Línea de base meteorología, calidad del aire y modelación WRF

DIA continuidad operacional faena minera Atacama Kozan

Región de Atacama

Diciembre, 2017

Revisión	Elaboró	Revisó	Aprobó	Fecha
1	Julio Castro M Alejandro Castillo A.	Rodrigo Palacios	Julio Castro	14-12-2017
0	Julio Castro M Alejandro Castillo A.	Rodrigo Palacios	Julio Castro	22-11-2017
A	Julio Castro M Alejandro Castillo A.	Rodrigo Palacios	Julio Castro	20-11-2017

Elaborado por:

Gestión Ambiental Consultores S.A.

Padre Mariano 103 of. 307, Providencia

Fono: +56 2 2719 5600

www.gac.cl

Autor (es):

Alejandro Castillo A.:
- Línea de base meteorología
- Línea de base calidad del aire

Julio Castro M.:
- Modelo WRF y análisis de incertidumbre

INDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN 5
2 Línea de base calidad del aire 5
2.1 Evaluación de Concentración de MP10 10
2.1.1 Norma Promedio Diario 10
2.1.2 Norma Promedio Anual para MP10 11
2.2 Evaluación de Concentración de MP2,5 14
2.2.1 Norma Promedio Diario para MP2,5 14
2.2.2 Norma Promedio anual para MP2,5 15
2.3 Evaluación de Concentración Material Particulado Sedimentable (MPS) 18
2.3.1 Promedio Mensual MPS 18
2.4 Dióxido de Nitrógeno (NO_2) 19
2.5 Dióxido de Azufre (SO_2) 21
2.5.1 Norma Primaria Diaria para SO_2 21
2.5.2 Norma Primaria Anual para SO_2 22
2.5.3 Norma Secundaria horario SO_2 23
2.5.4 Norma Secundaria Diaria SO_2 24
2.5.5 Norma Secundaria Anual SO_2 24
3 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DEL ÁREA DEL PROYECTO 26
3.1 Velocidad del Viento 27
3.2 Dirección del Viento 30
3.3 Temperatura 36
3.4 Humedad Relativa 38
3.5 Radiación Solar 39
4 MODELO METEOROLÓGICO 40
4.1 Justificación del Modelo Meteorológico 40
4.2 Descripción del Modelo Meteorológico 40
4.3 Dominio Modelación 44
4.4 Topografía y Uso de Suelos 47
4.5 Evaluación del Modelo Meteorológico 49
4.5.1 Velocidad del Viento 51
4.5.2 Dirección del Viento 58
4.5.3 Temperatura 73
4.5.4 Altura capa de mezcla en zona modelada 77
4.5.5 Factor de ajuste del modelo meteorológico en base a la velocidad del viento observada y modelada 78
4.5.6 Conclusiones modelo meteorológico 79

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Estaciones declaradas como EMRP-MP10, EMRPG..... 5
Tabla 2.2: Equipamiento Estaciones de monitoreo 6
Tabla 2.3: Ubicación de Estaciones. 6
Tabla 2.4: Periodo Considerado por Contaminante..... 8
Tabla 2.5: Disponibilidad de registros horarios por Año y Estación..... 8
Tabla 2.6: Normas de calidad del aire vigente a nivel horario, diario y anual 9
Tabla 2.7: Norma de Referencia para MPS. 9
Tabla 2.8: Evaluación de la norma 24 horas de MP10. 10
Tabla 2.9: Evaluación de la norma Anual de MP10. 12
Tabla 2.10: Evaluación de la Norma 24 horas de MP2,5. 14
Tabla 2.11: Evaluación de la Norma 24 horas de MP2,5. 15
Tabla 2.12: Evaluación de MPS..... 18
Tabla 2.13: Evaluación Norma Diaria de SO_2..... 21
Tabla 2.14: Evaluación Norma Anual de SO_2..... 22
Tabla 2.15: Evaluación Norma Secundaria Horaria de SO_2 23
Tabla 2.16: Evaluación Norma Secundaria Diaria de SO_2..... 24
Tabla 2.17: Tabla 2.18: Evaluación Norma Secundaria Anual de SO_2 24
Tabla 3.1: Coordenadas de ubicación de las estaciones meteorológicas. 26
Tabla 3.2: Caracterización de los datos meteorológicos, Numero de datos observados, Año 2016..... 27
Tabla 3.3: Caracterización de los datos meteorológicos, % de completitud Año 2016. 27
Tabla 3.4: Resumen Velocidad del viento, estaciones Paipote y Tierra Amarilla, Año 2016. 27
Tabla 3.5: Resumen temperatura, estaciones Principal y Tierra Amarilla. Año 2016. 36
Tabla 4.1: Definición de dominio de modelación. 41
Tabla 4.2: Definición proyección dominios de modelación. 42
Tabla 4.3: Características del Dominio de Modelación. 44
Tabla 4.4: Estadígrafos velocidad del viento, estaciones Tierra Amarilla y Paipote. Año 2016. 57
Tabla 4.5: Estadígrafos de desempeño velocidad del viento, estaciones Tierra Amarilla y Paipote. Año 2016. 58
Tabla 4.6: Estadígrafos de temperatura, estación Tierra Amarilla, Año 2016. 75
Tabla 4.7: Estadígrafos de desempeño de temperatura, estación Tierra Amarilla. Año 2016. 76
Tabla 4.8: Velocidad del viento observado, año 2016. 78
Tabla 4.9: Velocidad del viento modelado, año 2016. 78
Tabla 4.10: Razón velocidad del viento modelada y observada, año 2016. 78

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación de las estaciones Calidad del Aire. 7
Figura 2.2: Norma Diaria para MP10 por Año 11
Figura 2.3: Norma Anual para MP10 por Año 12
Figura 2.4: Norma Trianual para MP10 por Estación. 13
Figura 2.5: Norma Diaria para MP2,5 por Año 15
Figura 2.6: Norma Anual para MP2,5 por Año 16
Figura 2.7: Norma Trianual para MP2,5 17
Figura 2.8: Concentración mensual de MPS 19
Figura 2.10: Concentraciones promedio anual de NO_2 20
Figura 2.11: Percentil 99 de concentraciones máximas de 24 horas de NO_2 21
Figura 2.12: Norma Diaria para SO_2 por Año 22
Figura 2.13: Norma Diaria para SO_2 por Año 23
Figura 3.1: Ubicación de las estaciones meteorológicas. 26
Figura 3.2: Serie de tiempo de velocidad del viento observada Estación Paipote. Año 2016. 28
Figura 3.3: Serie de tiempo de velocidad del viento observada Estación Tierra Amarilla. Año 2016 28
Figura 3.4: Ciclo diario de la velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016. 29
Figura 3.5: Ciclo diario de la velocidad del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016 29
Figura 3.6: Distribución Horaria de las calmas registradas. Estación Paipote. Año 2016. 30
Figura 3.7: Distribución Horaria de las calmas registradas. Estación Tierra Amarilla. Año 2016 30
Figura 3.11: Rosas de viento observado. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 31
Figura 3.12: Ciclo Diario de la Dirección del Viento Observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 32
Figura 3.13: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 33
Figura 3.8: Rosas de viento observado. Estación Paipote. Año 2016. 34
Figura 3.9: Ciclo diario de la dirección del viento observada. Estación Paipote. Año 2016 35
Figura 3.10: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016. 35
Figura 3.14: Serie de tiempo de temperatura observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 36
Figura 3.15: Ciclo diario de temperatura observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 37
Figura 3.16: Ciclo estacional temperatura observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 37
Figura 3.17: Ciclo diario de humedad relativa observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 38
Figura 3.18: Ciclo estacional de humedad relativa observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 38
Figura 3.19: Ciclo diario de radiación solar observada. Estación Tierra Amarilla Año 2016. 39
Figura 3.20: Ciclo estacional de radiación solar observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 39
Figura 4.1: Extensiones de los dominios 1, 2, 3 y 4 en WRF. 41
Figura 4.2: Uso de suelo dominio 4 WRF 43
Figura 4.3: Dominio de Modelación del Proyecto. 45
Figura 4.4: Dominio de Modelación del Proyecto y límites comunales. 46

Figura 4.5: Topografía del dominio de modelación. 48
Figura 4.6: Ciclo diario de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Las Tierra Amarilla, año 2016. 52
Figura 4.7: Ciclo mensual de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Tierra Amarilla, año 2016. 53
Figura 4.8: Cuantiles condicionales e histograma de velocidad del viento observada y modelada, estación Tierra Amarilla, año 2016. 54
Figura 4.9: Ciclo diario de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Paipote, año 2016. 55
Figura 4.10: Ciclo mensual de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Paipote, noviembre 2014 a octubre 2015. 56
Figura 4.11: Cuantiles condicionales velocidad del viento observada y modelada, estación Paipote, año 2016. 57
Figura 4.12: Rosa de los vientos modelada y observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 59
Figura 4.13: Gráfico polar con frecuencia de desviación entre direcciones de viento modeladas y observadas por intervalos de diferencia en magnitud de velocidad del viento. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 60
Figura 4.14: Rosa de los vientos modelada y observada por hora del día. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 61
Figura 4.15: Ciclo diario de la dirección del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 63
Figura 4.16: Ciclo diario de la dirección del viento modelada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 64
Figura 4.17: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 65
Figura 4.18: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento modelada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016. 66
Figura 4.19: Rosa de los vientos modelada y observada. Estación Paipote. Año 2016. 67
Figura 4.20: Gráfico polar con frecuencia de desviación entre direcciones de viento modeladas y observadas por intervalos de diferencia en magnitud de velocidad del viento. Estación Paipote. Año 2016. 68
Figura 4.21: Rosa de los vientos modelada y observada por hora del día. Paipote. Año 2016. 69
Figura 4.22: Ciclo diario de la dirección del viento observada. Estación Paipote. Estación Independencia. Año 2016. 71
Figura 4.23: Ciclo diario de la dirección del viento modelada. Estación Paipote. Año 2016. 71
Figura 4.24: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016. 72
Figura 4.25: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016. 73
Figura 4.26: Ciclo diario de la temperatura modelada y observada. Estación Paipote. Año 2016. 74
Figura 4.27: Ciclo mensual de la temperatura modelada y observada. Estación Paipote. Año 2016. 75
Figura 4.28: Ciclo diario altura de capa de mezcla. Estación Paipote. Año 2016. 77

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento, corresponde al primero de dos informes que forman parte de los estudios complementarios de calidad del aire a presentar dentro la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto de "Continuidad operacional faena minera Atacama Kozan", el cual está ubicado en la zona de Paipote, en las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla, Región de Atacama.

Este documento consta de la línea de base de la calidad del aire, la caracterización meteorológica del área del Proyecto y la modelación meteorológica del dominio que se modelará posteriormente con el modelo de dispersión CALPUFF.

2 LÍNEA DE BASE CALIDAD DEL AIRE

Para el análisis de calidad del aire, se consideraron los registros recopilados en la estación Tierra Amarilla para los contaminantes MP10, MP2,5, MPS, NO_2, SO_2, MPS, estación Nantoco para los contaminantes MP10, MP2,5 y MPS y estación Copiapó con MP10, MP2,5, MPS, los antecedentes fueron proporcionados la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) mediante .

Las estaciones seleccionadas cuentan con resoluciones que otorgan la clarificación de EMRP (Estación de Monitoreo con Representatividad Poblacional), EMRPG (Estación de Monitoreo con Representación Poblacional por Gases), EMRRN (Estaciones de Monitoreo con Representatividad de Recursos Naturales Renovables), en la Tabla 2.1 se presentan las resoluciones por cada estación de monitoreo considerada.

Tabla 2.1: Estaciones declaradas como EMRP-MP10, EMRPG

Estación de Monitoreo	Resolución EMRP para MP10	Resolución EMRPG para SO_2
Copiapó	Res. N° 545, del 23 de Abril 2003 de Servicio de Salud Atacama	Res. N° 1729, del 14 de Septiembre de 2004 de Servicio de Salud Atacama.
Tierra Amarilla (CCMC)	Res. N° 545, del 23 de Abril 2003 de Servicio de Salud Atacama	Res. N° 1729, del 14 de Septiembre de 2004 de Servicio de Salud Atacama.
Nantoco	No posee	No posee

Fuente: informe técnico Cumplimiento de normas de calidad del aire por MP10, PLOMO Y SO_2, SMA 2016

El equipamiento utilizado por cada una de las estaciones se presenta en Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Equipamiento Estaciones de monitoreo

Parámetro	Nantoco	T. Amarilla (CCMC)	T. Amarilla (ENAMI)	Copiapó (Sivica)
MP10	Thermo, modelo 1405A	Teom (Hi-Vol)		THERMO FH62C-14
MP2.5	Thermo, modelo 1405A	Teom (Low-Vol)		ENVIRONNEMENT MP101M
SO2	-		Thermo Electron 43A,43C-TLE, 43i	-
NO2	-	Thermo 42i		-

Fuente: Elaboración propia.

La estación de Tierra amarilla se ubica en la localidad Homónima en un sector aledaño a la ruta C-35, en donde se encuentran ubicadas dos estaciones T. Amarilla perteneciente a C.C. Minera Candelaria la cual es EMRP y T. Amarrilla perteneciente a la red ENAMI, la cual presenta monitoreo de SO_2, ambas estaciones serán utilizadas para la línea de base donde para Material Particulado (MP2,5, MP10 y MPS) y NO2 se utilizara T. Amarilla (CCMC) y para la línea de base de SO_2 se utilizara T Amarilla ENAMI.

Por su parte la estación de Nantoco se encuentra en la localidad del mismo nombre situado a unos 500 metros al Oeste de la ruta C-35, finalmente la Estación Copiapó Sivica, se ubica en la zona céntrica de la ciudad de Copiapó.

