



## **“MODELACIÓN DE EMISIONES DE NO<sub>x</sub> EN UNIDAD TG HITACHI”**

**Central Tres Puentes**



**Julio 2020**

## Índice

1. Introducción .....	6
2. Descripción y justificación del modelo.....	7
3. Características del dominio de la modelación y su entorno .....	9
3.1 Dominio modelación .....	9
3.2 Topografía .....	10
3.3 Uso de suelo.....	11
4. Características del dominio de modelación y su entorno.....	12
4.1 Dominio de modelación .....	12
4.2 Velocidad y dirección del viento.....	14
4.2.1 Series temporal horaria .....	14
4.2.1 Ciclos diarios .....	15
4.2.2 Rosa de vientos estacional .....	16
4.3 Temperatura .....	17
4.3.1 Serie temporal horaria .....	17
4.3.2 Ciclo diario.....	17
4.4 Humedad relativa.....	18
4.4.1 Serie temporal horaria .....	18
4.4.2 Ciclo diario.....	18
5. Variables meteorológicas generadas con WRF.....	19
5.1 Meteorología de superficie.....	19
5.2 Velocidad y dirección del viento.....	19
5.2.1 Series temporal horaria .....	19
5.2.2 Ciclos diarios .....	20
5.2.3 Rosa de vientos estacional .....	21
5.3 Temperatura .....	22
5.3.1 Serie temporal horaria .....	22
5.3.1 Ciclo diario.....	23
6. Análisis de incertidumbre .....	24
6.1 Resultados del análisis de incertidumbre.....	25
7. Escenario de receptores .....	27

---

8.	Estimación de emisiones atmosféricas .....	29
9.	Normativa aplicable .....	31
10.	Línea de base de calidad del aire.....	31
11.	Aportes modelado .....	32
12.	Análisis normativo .....	34
13.	Conclusiones.....	39
14.	Apéndice 1 Isoconcentraciones.....	39

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Características del área de modelación.</i>	9
<i>Tabla 2: Características del área de modelación.</i>	11
<i>Tabla 3: Información de la Estación Punta Arenas Rural.</i>	12
<i>Tabla 4: Características del área de modelación.</i>	25
<i>Tabla 5: Características del área de modelación.</i>	27
<i>Tabla 6: Tasa de emisiones de NOx.</i>	29
<i>Tabla 7: Norma primaria de calidad del aire.</i>	31
<i>Tabla 8: Resultados del monitoreo de NO<sub>2</sub>, periodo 2015 – 2019.</i>	31
<i>Tabla 9: Aporte de NOx Central Tres Puentes, año 2016.</i>	32
<i>Tabla 10: Aporte de NOx Central Tres Puente, año 2017.</i>	32
<i>Tabla 11: Aporte de NOx Central Tres Puentes, año 2018.</i>	33
<i>Tabla 12: Análisis de norma primaria nacional, Central Tres Puentes, año 2016.</i>	36
<i>Tabla 13: Análisis de norma primaria nacional, Central Tres Puentes, año 2017.</i>	36
<i>Tabla 14: Análisis de norma primaria nacional, Central Tres Puentes, año 2018.</i>	37
<i>Tabla 15: Análisis de la directriz de la OMS, Central Tres Puentes, año 2016.</i>	37
<i>Tabla 16: Análisis de la directriz de la OMS, Central Tres Puentes, año 2017.</i>	38
<i>Tabla 17: Análisis de la directriz de la OMS, Central Tres Puentes, año 2018.</i>	38
<i>Tabla 18: Aporte de las emisiones de la TG Hitachi a la calidad del aire.</i>	39

## Índice de Figuras

<i>Figura 1: Representación de un Modelo Tipo Puff.</i>	8
<i>Figura 2: Dominio de la modelación.</i>	9
<i>Figura 3: Topografía en el dominio de la modelación.</i>	10
<i>Figura 4: Uso de suelo en el dominio de la modelación.</i>	11
<i>Figura 5: Ubicación de la estación Punta Arenas Rural.</i>	13
<i>Figura 6: Serie de tiempo horaria de velocidad del viento observada.</i>	14
<i>Figura 7: Serie de tiempo horaria de dirección del viento observada.</i>	14
<i>Figura 8: Ciclo diario de velocidad del viento observada.</i>	15
<i>Figura 9: Ciclo diario de dirección del viento observada.</i>	15
<i>Figura 10: Rosas de viento estacional observada, 1 de 2.</i>	16
<i>Figura 11: Rosas de viento estacional observada, 2 de 2.</i>	16

Figura 12: Serie temporal de temperatura observada. ....	17
Figura 13: Ciclo diario de temperatura observada.....	17
Figura 14: Serie temporal de humedad relativa observada. ....	18
Figura 15: Ciclo diario de humedad relativa observada.....	18
Figura 16: Serie de tiempo horaria de velocidad del viento generado con WRF. ....	19
Figura 17: Serie de tiempo horaria de dirección del viento generado con WRF. ....	20
Figura 18: Ciclo diario de velocidad del viento generado con WRF.....	20
Figura 19: Ciclo diario de dirección del viento generado con WRF. ....	21
Figura 20: Rosas de viento estacional generado con WRF 1 de 2. ....	21
Figura 21: Rosas de viento estacional generado con WRF 2 de 2. ....	22
Figura 22: Rosas de viento estacional generado con WRF 2 de 2. ....	22
Figura 23: Ciclo diario de temperatura generado con WRF.....	23
Figura 24: Regresión entre los datos modelados y observados .....	26
Figura 25: Ciclo diario de los datos observados y modelados.....	26
Figura 26: Escenario de receptores. ....	28
Figura 27: Serie temporal horaria NOx 2016.....	29
Figura 28: Serie temporal horaria NOx 2017.....	30
Figura 29: Serie temporal horaria NOx 2018.....	30
Figura 30: Isoconcentraciones, promedio anual NO <sub>2</sub> , año 2016.....	40
Figura 31: Isoconcentraciones, Percentil 1 hora, P99 NO <sub>2</sub> , año 2016.....	41
Figura 32: Isoconcentraciones, promedio anual NO <sub>2</sub> , año 2017.....	42
Figura 33: Isoconcentraciones, Percentil 1 hora, P99 NO <sub>2</sub> , año 2017.....	43
Figura 34: Isoconcentraciones, promedio anual NO <sub>2</sub> , año 2018.....	44
Figura 35: Isoconcentraciones, Percentil 1 hora, P99 NO <sub>2</sub> , año 2018.....	45

## **1. Introducción**

El presente documento tiene por objetivo establecer una predicción de impactos de carácter atmosféricos para las emisiones NOx a partir del escenario actual del proyecto.

La metodología para la modelación de emisiones se realiza de acuerdo con las directrices señaladas en la “Guía para el de Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA”, elaborada por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) en el año 2012. La guía establece lo siguiente:

- Modelos de calidad del aire según dominio de la modelación y tipo de contaminantes.
- Presentación de los datos meteorológicos y resultados.
- Presentación de la modelación de calidad del aire.
- Criterios para presentación de análisis de incertidumbre.

La base del modelo de dispersión es el modelo de campos de viento WRF y el modelo de dispersión atmosférica Calpuff, ambos incluidos en la Guía antes mencionada.

La modelación de la dispersión de las emisiones del proyecto corresponde a las emisiones resultantes para los años 2016, 2017 y 2018 de la Central Tres Puentes. Se consideraron 6 receptores de interés para evaluar el cumplimiento normativo primario de calidad del aire según el aporte resultante.

## **2. Descripción y justificación del modelo**

Para la presente modelación de emisiones atmosféricas, los modelos de pronóstico y dispersión propuestos son los siguientes:

- Modelo de pronóstico WRF
- Modelos de dispersión de contaminantes CALPUFF

El Modelo WRF es un modelo de meso escala de quinta generación, corresponde a una versión no hidrostática y compresible de un modelo desarrollado por el “National Center for Atmospheric Research” (NCAR), el “National Oceanic and Atmospheric Administration”, la “Air Force Weather Agency” (AFWA), el “Naval Research Laboratory”, y la “University of Oklahoma”, en conjunto con la “Federal Aviation Administration” (FAA).

El Modelo WRF como modelo físico de predicción resuelve en una malla las ecuaciones de pronóstico para las principales variables meteorológicas: geopotencial, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y niveles de presión, entre otras. Por otra parte, el modelo se alimenta con los campos de las salidas del Modelo GFS “Global Forecast System”.

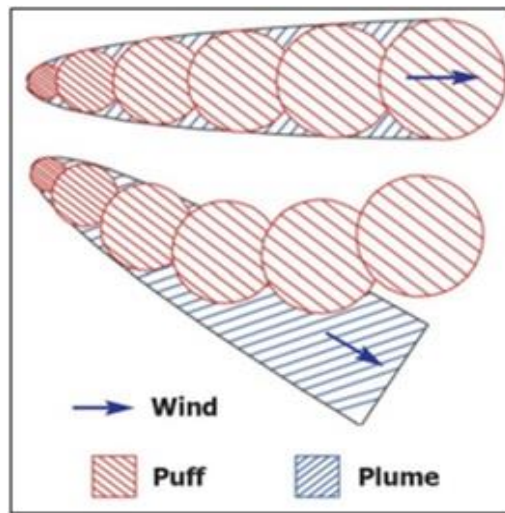
Algunos aspectos importantes del Modelo WRF son: la capacidad de anidamientos múltiples con interacciones en ambas direcciones entre los dominios, facilitando el estudio de fenómenos atmosféricos bajo distintas escalas espaciales y el diseño de predicciones a muy alta resolución.

El modelo de dispersión Calpuff es una combinación entre modelos Gaussianos y modelos Lagrangeanos, en el sentido que calculan la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea, llamada “puff”, a lo largo de una trayectoria. Su aproximación matemática consiste en estimar la dispersión en forma Gaussiana en cada punto de una trayectoria; es decir, a diferencia de los modelos Lagrangeanos que necesitan el cálculo de un gran número de trayectorias para una fuente, los modelos tipo “puff” sólo requieren una trayectoria por “puff”, lo que hace su cálculo mucho más rápido. En el caso de emisiones continuas, se simulan las trayectorias y la dispersión Gaussiana de muchos “puffs”.

En la Figura N°1 se muestra de forma esquemática lo anterior.

Finalmente, CALPOST procesa las salidas de CALPUFF creando los archivos con las tabulaciones necesarias para la evaluación de los resultados según los estadísticos establecidos en las normas de calidad del aire.

Se utiliza el modelo Calpuff por la topografía compleja del terreno, y cuyos efectos exceden los 5 km, como describe la “Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA”, 2012.



**Figura 1: Representación de un Modelo Tipo Puff.**

Por otra parte, el Modelo de Dispersión Calpuff requiere para su desarrollo de los siguientes escenarios:

- Escenario Meteorológico correspondiente a los datos evaluados a partir del Modelo de Pronóstico WRF.
- Escenario de Receptores y Emisiones, basado en puntos o receptores de interés y sensibles al impacto por parte de las emisiones generadas por el Proyecto, tales como centros urbanos, casas cercanas, entre otros.



### 3. Características del dominio de la modelación y su entorno

#### 3.1 Dominio de modelación

El área de modelación corresponde a una grilla de 50 x 50 km, con un espaciamento de 1 km, en cuyo interior se encuentra ubicado el sitio de emplazamiento del proyecto y puntos de interés.

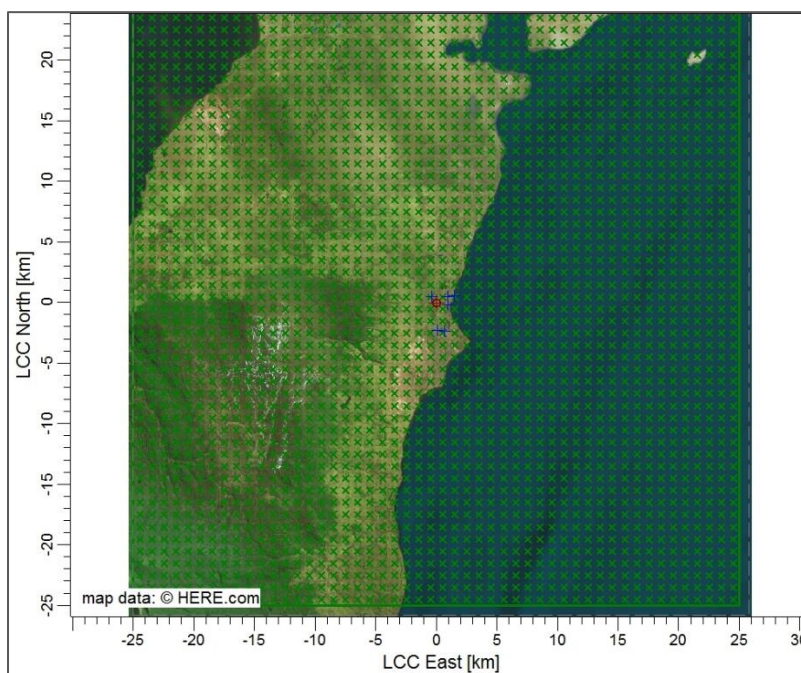
La Tabla 1 resume las características del área de modelación.

