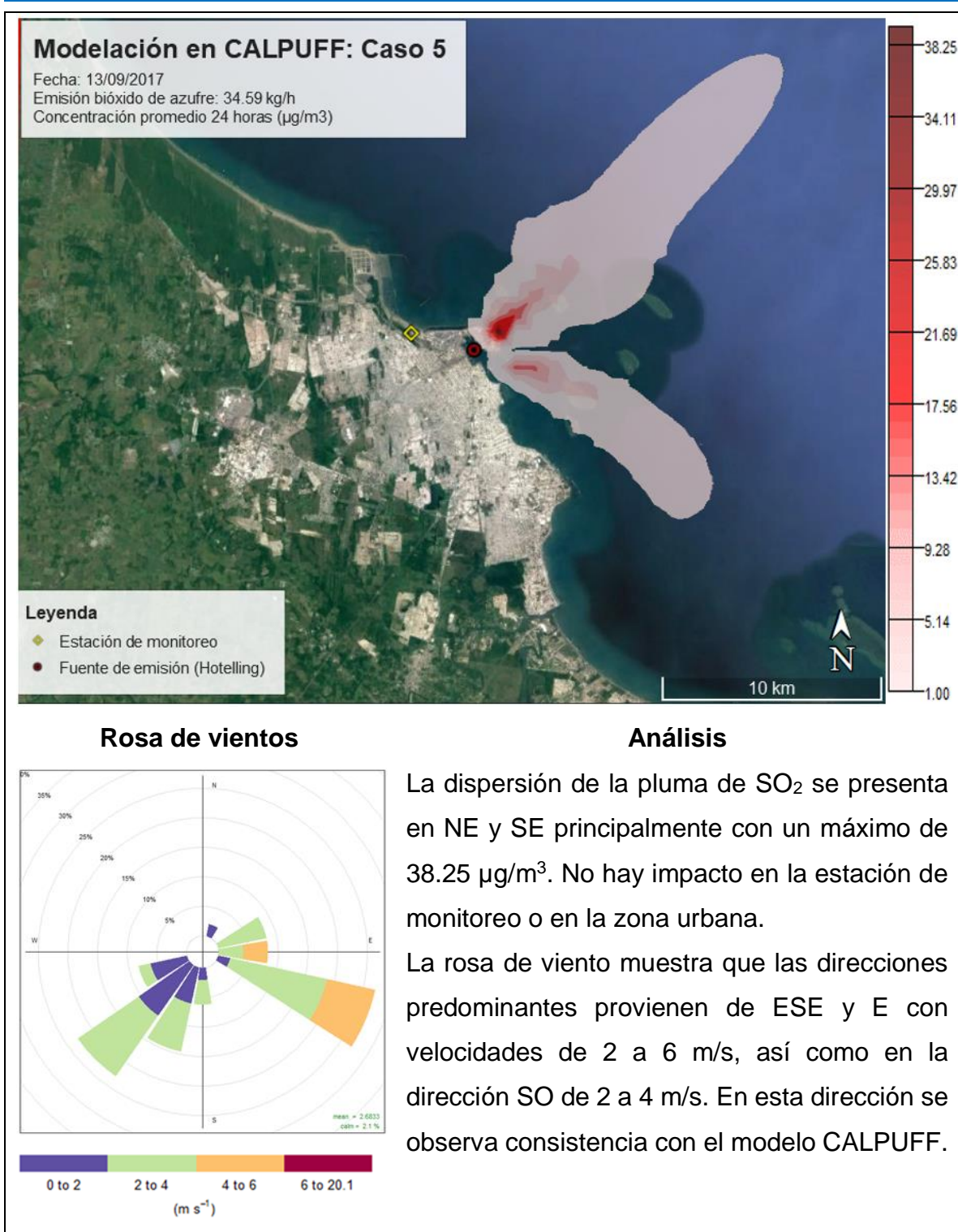


Figura 0.4 Caso de estudio CALPUFF 13/09/2017

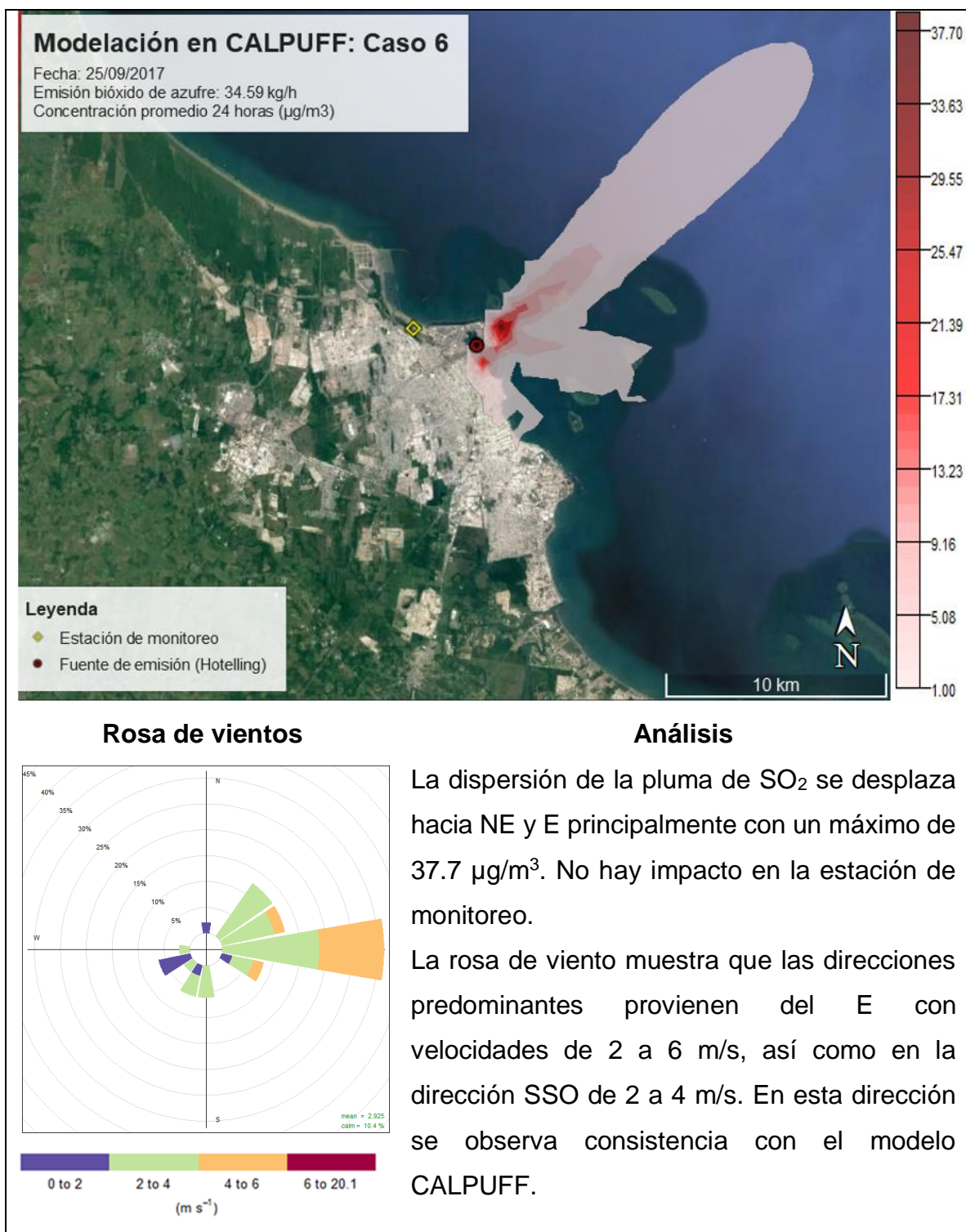


Figura 0.5 Caso de estudio CALPUFF 25/09/2017

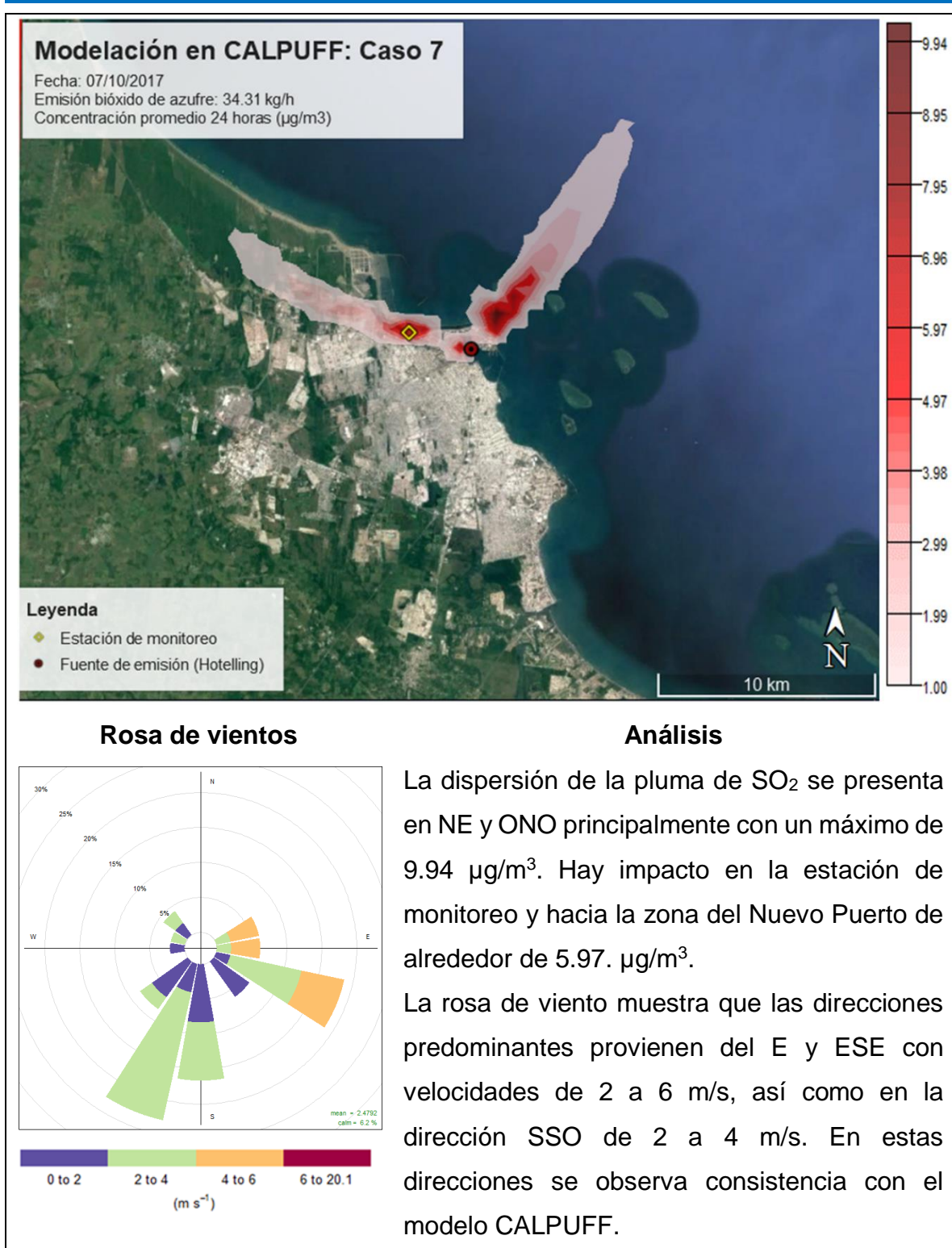


Figura 0.6 Caso de estudio CALPUFF 07/10/2017

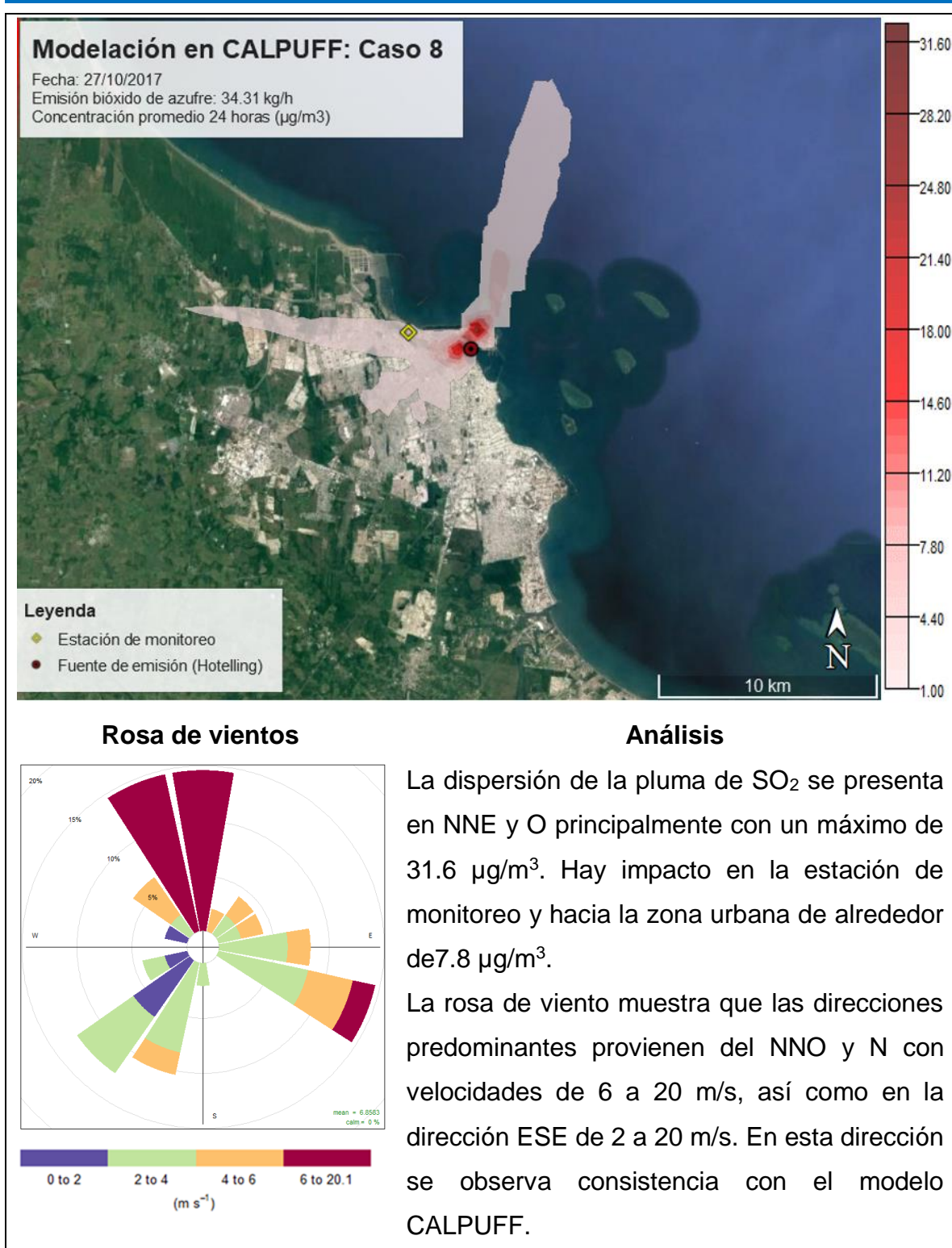
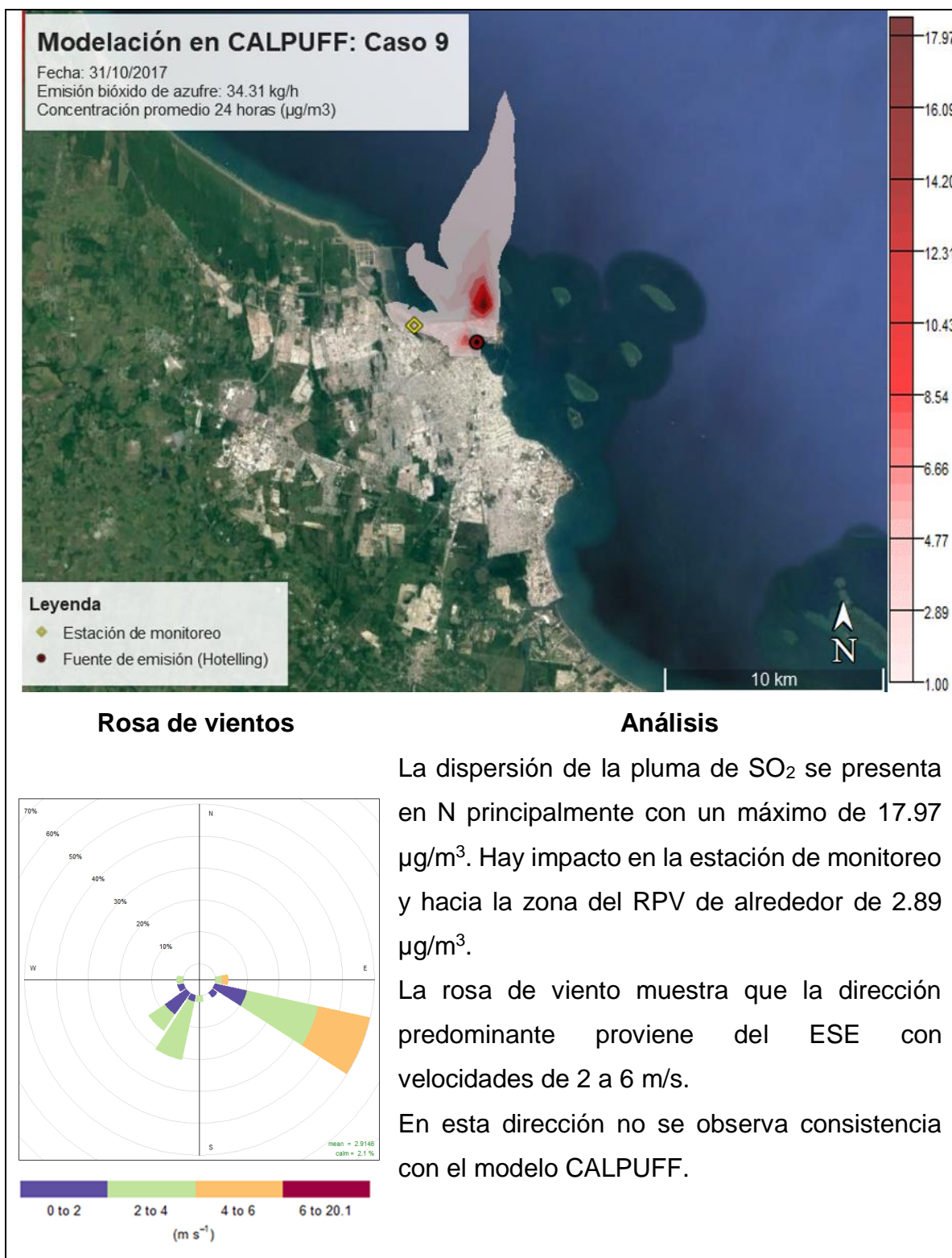