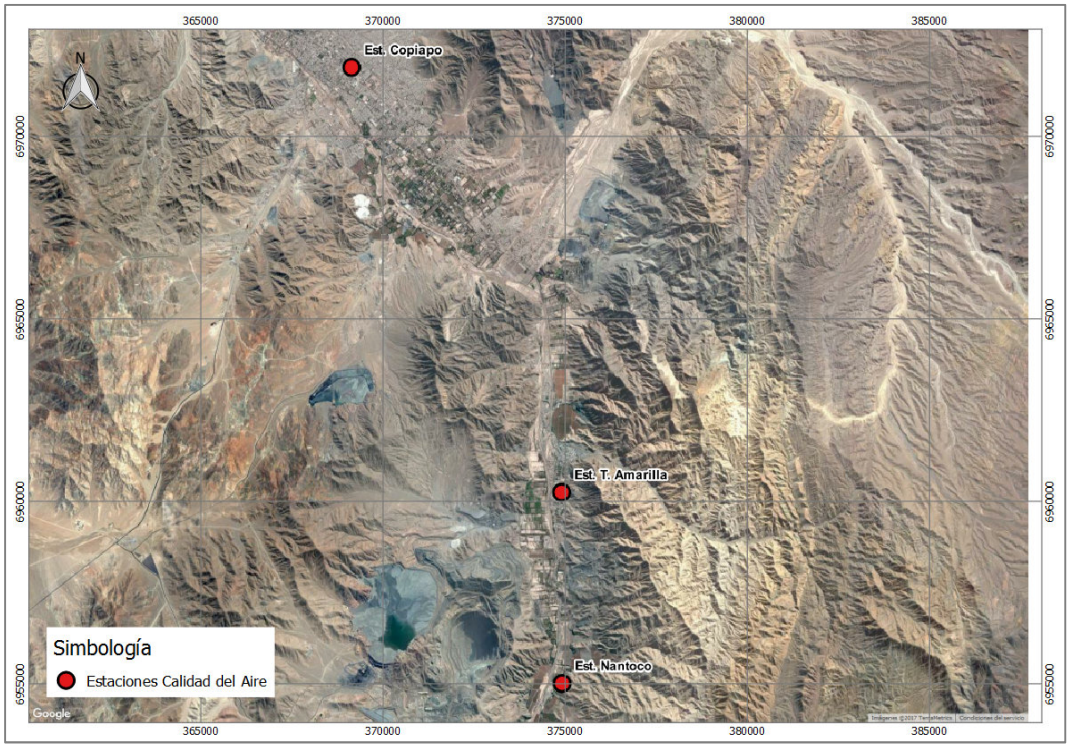
Las coordenadas de la ubicación de las estaciones se presentan a continuación en Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Ubicación de Estaciones.

Estación	Coordenadas UTM, Datum WGS 84 Huso 19		Variable Monitoreada
	Este (m)	Norte (m)	
Copiapó	368.534	6.972.643	MP10-MP2,5
T. Amarilla	375.128	6.960.567	MP10-MP2,5-MPS-NO_2-SO_2
Nantoco	374.609	6.951.835	MP10-MP2,5-MPS

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.1: Ubicación de las estaciones Calidad del Aire.



Fuente: Elaboración propia, en base a Google Earth.

En Tabla 2.1 se presenta el periodo de tiempo por cada contaminante considerado para el desarrollo de la línea de base, donde el periodo utilizado es de 01/2014 a 12/2016 con excepción de NO2 de T. Amarilla, MP10 y MP2,5 en Nantoco, los cuales comenzaron posterior a esta fecha.

Tabla 2.4: Periodo Considerado por Contaminante

Estación	Contaminante	Periodo
Tierra Amarilla	MP10	01/2014 – 12/2016
	MP2,5	01/2014 – 12/2016
	MPS	01/2014 – 12/2016
	NO2	08/2014 – 03/2016
	SO2	01/2014 – 12/2016
Copiapó	MP10	01/2014 – 12/2016
	MP2,5	01/2014 – 12/2016
Nantoco	MP10	09/2014 – 12/2016
	MP2,5	09/2014 – 12/2016
	MPS	01/2014 – 12/2016

Fuente: Elaboración propia.

La disponibilidad de datos se presenta a continuación, donde en general se cuenta con más del 75% los datos por año, los años donde no se presenta más del 75% solo se consideraran solo como referencia.

Tabla 2.5: Disponibilidad de registros horarios por Año y Estación

Año	T. Amarilla (Discreto)				T. Amarilla (ENAMI) (Discreto)		Copiapó (Continuo)		Nantoco (Continuo)	
	MP10 (%)	MP2,5 (%)	MPS (%)	NO_2 (%)	MPS (%)	SO_2 (%)	MP10 (%)	MP2,5 (%)	MP10 (%)	MP2,5 (%)
2014	100%	90%	100%	36%	100%	41%	67%	95%	31%	31%
2015	92%	94%	100%	85%	100%	91%	97%	89%	85%	85%
2016	97%	98%	100%	21%	100%	80%	98%	98%	85%	85%

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2.6 se presenta los cuerpos normativos vigentes y los valores límites por contaminante:

Tabla 2.6: Normas de calidad del aire vigente a nivel horario, diario y anual

Norma	Descripción	Contaminante	Límite Concentración Horaria	Límite Concentración 24 horas	Límite Concentración Anual
Primaria	D.S. N° 59/1998, modificado por D.S. N° 45/2001, MINSEGPRES	MP10	No aplica	150 µg/m^{3}N	50 µg/m^{3}N
	D.S. N° 12/11 MMA	MP2,5	No aplica	50 µg/m^{3}N	20 µg/m^{3}N
	D.S. N° 113/2002 MINSEGPRES	SO_2	No aplica	250 µg/m^{3}N	80 µg/m^{3}N
	D.S. N° 114/2002 MINSEGPRES	NO_2	400 µg/m^{3}N	No aplica	100 µg/m^{3}N
Secundaria	D.S. N° 22/2009, MINSEGPRES	SO_2	1.000 µg/m^{3}N (trianual) 2.000 µg/m^{3}N (anual)	365 µg/m^{3}N (trianual) 730 µg/m^{3}N (anual)	80 µg/m^{3}N (trianual) 160 µg/m^{3}N (anual)

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que no existe norma secundaria de MPS a nivel nacional en Chile, para evaluar la sedimentación del material particulado (MPS) se utilizará el Decreto N°3395/96 de la República de Argentina como norma de referencia.

Tabla 2.7: Norma de Referencia para MPS.

Norma	Descripción	Contaminante	Media Aritmética Mensual (mg/m²/día)
Secundaria	Decreto N°3395/96 República de Argentina	MPS	333

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta el análisis de la Cálida del Aire para los contaminantes MP10, MP2,5, MPS,NO_2, SO_2, para las estaciones Copiapó, Tierra Amarilla y Nantoco.

2.1 Evaluación de Concentración de MP10

2.1.1 Norma Promedio Diario

En la Tabla 2.8 se presenta un resumen de los valores calculados del percentil 98 de la concentración 24 horas de la norma de MP10, para los años 2014 al 2016, para cada una de las estaciones consideradas, la estación de Nantoco y Copiapó para el año 2014 serán consideradas como de referencia ya que no presentaron más de 75% de los datos necesarios para cada estadígrafo.

De acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 59/1998, modificado por D.S. N° 45/2001 ambos del MINSEGPRES, la norma de calidad del aire diaria para MP10, se considerará sobrepasada cuando el percentil 98 de los promedios de concentraciones de 24 horas, durante un período anual sea mayor a 150 µg/m^{3}N, o se supere los 150 µg/m^{3}N como promedio diario durante 7 días al año.

El año 2015 presenta superación de norma, para las estaciones Copiapó y Tierra amarilla, lo cual se debe básicamente a la resuspención del material particulado depositado por los aluviones generados durante el mes de marzo. Para el año 2016 las estaciones Copiapó y Nanatoco, representan un 70% y 50% de la norma, respectivamente. En tanto la estación Tierra amarilla presenta un 87% de la norma promedio diaria con valores de concentración P98 de 131 µg/m^{3}N.

Tabla 2.8: Evaluación de la norma 24 horas de MP10.

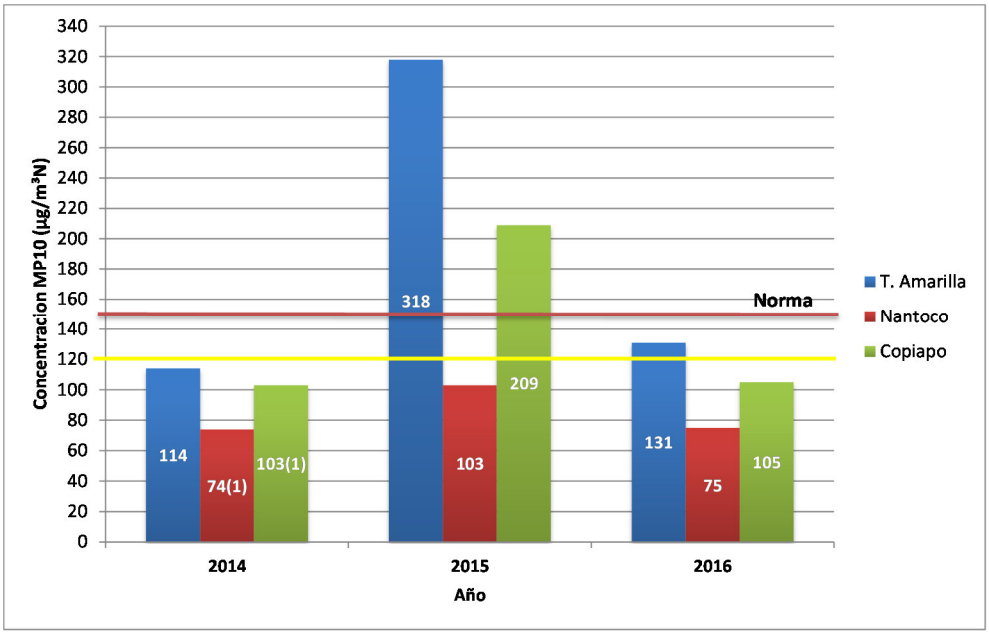
Estación	Año	N° Excedencia > 150 µg/m³N	Percentil 98 (µg/m³N)	Norma (µg/m³N)	% de la Norma 24 horas
T. Amarilla	2014	0	*114*(1)	150	76%
	2015	19	318		212%
	2016	2	131		87%
Nantoco	2014	0	*74*(1)		49%
	2015	3	103		69%
	2016	1	75		50%
Copiapó	2014	0	103		69%
	2015	26	209		139%
	2016	4	105		70%

(1): Referencial disponibilidad horaria menor a 75%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2.2 se presenta los valores del percentil 98 de las contracciones de MP10.

Figura 2.2: Norma Diaria para MP10 por Año



(1): Referencial disponibilidad horaria menor a 75%

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Norma Promedio Anual para MP10

En la Tabla 2.8 se presenta un resumen de los valores calculados para la concentración promedio anual de MP10, para los años 2014 al 2016, para cada una de las estaciones consideradas, donde los valores presentados para estación Natoco y Copiapó son referenciales debido a que el año 2014 presenta menos de 8 meses de datos.

La norma Anual de calidad del aire para MP10 se considerará sobrepasada cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos sea mayor que 50 µg/m^{3}N.

De los valores registrados en las estaciones T. Amarilla, Copiapó y Nantoco, todas presentan superación de la norma anual de MP10, siendo T. Amarilla la estación que presenta la mayor concentración en promedio de 76 µg/m^{3}N representando el 152% de la norma.

Tabla 2.9: Evaluación de la norma Anual de MP10.

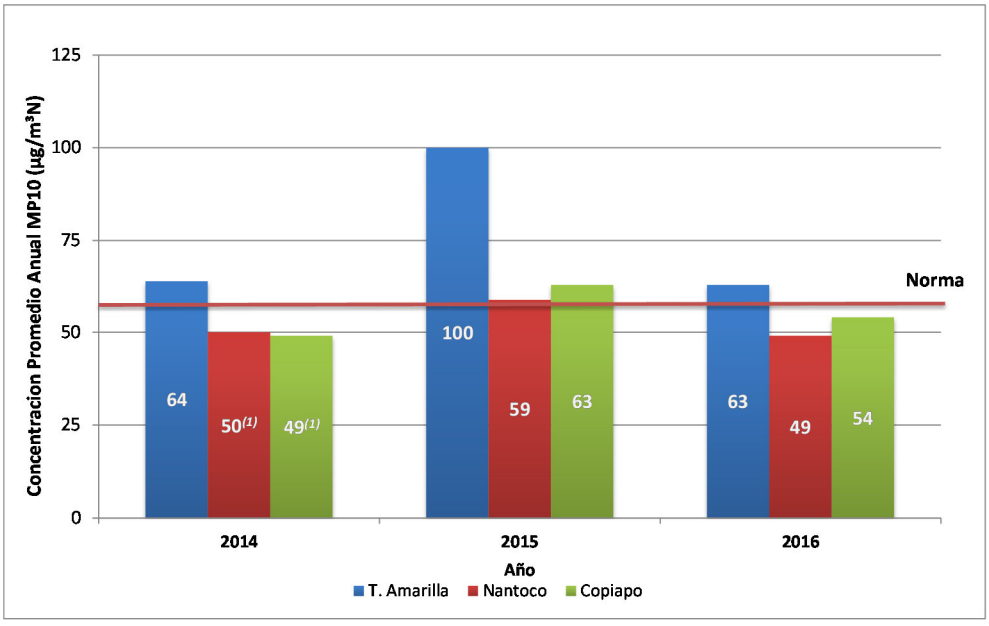
Estación	Año	Promedio	Promedio Tri-Anual	% de la Norma Anual
T. Amarilla	2014	64(1)	76(1)	152%
	2015	100		
	2016	63		
Nantoco	2014	50(1)	53(1)	104%
	2015	59		
	2016	49		
Copiapó	2014	49	55	110%
	2015	63		
	2016	54		

(1): Referencial disponibilidad menor a 8 meses

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2.3 se presenta los valores de las contracciones promedio anual de MP10 en las estaciones analizadas, donde se destaca la superación de la norma todos los años para todas la estaciones. En comparación al Año 2014 el año 2016 presenta una disminución de los promedios anuales.