**Tabla 1: Características del área de modelación.**

Característica	Especificación
Tamaño de la Grilla	50 x 50 km, con espaciamento de 1 km
N° de celdas en eje x	50
N° de celdas en eje y	50
Coordenada de Origen	305408.00 m E 6141822.00 m S

El área de dominio de la modelación se presenta en la Figura 2.

Cabe señalar que el área del dominio de modelación no es el área de influencia del proyecto, sin embargo, lo abarca a fin de evaluar los distintos componentes ambientales que pueden verse afectados.

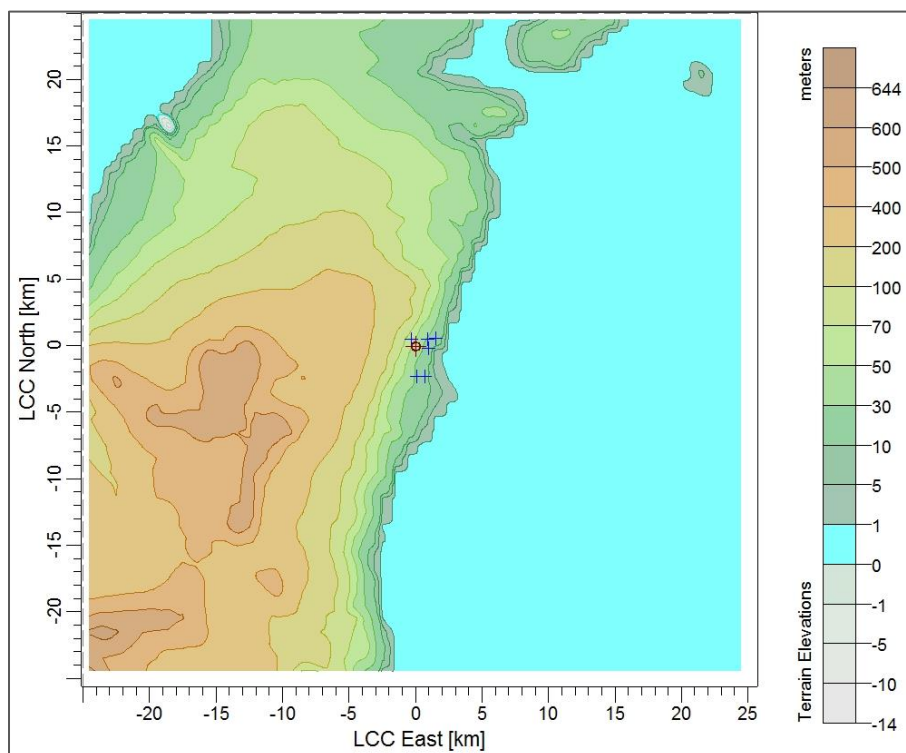


**Figura 2: Dominio de la modelación.**

### 3.2 Topografía

Los antecedentes topográficos presentados en la Figura N°3 son extraídos como datos de entrada al modelo Calpuff, desde la página web de “Land Cover Institute del Geological Survey de Estados Unidos “(USGS)<sup>1</sup>.

Se aprecia que las elevaciones máximas del terreno alcanzan los 644 m.



**Figura 3: Topografía en el dominio de la modelación.**

<sup>1</sup> <https://landcover.usgs.gov/>

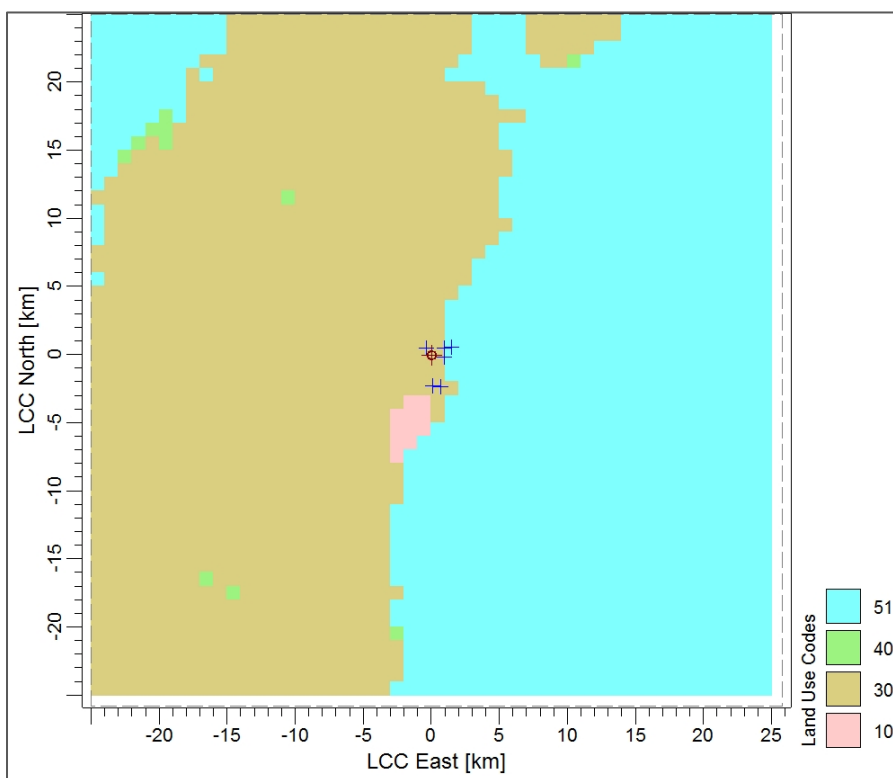
### 3.3 Uso de suelo

En la Tabla 2 se presentan las características del uso del suelo del dominio de la modelación.

**Tabla 2: Características del área de modelación.**

Tipo de Suelo	Código	Rugosidad superficial	Albedo	Razón de Bowen
Agua	51	0,001	0,1	0,0
Bosques	40	1,0	0,1	1,0
Pastizales	30	0,05	0,25	1,0
Urbano	10	1,0	0,18	1,5

De la Figura 4 Uso de suelos en el dominio de la modelación, se aprecia que la predominancia corresponde a suelos de tipo pastizales.



**Figura 4: Uso de suelo en el dominio de la modelación.**

## 4. Características del dominio de modelación y su entorno

### 4.1 Dominio de modelación

Para la caracterización meteorológica del área de emplazamiento del proyecto se ha utilizado la base de datos de la estación de monitoreo Punta Arenas Rural ubicada en la comuna de Punta Arenas, región de Magallanes. Los valores son obtenidos en línea desde la página web de la red AGROMET2.

Es importante señalar que el uso de los datos meteorológicos observados, además de caracterizar cualitativamente la dispersión de las emisiones del proyecto, permiten realizar el análisis de incertidumbre del modelo de campos de viento.

Los registros meteorológicos utilizados corresponden a los periodos entre el día 01 de enero al 31 de diciembre del 2019 en donde la condición más desfavorable se presenta en el periodo invernal.

En la Tabla 3 se presenta la información general de la estación Punta Arenas Rural, mientras que en la Figura 5 se presenta la ubicación respecto a la Central.

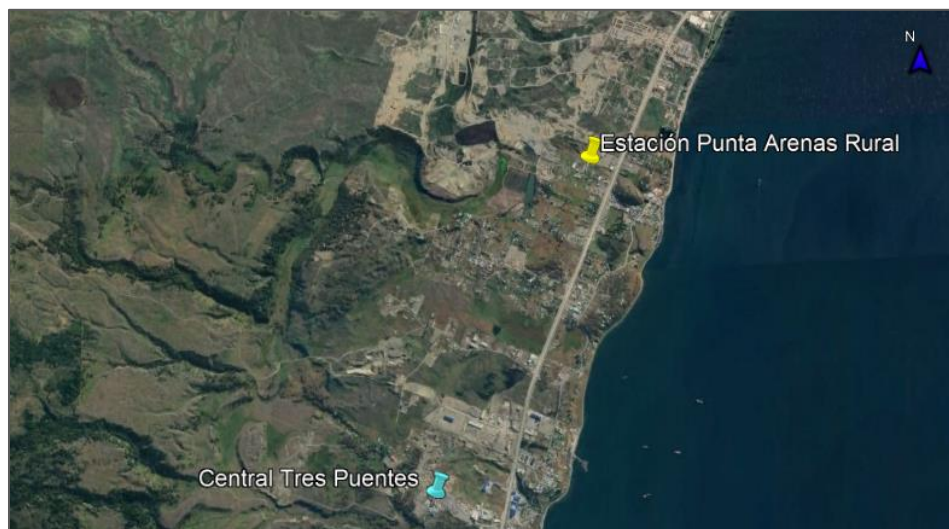
**Tabla 3: Información de la Estación Punta Arenas Rural.**

Tipo de Suelo	Código
Operador	Red Agroclimática Nacional. Ministerio de Agricultura
Localización	Región del Magallanes, comuna de Punta Arenas
Coordenadas UTM	374453.00 m E 4118382.00 m S
Huso horario	19 F
Parámetros meteorológicos	Velocidad (m/s) y dirección del viento (°), Temperatura (°C) y Humedad Relativa (%)
Frecuencia	Horaria

<sup>2</sup> [www.agromet.cl/datos-historicos](http://www.agromet.cl/datos-historicos).

Se puede observar de la Figura 5 que la estación Punta Arenas Rural se ubica en dirección Nor-noroeste de la Central Tres Puentes hacia unos 4 km aproximadamente, establecida dentro del área de modelación.

Cabe destacar que los datos de esta estación no se usan para la base de campos de viento del modelo de dispersión Calpuff, sino solo en forma referencial y comparativa con los resultados del modelo de campos de viento WRF, por lo tanto no es necesario que se encuentre dentro del área de influencia del proyecto, pero si dentro del área de modelación, lo cual si ocurre.



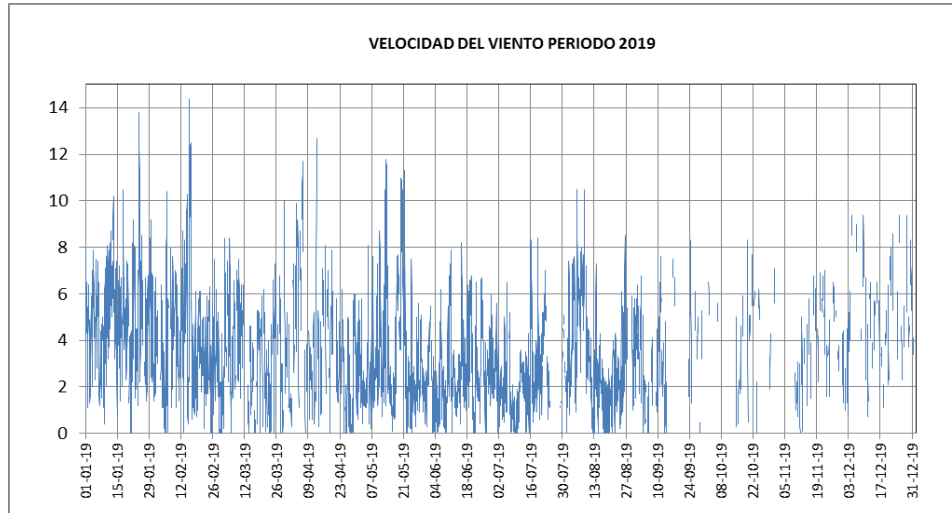
***Figura 5: Ubicación de la estación Punta Arenas Rural.***

## 4.2 Velocidad y dirección del viento

### 4.2.1 Series temporal horaria

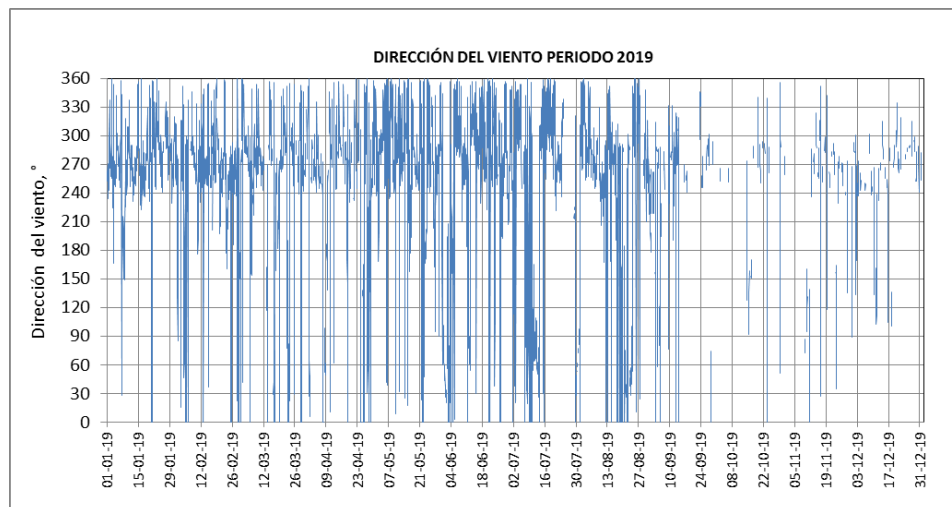
En la Figura 6 se aprecia la serie temporal horaria de velocidad del viento. La máxima registrada es de 14,4 m/s, mientras que el promedio para el periodo es de 3,6 m/s.