Figura 0.7 Caso de estudio CALPUFF 27/10/2017



**Figura 0.8 Caso de estudio CALPUFF 31/10/2017**

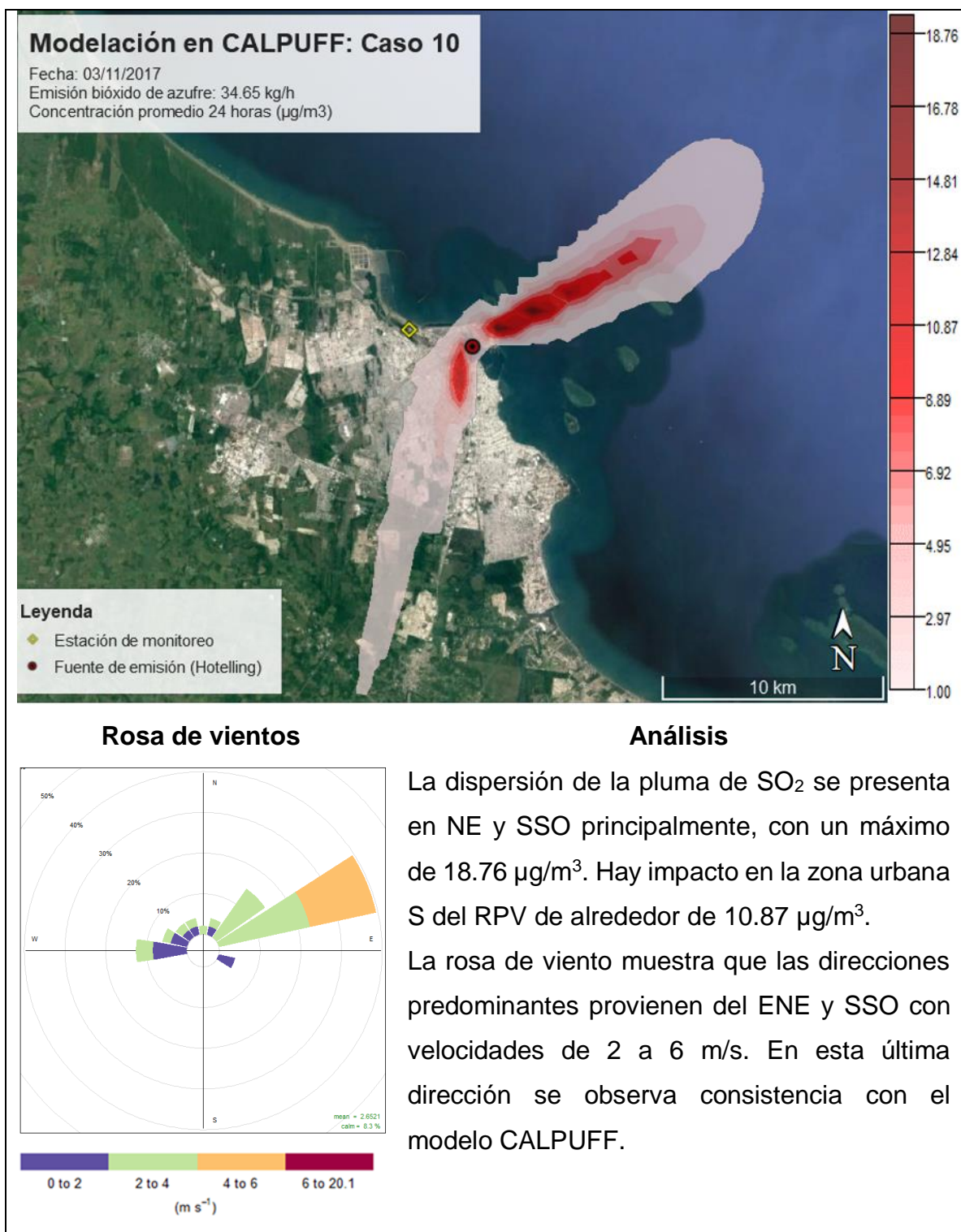
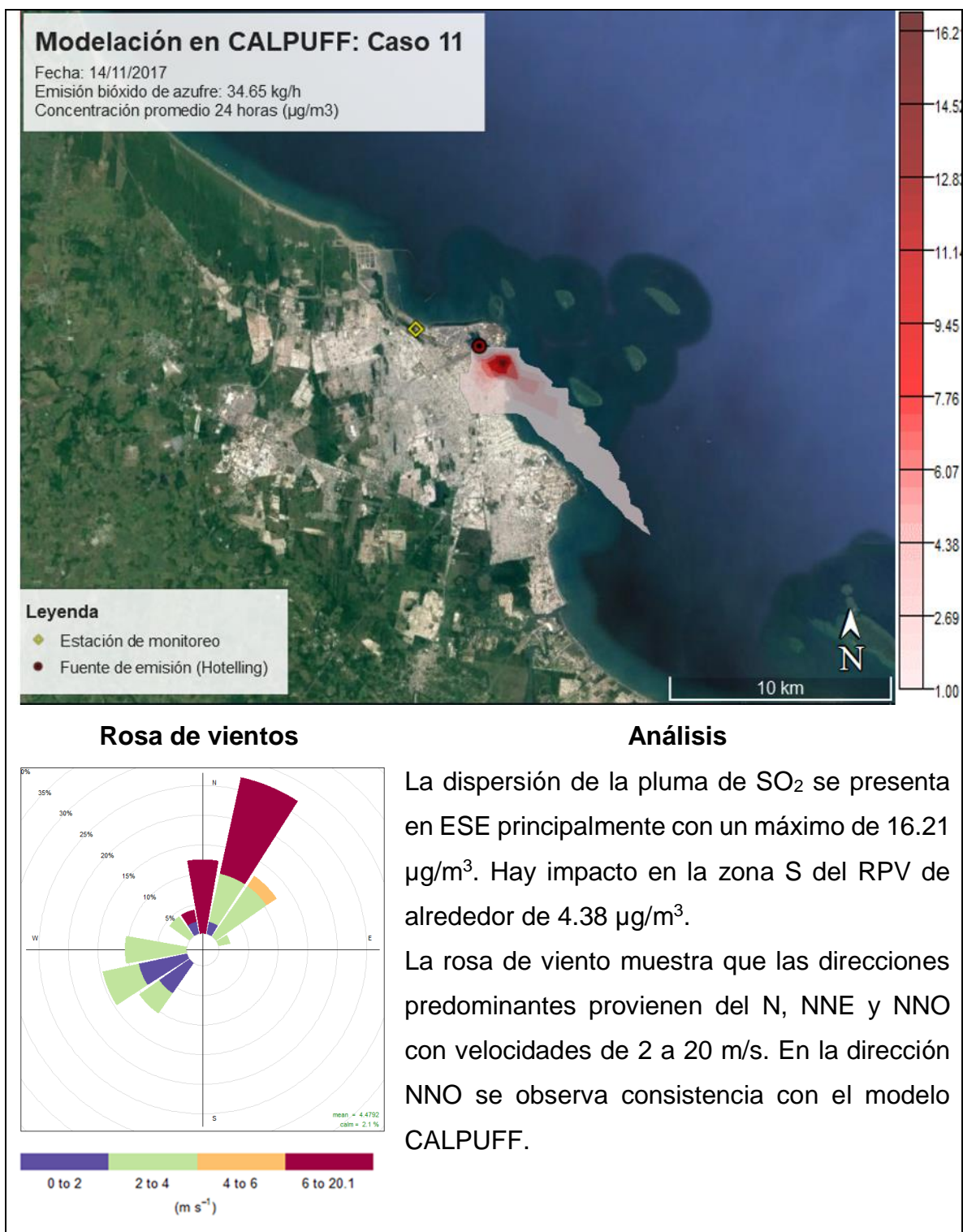
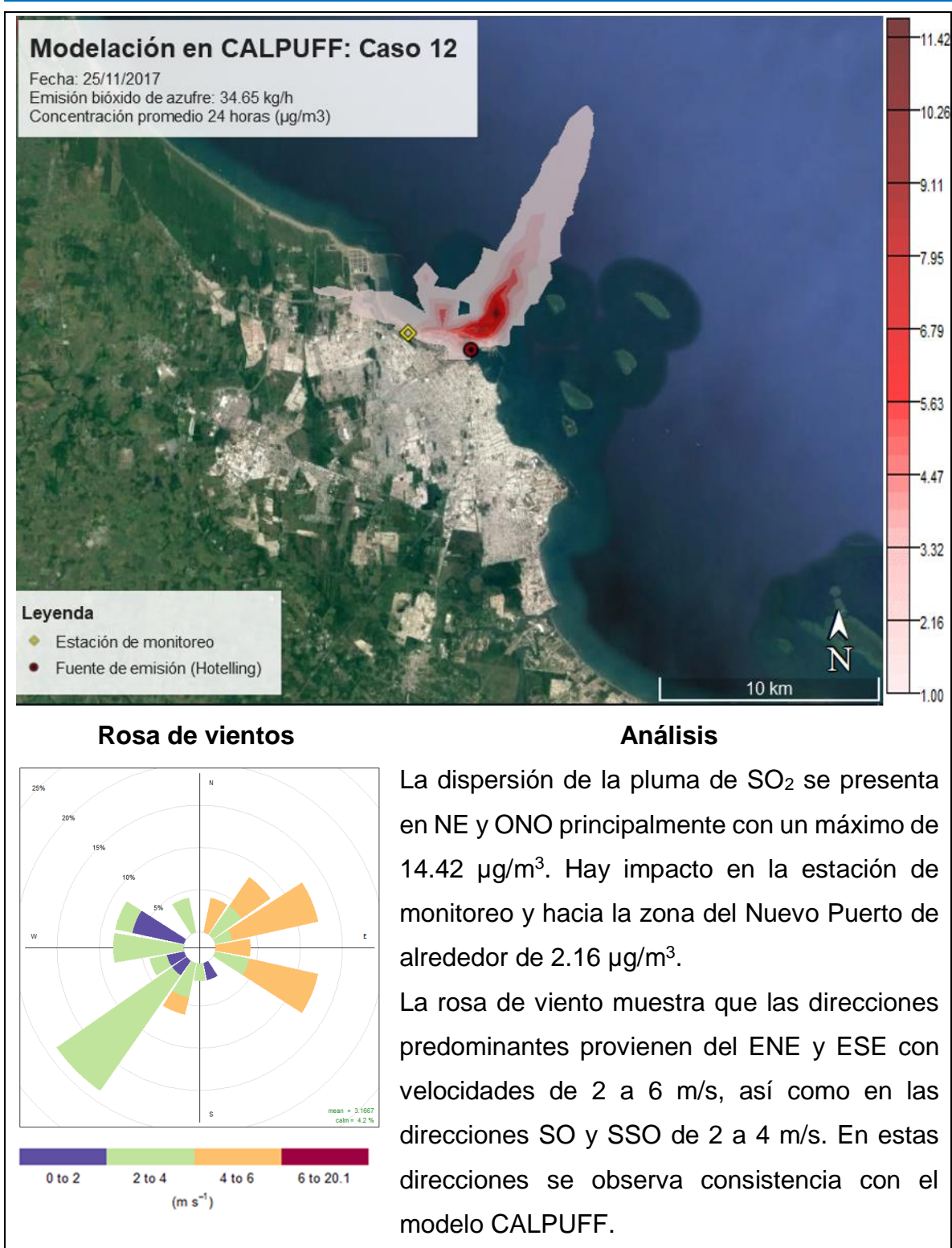