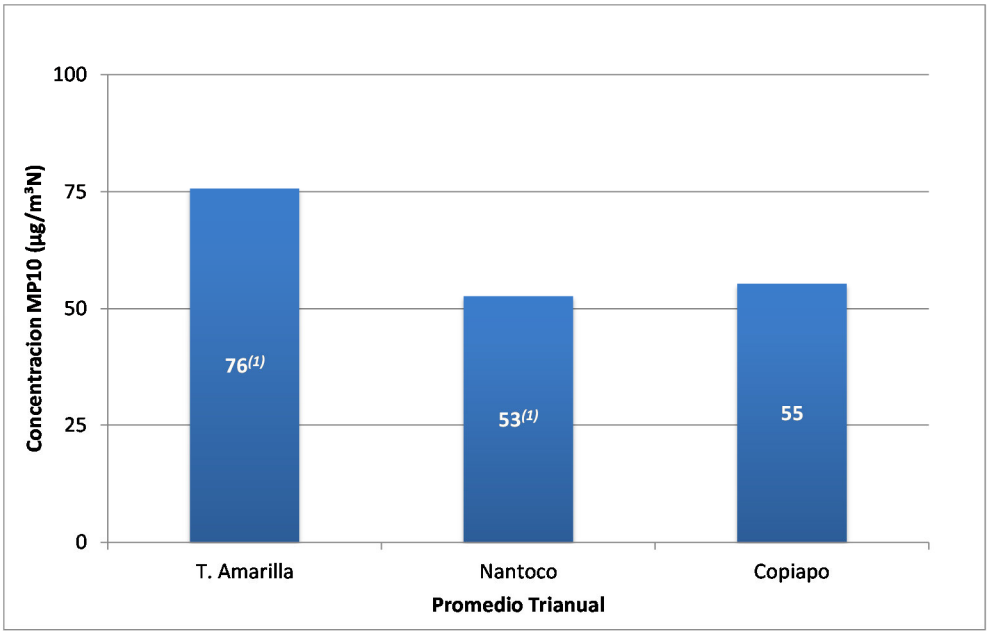
Figura 2.3: Norma Anual para MP10 por Año



(1): Referencial disponibilidad menor a 8 meses.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.4: Norma Trianual para MP10 por Estación.



(1): Referencial disponibilidad menor a 8 meses.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Evaluación de Concentración de MP2,5

2.2.1 Norma Promedio Diario para MP2,5

En la Tabla 2.10 se presenta un resumen de los valores calculados para la concentración promedio diario de MP2,5, para los años 2014 al 2016, para cada una de las estaciones consideradas.

De acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 12/2011 MMA, la norma de calidad del aire para MP2,5, se considerará sobrepasada la norma diaria cuando el percentil 98 del concentración promedio diaria durante un año sea mayor a 50 µg/m^{3}N.

La concentración de MP2,5 presenta en el año 2015 aumento en relación al año 2014, en línea con el MP10. Solo la estación de Nantoco supera la norma Diaria con 64 µg/m^{3}N, en tanto las estaciones T. Amarilla y Copiapo solo presenta para el año 2015 un 80% y 84% respectivamente. El año 2016 todas las estaciones no superan el 64% de la norma.

Tabla 2.10: Evaluación de la Norma 24 horas de MP2,5.

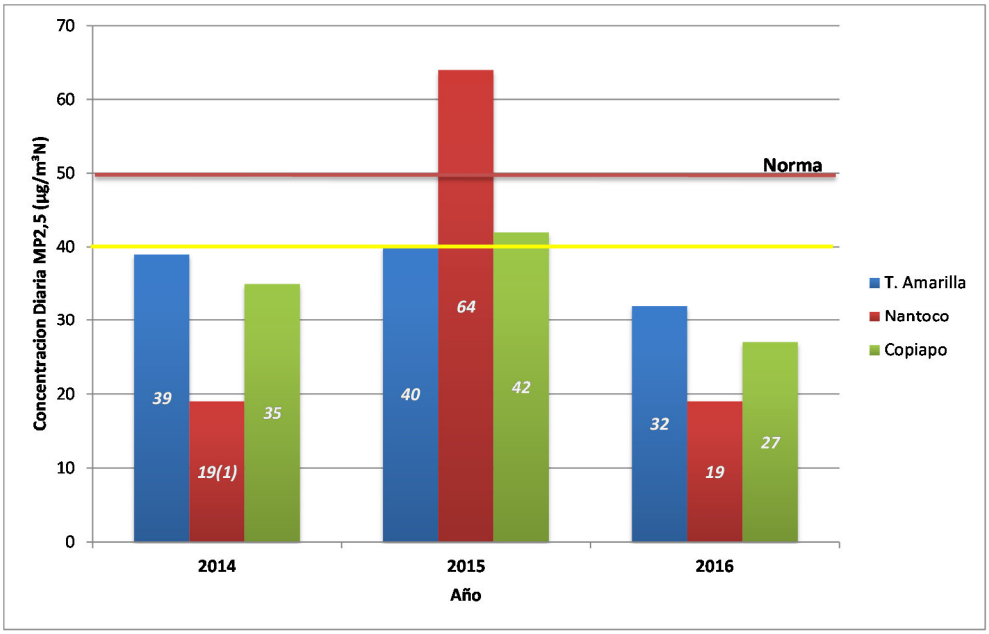
Estación	Año	N° Excedencia > 50 µg/m³N	Percentil 98 (µg/m³N)	Norma (µg/m³N)	% de la Norma 24 horas
T. Amarilla	2014	2	39	50	78%
	2015	1	40		80%
	2016	1	32		64%
Nantoco	2014	0	*19*(1)		38%
	2015	8	64		128%
	2016	0	19		38%
Copiapó	2014	0	35		70%
	2015	2	42		84%
	2016	0	27		54%

(1): Referencial disponibilidad horaria menor a 75%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2.5, se muestra el P98 de las concentraciones en 24 horas de MP2,5. Se observa que la normativa establecida como valor límite diario (50 µg/m³) es superada solo por la estación Nantoco con un valor de 64 µg/m³.

Figura 2.5: Norma Diaria para MP2,5 por Año



(1): Referencial disponibilidad horaria menor a 75%

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Norma Promedio anual para MP2,5

La norma Anual de calidad del aire para MP2,5 se sobrepasa cuando el promedio tri-anual de las concentraciones anuales sea mayor a 20 µg/m^{3}N.

En la Tabla 2.11 se presenta el cálculo del promedio anual donde no existe una superación de la norma. Solo la estación Tierra amarilla está en el límite del valor indicado por la norma Anual.

Tabla 2.11: Evaluación de la Norma 24 horas de MP2,5.

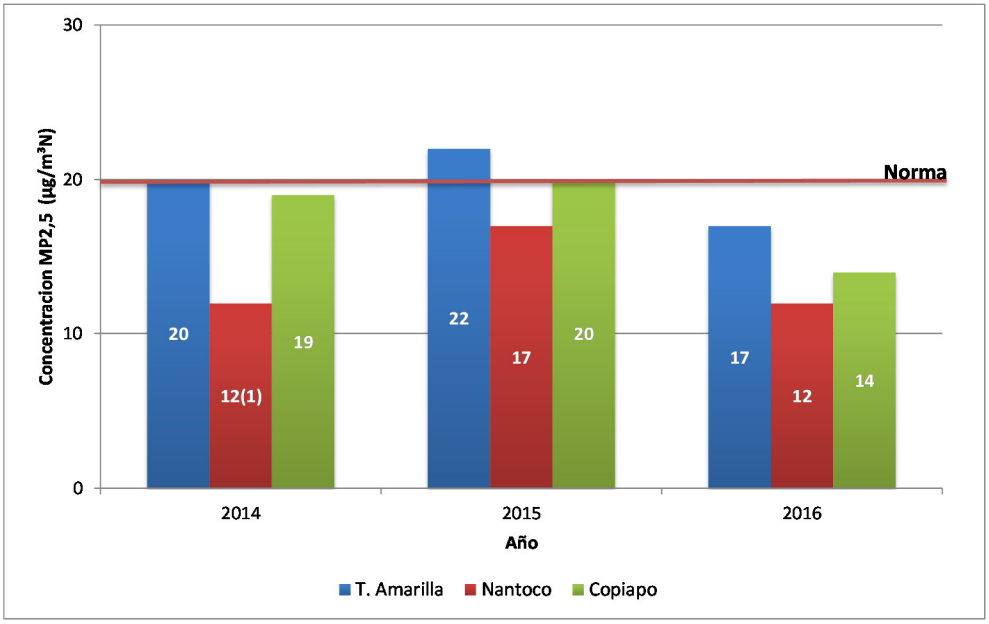
Estación	Año	Promedio	Promedio Tri-Anual	% Norma
T. Amarilla	2014	20	20	100%
	2015	22		110%
	2016	17		85%
Nantoco	2014	12(1)	14(1)	60%
	2015	17		85%
	2016	12		60%
Copiapó	2014	19	18	95%
	2015	20		100%
	2016	14		70%

(1): Referencial disponibilidad horaria menor 8 meses

Fuente: Elaboración propia.

En Figura 2.6 y Figura 2.7 se presenta la Norma anual y Trianual, en donde solo se supera la norma en el año 2015 para estación T. Amarilla. En tanto para el promedio trianual solo la estación Tierra Amarilla presenta valores cercanos al 98% de la Norma Anual.

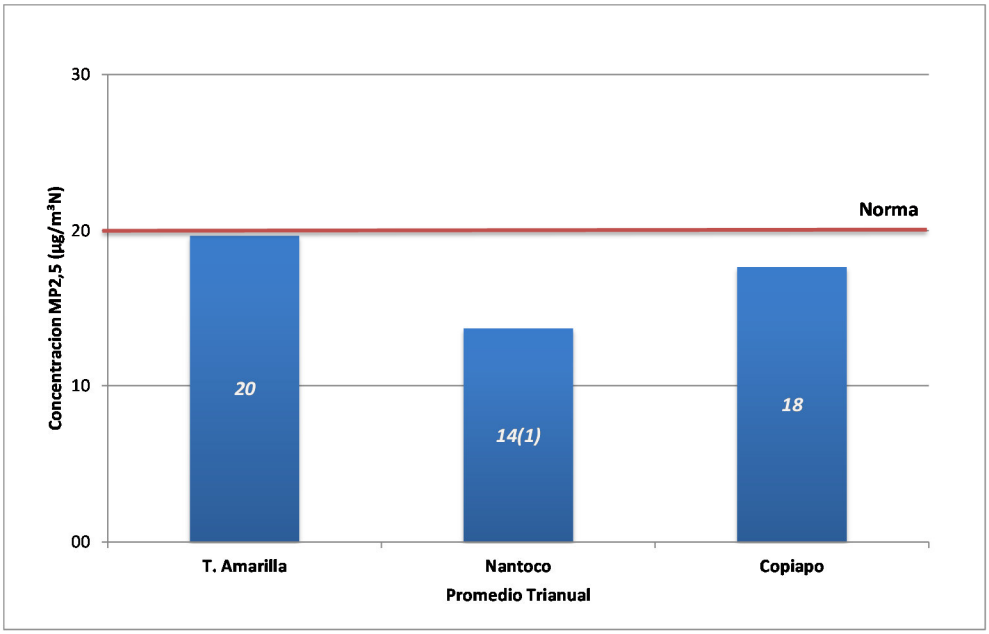
Figura 2.6: Norma Anual para MP2,5 por Año



(1): Referencial disponibilidad horaria menor 8 meses

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.7: Norma Trianual para MP2,5



(1): Referencial disponibilidad horaria menor 8 meses

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Evaluación de Concentración Material Particulado Sedimentable (MPS)

2.3.1 Promedio Mensual MPS

Para el análisis del material particulado sedimentable (MPS), se utilizara como referencia el D.S. N°3395/96 de la República Argentina debido a que no se cuenta con normativa que regule éste contaminante en el área de estudio.

En Tabla 2.12 se presentan los máximos promedio de MPS, donde para estación Tierra amarilla el año 2015 presenta un aumento significativo del promedio diario, esto debido al evento del aluvión. La norma de Argentina se supera solo en la estación T. Amarilla en los años 2014 y 2015.

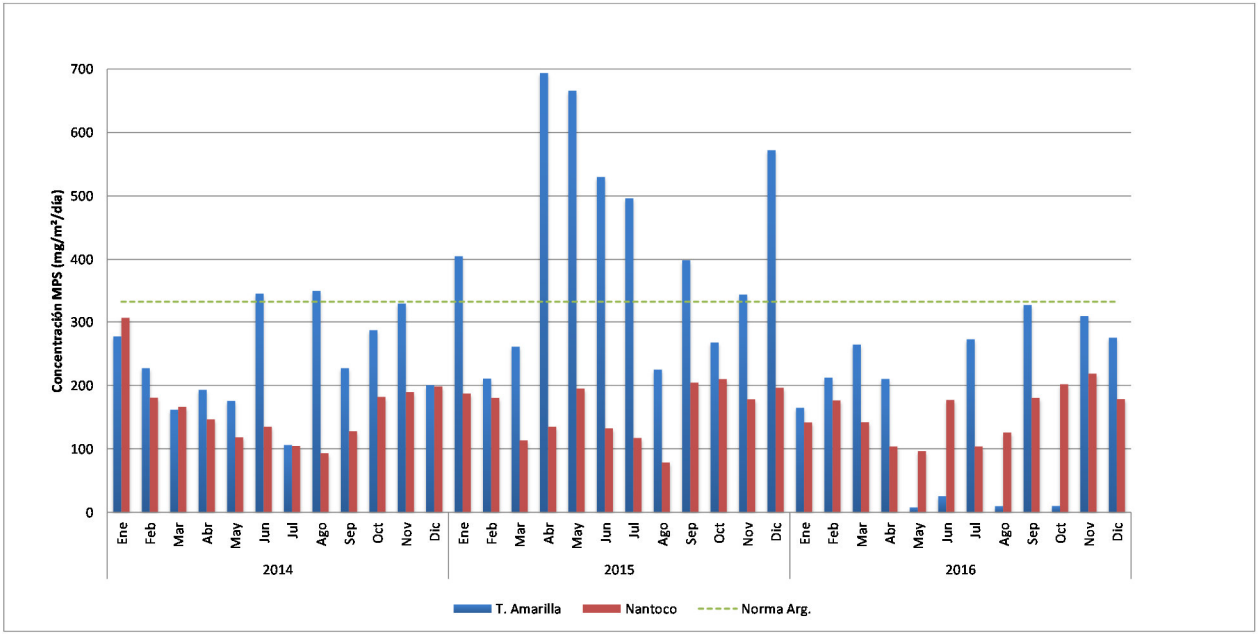
Tabla 2.12: Evaluación de MPS.