Se aprecia que existen datos faltantes.



**Figura 6: Serie de tiempo horaria de velocidad del viento observada.**

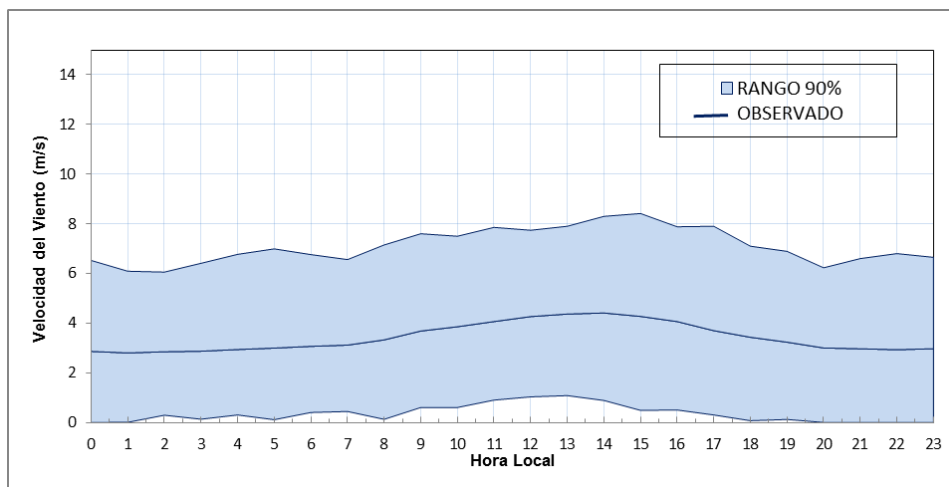
En la Figura 7 se presenta la serie de tiempo horaria para la dirección del viento observada.



**Figura 7: Serie de tiempo horaria de dirección del viento observada.**

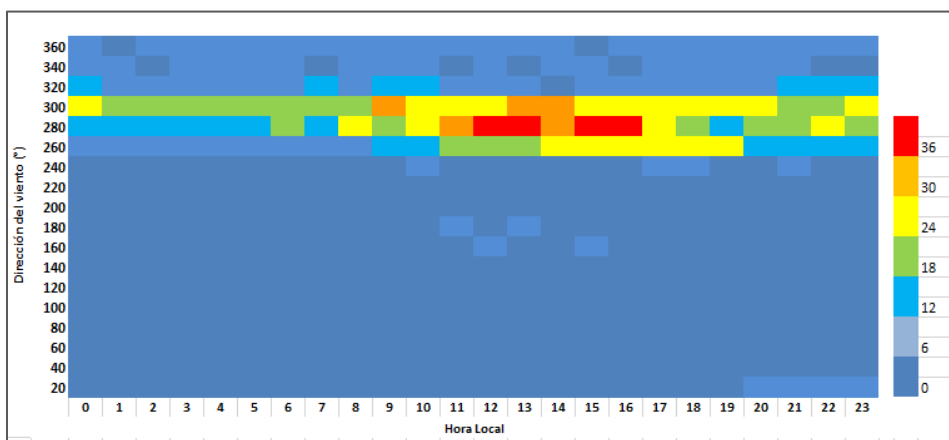
#### 4.2.1 Ciclos diarios

La Figura 8 presenta el ciclo de velocidad del viento en términos de percentil 5 y 95. Se aprecia que los valores más altos se presentan durante el día, entre las 12:00 a 15:00 horas.



**Figura 8: Ciclo diario de velocidad del viento observada.**

En la Figura 9 se presenta el ciclo diario de dirección del viento observado. Se puede apreciar que entre las 11:00 a 16:00 horas se presenta mayor frecuencia de vientos.

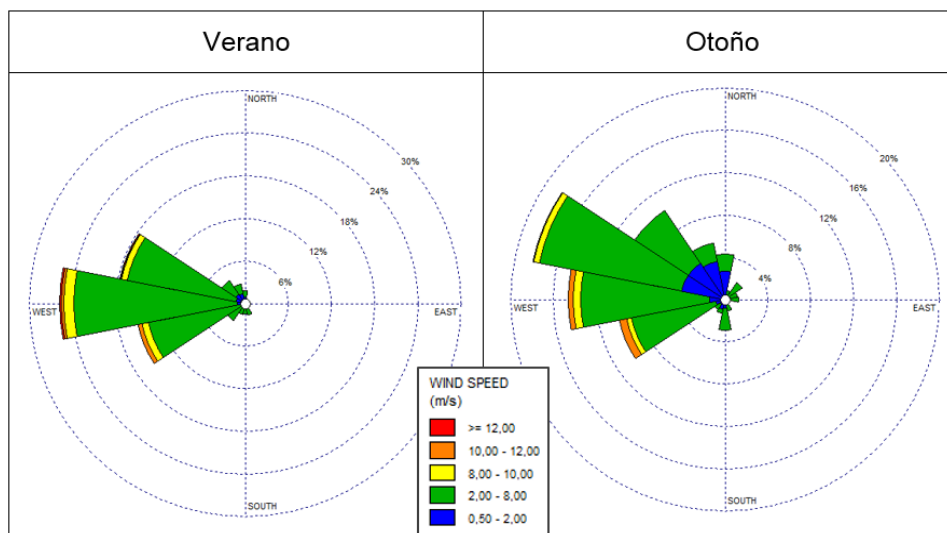


**Figura 9: Ciclo diario de dirección del viento observada.**



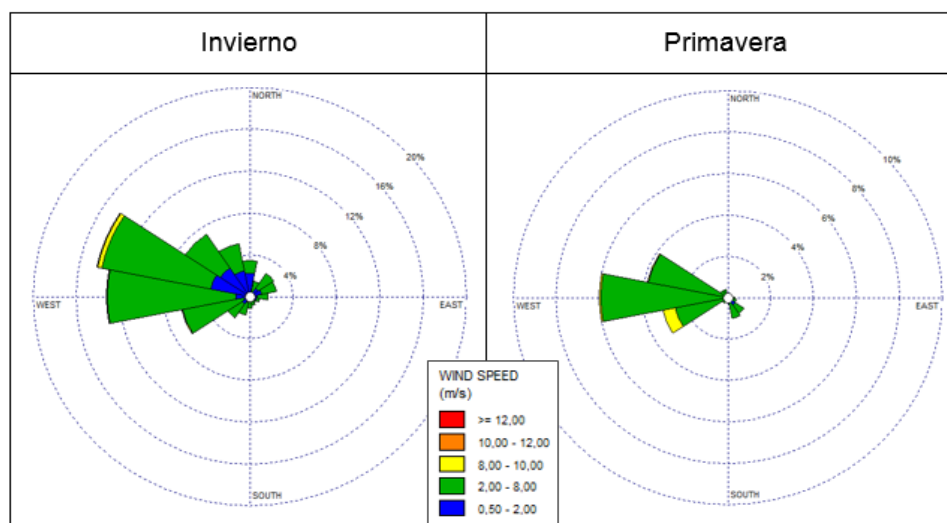
#### 4.2.2 Rosa de vientos estacional

La Figura 10 muestra las rosas de vientos de verano y otoño del periodo observado, en la cual se aprecia que predominan las componentes oeste, oeste-noroeste y oeste-suroeste con velocidades que frecuentan principalmente entre los 2 a 8 m/s.



**Figura 10: Rosas de viento estacional observada, 1 de 2.**

La Figura 11 presenta las rosas de vientos para las estaciones de invierno y primavera en donde se observan las componentes predominantes oeste, oeste-noroeste y oeste-suroeste con velocidades que varían entre los 2 a 10 m/s.



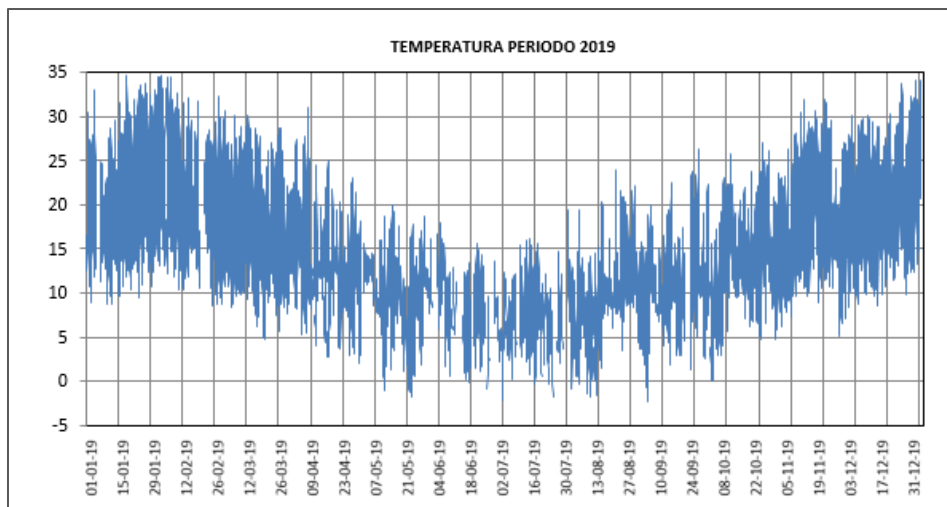
**Figura 11: Rosas de viento estacional observada, 2 de 2.**



### 4.3 Temperatura

#### 4.3.1 Serie temporal horaria

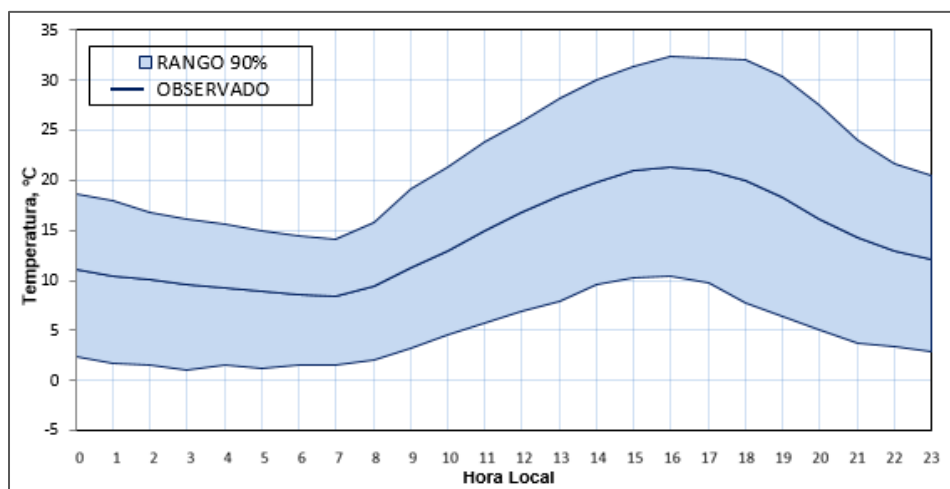
La serie de tiempo horaria para temperatura del periodo observado se presenta en la Figura 12. Se aprecia que las máximas alcanzan los 34,7 en los meses de verano, mientras que las mínimas registran valores de -2,4 °C.



**Figura 12: Serie temporal de temperatura observada.**

#### 4.3.2 Ciclo diario

La Figura 13 muestra el ciclo diario de temperatura observada en términos de percentil 5 y 95. Se aprecia que las temperaturas alcanzan valores máximos entre las 15:00 a 17:00 horas, mientras que las mínimas se presentan durante la madrugada.