Figura 0.9 Caso de estudio CALPUFF 03/11/2017



**Figura 0.10 Caso de estudio CALPUFF 14/11/2017**



**Figura 0.11** Caso de estudio CALPUFF 25/11/2017



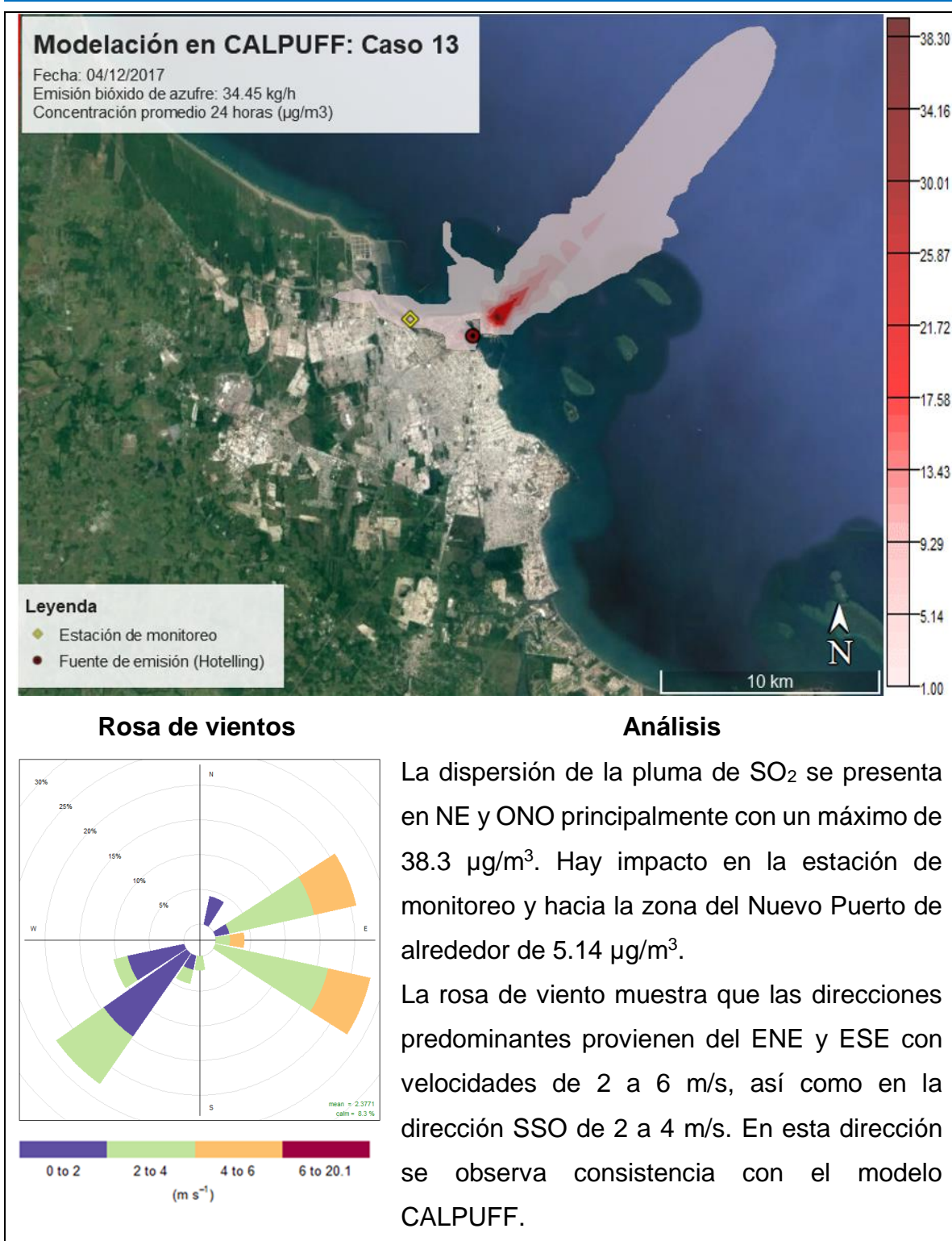


Figura 0.12 Caso de estudio CALPUFF 04/12/2017

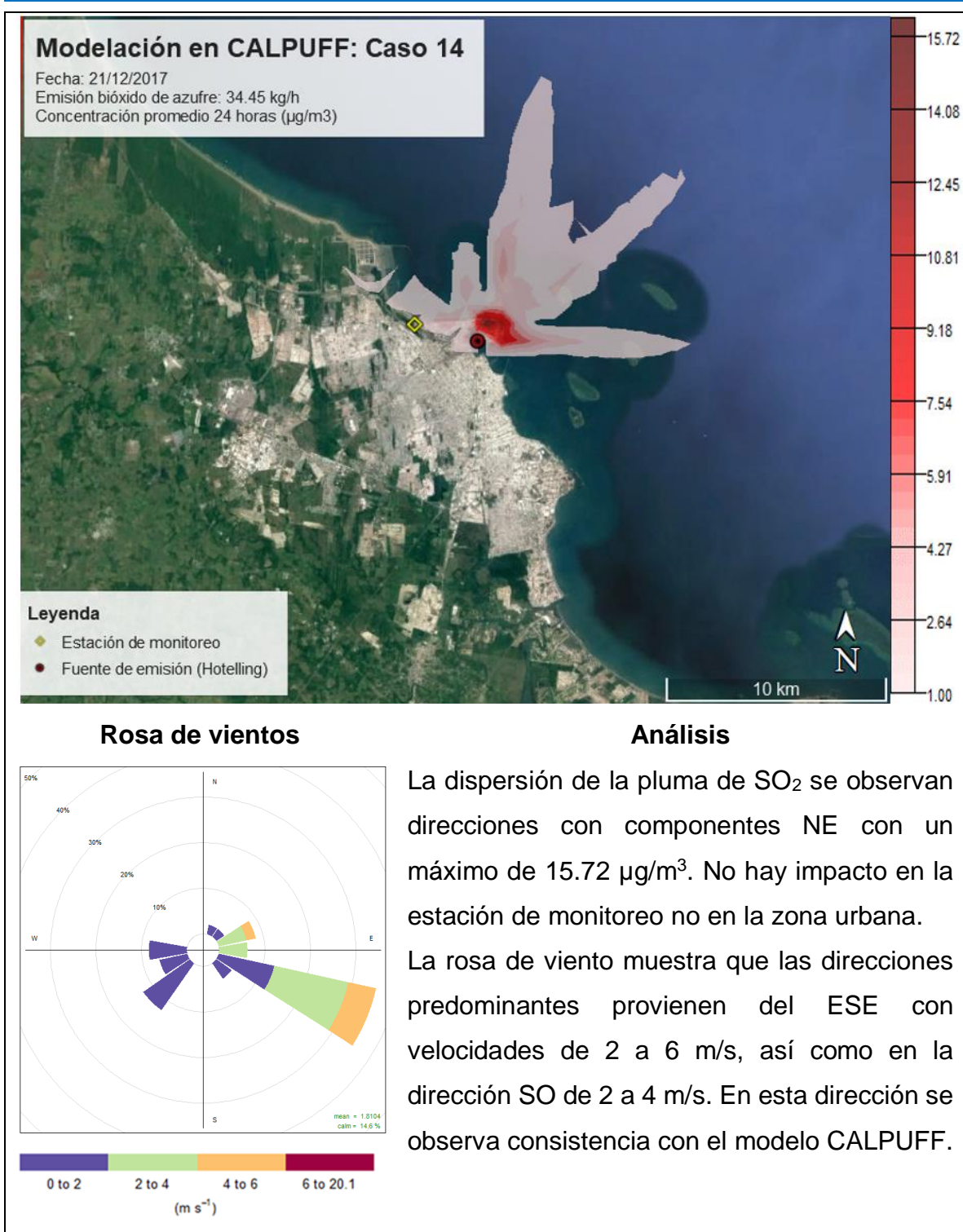
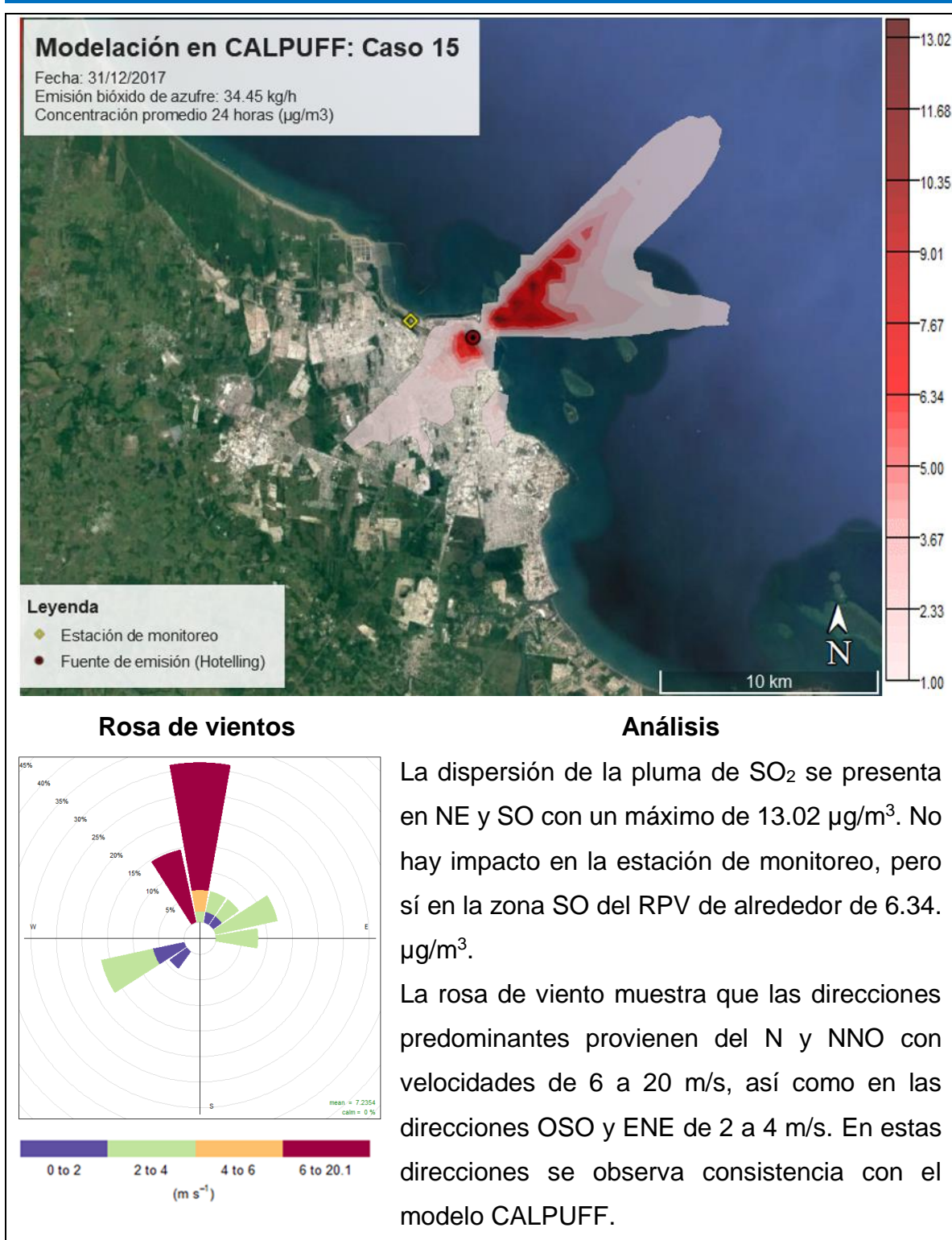