Estación	Año	Máximo Mensual	DS3395 (333 mg/m²/día)
T. Amarilla	2014	350	105%
	2015	694	208%
	2016	328	98%
Nantoco	2014	307	92%
	2015	210	63%
	2016	219	66%

Fuente: Elaboración propia.

En Figura 2.8 se presenta las concentraciones promedio donde se observa que para el año 2015 las concentraciones de T. Amarilla presenta aumento de la concentración de MPS hasta los 700 mg/m²/día, en tanto para el año 2016 presenta un descenso de las concentraciones registradas.

Figura 2.8: Concentración mensual de MPS



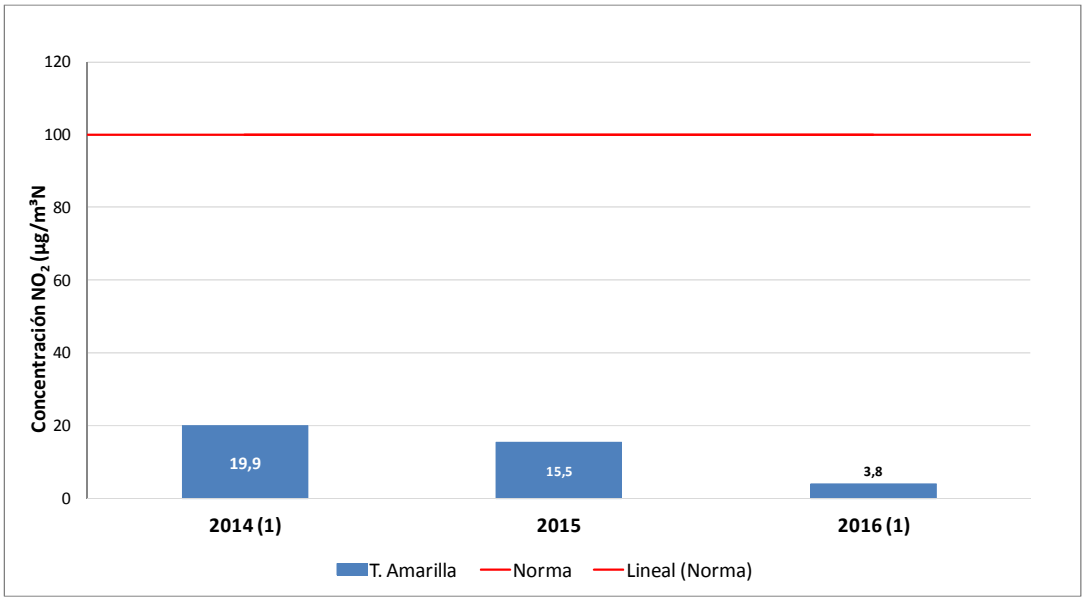
Fuente: Elaboración propia.

2.4 Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

A continuación, en la Figura 2.9, se presentan las medias aritméticas de las concentraciones anuales de NO_2. Se sobrepasa la norma de calidad del aire para NO_2, cuando el promedio aritmético de tres años sucesivos del percentil 99 de los máximos diarios de concentración de 1 hora registrados durante un año calendario superen los 400 µg/m^{3}N.

En Figura 2.10 se presenta el análisis de la normativa horaria para la estación Tierra Amarilla. Los años 2014 y 2016, debido a que presentan menos del 75% de los datos, serán considerados sólo a modo de referencia. Se observa que no hay superación de la norma, los valores registrados llegan a un 26% de la norma horaria.

Figura 2.9: Concentraciones promedio anual de NO_2

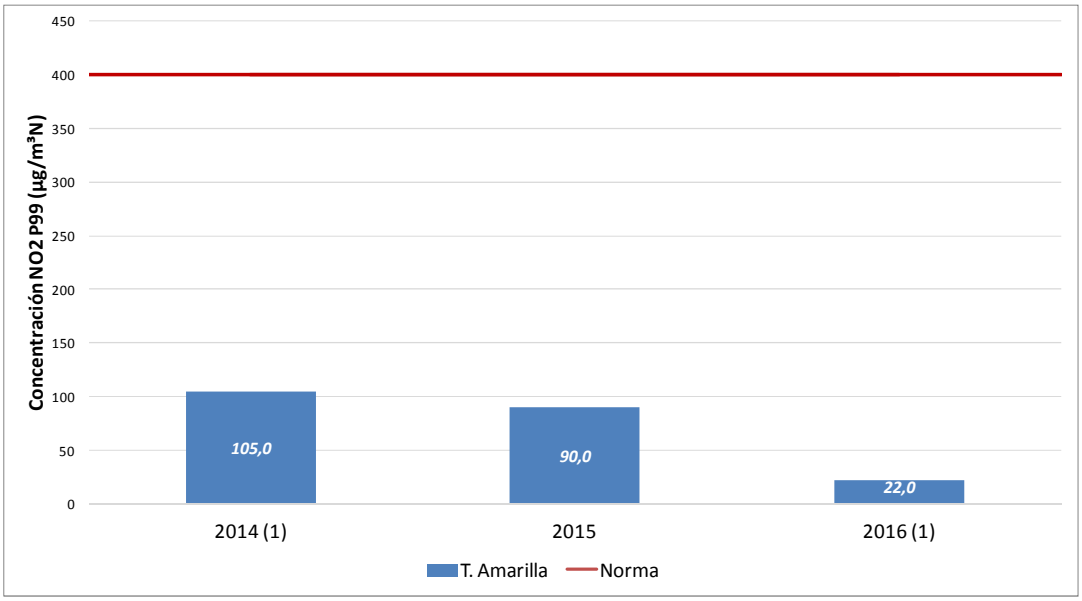


(1): Referencial disponibilidad horaria menor a 75%

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que la Norma horaria, la anual, representada por el promedio aritmético de los valores de concentración anual de tres años, representa solamente el 20% de la norma, esto considerando los años 2014 y 2016 de manera referencial.

Figura 2.10: Percentil 99 de concentraciones máximas de 24 horas de NO_2



(1): Referencial disponibilidad menor a 8 meses.

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Dióxido de Azufre (SO_2)

2.5.1 Norma Primaria Diaria para SO_2

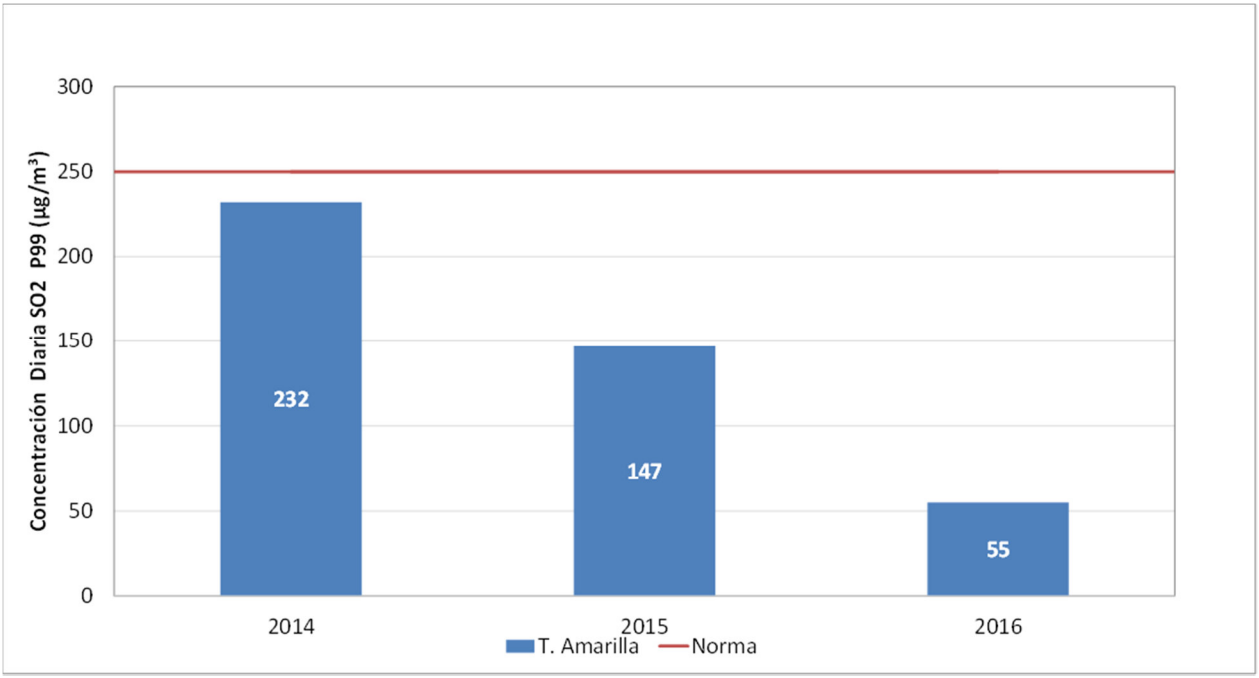
En Tabla 2.13 se muestra el P99 de las concentraciones promedio en 24 horas de SO_2 registrado en la estaciones T. Amarilla durante el período analizado. La norma de concentración de 24 horas es sobrepasada cuando el promedio aritmético de tres años sucesivos, del percentil 99 de las concentraciones de 24 horas durante un año calendario, es mayor a 250 µg/m^{3}N, de acuerdo a esto la estación T. Amarilla no presenta superación de la norma Diaria. Las concentraciones registradas han descendido de 92.6% el año 2014 a representar 21,8% de la norma para el año 2016.

Tabla 2.13: Evaluación Norma Diaria de SO_2

Estación	Año	SO_2 Promedio Diario (P99) (µg/m³)	% Norma Primaria
T. Amarilla	2014	232	92,6%
	2015	147	58,8%
	2016	55	21,8%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.11: Norma Diaria para SO_2 por Año



Fuente: Elaboración propia.

2.5.2 Norma Primaria Anual para SO_2

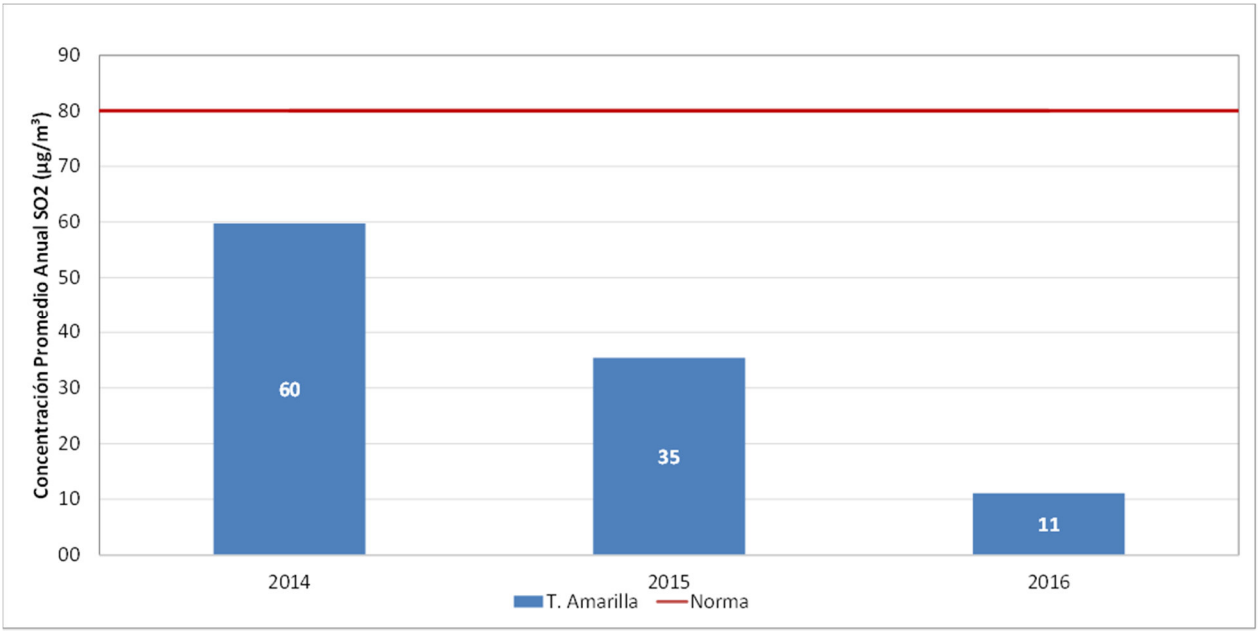
En Tabla 2.13 se muestra el P99 de las concentraciones promedio en 24 horas de SO2 registrado en la estaciones T. Amarilla durante el período analizado. Se sobrepasa la norma primaria de calidad de aire para SO_2 como concentración anual, cuando el promedio aritmético de los valores de concentración anual de tres años calendarios sucesivo es mayor a 80 µg/m^{3}N. Consecuentemente con la norma diaria, la concentración promedio anual presenta un descenso de 67 µg/m^{3}N el año 2014 a 13 µg/m^{3}N lo que representa un 16% de la norma anual para el año 2016.