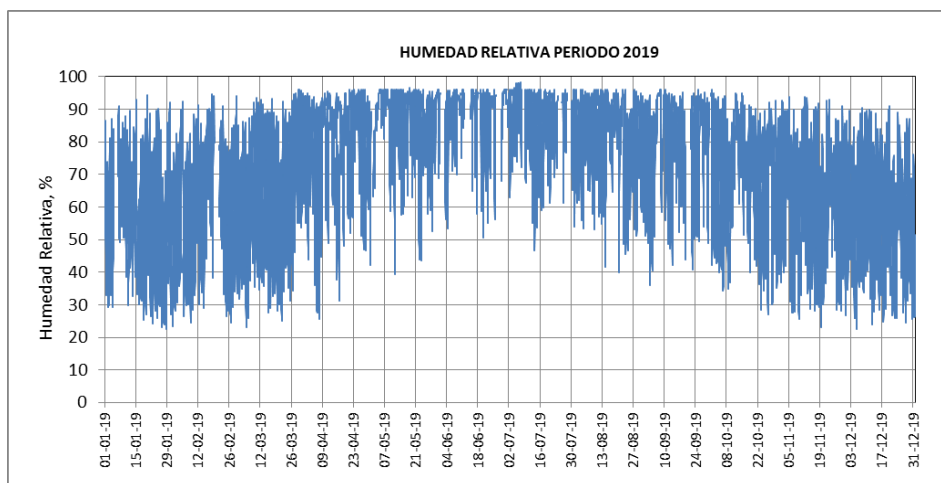


**Figura 13: Ciclo diario de temperatura observada.**

## 4.4 Humedad relativa

### 4.4.1 Serie temporal horaria

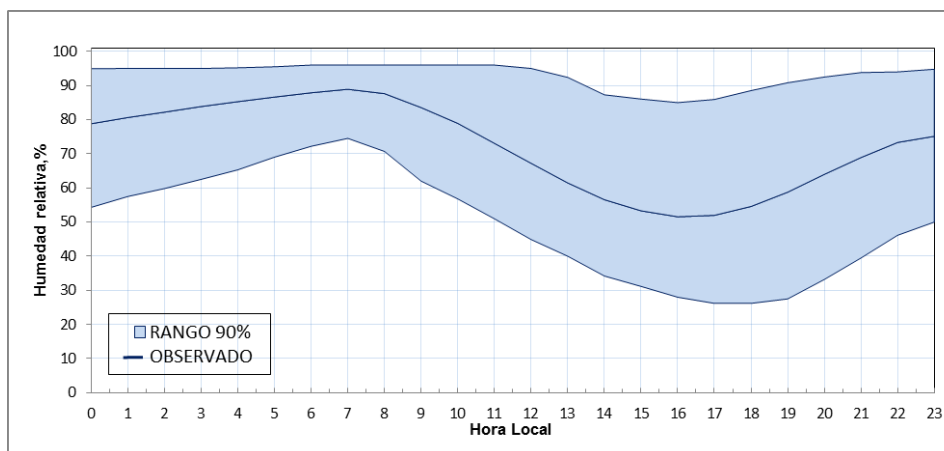
En la Figura 14 se presenta la serie temporal horaria de humedad relativa observada, en los cuales los valores para el periodo oscilan entre el 22 % y el 98 %.



**Figura 14: Serie temporal de humedad relativa observada.**

### 4.4.2 Ciclo diario

El ciclo diario de humedad relativa observada en términos de percentil 5 y 95 se presenta en la Figura 15.



**Figura 15: Ciclo diario de humedad relativa observada.**

## 5. Variables meteorológicas generadas con WRF

### 5.1 Meteorología de superficie

Las variables meteorológicas que se consideran para la modelación de dispersión de contaminantes se obtienen a través del modelo de pronóstico WRF para el periodo comprendido entre el 01 de enero al 31 de diciembre del 2019.

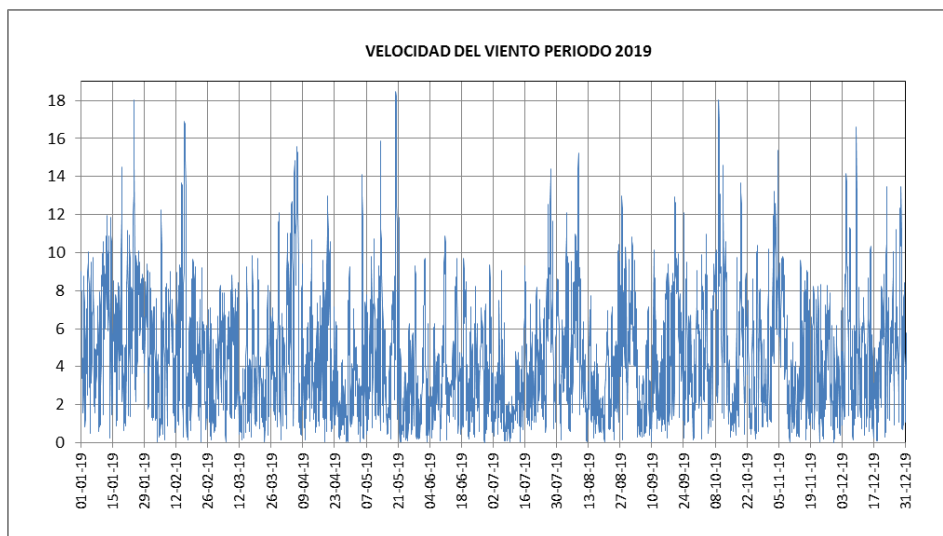
Los parámetros como resultados del modelo corresponden a los siguientes:

- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección del viento (°)
- Temperatura (°C).

### 5.2 Velocidad y dirección del viento

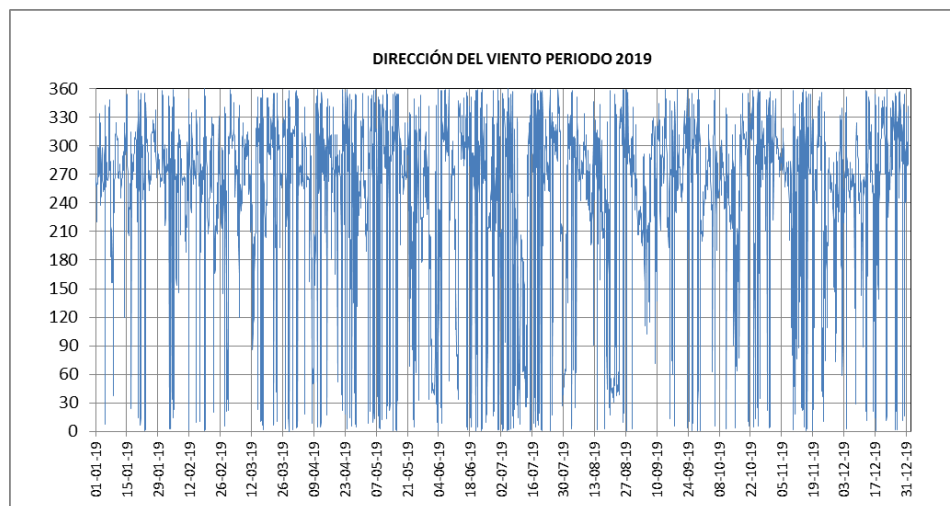
#### 5.2.1 Series temporal horaria

En la Figura 16 se aprecia la serie de tiempo horaria de velocidad del viento generado con el modelo WRF. Se observa que, para el periodo, los vientos registran velocidades sobre los 14 m/s, con un valor máximo alcanzado de 18,5 m/s para el día 05 de mayo a las 05:00 horas.



**Figura 16:** Serie de tiempo horaria de velocidad del viento generado con WRF.

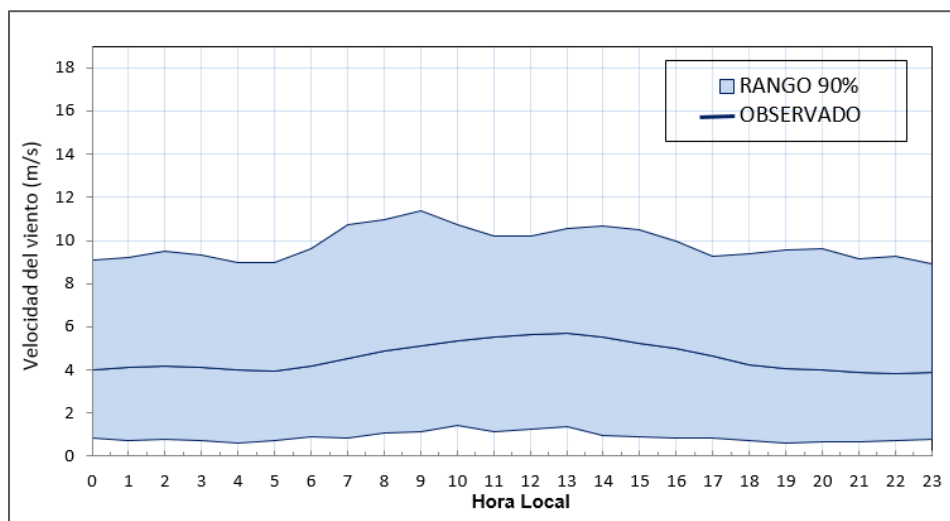
La Figura 17 presenta la serie de tiempo horaria de dirección del viento generado con WRF. Para el periodo frecuentan las componentes Oeste, Oeste-noroeste y Noroeste.



**Figura 17: Serie de tiempo horaria de dirección del viento generado con WRF.**

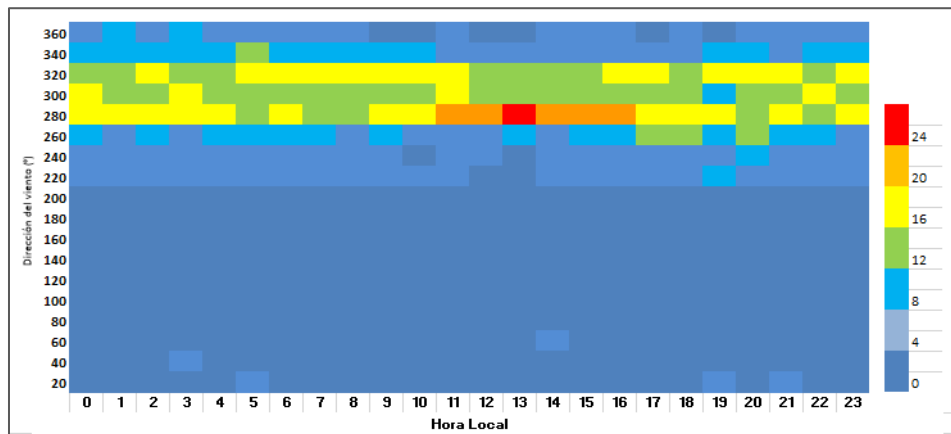
### 5.2.2 Ciclo diarios

En la Figura 18 se presenta el ciclo diario de velocidad del viento generado con WRF junto con su variabilidad en términos de percentiles 5 y 95. Se observa que entre las 11:00 a 13:00 horas se presentan los valores más altos respecto al promedio observado.



**Figura 18: Ciclo diario de velocidad del viento generado con WRF.**

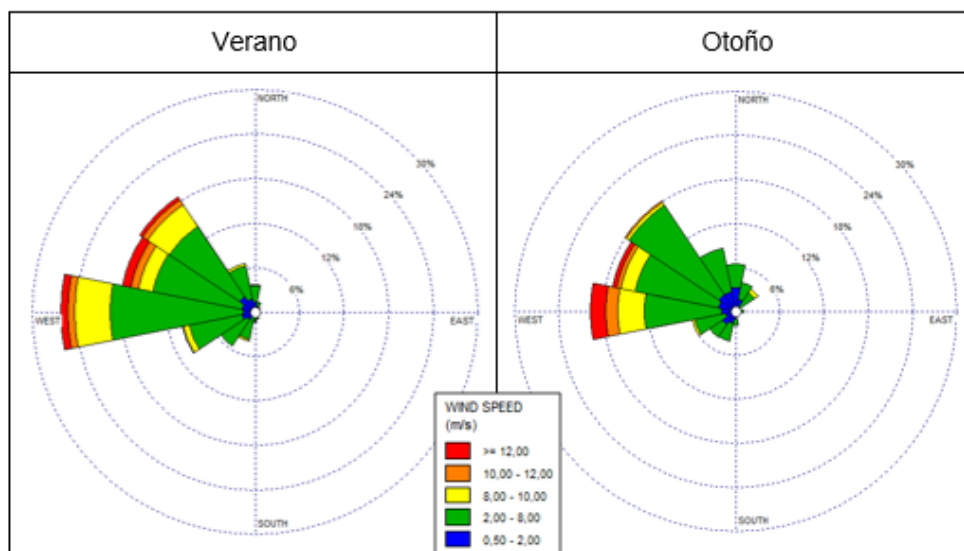
En la Figura 19 se aprecia el ciclo diario de dirección del viento generado con WRF. Se puede observar que entre las 11:00 a 17:00 horas se presenta una mayor intensidad de vientos Oeste.