Figura 0.13 Caso de estudio CALPUFF 21/12/2017



**Figura 0.14 Caso de estudio CALPUFF 31/12/2017**

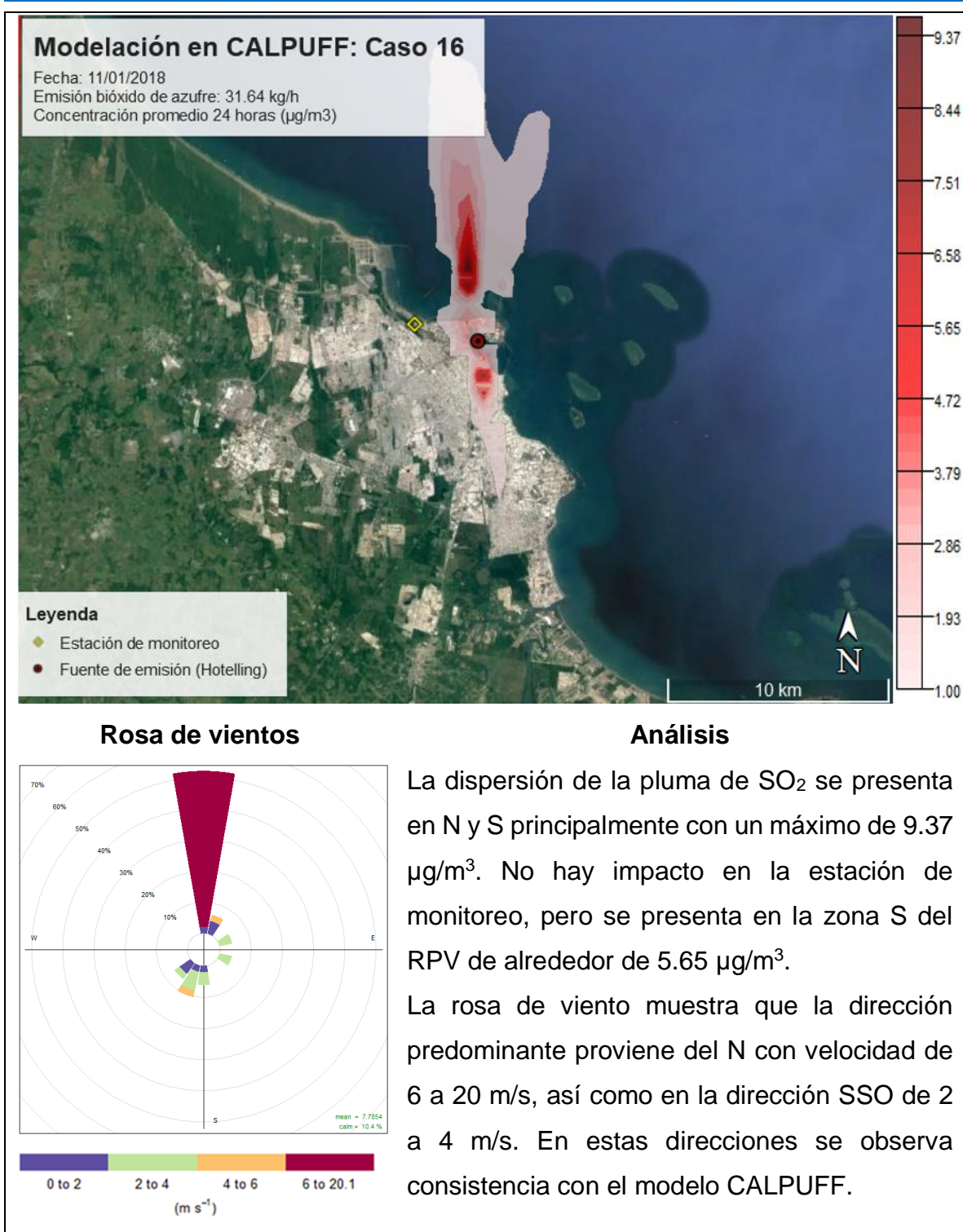


Figura 0.15 Caso de estudio CALPUFF 11/01/2018

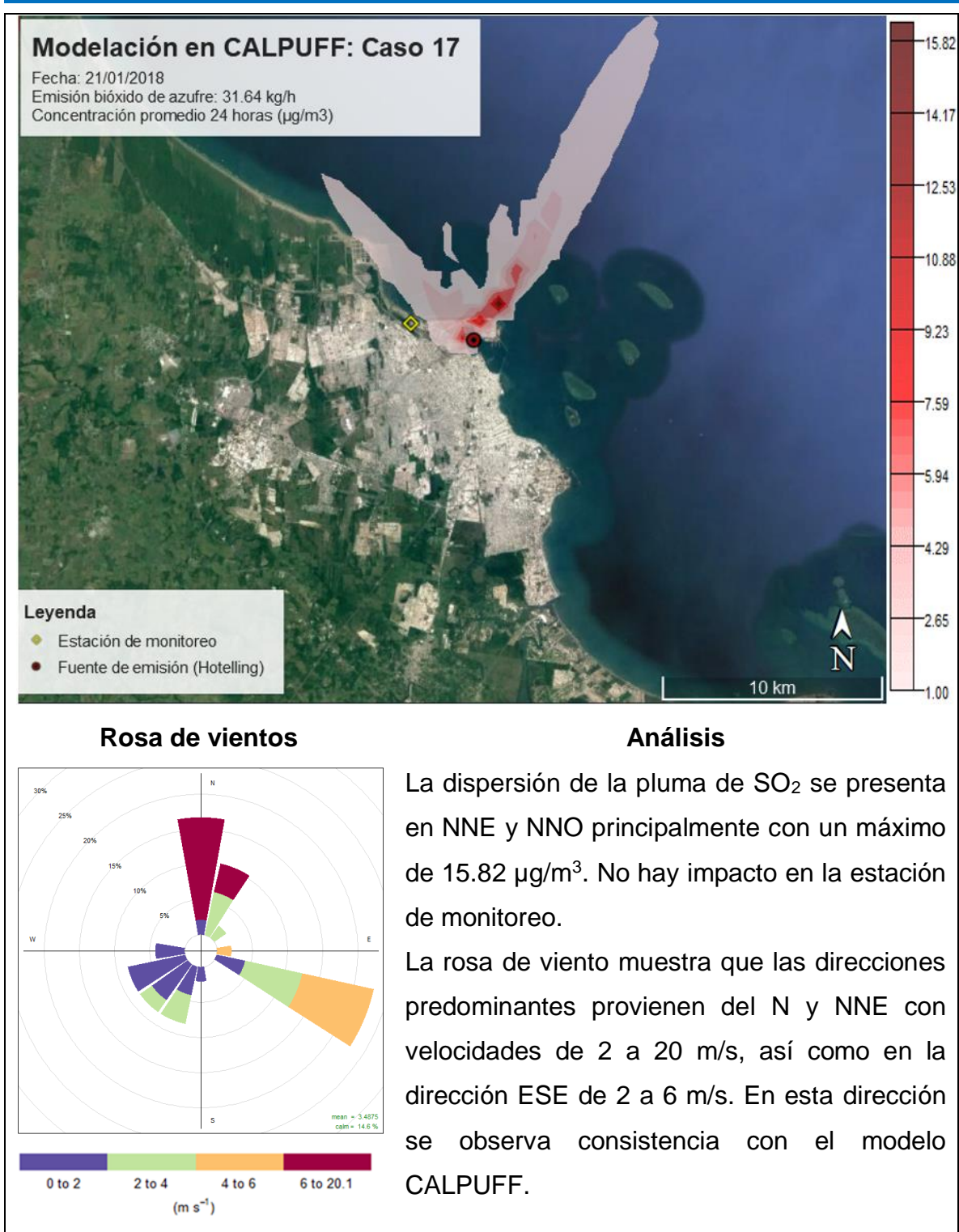
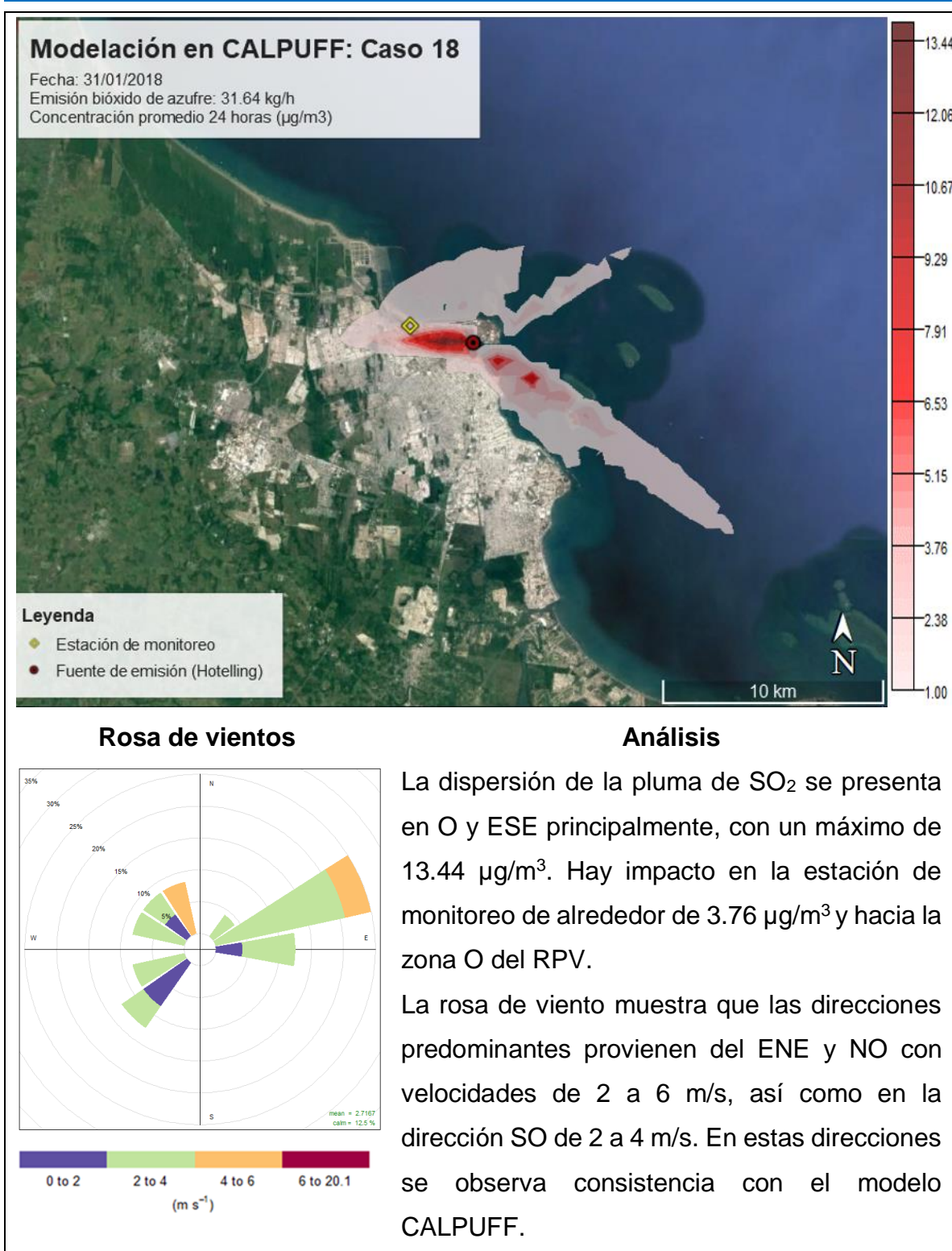