Tabla 2.14: Evaluación Norma Anual de SO_2

Estación	Año	SO_2 Promedio Anual (µg/m^3)	% Norma Primaria
T. Amarilla	2014	67	83%
	2015	31	38%
	2016	13	16%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.12: Norma Diaria para SO_2 por Año



Fuente: Elaboración propia.

2.5.3 Norma Secundaria horario SO_2

En la Tabla 2.15, se presenta un resumen con el cálculo del percentil 99,73 de la norma secundaria horaria para SO_2, la cual se sobrepasa cuando el promedio aritmético de tres años calendario sucesivos de los valores del percentil 99,73 de las concentraciones de 1 hora supera los 1.000 µg/m^{3}N, además, si en un año calendario el percentil 99,73 de las concentraciones de 1 año supera los 2.000 µg/m^{3}N.

Los valores registrados en estación T. Amarilla no superan la norma secundaria para ninguno de los límites establecidos, la concentración promedio horario anual para el 2014 representa un 73% del valor normado, el cual va disminuyendo hasta representar el 17%.

Tabla 2.15: Evaluación Norma Secundaria Horaria de SO_2

Estación	Año	SO_2 Promedio Horario (P99,73) (µg/m³)	% Norma Secundaria	Promedio Tri-Anual	% Norma Secundaria Horaria Anual
T. Amarilla	2014	1.463	73%	869	87%
	2015	804	40%		
	2016	341	17%		

Fuente: Elaboración propia.

2.5.4 Norma Secundaria Diaria SO_2

Se sobrepasa la norma secundaria como concentración de 24 horas, cuando el promedio aritmético de tres años calendario sucesivos de los valores del percentil 99,7 de las concentraciones de 24 horas registradas cada año, es mayor a 365 µg/m^{3}N. Además si en un año calendario el percentil 99,7 de las concentraciones de 24 horas es mayor a 730 µg/m^{3}N.

Los valores calculados se presentan en Tabla 2.16, donde no existe superación de la norma secundaria promedio diario.

Tabla 2.16: Evaluación Norma Secundaria Diaria de SO_2

Estación	Año	SO2 Promedio Diario (P99,7) (µg/m³)	% Norma Secundaria	Promedio Tri-Anual	% Norma Secundaria Horaria Anual
T. Amarilla	2014	260	35,7%	169	46%
	2015	191	26,1%		
	2016	57	7,8%		

Fuente: Elaboración propia.

2.5.5 Norma Secundaria Anual SO_2

La norma secundaria de calidad de aire para SO_2 como concentración anual, se sobrepasa cuando el promedio aritmético de tres años calendario sucesivos de los valores de concentración anual, es mayor a 80 µg/m^{3}N. Además si en un año calendario, el valor de concentración es mayor a 160 µg/m^{3}N.

Los valores calculados se presentan en Tabla 2.17, en donde se observa no existe superación de la norma secundaria promedio Anual.

Tabla 2.17: Tabla 2.18: Evaluación Norma Secundaria Anual de SO_2

Estación	Año	SO_2 Promedio Diario (P99,7) (µg/m³)	% Norma Secundaria	Promedio Tri-Anual	% Norma Secundaria Horaria Anual
T. Amarilla	2014	67	42%	37	46%
	2015	31	19%		
	2016	13	8%		

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis de MP10, MP2,5, MPS y gases (SO2 y NO2) elaborado según los registros de datos provenientes de las estaciones TAMA, Nantoco y Tierra Amarilla (ENAMI) se obtiene que:

Material Particulado Respirable MP10

Del análisis de los promedios diarios se puede establecer que las estaciones analizadas no superan la normativa, salvo para el año 2015 donde la existencia de aluviones impactaron en la calidad del aire. La estación Tierra amarilla registra para el año 2016 un 87% del valor normado.

En tanto para el promedio anual, todas las estaciones analizadas presentan superación de la norma anual, donde si bien se puede advertir el impacto del aluvión, los niveles basales antes y posterior al año 2015 superan la norma Anual.

Material Particulado Fino Respirable (MP2,5)

El material particulado MP2,5 presenta en su norma diaria valores debajo de la norma, salvo para el año 2015 debido básicamente a los aluviones ocurridos ese año. En tanto el año 2016 en todas las estaciones analizadas la concentración diaria no se supera el 65% del valor normado.

En cuanto a la norma Anual, las estaciones no superan el límite indicado en la normativa.

Material Particulado Sedimentable

La concentración de MPS si bien no está normado para la zona, los registros muestran que las estación Tierra Amarilla y Nantoco en general no superan el límite diario establecido por el Decreto N°3395/96 República de Argentina.

Gases

En estación Tierra Amarilla de acuerdo al análisis de NO_2, las concentraciones registradas se sitúan por debajo del valor normado, presentando en general un 20% de la norma tanto para Diaria como Anual

Al igual que el NO_2, el SO_2 presenta concentraciones por debajo de los valores de la norma primaria (D.S. N°113/02 MINSEGPRES). En tanto en Norma Secundaria (D.S. N°22/2009 MINSEGPRES), solo el promedio trianual de los valores horarios está en un 87% del valor normado, el resto de los estadígrafos se encuentra por debajo del 50% de los limites. Cabe destacar que las concentraciones de SO_2 registradas en la estación T. Amarilla han presentado un descenso desde el año 2014 al 2016.

3 CARACTERIZACIÓN METEOROLÓGICA DEL ÁREA DEL PROYECTO

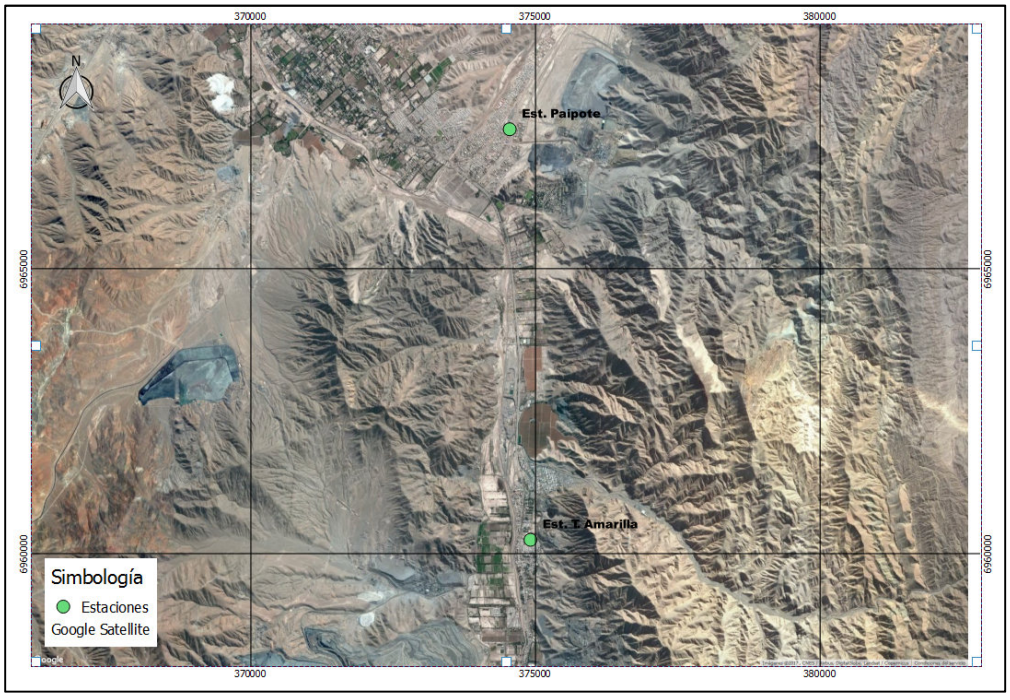
La información meteorológica de superficie utilizada para la caracterización del área del Proyecto, corresponde a las mediciones registradas en dos estaciones meteorológicas en el sector, correspondiente a las estaciones Paipote y Tierra Amarilla. Las coordenadas de ambas estaciones se indican en la Tabla 3.1: Para la caracterización meteorológica se cuenta con registros de velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar para la estación Tierra Amarilla y velocidad y dirección del viento para la estación Paipote.

Tabla 3.1: Coordenadas de ubicación de las estaciones meteorológicas.

Estación Meteorológica	Coordenadas UTM	
	Este (m)	Norte (m)
Paipote	374.539	6.967.442
Tierra Amarilla	375.128	6.960.567

(*) Huso 19S, Datum WGS84

Figura 3.1: Ubicación de las estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia, en base a Google Earth.

La disponibilidad de los datos registrados se presenta en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3donde se observa que se tiene un 99% de disponibilidad de información.

Tabla 3.2: Caracterización de los datos meteorológicos, Numero de datos observados, Año 2016

Estación	Velocidad del viento	Dirección del viento	Temperatura	Humedad relativa	Radiación solar	Presión Barométrica
Paipote	8734	8741				
T. Amarilla	8779	8735	8781	8782	8781	8781

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3: Caracterización de los datos meteorológicos, % de completitud Año 2016.

Estación	Velocidad del viento	Dirección del viento	Temperatura	Humedad relativa	Radiación solar	Presión Barométrica
Paipote	99.43%	99.51%				
T. Amarilla	99.94%	99.44%	99.97%	99.98%	99.97%	99.97%

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta un resumen de los resultados del monitoreo de variables meteorológicas medidos durante el año 2016 en la zona del proyecto.

3.1 Velocidad del Viento

En la Figura 3.4, presenta la velocidad promedio de las estaciones, en ella se observa que la velocidad promedio del viento para el año 2016 de estación Tierra Amarilla es de 2,28 (m/s) con un máximo horario de 5,45 (m/s), con promedios cercanos la estación Paipote presenta un promedio 2,12 (m/s) y un valor máximo horario mayor con 6,7 (m/s).

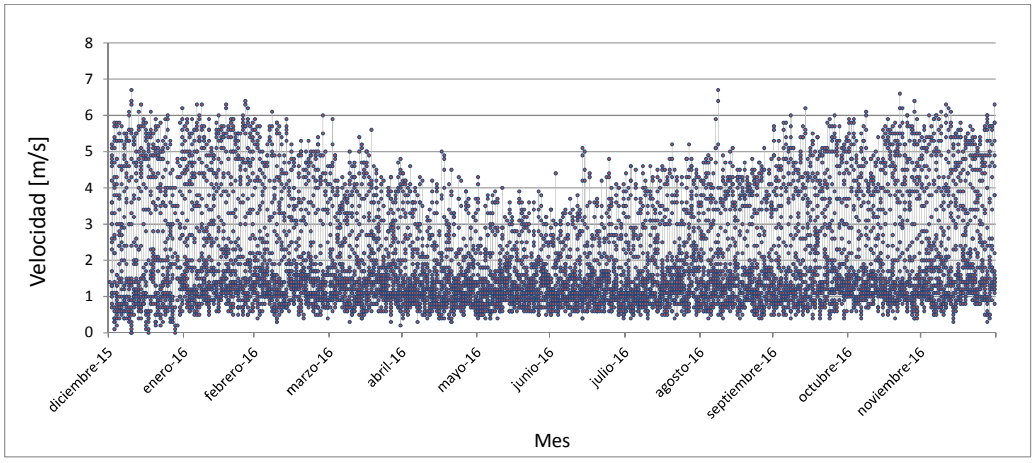
Tabla 3.4: Resumen Velocidad del viento, estaciones Paipote y Tierra Amarilla, Año 2016.

Variable	Tierra Amarilla	Paipote
Promedio (m/s)	2.28	2.12
Máximo (m/s)	5.45	6.70
Porcentaje de calmas	5,3%	2,8%

Fuente: Elaboración propia.

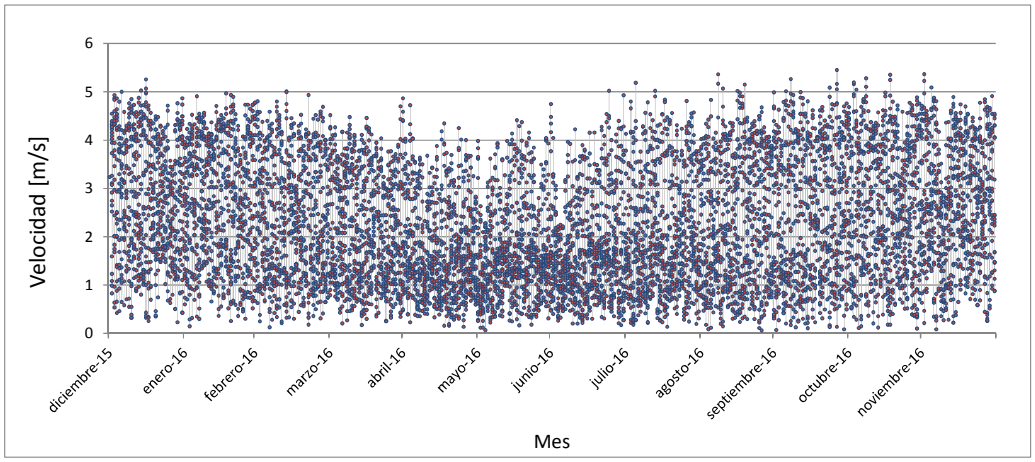
En la Figura 3.2 y Figura 3.3 se presenta la serie de tiempo para cada estación, en donde es posible apreciar que en ambas estaciones se registran mayores velocidades de vientos durante los meses de verano respecto a los otros meses. En cuanto a la completitud de las variables ambas estaciones no presentan periodos sin datos.