**Figura 19: Ciclo diario de dirección del viento generado con WRF.**

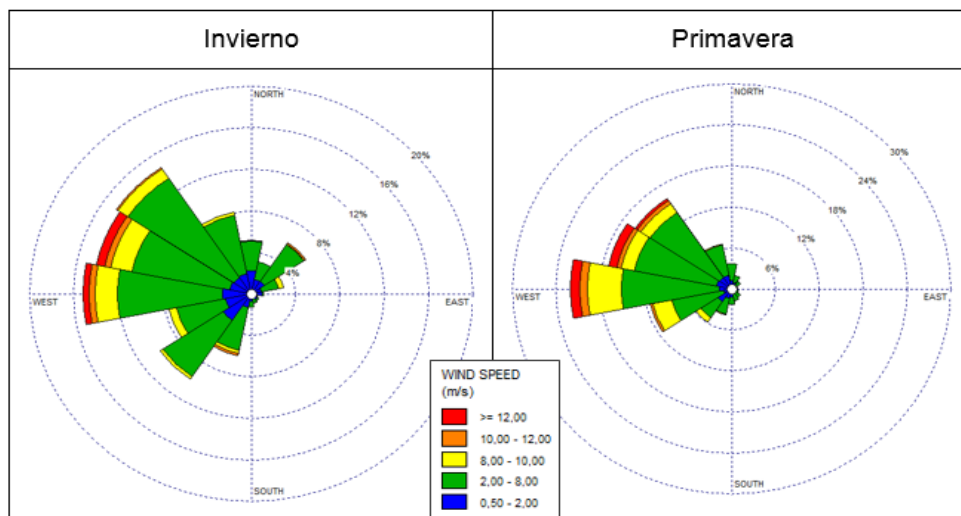
### 5.2.3 Rosa de vientos estacional

La Figura 20 presenta las rosas de vientos de velocidad y dirección generadas con el modelo WRF para el periodo de verano y otoño. Se puede apreciar que predominan las componentes Oeste, Oeste-noroeste y Noreste con velocidades que frecuentan mayormente entre los 2 a 8 m/s.



**Figura 20: Rosas de viento estacional generado con WRF 1 de 2.**

En la Figura 21 se observa la rosa de vientos para las estaciones de invierno y primavera. Para ambos periodos predominan las componentes Oeste, Oeste-noroeste y Noreste con velocidades que varían principalmente entre los 2 y 10 m/s.

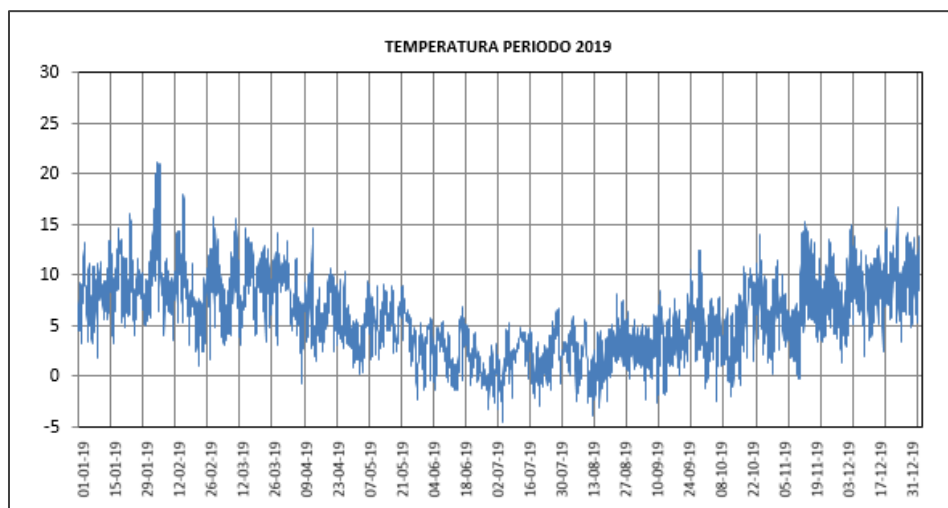


**Figura 21: Rosas de viento estacional generado con WRF 2 de 2.**

### 5.3 Temperatura

#### 5.3.1 Serie temporal horaria

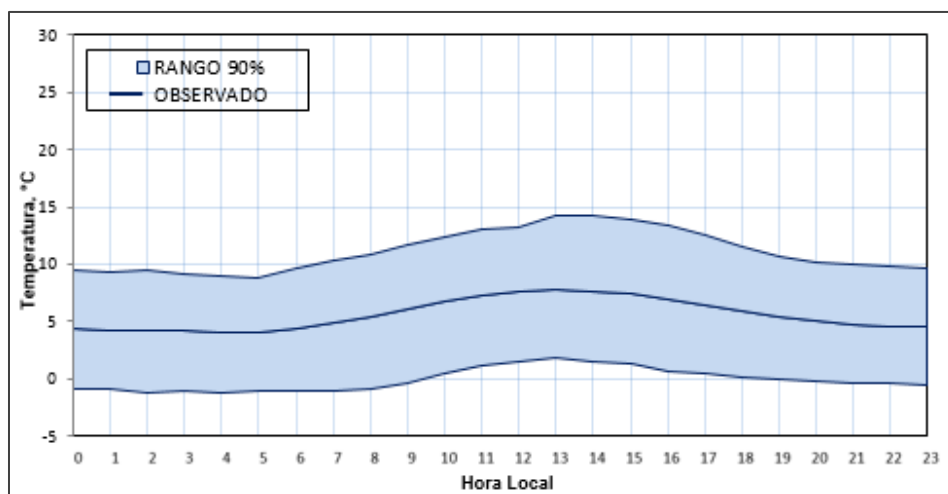
En la Figura 22 se presenta la serie temporal horaria para temperatura generada con WRF. Se aprecia que la temperatura varía principalmente entre los 0 a 15 °C. No obstante, se registra, máximas sobre los 20,0 °C y mínimas que alcanzan los -4,6 °C.



**Figura 22: Rosas de viento estacional generado con WRF 2 de 2.**

### 5.3.1 Ciclo diario

En la Figura 23 se aprecia el ciclo diario de la temperatura modelada en términos de percentiles 5 y 95. Se observa que los valores máximos se registran entre las 12:00 a 15:00 horas, mientras que las mínimas se presentan durante la madrugada.



**Figura 23: Ciclo diario de temperatura generado con WRF.**

## 6. Análisis de incertidumbre

La incertidumbre de dos series de datos puede desarrollarse de distintas formas, pero la más estándar en términos matemáticos es la aproximación de los mínimos cuadrados.

Este método consiste en asumir que existe una relación lineal entre las series de datos y se obtienen las siguientes ecuaciones de incertidumbre, al minimizar los cuadrados de los errores entre las series.

Se asume que si  $x_i$  es un punto de la velocidad modelada y  $y_i$  es un punto de velocidad observada en la hora  $i$  del año modelado<sup>3</sup>, la relación entre ellas es:

$$y_i = mx_i + b$$

Donde  $m$  corresponde a la pendiente de la relación lineal y está dado por:

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}$$

Y  $b$  corresponde a la intersección por el eje y está dado por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} .$$

Y  $N$  es el número de puntos considerados

Por lo tanto, las incertidumbres asociadas a las velocidades modeladas  $S_y$  a la incertidumbre para la pendiente  $m$   $S_m$ , y a la incertidumbre para  $b$   $S_b$ , vienen dadas por las siguientes ecuaciones,

Para  $S_y$ , la ecuación es:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}} .$$

<sup>3</sup> Los datos observados y modelados corresponden al día 01 de enero al 31 de diciembre del 2019. Por lo tanto, el análisis de incertidumbre corresponde a doce meses, que son los datos comparables.



Para  $S_m$ , la ecuación es:

$$S_m = S_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}}$$

Finalmente, para  $S_b$ , la ecuación es:

$$S_b = S_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}}$$

## 6.1 Resultados del análisis de incertidumbre

Como parte integral del método y base para este desarrollo, se debe limpiar la base de datos observados de data no fidedigna, como son la falta de información, valores en periodos no esperados, mantenciones y otros por lo que quedan 5.516 promedios horarios que asumen el valor de N en las ecuaciones.

Los resultados de la implementación del método entregan los siguientes resultados expuestos en la Tabla 4.

La diferencia entre la altura del sensor de viento y la altura del sensor que entrega el modelo WRF, explica parte de la diferencia encontrada en las velocidades, ver nota<sup>4</sup>. La expresión entre velocidades da un factor de 1.08 entre valores de velocidad a distinta altura. La otra diferencia puede ser atribuida a mantención y/o a representatividad.

**Tabla 4: Características del área de modelación.**

Parámetro de la regresión	Resultado
m, adimensional	0,54
b, m/s	1,11
Sy, m/s	2,83
Sm, adimensional	0,013
Sb, m/s	0,07
R <sup>2</sup> , m/s <sup>5</sup>	0,52

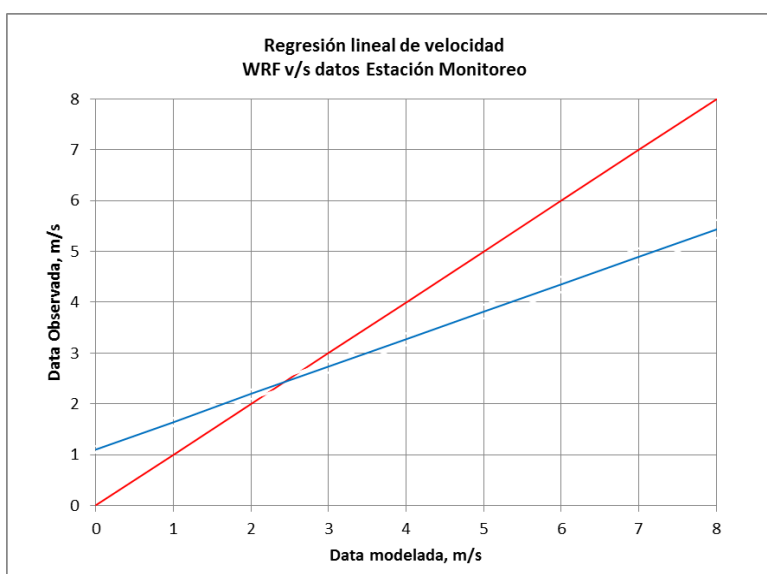
<sup>4</sup>  $V_{10}=V_2 (10/2)^\alpha$ , donde  $\alpha$  corresponde al exponente de rugosidad (wind shear exponent). Varía entre 0,0 a 0,40, según el tipo de rugosidad del terreno: agua, 0,13; grama, 0,14 a 0,16; cultivos y arbustos, 0,20; bosques, 0,25 y zonas urbanas, 0,40. Se asume un valor de 0.15 para el proyecto, rugosidad similar a la de pastizales. Da un valor de 1.08, es decir vientos un 8% más alto a 10 m que a 2 m de altura

<sup>5</sup> Coeficiente de correlación.

La Figura 24 muestra la correlación entre variables para el rango de velocidades presentes en la estación.

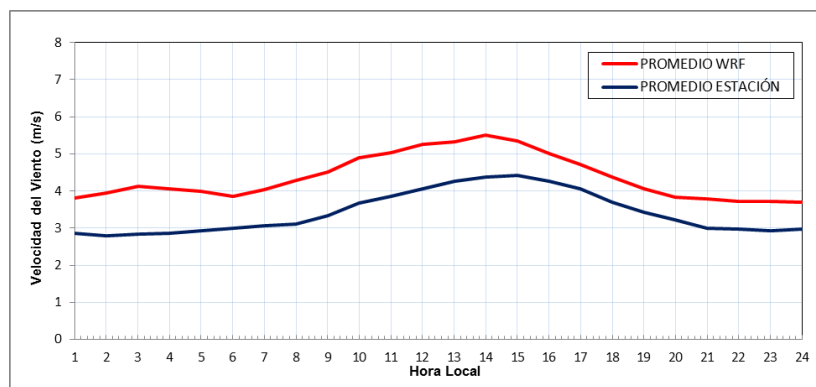
La línea recta en rojo corresponde a una respuesta ideal, donde la correlación es 1, con  $m=1$  y  $b=0$  m/s. La otra recta corresponde a la relación entre la data modelada y la data observada, con una correlación de 0,52 para  $m=0,54$  y  $b= 1,11$  m/s, más las variaciones de  $m$  y  $b$ .

Se aprecia que el modelo sobre los 2,4 m/s aproximadamente subestiman la intensidades de los vientos, que son los que favorecen la dispersión de contaminantes, mientras que a velocidades menores, la sobreestiman.



**Figura 24: Regresión entre los datos modelados y observados**

La Figura N° 25 muestra los ciclos diarios de la data modelada y observada.