Figura 0.16 Caso de estudio CALPUFF 21/01/2018



**Figura 0.17 Caso de estudio CALPUFF 31/01/2018**

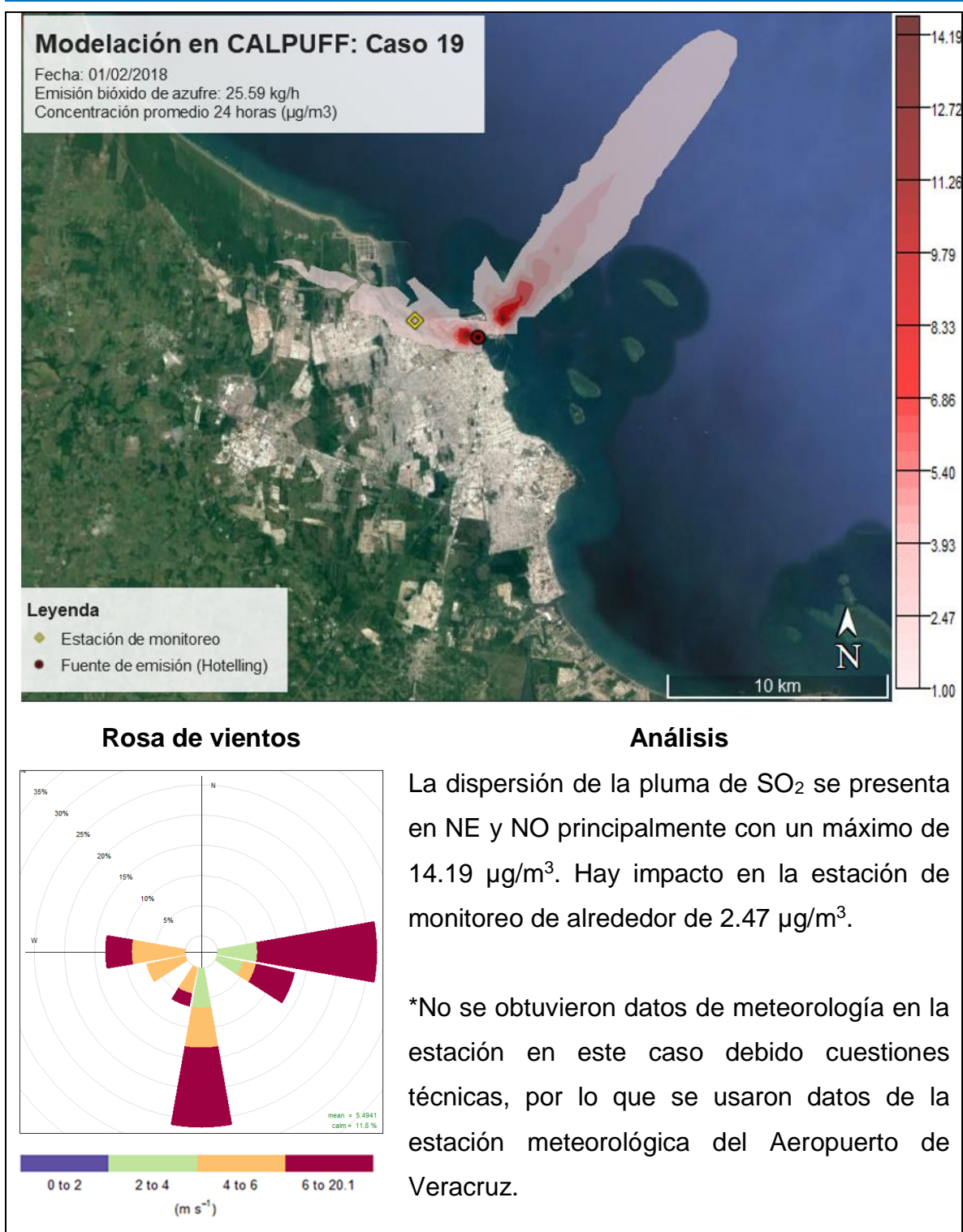


Figura 0.18 Caso de estudio CALPUFF 01/02/2018

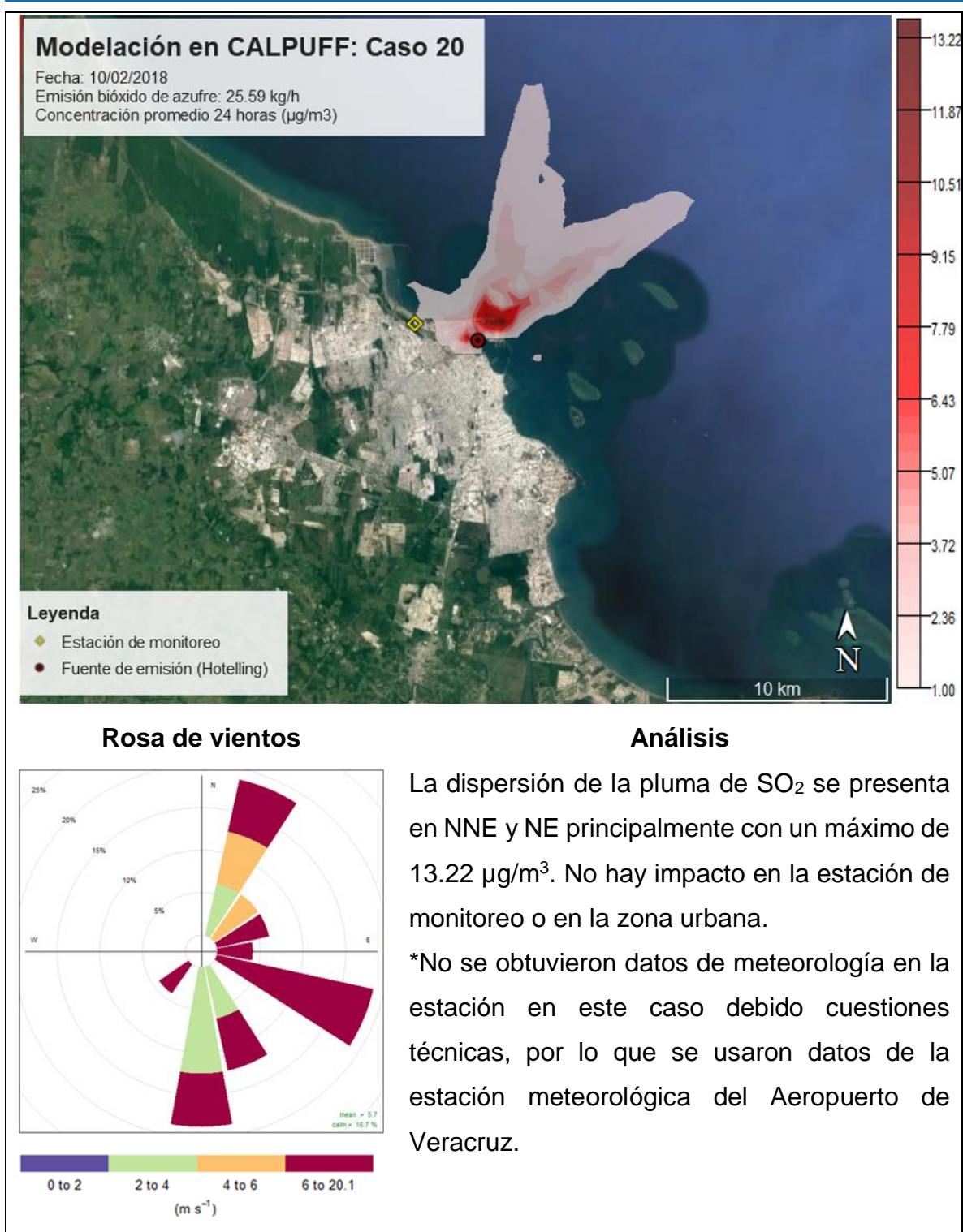


Figura 0.19 Caso de estudio CALPUFF 10/02/2018



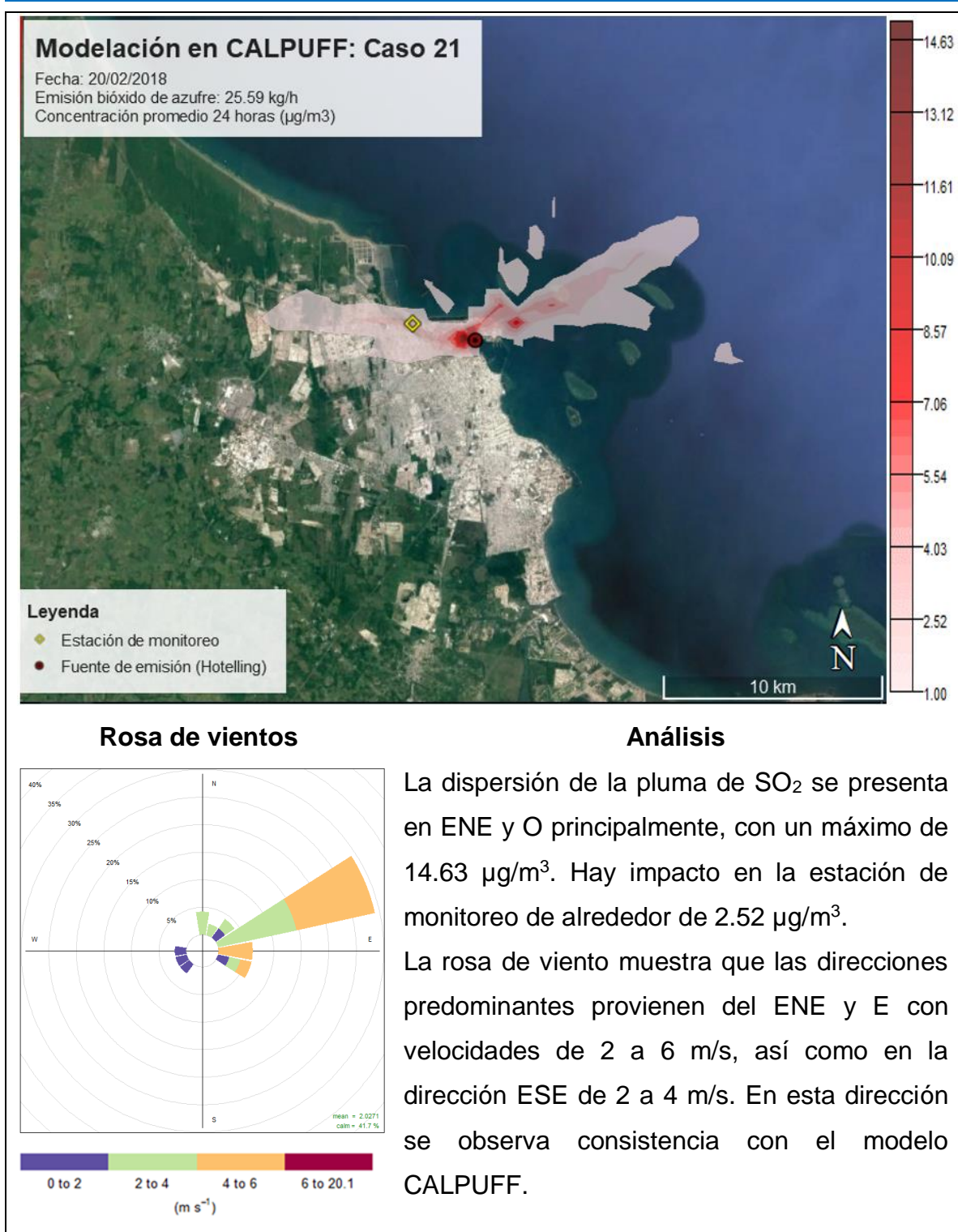
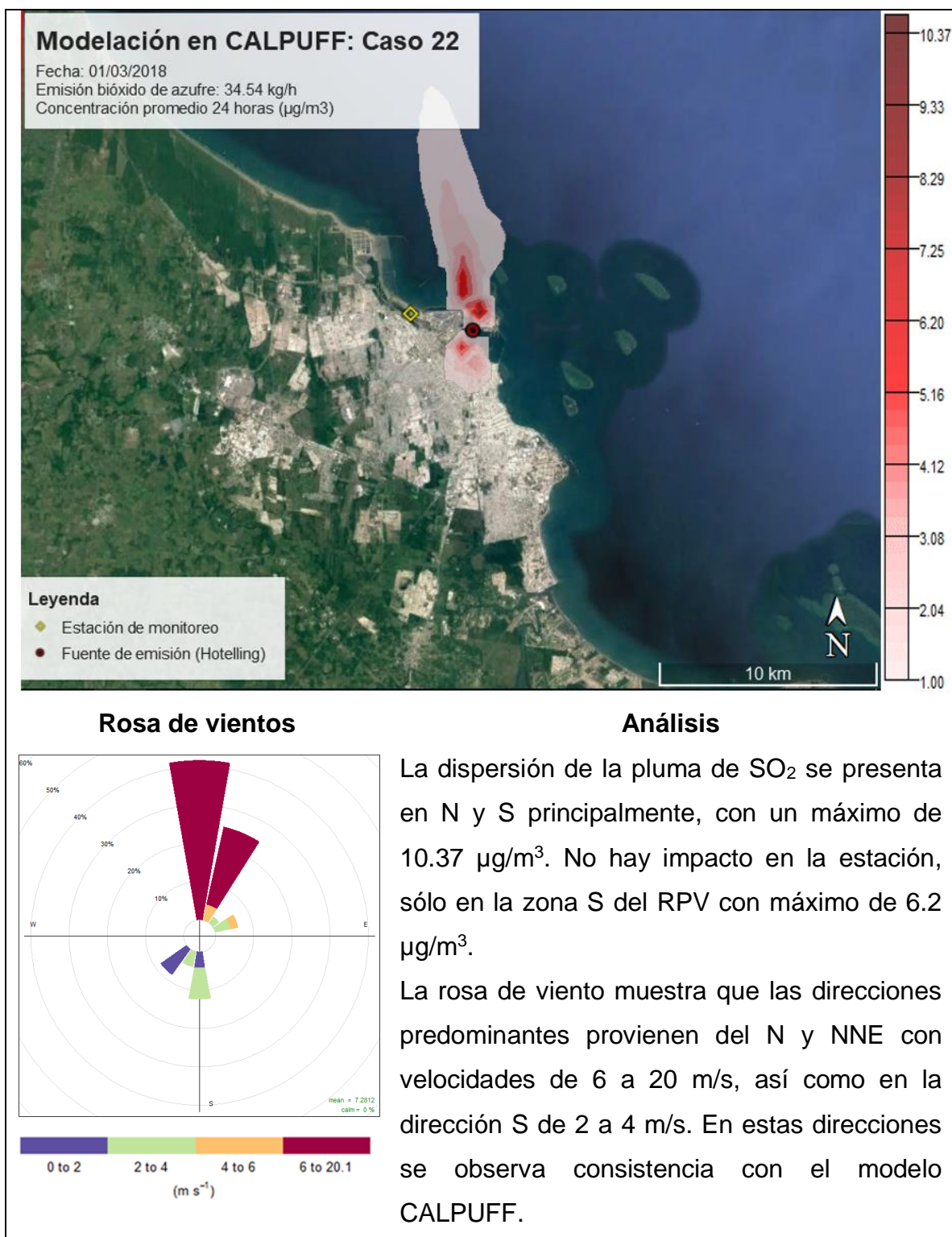