Figura 3.2: Serie de tiempo de velocidad del viento observada Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

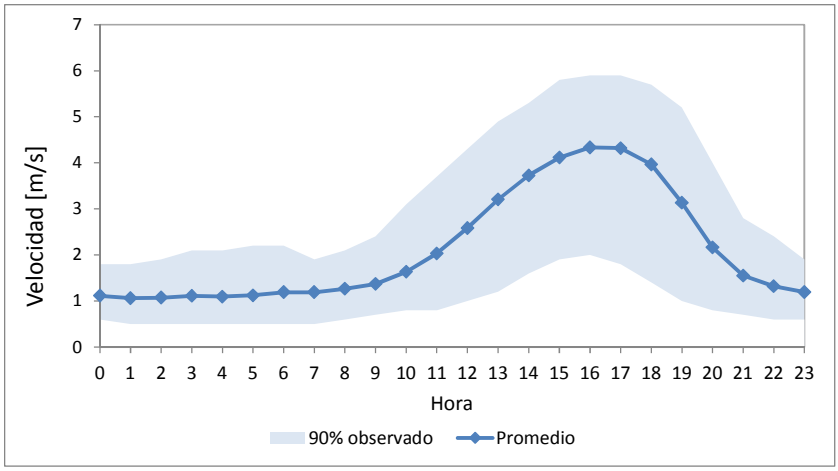
Figura 3.3: Serie de tiempo de velocidad del viento observada Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.4 muestra el ciclo diario del viento observado en la estación Paipote, en donde se aprecia una variación en las magnitudes de viento entre las horas de la noche y de día, donde las máximas diarias se presentan entre las 16:00 y 17:00 hrs. con valores cercanos en promedio a 4,3 (m/s), horario en que además aumenta la desviación estándar de las magnitudes de viento.

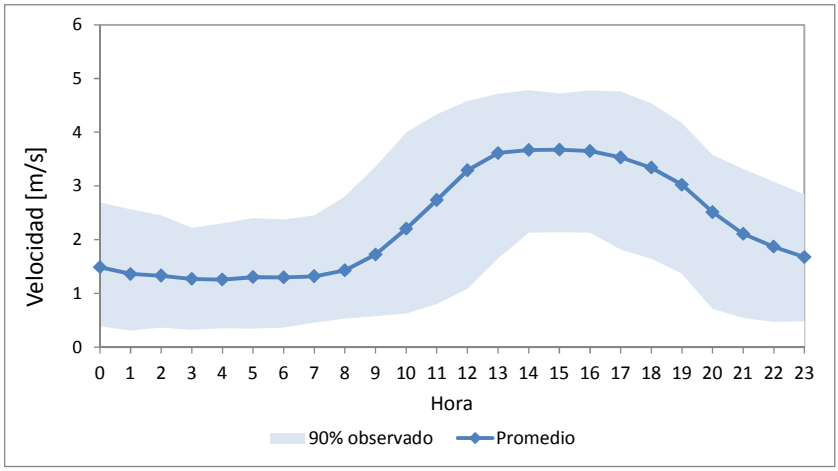
Figura 3.4: Ciclo diario de la velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

La estación Tierra amarilla presentada en la Figura 3.5 presenta el mismo comportamiento diario que estación Paipote, donde las horas de mayor velocidad promedio del viento es entre 16:00 y 17:00 hrs con valores promedios de 3,7 (m/s).

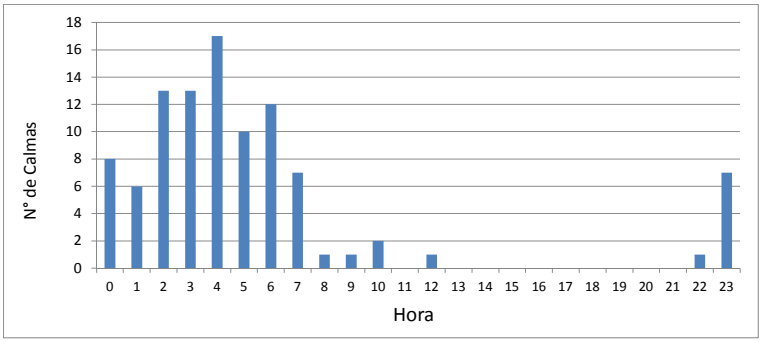
Figura 3.5: Ciclo diario de la velocidad del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016



Fuente: Elaboración propia.

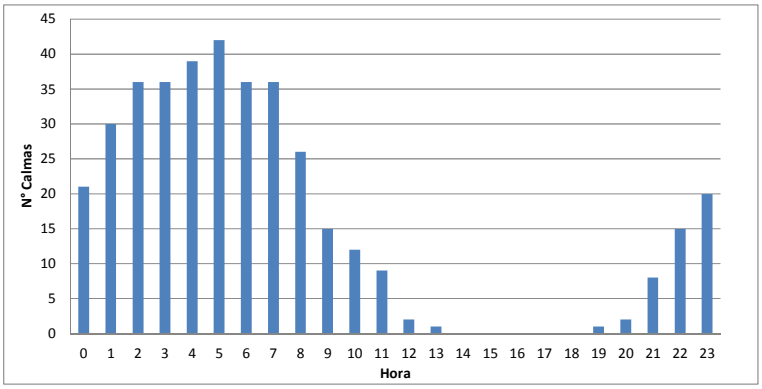
En Figura 3.6 y Figura 3.7 se registran la frecuencia de calmas en la estación Paipote y Tierra Amarilla respectivamente, donde se observa que en ambas estaciones las calmas se concentran preferentemente entre las 23:00 y las 07:00 horas y estación Tierra amarilla presenta mayor cantidad de casos de calma que estación Paipote

Figura 3.6: Distribución Horaria de las calmas registradas. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7: Distribución Horaria de las calmas registradas. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



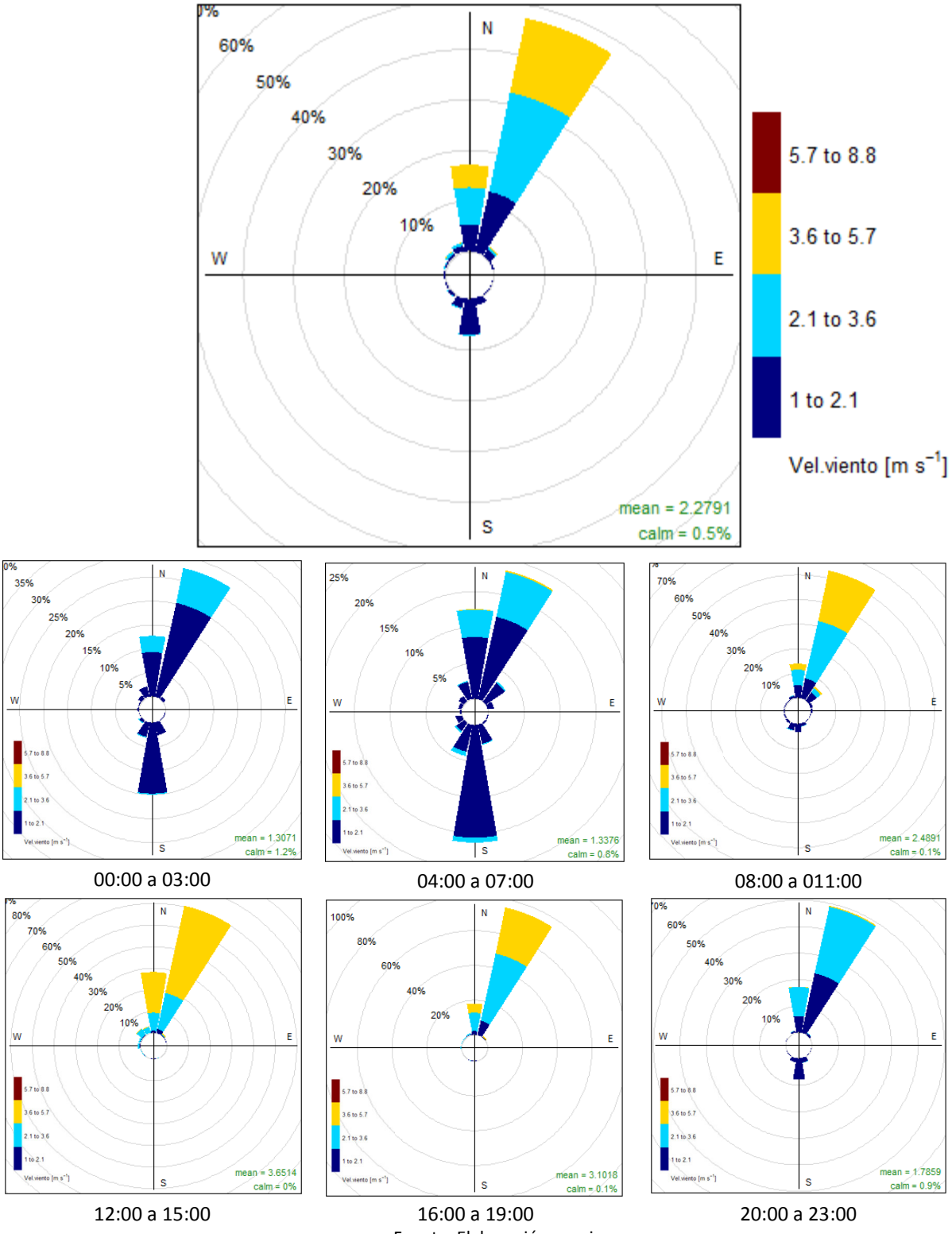
Fuente: Elaboración propia.

3.2 Dirección del Viento

Estación Tierra Amarilla

La estación Tierra Amarilla presenta una clara predominancia de viento nor-noreste (NNE) y viento Norte (N), con una frecuencia de aproximadamente un 70% del tiempo, la dirección del viento esta principalmente influenciada por la forma del valle, donde está ubicada la localidad de Tierra Amarilla, produciéndose una fuerte canalización del viento, situación que se aprecia en la Figura 3.8 donde la componente principal del viento es NNE y N durante las 24 horas, solo durante el periodo de 0:00 a 7:00 se registra viento Sur, con magnitudes de viento débiles.

Figura 3.8: Rosas de viento observado. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



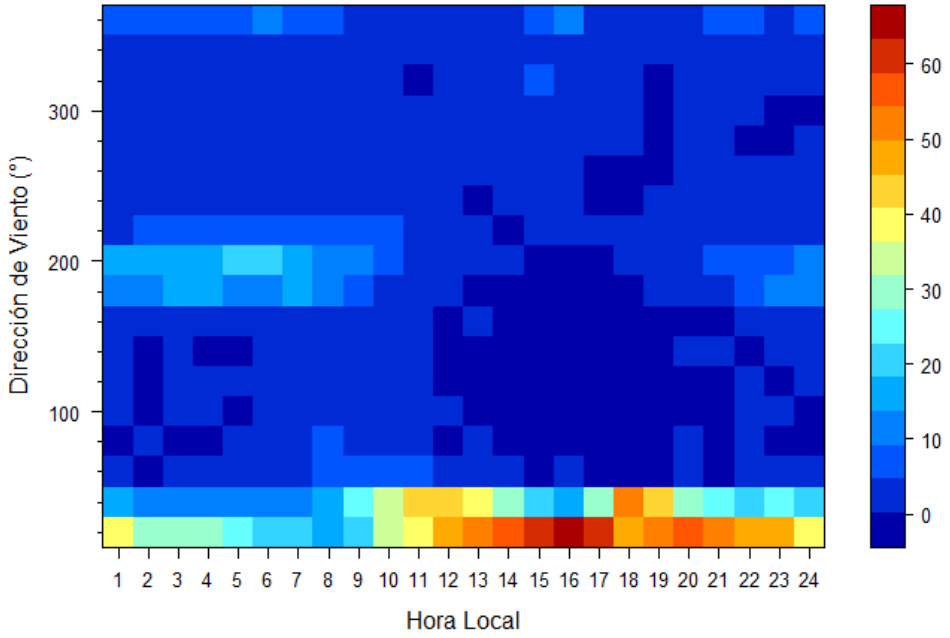
00:00 a 03:00 | 04:00 a 07:00 | 08:00 a 011:00

12:00 a 15:00 | 16:00 a 19:00 | 20:00 a 23:00

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.9 confirma la gran frecuencia de viento norte que se presenta durante las horas del día, frecuencia que disminuye a un 50 % aproximadamente en horas de la madrugada y primeras horas de la mañana, entre las 02:00 y las 10:00 horas.

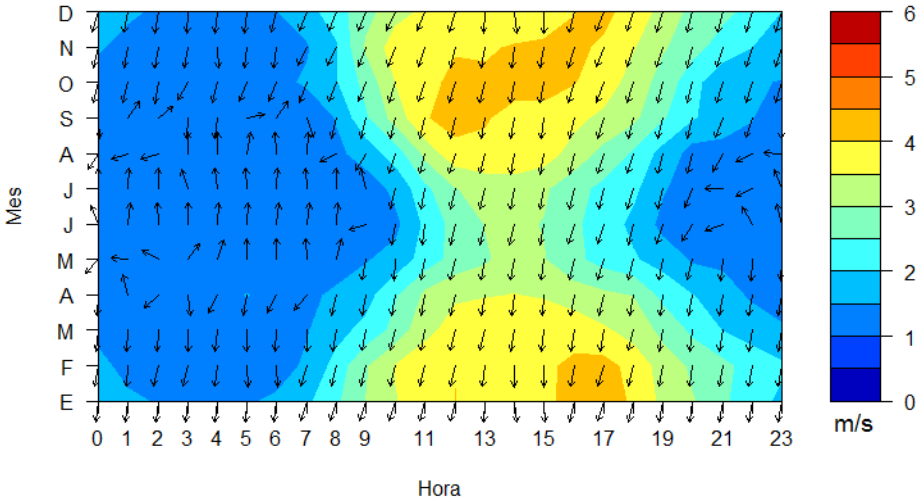
Figura 3.9: Ciclo Diario de la Dirección del Viento Observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.10 muestra la predominancia del viento Norte durante todo el año en especial en los meses de primavera y verano en todo día, en tanto para los meses de invierno se presenta viento Sur durante las horas de la madrugada principalmente. Además se puede ver mayores magnitudes de viento durante los meses de primavera y verano, principalmente entre las 11:00 y 19:00 horas.