**Figura 25: Ciclo diario de los datos observados y modelados**

## 7. Escenario de receptores

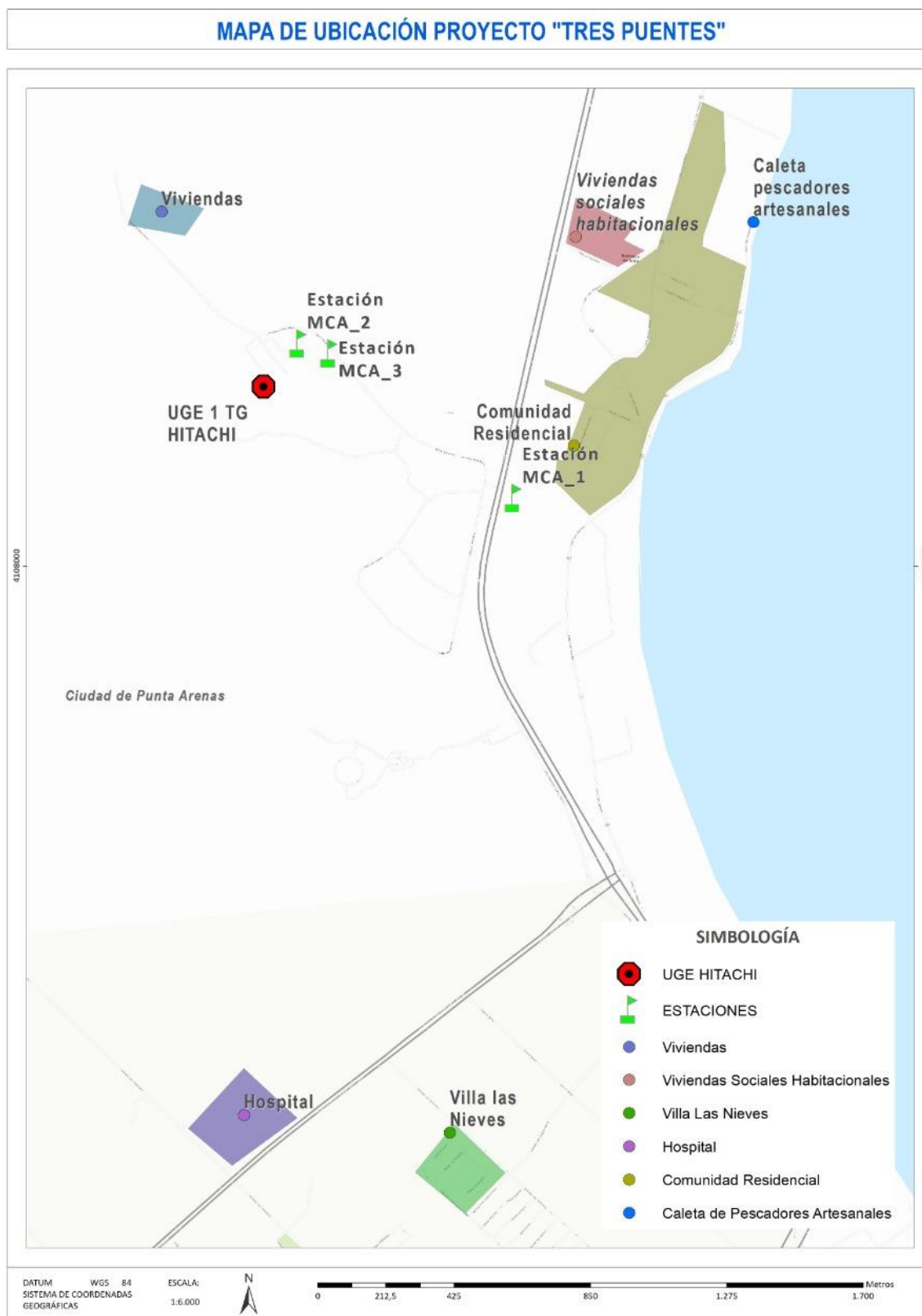
En la Tabla 5 se presenta el escenario de receptores asumidos dentro del área de modelación.

El criterio para la selección de cada receptor se relaciona con la cercanía que posee cada uno respecto a la Central y con la caracterización del entorno como la representatividad poblacional, entre otros.

**Tabla 5: Características del área de modelación.**

Receptor	Coordenadas UTM WGS84 19F	
	Este	Norte
Comunidad Residencial	374057.07 m E	4114709.56 m S
Viviendas Sociales Habitacionales	373997.69 m E	4115290.80 m S
Caleta de Pescadores Artesanales	374484.00 m E	4115385.00 m S
Viviendas	372644.39 m E	4115263.30 m S
Hospital	373135.59 m E	4112482.40 m S
Villa Las Nieves	373830.05 m E	4112370.63 m S

En la Figura 26 se aprecia la ubicación de los receptores respecto a la Central Tres Puentes y la posición de las estaciones de monitoreo de calidad el aire.



**Figura 26: Escenario de receptores.**

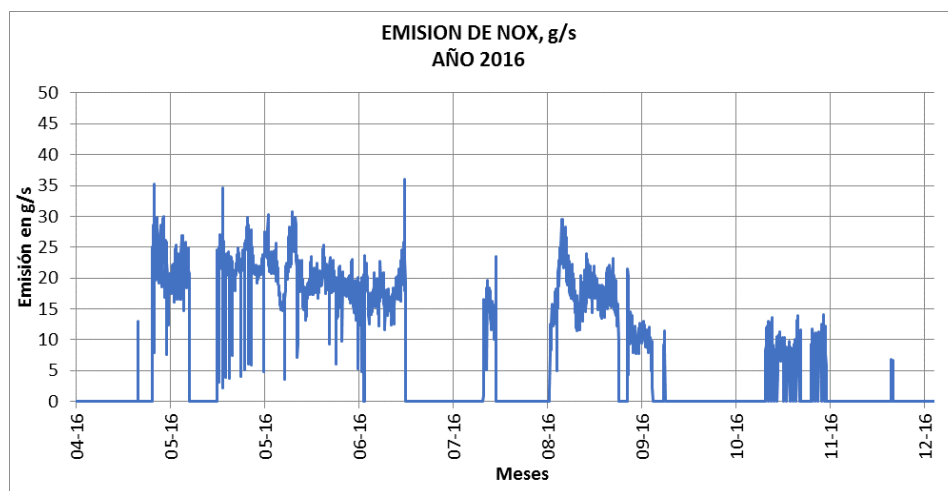
## 8. Estimación de emisiones atmosféricas

La Tabla 6 presenta las emisiones anuales ingresadas al modelo, que corresponden a las emisiones de NOx para los años 2016, 2017 y 2018.

**Tabla 6: Tasa de emisiones de NOx.**

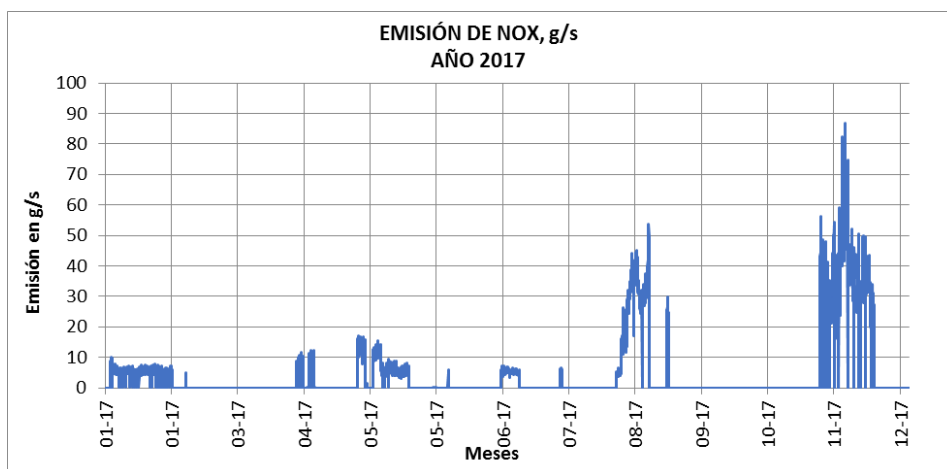
Año	Emisiones totales (ton/año)
2016	182,9
2017	157,3
2018	126,0

En las Figuras 27, 28 y 29 se observa la serie de tiempo horaria de términos de tasas de emisión de NOx expresadas en g/s<sup>6</sup> promedio para los periodos 2016 (desde abril), 2017 y 2018 respectivamente. Dichos valores se encuentran calculados utilizando como base las mediciones de emisiones en los sistemas de monitoreo de la fuente en estudio (CEMS).

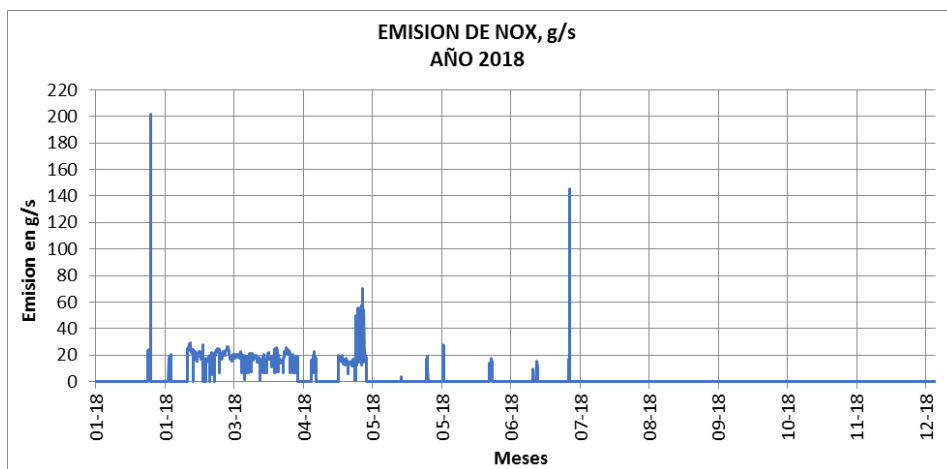


**Figura 27: Serie temporal horaria NOx 2016.**

<sup>6</sup> g/s es la unidad de la tasa de emisión de una fuente puntual, unidad que acepta el modelo Calpuff



**Figura 28: Serie temporal horaria NOx 2017.**



**Figura 29: Serie temporal horaria NOx 2018.**

## 9. Normativa aplicable

Las concentraciones como resultado de la modelación de contaminantes para la evaluación de las emisiones generadas en las fases del proyecto, como parte de la línea de base, deben dar cumplimiento a las exigencias de la Tabla 7.

**Tabla 7: Norma primaria de calidad del aire**

Parámetro	Tipo de Norma	Estadístico	Valor	Referencia
NO <sub>2</sub>	Primaria	Promedio Anual	100 µg/m <sup>3</sup> N	D.S. 114/02 MINSEGPRES
		Percentil 99 1 hora	400 µg/m <sup>3</sup> N	D.S. 114/02 MINSEGPRES
	Directriz OMS	Media Anual	40 µg/m <sup>3</sup> N	Guía Internacional de Calidad del Aire de la OMS.
		Media 1 hora	200 µg/m <sup>3</sup> N	

Los valores de la tabla evidencian que la directriz de la OMS es prácticamente el doble más exigente que la norma de calidad de aire vigente en Chile.

## 10. Línea de base de calidad del aire

Los informes de resultados de la “Campaña de Monitoreo de Calidad del Aire y Meteorología, Proyecto Empresa Eléctrica de Magallanes S.A” entregan los resultados de las mediciones del gas NO<sub>2</sub> para los periodos del 2015 al 2019.

Los muestreos son de carácter mensual, no obstante, a fin de comparar la calidad del aire registrada en las estaciones de monitoreo con las normas primarias de calidad para los promedios anuales, en la Tabla 8 se presentan los resultados de las mediciones de NO<sub>2</sub> respecto a la norma primaria.

**Tabla 8: Resultados del monitoreo de NO<sub>2</sub>, periodo 2015 – 2019.**

Estadístico	Valor norma (µg/m <sup>3</sup> N)	Concentraciones (µg/m <sup>3</sup> N)					
		Diciembre 2015	Enero 2016	Diciembre 2017	Enero 2018	Abril 2019	Mayo 2019
Promedio Mensual	100 <sup>7</sup>	2,5	5,4	12,6	5,1	4,2	3,7
Máximo Horario Mensual P99	400 <sup>8</sup>	16,4	46,4	149,6	40,2	28,3	18,1

En la tabla destaca el valor del muestreo de Diciembre 2017, que será referido como la línea de base para los 3 años de interés de esta modelación.

<sup>7</sup> D.S. 114/02 MINSEGPRES

<sup>8</sup> D.S. 114/02 MINSEGPRES

## 11. Aportes al modelado

Las Tablas 9, 10 y 11 presentan el aporte como resultado de la modelación de emisiones de NOx.

Para el año 2016, el receptor Comunidad Residencial presenta el aporte más alto como promedio anual de la norma, mientras que, para el estadístico horario, percentil 99, el receptor Caleta Pescadores y la Comunidad Residencial presentan los valores más altos.