Figura 0.20 Caso de estudio CALPUFF 20/02/2018



**Figura 0.21 Caso de estudio CALPUFF 01/03/2018**

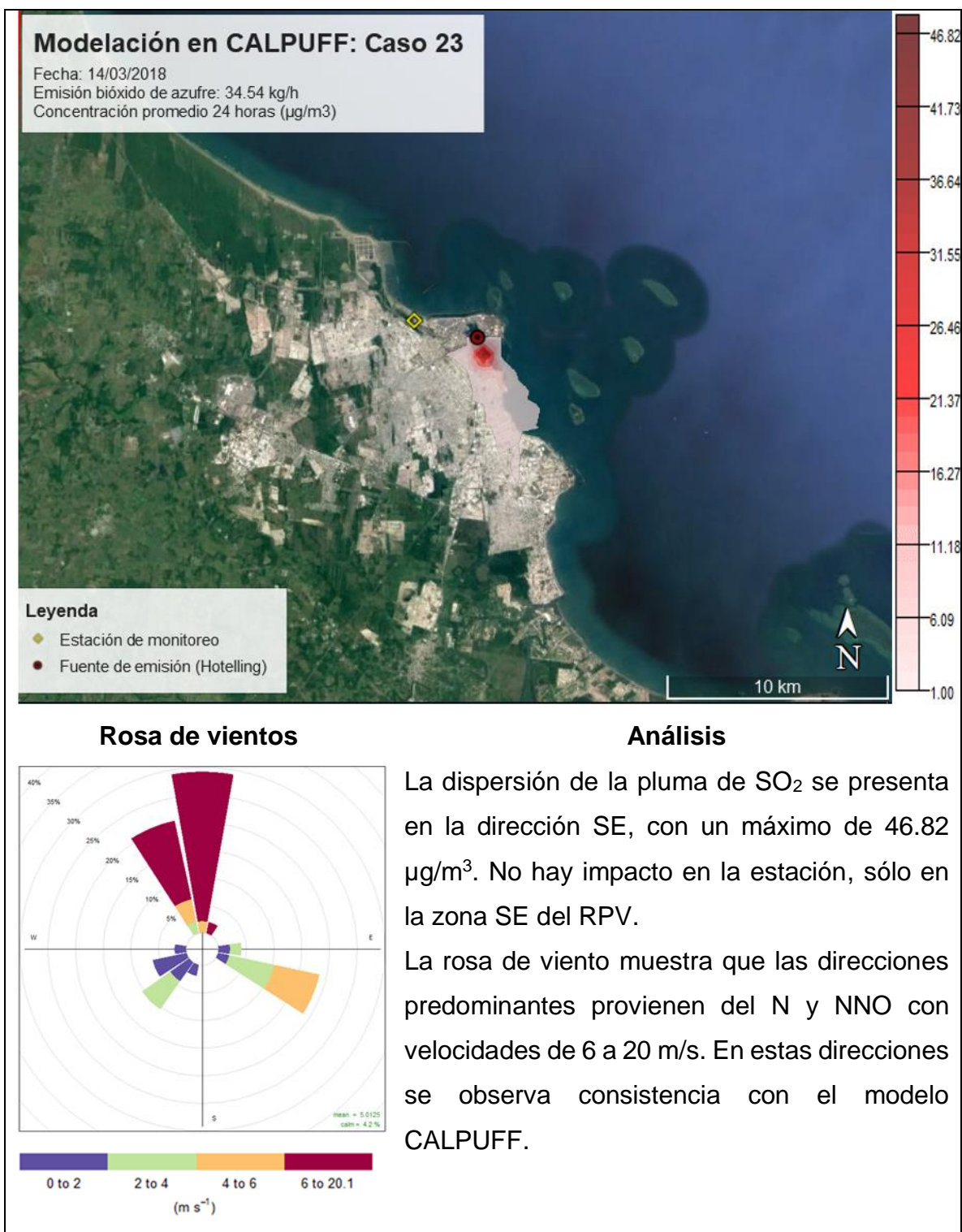


Figura 0.22 Caso de estudio CALPUFF 14/03/2018

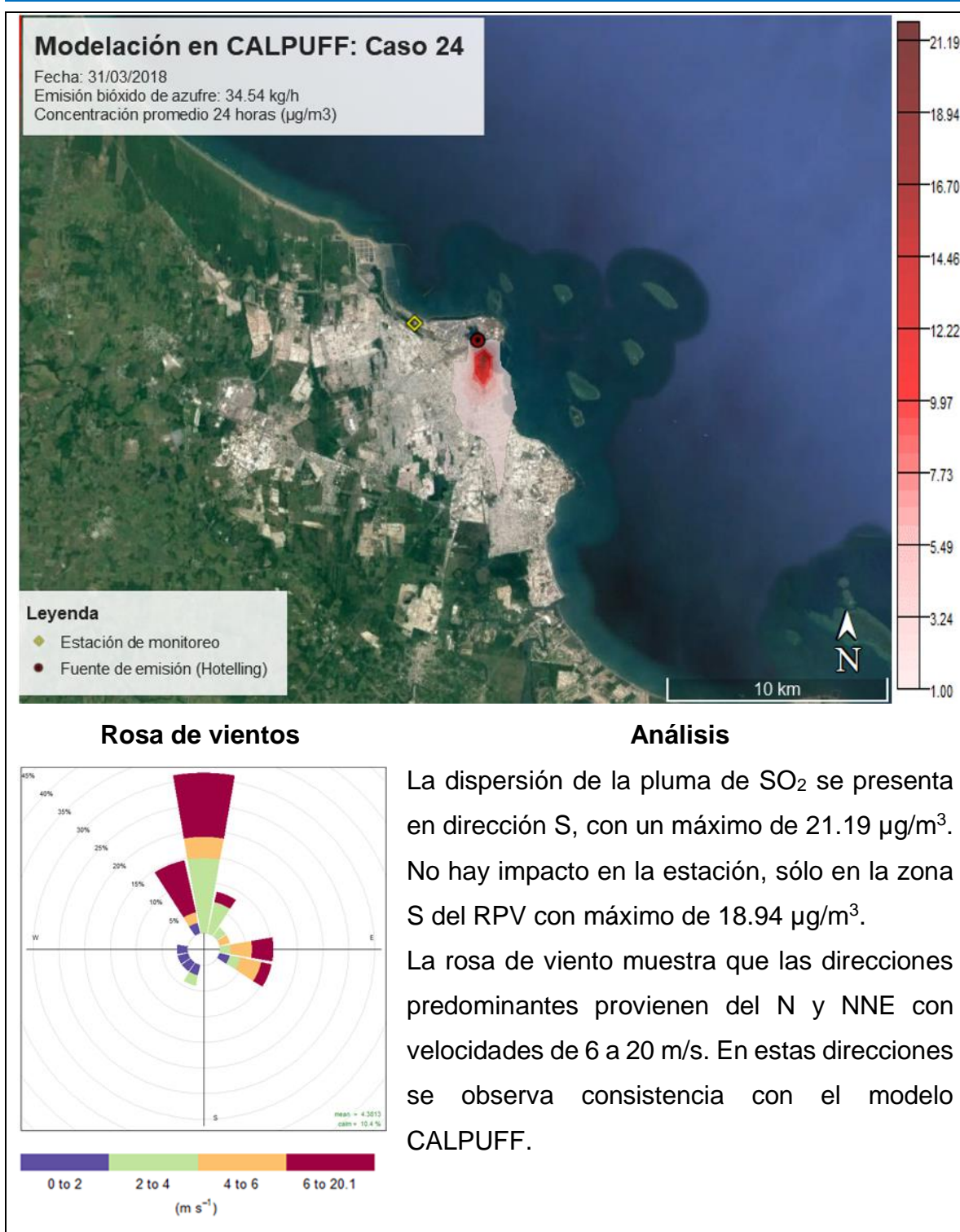


Figura 0.23 Caso de estudio CALPUFF 31/03/2018

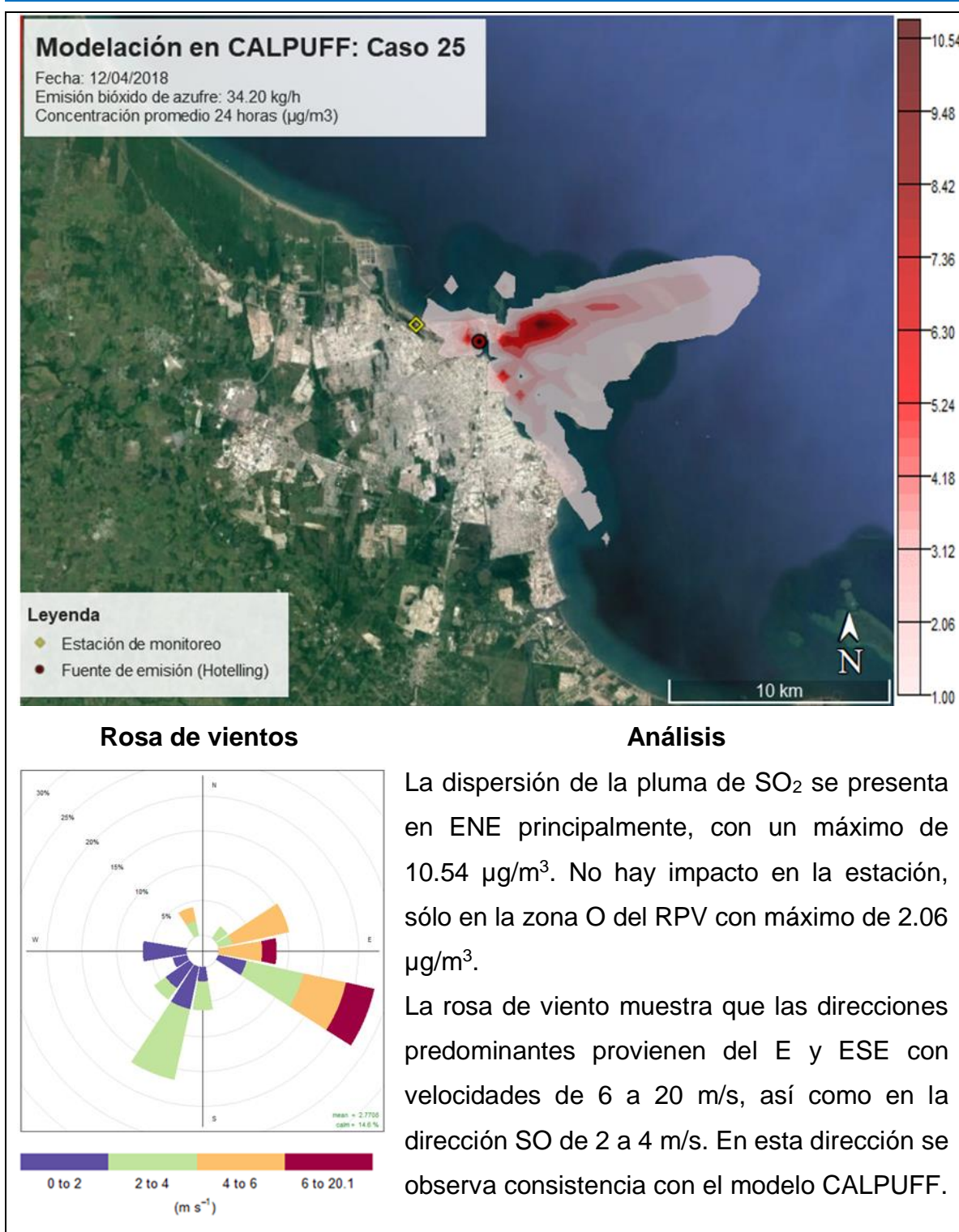


Figura 0.24 Caso de estudio CALPUFF 12/04/2018

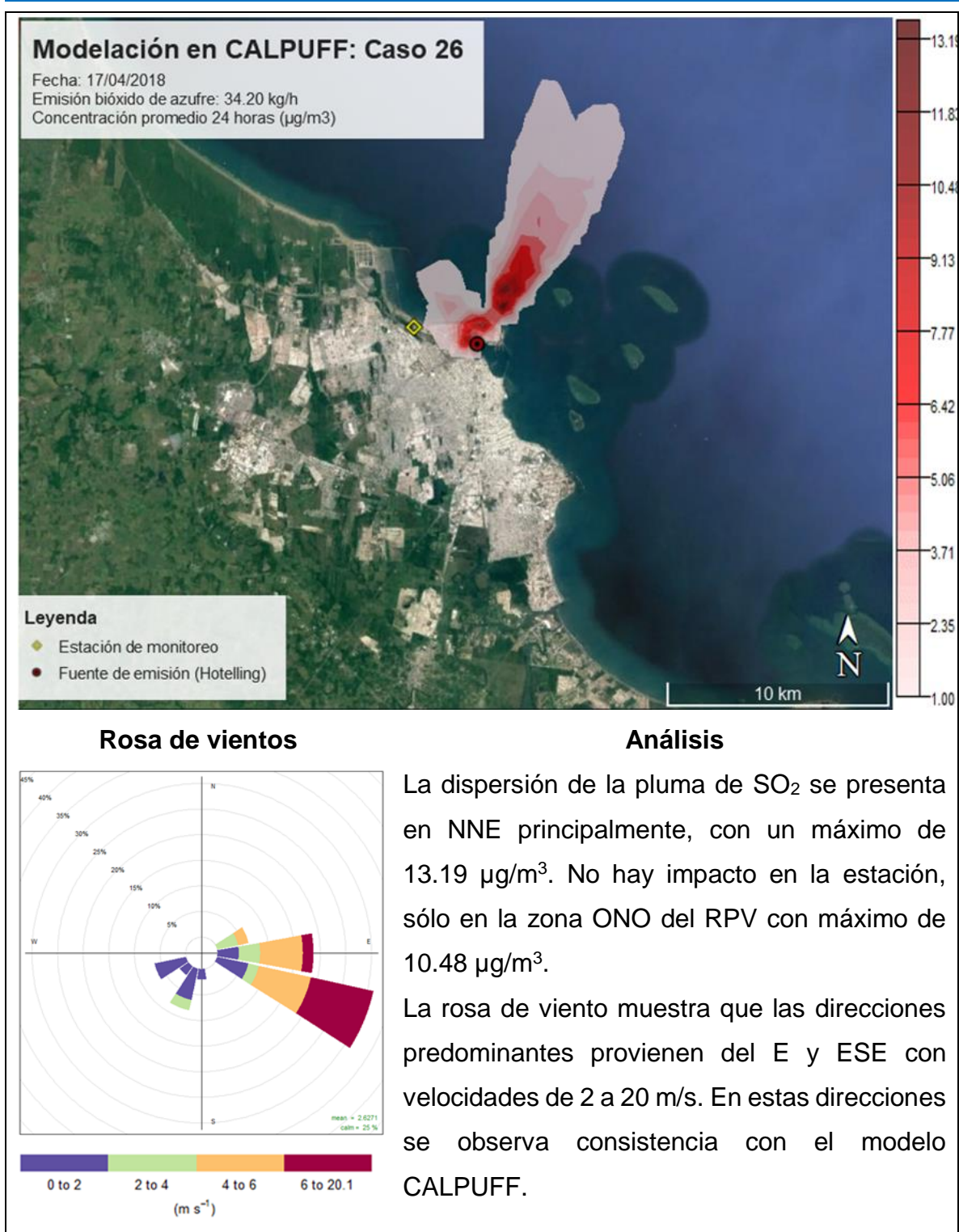


Figura 0.25 Caso de estudio CALPUFF 17/04/2018