Figura 3.10: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



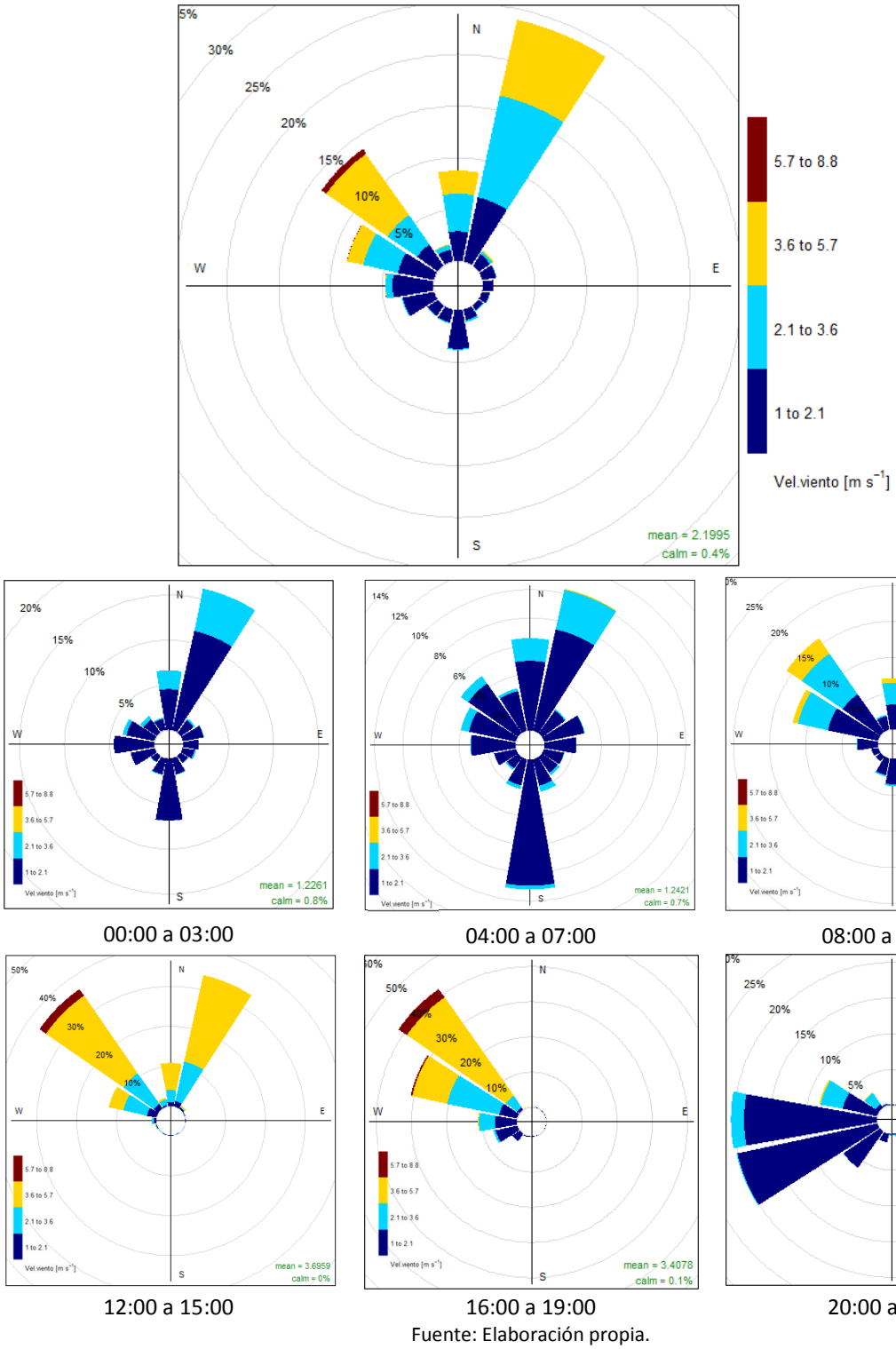
Fuente: Elaboración propia.

Estación Paipote

En la Figura 3.11 se presentan las rosas de viento (anual y cada cuatro horas) obtenidas a partir de la serie de datos. En el caso de la rosa de los vientos anual, se observa un predominio de los vientos provenientes desde el nor-noreste (NNE), durante 25% del tiempo, con velocidades máximas en el rango de 3.6 a 5.7 (m/s), el cual es el mismo componente predominante en estación Tierra Amarilla, esto debido a la cuenca en común que tienen ambas estaciones meteorológicas. Pero a diferencia de Tierra Amarilla, Paipote también presenta una frecuencia importante de vientos con componente noroeste (NO) durante horas del medio dia y tarde y componente oeste (O) durante horas de la noche. La componente NO aparece por la influencia de la cuenca de Copiapo y San Fernando, mientras que la componente oeste (O) se debe principalmente a un fenómeno de viento de montaña a valle.

Las rosas de viento por rango horario dan cuenta de que durante el periodo comprendido entre las 00:00 y 07:00 horas se presentan vientos provenientes del norte (N), y nor-noreste (NNE) y sur (S), con una frecuencia de aproximadamente 20 % del tiempo, con velocidades generalmente menores a 2 (m/s). Entre las 08:00 y las 11:00 comienza la rotación del viento migrando desde nor-noreste (NNE) de un 20% del tiempo a noroeste (NO) y nor-noroeste NNO con un 27% del tiempo, las velocidades del viento aumentan hasta el rango de 5.7 a 8.8 (m/s). Finalmente de 20:00 a 23:00 el viento presenta componentes oeste (O) y oeste-suroeste (OSO) con una frecuencia del 40% del tiempo.

Figura 3.11: Rosas de viento observado. Estación Paipote. Año 2016.



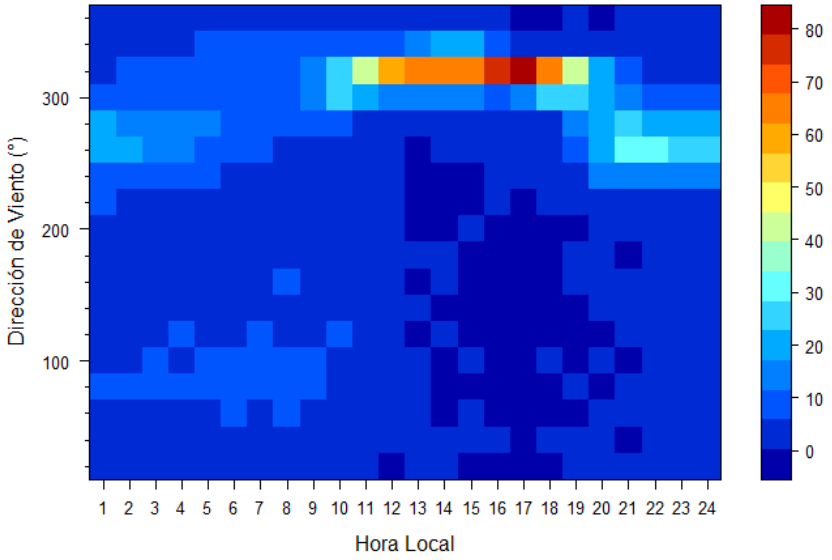
00:00 a 03:00 | 04:00 a 07:00 | 08:00 a 011:00

12:00 a 15:00 | 16:00 a 19:00 | 20:00 a 23:00

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.12 se presenta el ciclo diario de dirección del viento observada, en dicho gráfico, se puede corroborar lo representado por las rosas del viento.

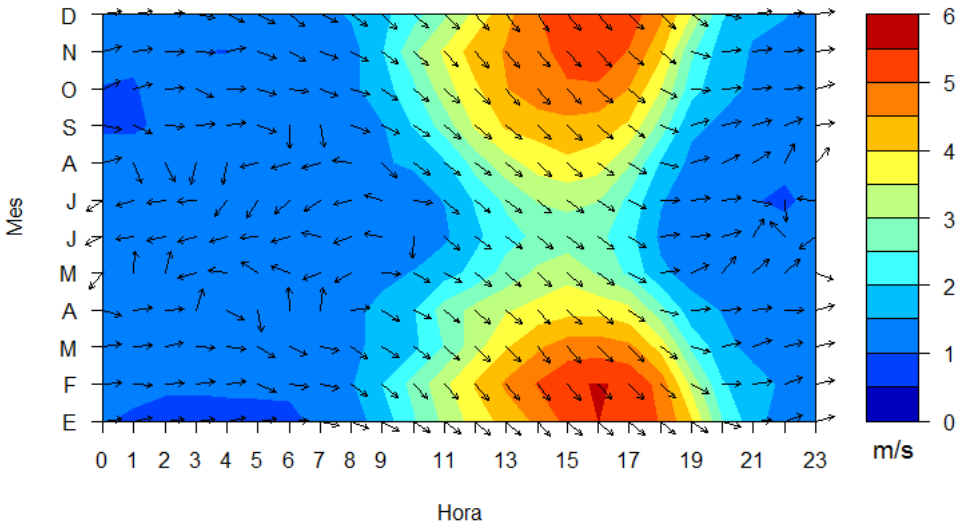
Figura 3.12: Ciclo diario de la dirección del viento observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.13, se muestra el ciclo estacional de dirección y velocidad del viento observada. En dicho gráfico, se observa que durante todo el año se produce el comportamiento descrito anteriormente, preferentemente entre las 08:00 a 23:00 con direcciones de desde el NO y O, con velocidades máximas presentadas entre las 15:00 y 18:00 hrs en especial para los meses cálidos.

Figura 3.13: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Temperatura

La Tabla 3.5 muestra el resumen de los datos de temperatura en las estaciones Tierra Amarilla. Donde la temperatura promedio es de 17.68 (°C) y el máximo anual es 35,37 (°C).

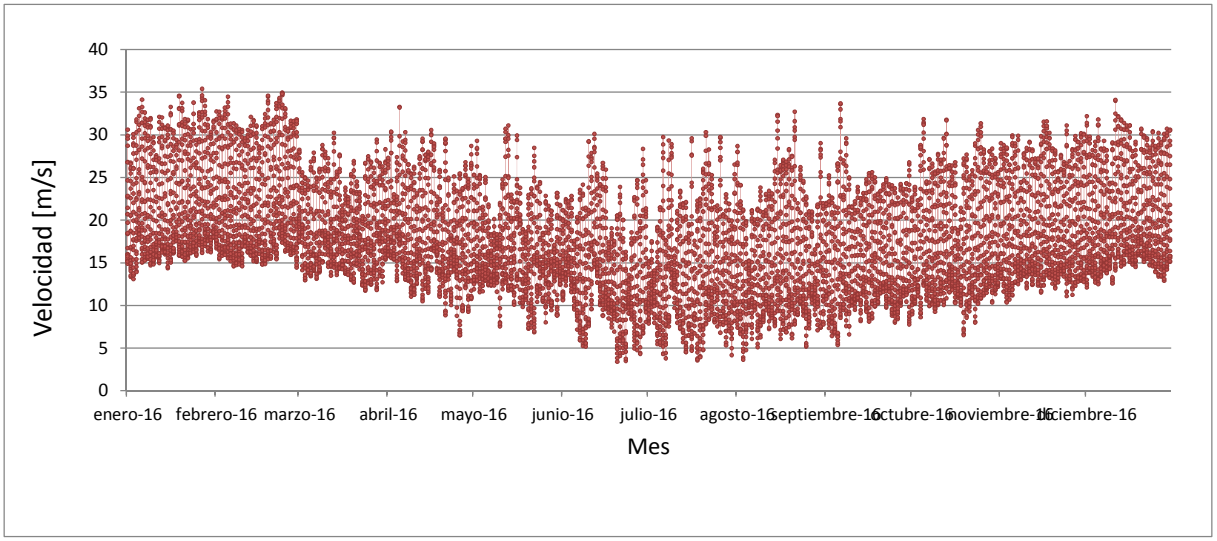
Tabla 3.5: Resumen temperatura, estaciones Principal y Tierra Amarilla. Año 2016.

Variable	Tierra Amarilla
Promedio (°C)	17,7
Máximo (°C)	35,4
Mínimo (°C)	3, 4

Fuente: Elaboración propia.

La serie de tiempo de los registros de temperatura de la estación Tierra amarilla para el año 2016 se presenta en la Figura 3.14, donde no se aprecia días sin datos.

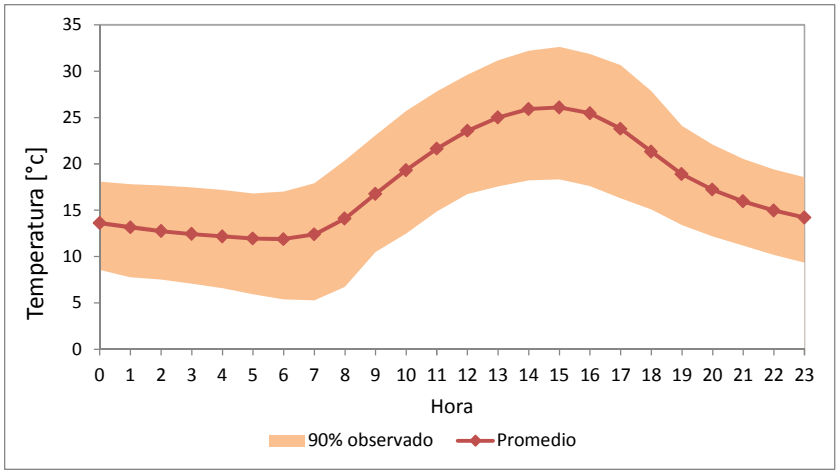
Figura 3.14: Serie de tiempo de temperatura observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

El ciclo diario promedio junto con su variabilidad en término de los percentiles 5 y 95 se presenta en la Figura 3.15. La hora en que se registra el mayor promedio de temperatura corresponde a las 15:00 horas, con un valor de 26,1 ºC, mientras que la temperatura promedio mínima es de 11,9 ºC obtenida a las 06:00 horas.