**Tabla 9: Aporte de NOx Central Tres Puentes, año 2016.**

Receptores	Concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )				
	Promedio Anual	% de la Norma (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora	% de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	% de la Norma (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,18	0,18%	16,96	4,24%	8,48%
Comunidad Residencial	0,24	0,24%	16,96	4,24%	8,48%
Hospital	0,09	0,09%	16,48	4,12%	8,24%
Villa Las Nieves	0,11	0,11%	15,23	3,81%	7,61%
Viviendas Sociales	0,15	0,15%	11,87	2,97%	5,93%
Viviendas	0,05	0,05%	9,77	2,44%	4,89%

Para el año 2017 el receptor Comunidad Residencial presenta las concentraciones más altas como promedio anual y percentil horario P99 como resultado del aporte del proyecto.

**Tabla 10: Aporte de NOx Central Tres Puente, año 2017.**

Receptores	Concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )				
	Promedio Anual	% de la Norma (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora	% de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	% de la Norma (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,12	0,12%	9,79	2,45%	4,89%
Comunidad Residencial	0,15	0,15%	12,39	3,10%	6,20%
Hospital	0,03	0,03%	9,63	2,41%	4,82%
Villa Las Nieves	0,04	0,04%	7,00	1,75%	3,50%
Viviendas Sociales	0,11	0,11%	10,58	2,65%	5,29%
Viviendas	0,02	0,02%	7,01	1,75%	3,50%



Respecto al aporte como resultado de la modelación de las emisiones de NOx para el año 2018, el receptor Comunidad Residencial presenta las concentraciones de más altas como promedio anual de la norma, mientras que el receptor Hospital presenta las mayores concentraciones para percentil horario P99.

**Tabla 11: Aporte de NOx Central Tres Puentes, año 2018.**

Receptores	Concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )				
	Promedio Anual	% de la Norma (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora	% de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	% de la Norma (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,05	0,05%	4,92	1,23%	2,46%
Comunidad Residencial	0,11	0,11%	9,63	2,41%	4,82%
Hospital	0,06	0,06%	16,89	4,22%	8,44%
Villa Las Nieves	0,06	0,06%	15,69	3,92%	7,84%
Viviendas Sociales	0,06	0,06%	6,61	1,65%	3,30%
Viviendas	0,01	0,01%	7,45	1,86%	3,73%

## 12. Análisis normativo

Dado que la unidad Hitachi ha operado en los 3 años del período de interés de esta modelación, los valores de los resultados del aporte de las emisiones de la fuente se encuentran ya contenidos en los valores de la línea base. En las Tablas 12 a 17 se presentan los resultados del aporte de la unidad TG Hitachi y el resultado del monitoreo de NO<sub>2</sub><sup>9</sup> para el año 2017, el cual representa el peor escenario evaluado.

A continuación, se detallan los valores máximos por año de la norma primaria presentado en las Tablas 12, 13 y 14.

Para el año 2016 el aporte modelado de calidad del aire para el receptor Comunidad Residencial alcanza una concentración de 0,24 µg/m<sup>3</sup>N como promedio anual, valor incluido en la línea base de calidad del aire representado por un valor de 12,6 µg/m<sup>3</sup>N (12,6% de la norma nacional), mientras que para el receptor Caleta de Pescadores el percentil horario P99 alcanza un valor de 16,96 µg/m<sup>3</sup>N, el cual está contenido en los 149,60 µg/m<sup>3</sup>N de la línea base (37,4% de la norma nacional).

Respecto al año 2017, el aporte del modelado para el receptor Comunidad Residencial es de 0,15 µg/m<sup>3</sup>N como promedio anual, el cual se encuentra incluido en la línea base de calidad del aire (12,6 µg/m<sup>3</sup>N). Mientras que para el percentil horario P99 el valor de concentración es de 12,39 µg/m<sup>3</sup>N, equivalente al 3,1% de la norma nacional.

En el año 2018, el aporte modelado de la calidad del aire para el receptor Comunidad Residencial alcanza un valor de 0,11 µg/m<sup>3</sup>N como promedio anual (0,11% de la norma), mientras que para el receptor Hospital, el percentil horario P99 presenta un valor de 16,89 µg/m<sup>3</sup>N, resultado incluido en la línea base de calidad del aire representado por 149,6 µg/m<sup>3</sup>N (37,4% de la norma nacional).

Ahora bien, si se considera la directriz de la OMS como límite de comparación para la media anual de calidad del aire (40 µg/m<sup>3</sup>N), la Comunidad Residencial representaría un 0,6% de esta exigencia para el año 2016, con un valor de 0,24 µg/m<sup>3</sup>N como promedio anual.

En el año 2017 el aporte modelado de calidad del aire para el receptor Comunidad Residencial alcanza un valor de 0,15 µg/m<sup>3</sup>N, equivalente al 0,38% de la directriz de la OMS para la media anual (40 µg/m<sup>3</sup>N). Mientras que para el percentil horario P99, el valor de concentración representa un 6,2% de la media horaria recomendado por la OMS.

---

<sup>9</sup> De los NO<sub>x</sub>, la variable normada en calidad del aire es el NO<sub>2</sub>.

Con respecto al año 2018, el aporte modelado de calidad del aire es de  $0,11 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  para el receptor Comunidad Residencial, el cual representa el 0,28% de la media anual recomendada por la OMS. Por otra parte, el percentil horario P99 para el mismo receptor, alcanza un valor de  $16,89 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , un 8,44% de los  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  estipulado en la directriz de la OMS.

Finalmente, el año 2016 representa el período con concentraciones más altas como resultado del aporte modelado. El promedio anual alcanzado es de  $0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , un 1,9% de la línea base ( $12,6 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) y un 0,6% de la directriz de la OMS. Mientras que el percentil diario P99 representa un valor de  $16,96 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , equivalente a un 11,3% de la línea base ( $149,6 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) y un 8,48% de lo recomendado por la OMS ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ).

**Tabla 12: Análisis de norma primaria nacional, Central Tres Puentes, año 2016.**

Receptores	Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]					
	Promedio Anual [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Norma (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,18	12,60	12,6%	16,96	149,60	37,4%
Comunidad Residencial	0,24	12,60	12,6%	16,96	149,60	37,4%
Hospital	0,09	12,60	12,6%	16,48	149,60	37,4%
Villa Las Nieves	0,11	12,60	12,6%	15,23	149,60	37,4%
Viviendas Sociales	0,15	12,60	12,6%	11,87	149,60	37,4%
Viviendas	0,05	12,60	12,6%	9,77	149,60	37,4%

**Tabla 13: Análisis de norma primaria nacional, Central Tres Puentes, año 2017.**

Receptores	Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]					
	Promedio Anual [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Norma (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,12	12,60	12,6%	9,79	149,60	37,4%
Comunidad Residencial	0,15	12,60	12,6%	12,39	149,60	37,4%
Hospital	0,03	12,60	12,6%	9,63	149,60	37,4%
Villa Las Nieves	0,04	12,60	12,6%	7,00	149,60	37,4%
Viviendas Sociales	0,11	12,60	12,6%	10,58	149,60	37,4%
Viviendas	0,02	12,60	12,6%	7,01	149,60	37,4%

**Tabla 14: Análisis de norma primaria nacional, Central Tres Puentes, año 2018.**

Receptores	Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]					
	Promedio Anual [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Norma (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Norma (400 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,05	12,60	12,6%	4,92	149,60	37,4%
Comunidad Residencial	0,11	12,60	12,6%	9,63	149,60	37,4%
Hospital	0,06	12,60	12,6%	16,89	149,60	37,4%
Villa Las Nieves	0,06	12,60	12,6%	15,69	149,60	37,4%
Viviendas Sociales	0,06	12,60	12,6%	6,61	149,60	37,4%
Viviendas	0,01	12,60	12,6%	7,45	149,60	37,4%

**Tabla 15: Análisis de la directriz de la OMS , Central Tres Puentes, año 2016.**

Receptores	Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]					
	Promedio Anual [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Directriz (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Directriz (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,18	12,60	31,5%	16,96	149,60	74,8%
Comunidad Residencial	0,24	12,60	31,5%	16,96	149,60	74,8%
Hospital	0,09	12,60	31,5%	16,48	149,60	74,8%
Villa Las Nieves	0,11	12,60	31,5%	15,23	149,60	74,8%
Viviendas Sociales	0,15	12,60	31,5%	11,87	149,60	74,8%
Viviendas	0,05	12,60	31,5%	9,77	149,60	74,8%

**Tabla 16: Análisis de la directriz de la OMS, Central Tres Puentes, año 2017.**

Receptores	Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]					
	Promedio Anual [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Directriz (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Directriz (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,12	12,60	31,5%	9,79	149,60	74,8%
Comunidad Residencial	0,15	12,60	31,5%	12,39	149,60	74,8%
Hospital	0,03	12,60	31,5%	9,63	149,60	74,8%
Villa Las Nieves	0,04	12,60	31,5%	7,00	149,60	74,8%
Viviendas Sociales	0,11	12,60	31,5%	10,58	149,60	74,8%
Viviendas	0,02	12,60	31,5%	7,01	149,60	74,8%

**Tabla 17: Análisis de la directriz de la OMS , Central Tres Puentes, año 2018.**

Receptores	Concentraciones [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]					
	Promedio Anual [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Directriz (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Percentil 99 1 Hora [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	Línea de base [ $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ]	% de la Directriz (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Caleta de Pescadores	0,05	12,60	31,5%	4,92	149,60	74,8%
Comunidad Residencial	0,11	12,60	31,5%	9,63	149,60	74,8%
Hospital	0,06	12,60	31,5%	16,89	149,60	74,8%
Villa Las Nieves	0,06	12,60	31,5%	15,69	149,60	74,8%
Viviendas Sociales	0,06	12,60	31,5%	6,61	149,60	74,8%
Viviendas	0,01	12,60	31,5%	7,45	149,60	74,8%

### 13. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de la modelación de la dispersión de emisiones de NOx para los años 2016, 2017 y 2018 es posible determinar que el año 2016 presenta las concentraciones más altas estimadas en los receptores Comunidad Residencial y Caleta de Pescadores.

Se evaluó el cumplimiento de la norma primaria de calidad del aire y el cumplimiento de la directriz de la OMS. En el peor caso, considerado como línea base, las concentraciones de NO<sub>2</sub> como promedio anual son de un 12,6% de la norma primaria y un 31,5% de la directriz de la OMS. Respecto a las concentraciones alcanzadas para el percentil horario P99, son de un 37,4% de la norma primaria y un 74,8 % de la directriz internacional.

Sobre la base del modelamiento es posible verificar que el impacto de las emisiones de NOx de la unidad Hitachi, representa en el receptor más afectado, del orden de un 2% de la línea de base en cuanto a promedio anual, y un 11% de la línea base en el percentil 99 del valor horario.

De lo indicado en los dos párrafos anteriores, la unidad TG Hitachi tiene un impacto bajo en la calidad del aire del receptor más afectado, en una proporción muy por debajo de la norma, como se indica en la tabla siguiente:

**Tabla 18: Aporte de las emisiones de la TG Hitachi a la calidad del aire.**

<b>Aporte de las emisiones de la TG Hitachi a la calidad del aire (Peor Receptor)</b>		
<b>Exigencia</b>	<b>Promedio Anual</b>	<b>Percentil 99 Horario</b>
<b>Norma Primaria</b>	< 0,3%	< 15%
<b>Directriz OMS</b>	< 0,6%	< 30%

Se reitera que los resultados presentados corresponden a un escenario conservador debido a dos factores del modelamiento:

- i) La sobrestimación de los resultados debido a que el modelo tiende a subestimar los vientos.
- ii) La línea base considerada es la máxima encontrada en el mes más desfavorable y se extrapola a todo el año.

Dado lo anterior, se concluye que el aporte de la central Hitachi está por debajo de la normativa de calidad del aire, considerando tanto la norma nacional como directriz de la OMS.