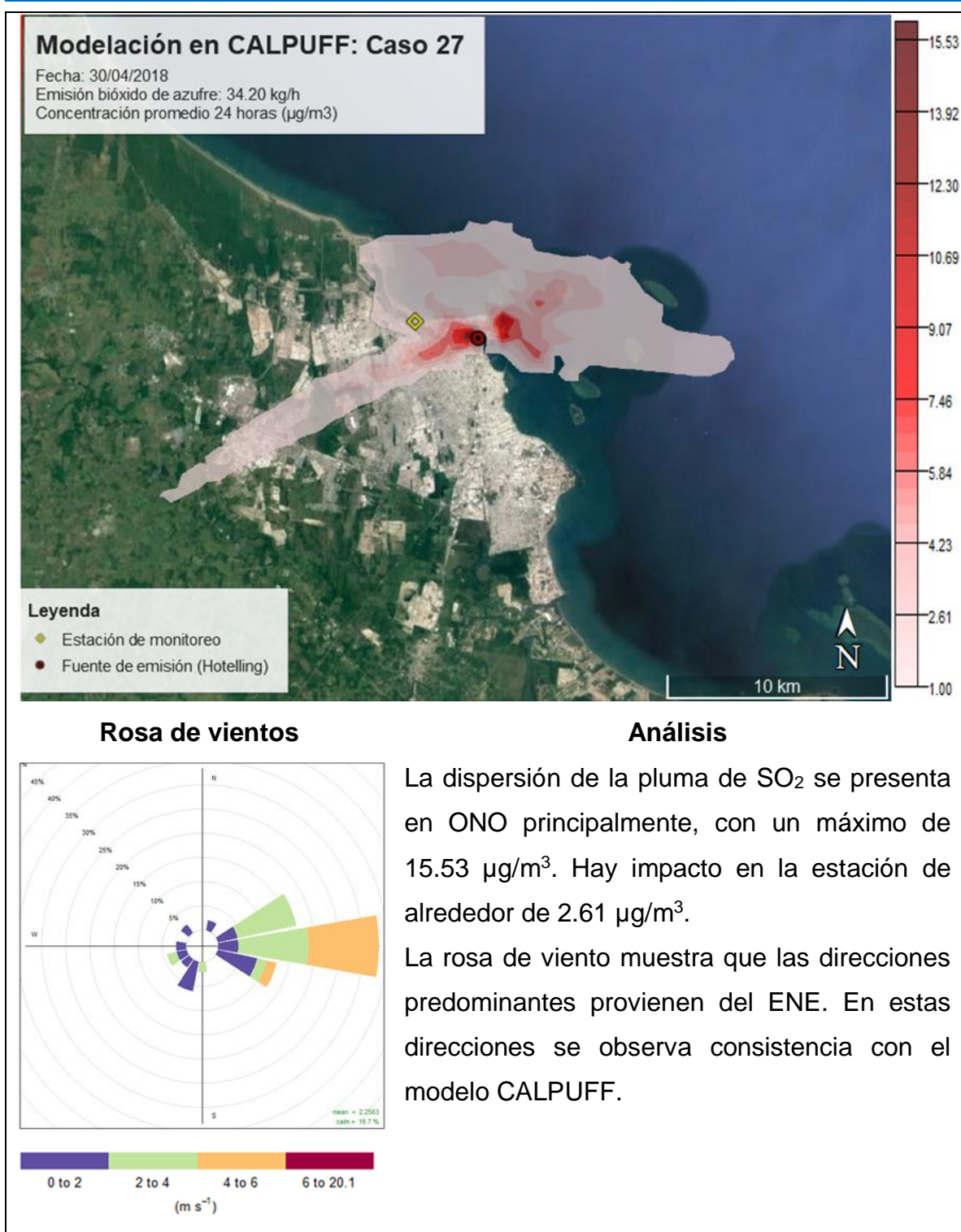


Figura 0.26 Caso de estudio CALPUFF 30/04/2018

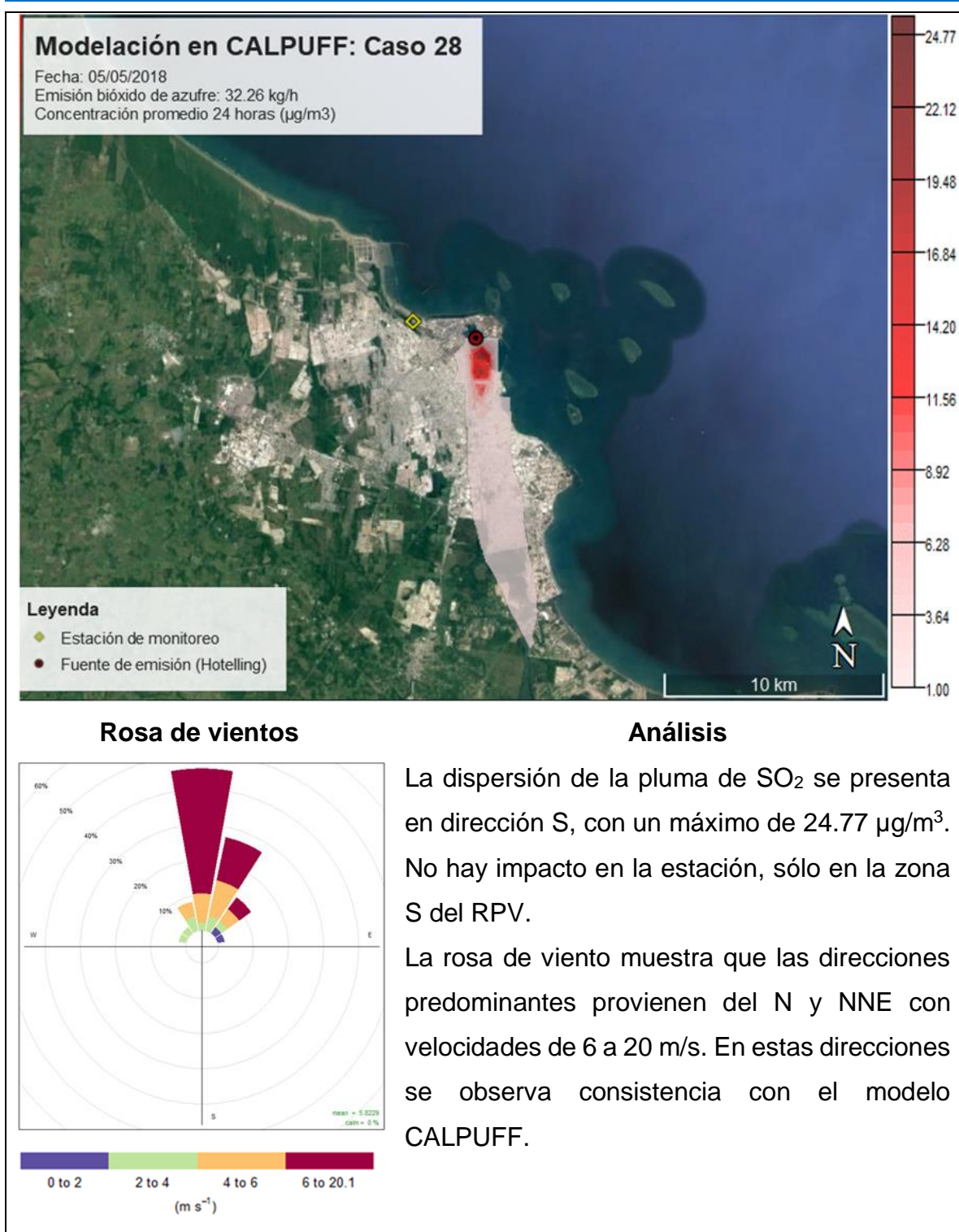


Figura 0.27 Caso de estudio CALPUFF 05/05/2018



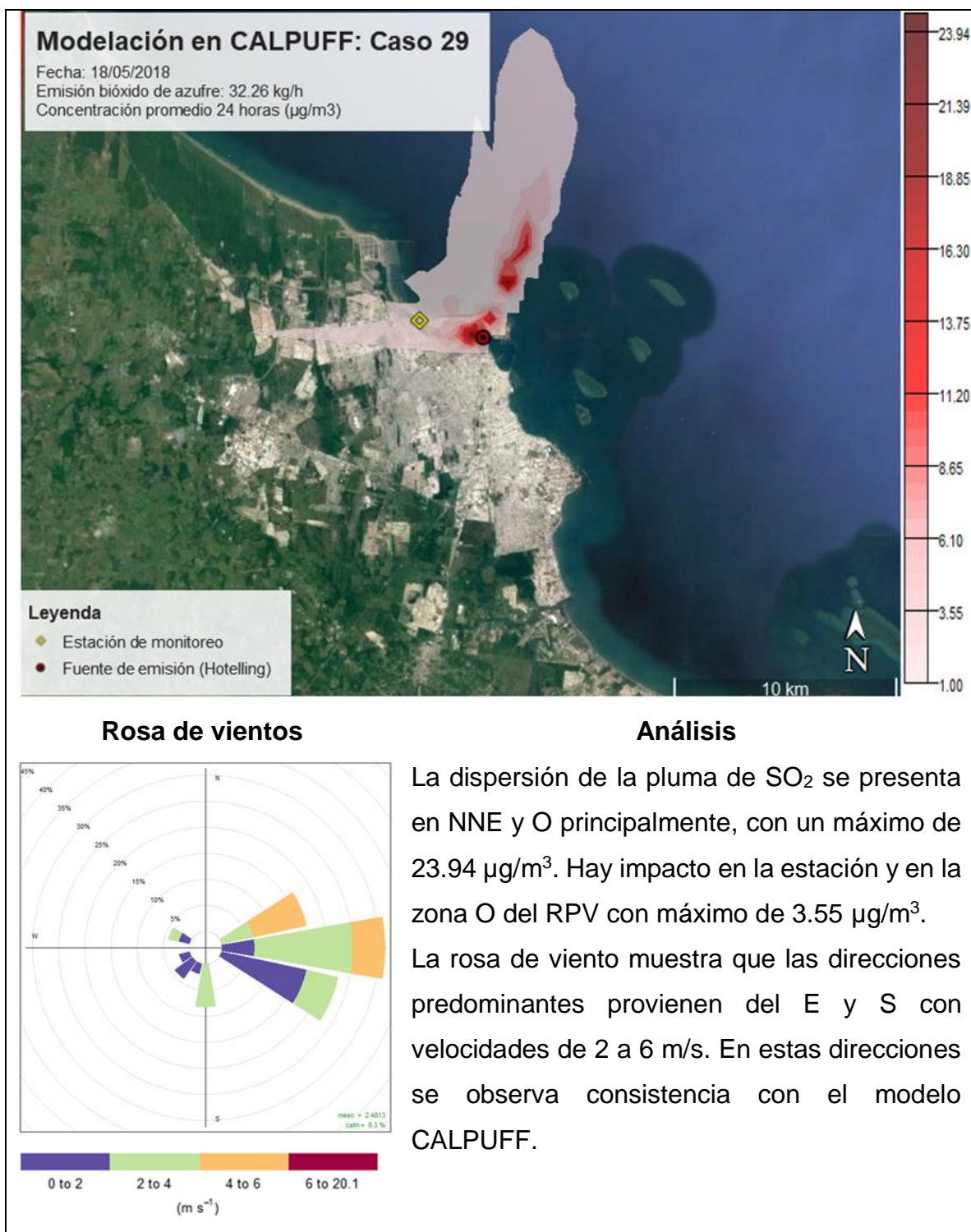


Figura 0.28 Caso de estudio CALPUFF 18/05/2018

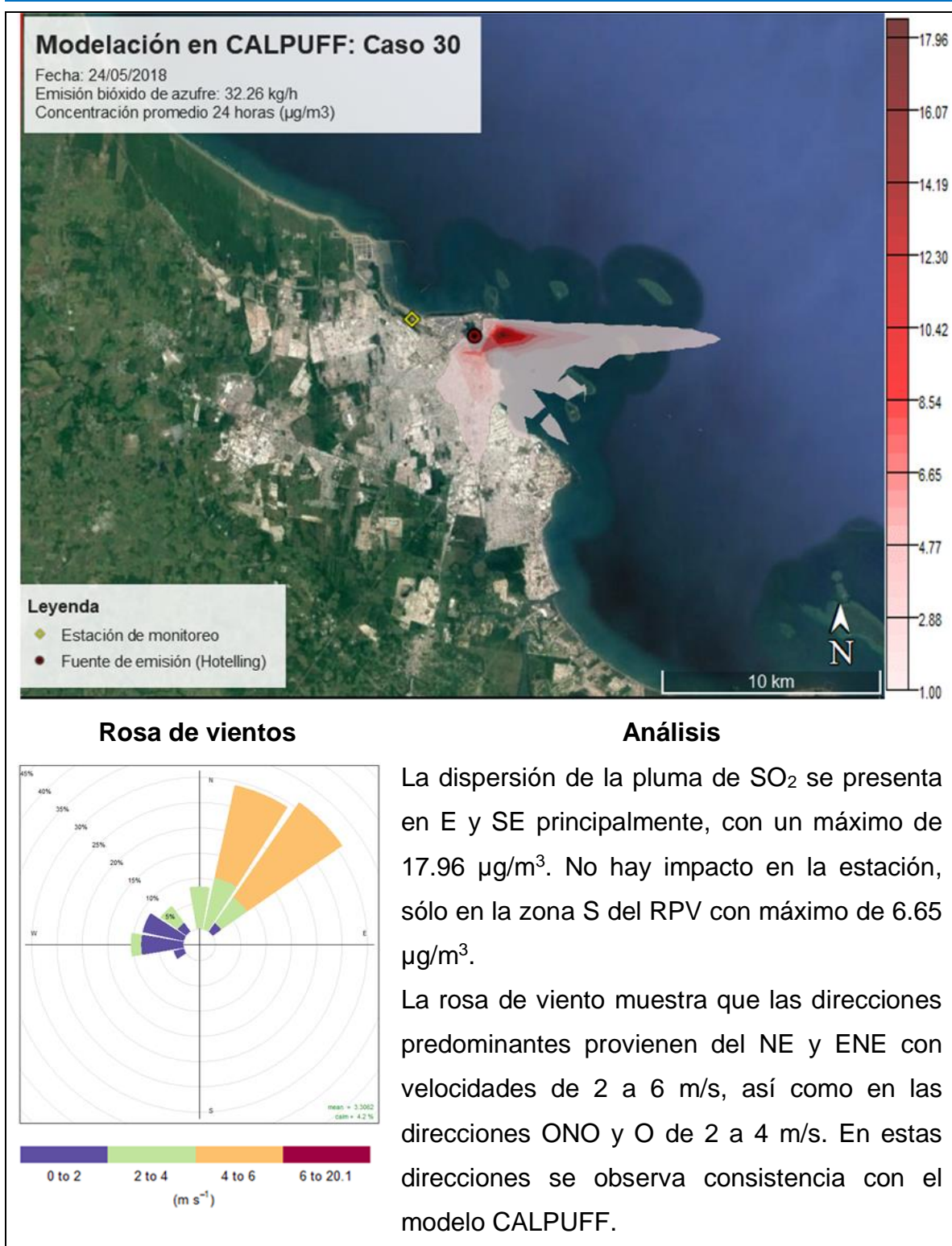


Figura 0.29 Caso de estudio CALPUFF 25/05/2018

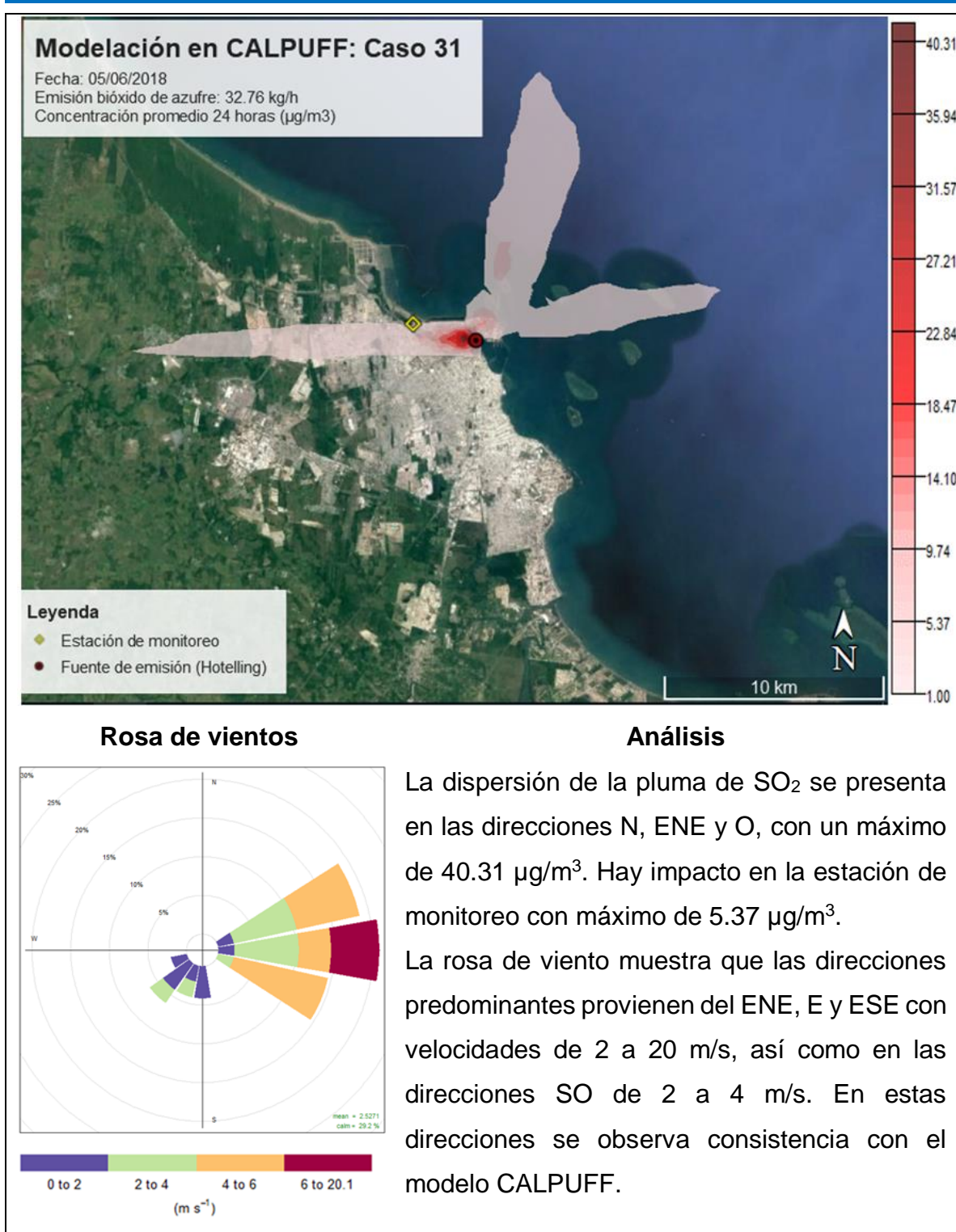


Figura 0.30 Caso de estudio CALPUFF 05/06/2018

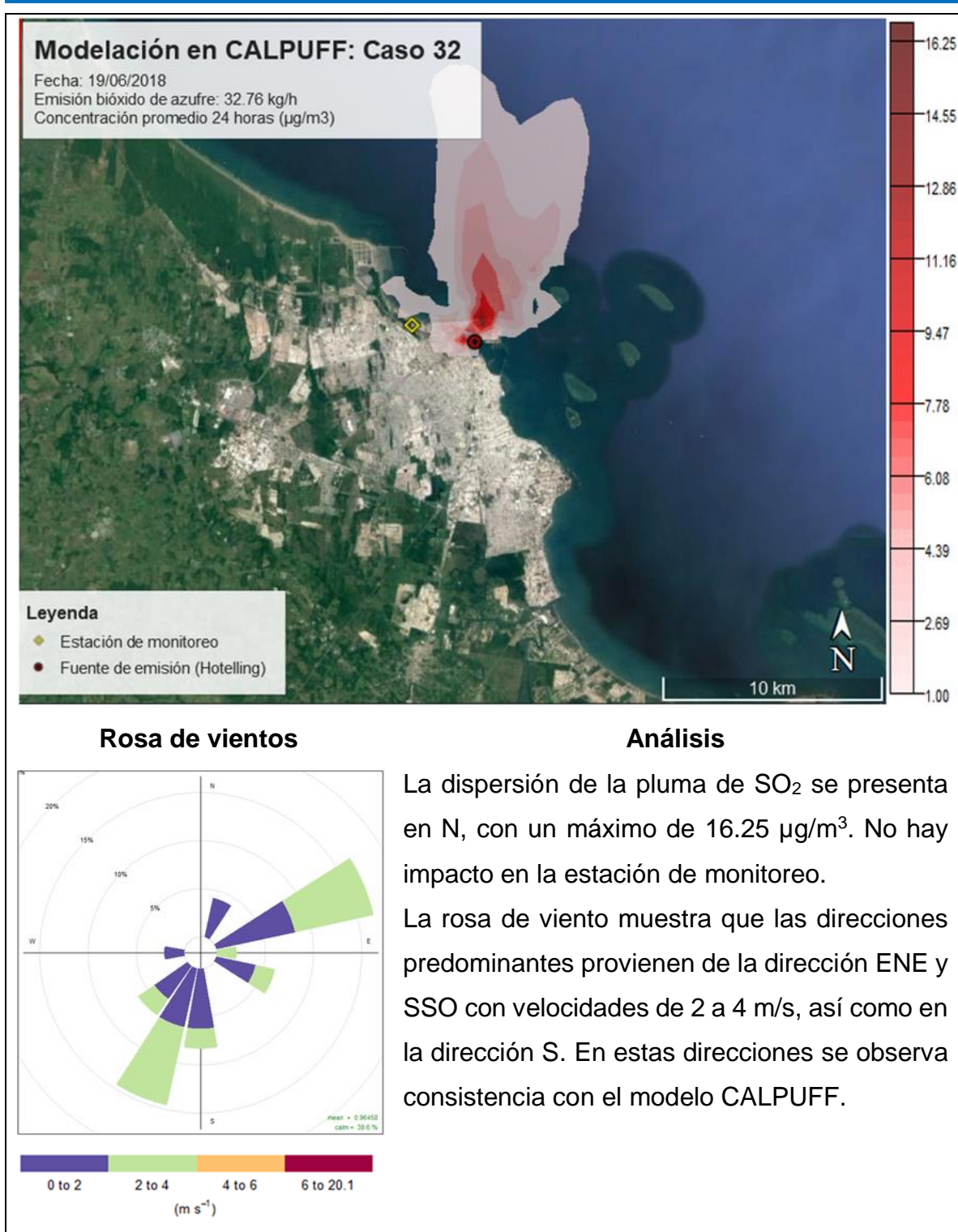


Figura 0.31 Caso de estudio CALPUFF 19/06/2018

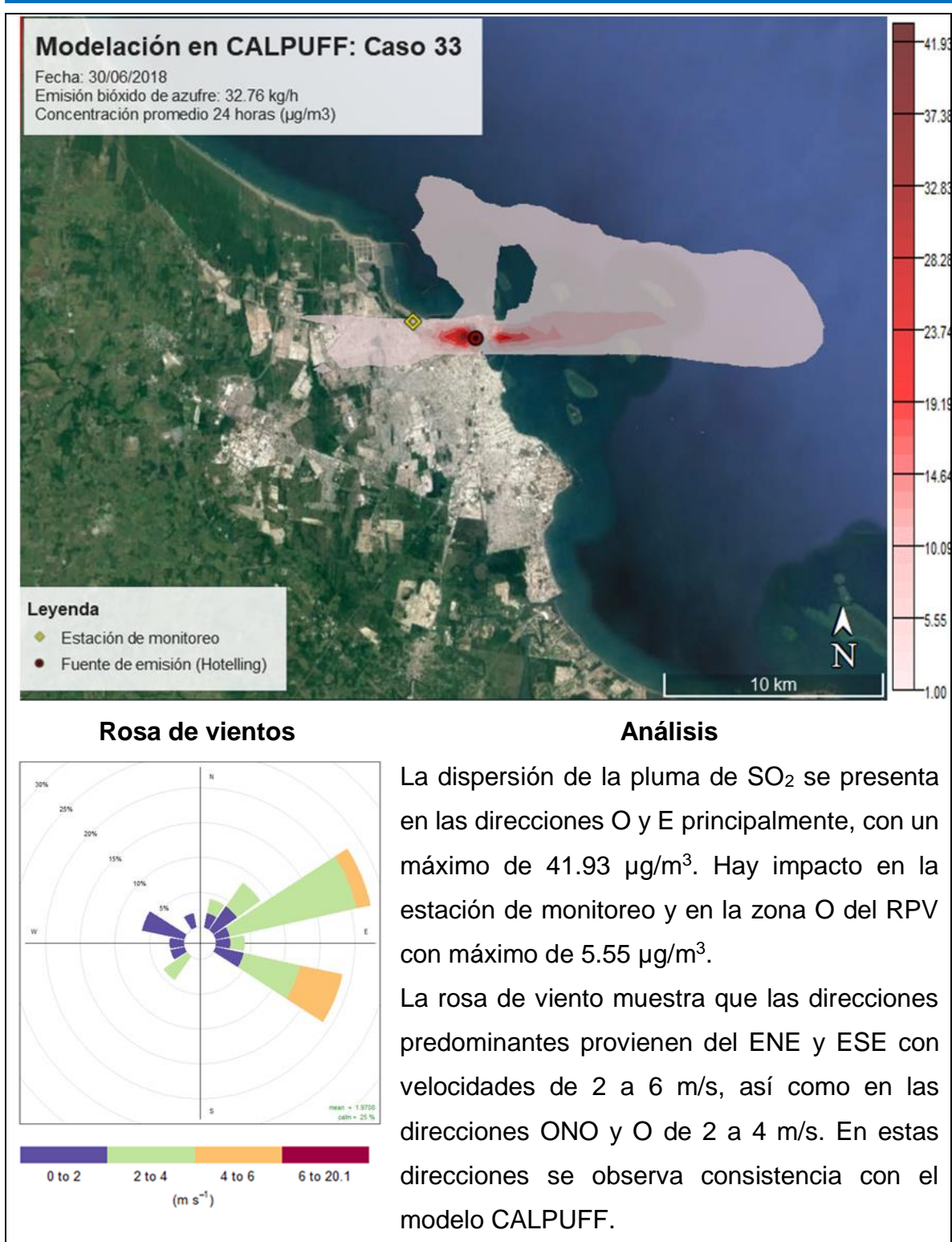


Figura 0.32 Caso de estudio CALPUFF 30/06/2018

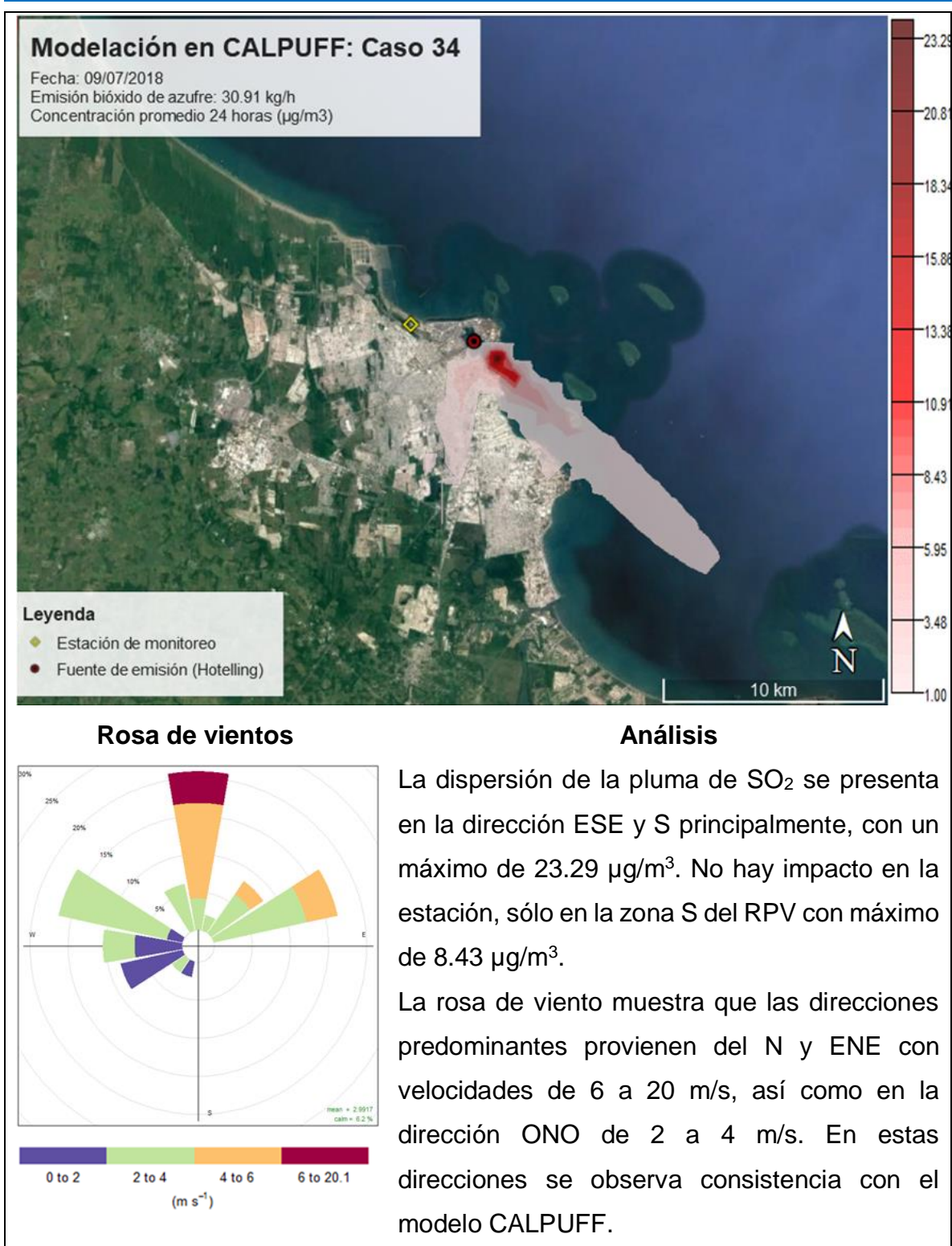


Figura 0.33 Caso de estudio CALPUFF 09/07/2018

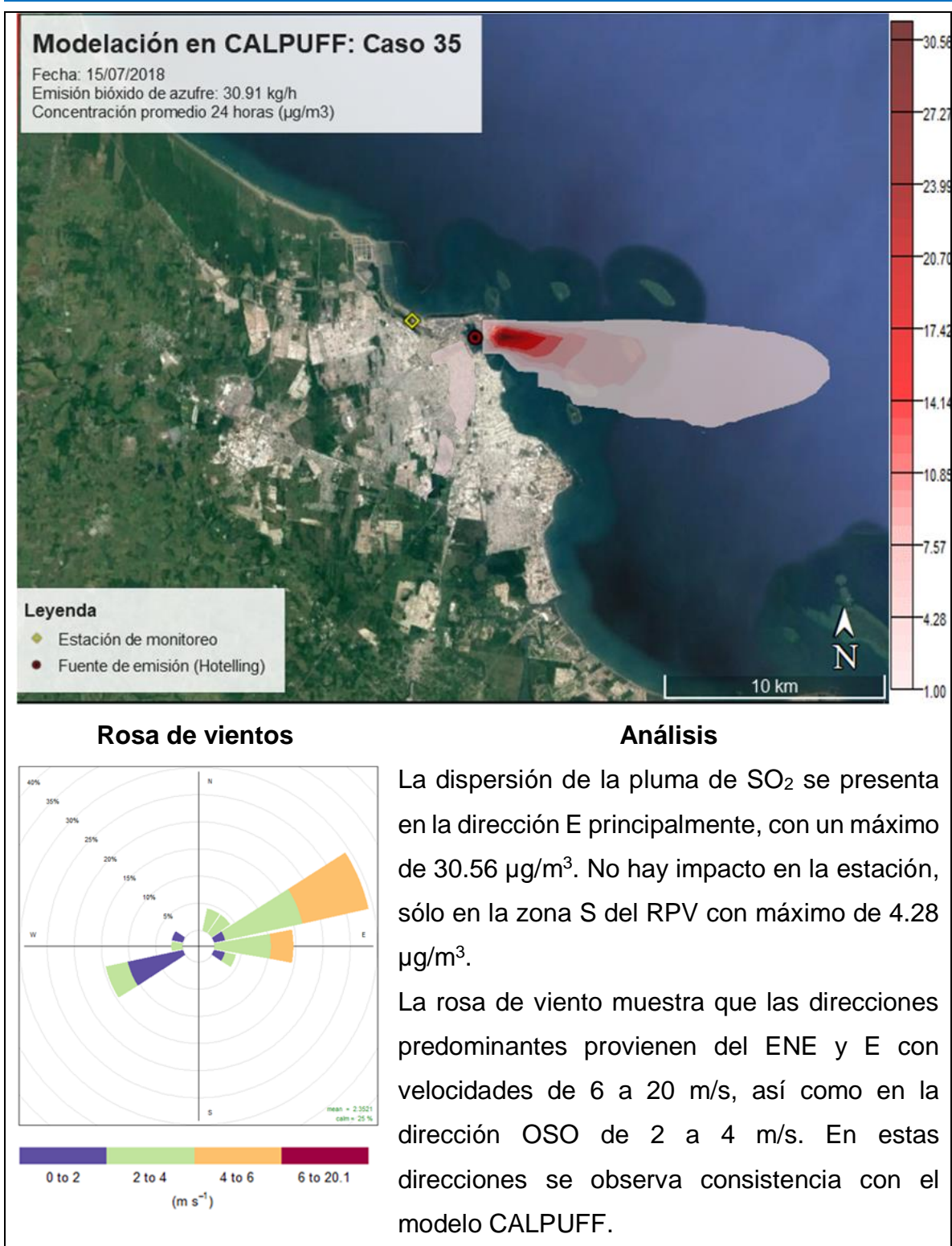


Figura 0.34 Caso de estudio CALPUFF 15/07/2018

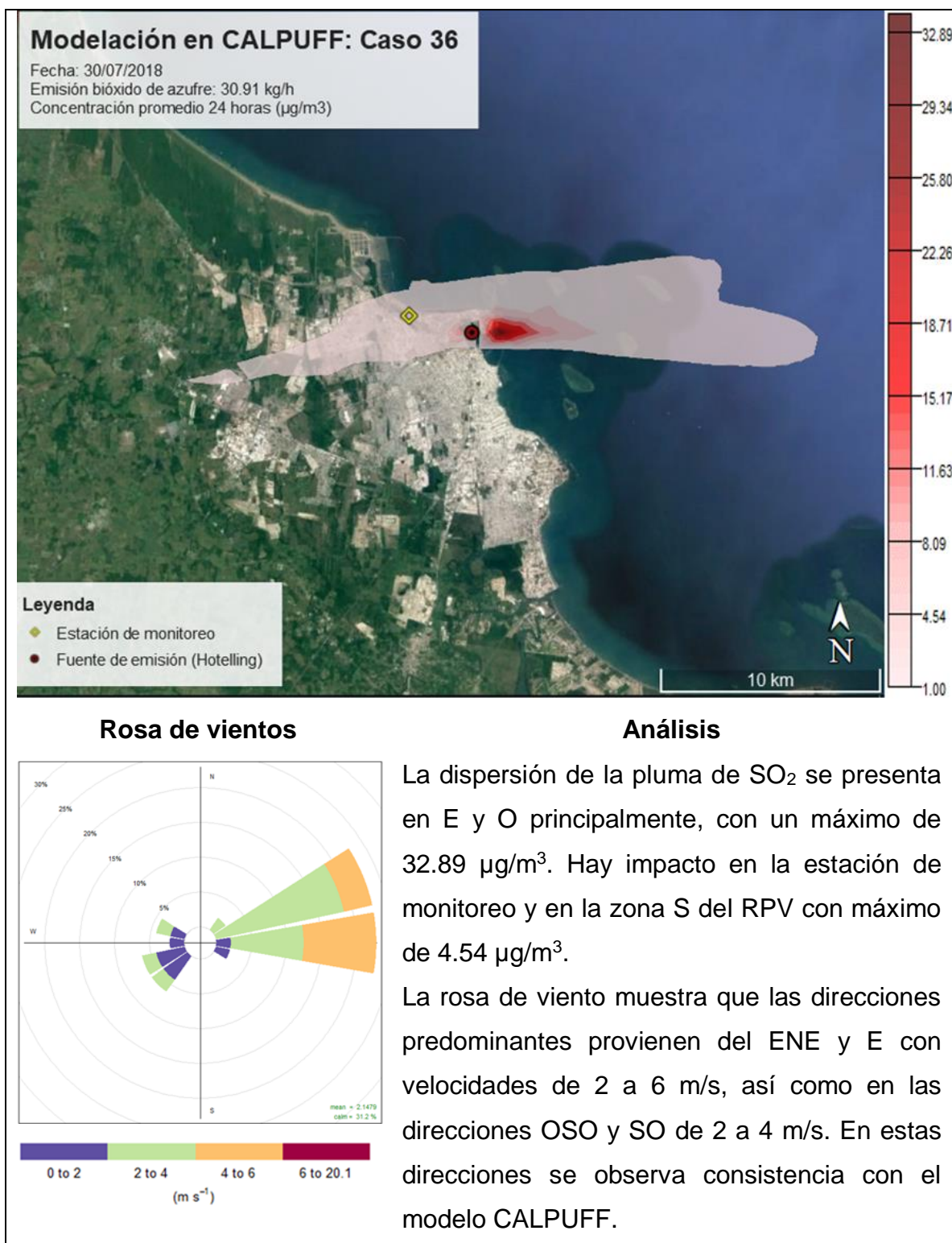


Figura 0.35 Caso de estudio CALPUFF 30/07/2018