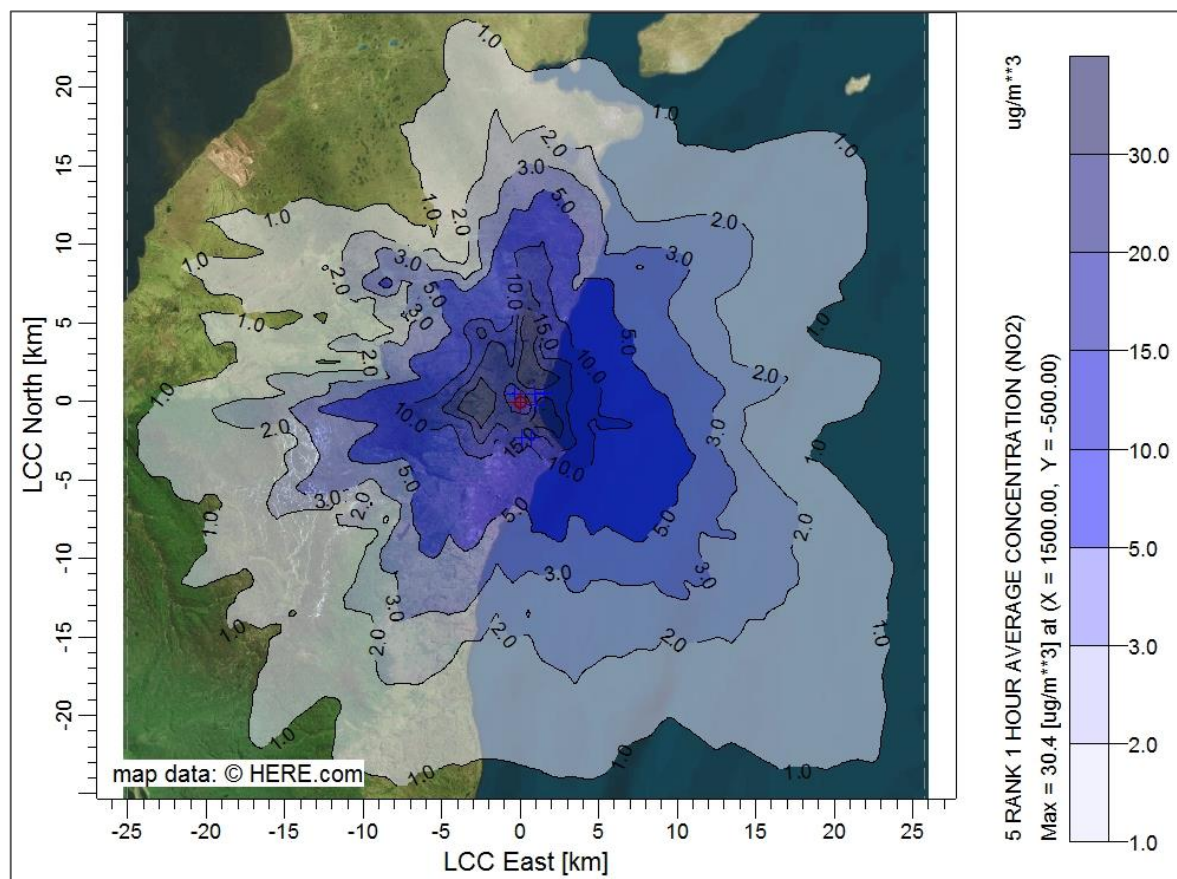
### 14. Apéndice 1 Isoconcentraciones



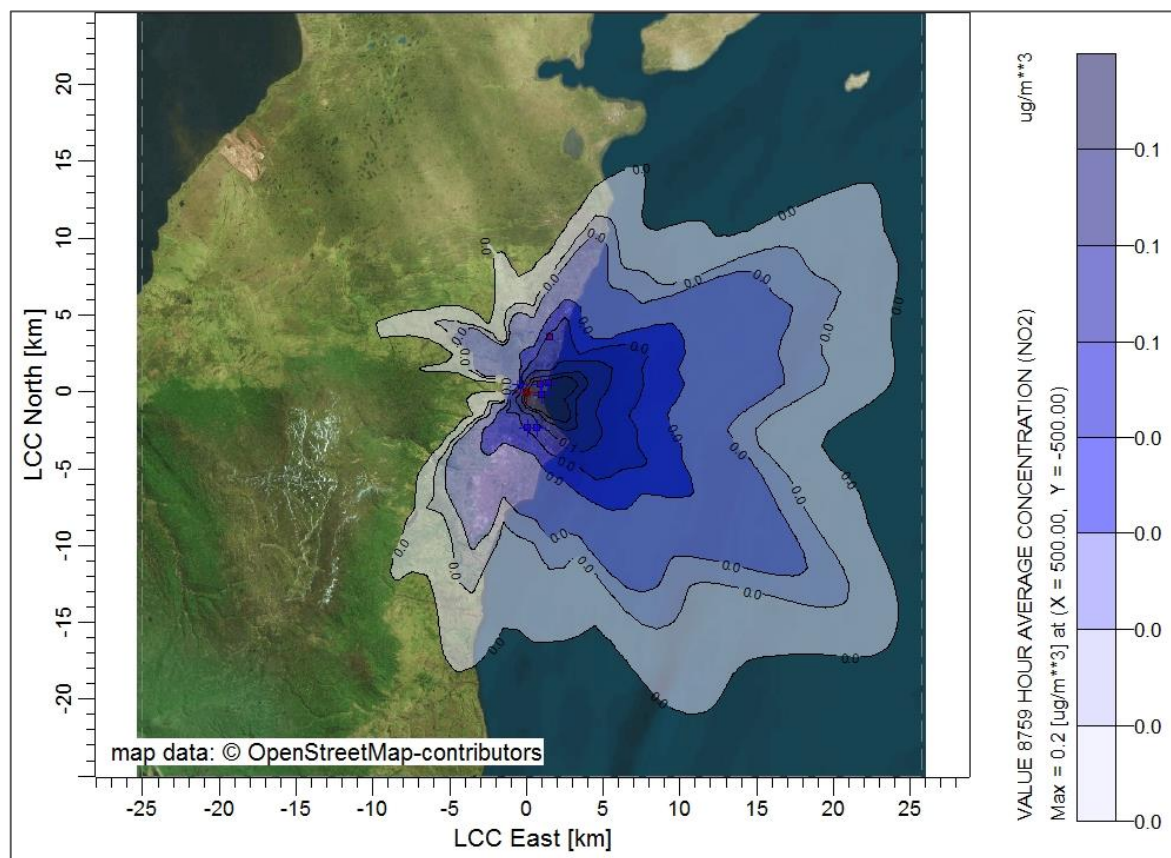
[illegible]



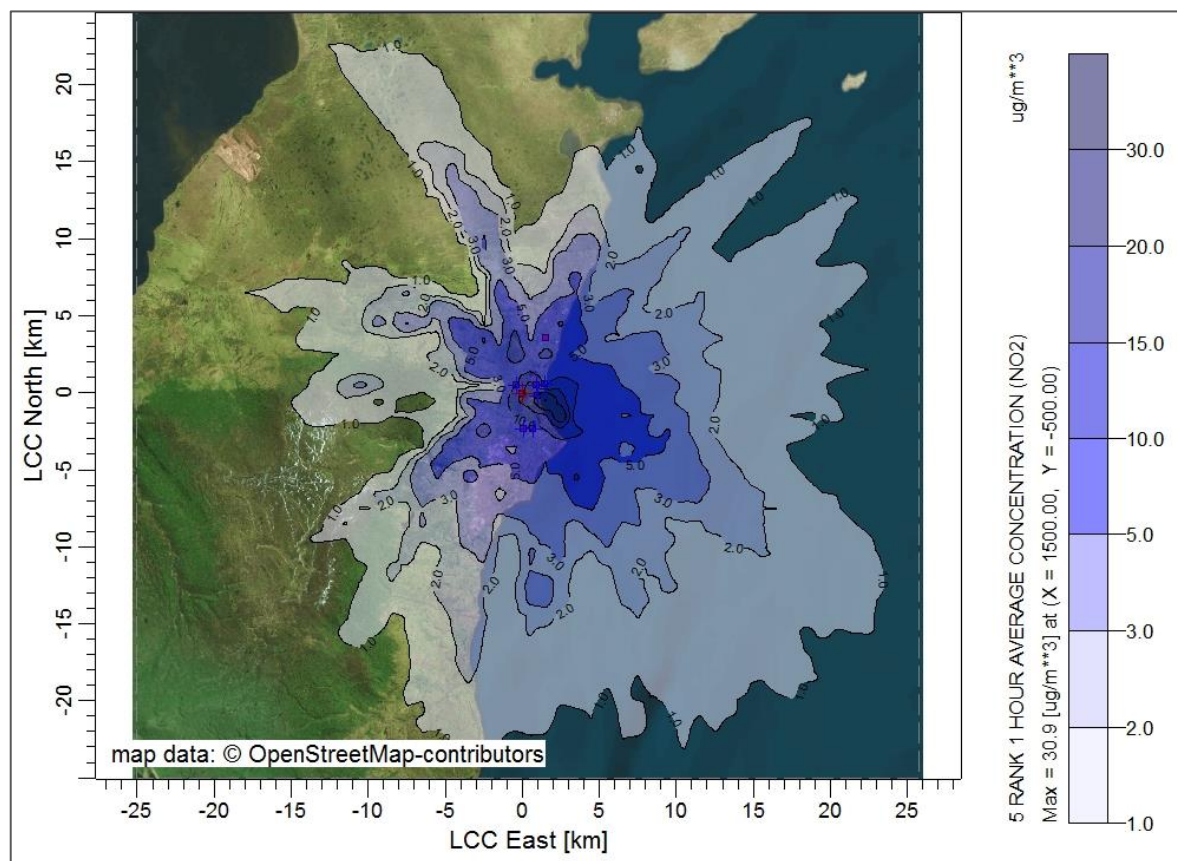
**Figura 31: Isoconcentraciones, Percentil 1 hora, P99 NO<sub>2</sub>, año 2016**



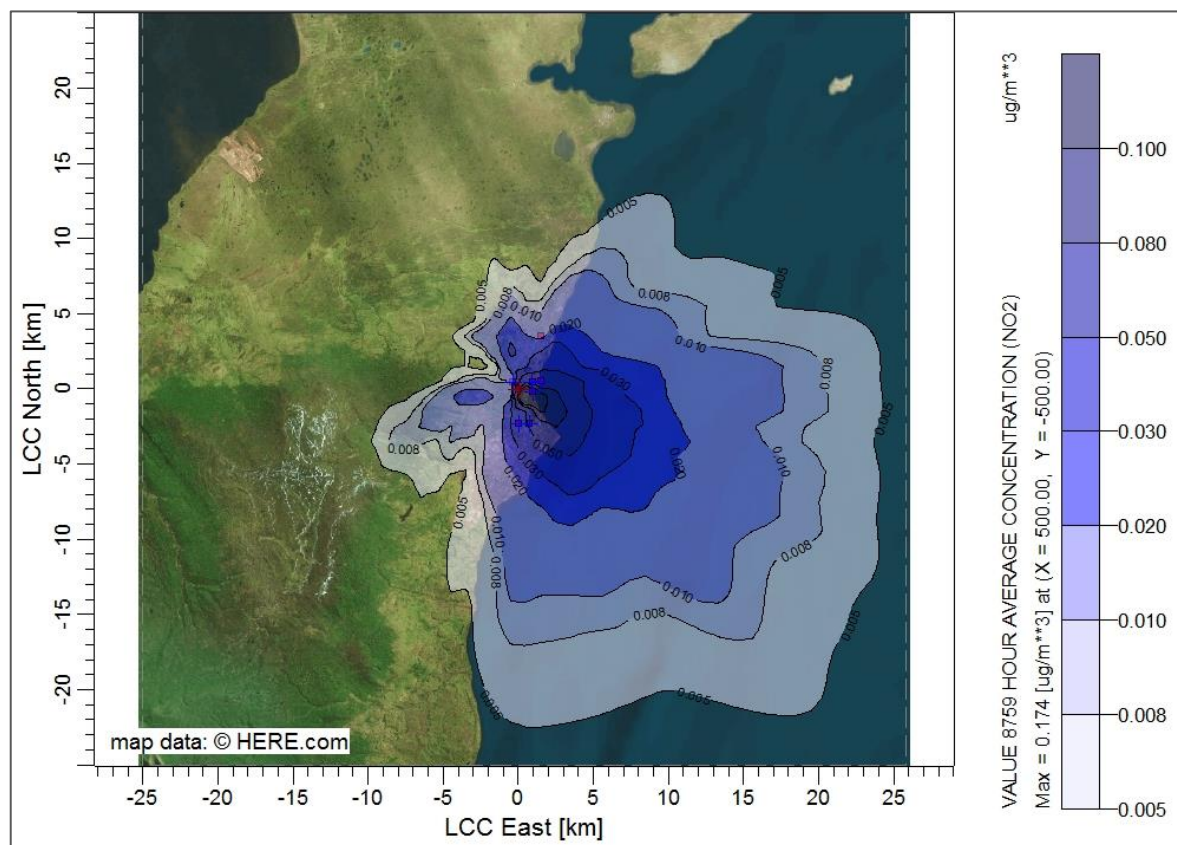
**Figura 32: Isoconcentraciones, promedio anual NO<sub>2</sub>, año 2017**



**Figura 33: Isoconcentraciones, Percentil 1 hora, P99 NO<sub>2</sub>, año 2017**



**Figura 34: Isoconcentraciones, promedio anual NO<sub>2</sub>, año 2018**





**Figura 35: Isoconcentraciones, Percentil 1 hora, P99 NO<sub>2</sub>, año 2018**