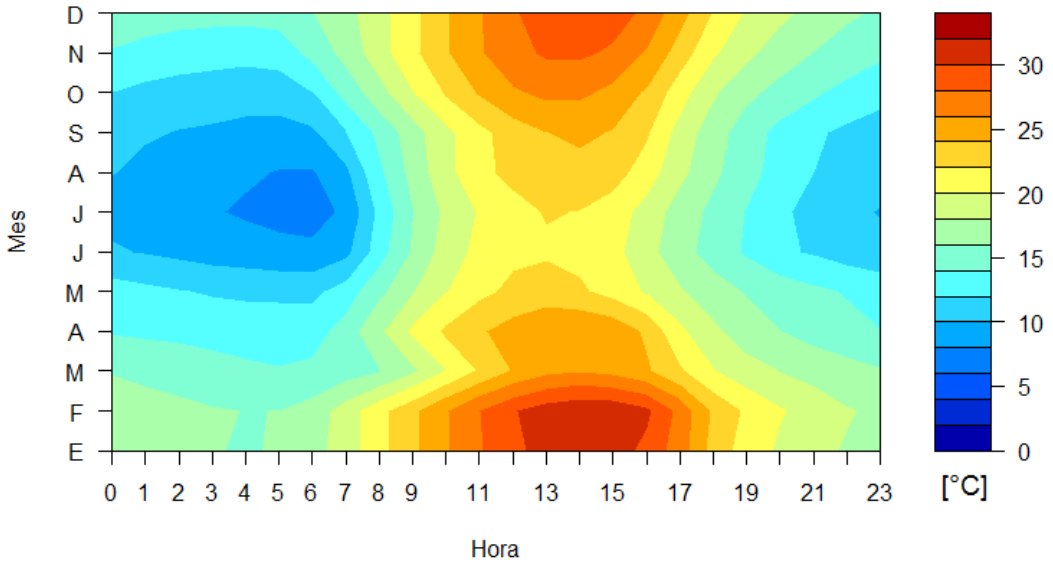
Figura 3.15: Ciclo diario de temperatura observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia

La Figura 3.16 muestra la variabilidad mensual de la temperatura, donde es posible verificar que el mes más frío corresponde al mes de junio con una temperatura media promedio de unos 20°C, la amplitud térmica mensual es más baja durante los meses de invierno que durante los meses de verano, las mayores temperaturas se registran en los meses cálidos de Noviembre a Marzo, durante las 13:00 a 16:00.

Figura 3.16: Ciclo estacional temperatura observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.

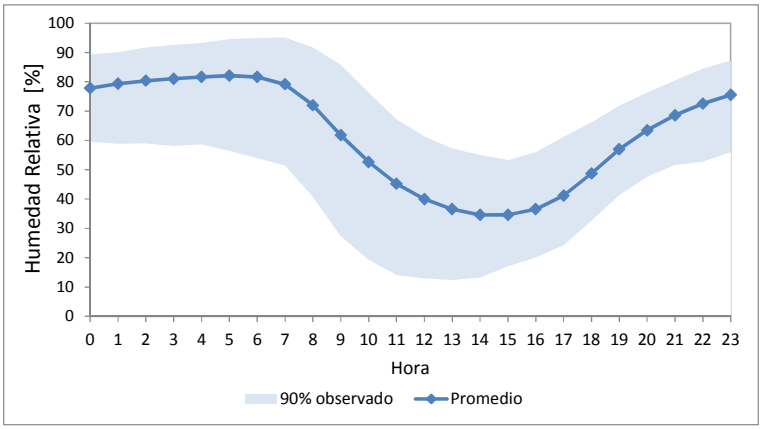


Fuente: Elaboración propia.

3.4 Humedad Relativa

El ciclo promedio diario de humedad relativa de la estación Tierra Amarilla para el año 2016 se presenta en la Figura 3.18, con su variabilidad en término de los percentiles 5 y 95. El promedio horario máximo es de 82,1 % y se alcanza a las 06:00 horas, mientras que el promedio mínimo es de 36,6 %, obtenido a las 16:00 horas

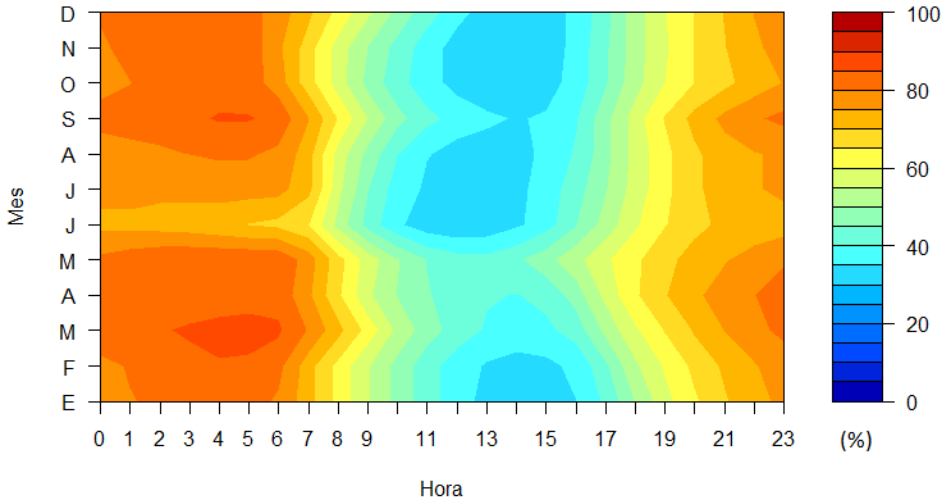
Figura 3.17: Ciclo diario de humedad relativa observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.18 muestra la variabilidad mensual de la Humedad Relativa, donde es posible verificar que la humedad aumenta en el horario nocturno de 21:00 a 07:00 disminuyendo en el horario diurno producto de la radiación solar, comportamiento que se registra todo el año sin cambios importantes debido a las estaciones.

Figura 3.18: Ciclo estacional de humedad relativa observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.

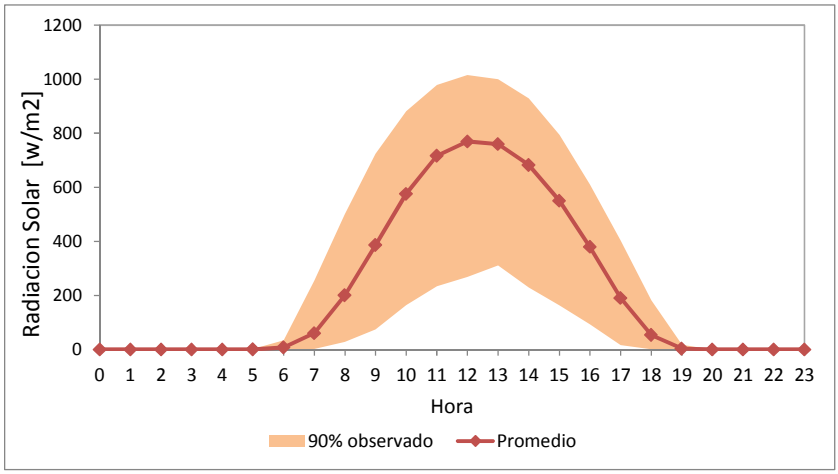


Fuente: Elaboración propia.

3.5 Radiación Solar

El ciclo diario promedio de los registros de radiación solar de la estación Tierra Amarilla para el año 2016 se presenta en Figura 3.19, en unidades (w/m²), el promedio horario máximo es de 769 (w/m²) y se alcanza a las 13:00 horas.

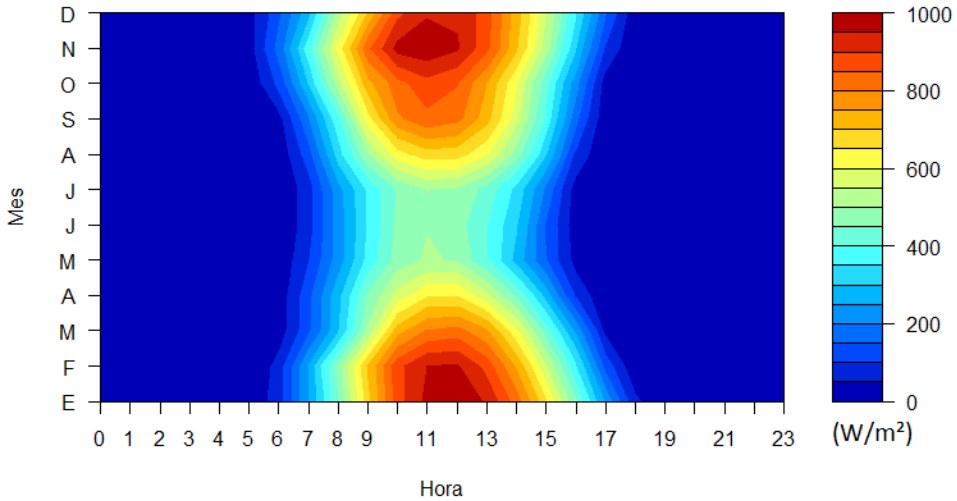
Figura 3.19: Ciclo diario de radiación solar observada. Estación Tierra Amarilla Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

En tanto en la Figura 3.20 se presenta el ciclo estacional de tiempo de la radiación solar en donde se observa que los máximos diarios se presentan en el mes noviembre superando los 1000 (w/m²), los cuales descienden a 500 (w/m²) durante el mes de Julio.

Figura 3.20: Ciclo estacional de radiación solar observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

4 MODELO METEOROLÓGICO

4.1 Justificación del Modelo Meteorológico

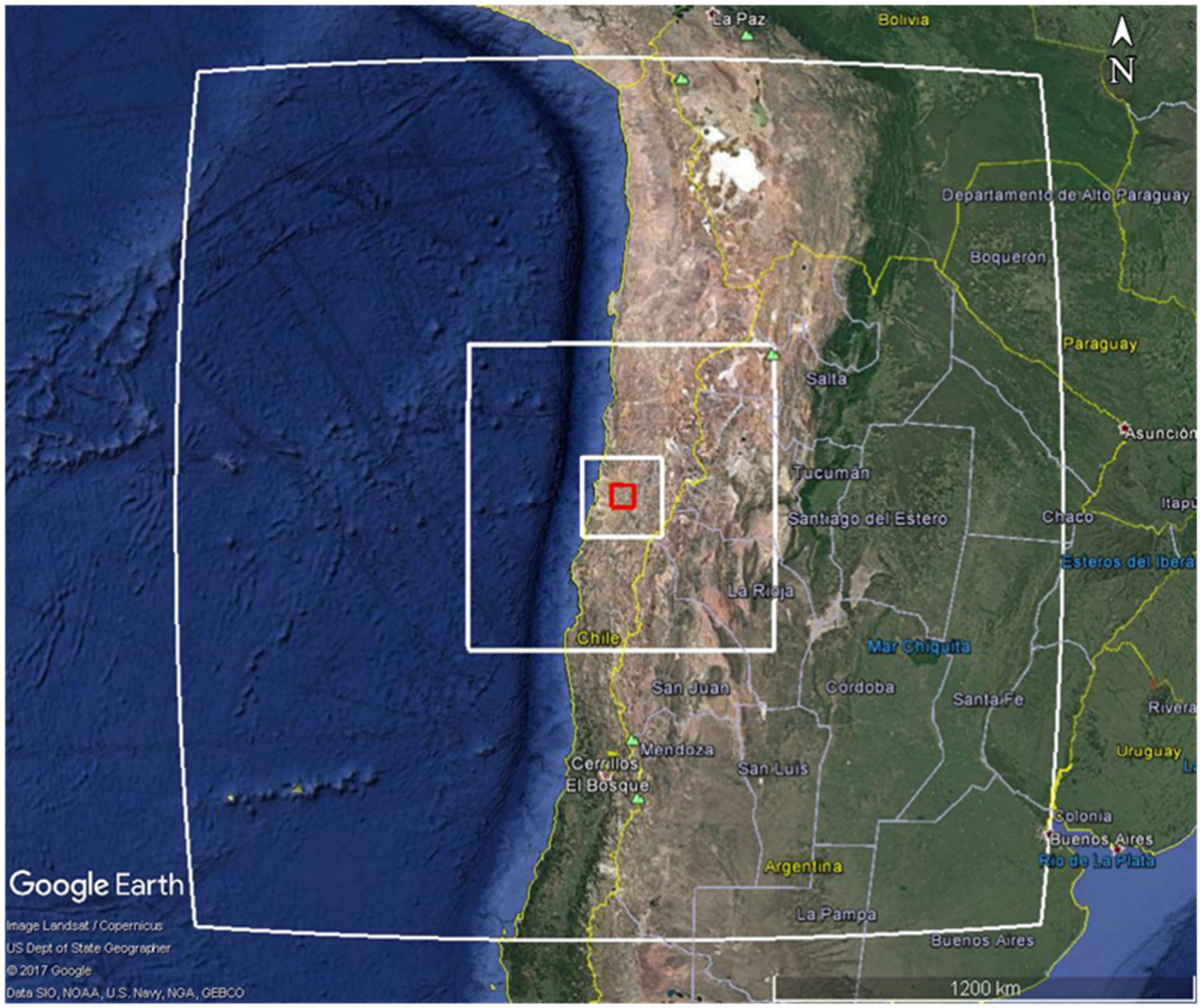
Según lo establecido por la Guía para el uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA, la selección del modelo meteorológico utilizado en el presente estudio se realizó fundamentándose en las condiciones del dominio de modelación del área entorno al proyecto, motivo por el cual la Guía recomienda un modelo que permita simular una meteorología heterogénea. Por esta razón, el campo meteorológico tridimensional horario del año 2016 completo fue generado utilizando el modelo meteorológico WRF, en su versión 3.8.1, y procesado con MMIF v3.2. Posteriormente esta información fue utilizada en el modelo de calidad de aire CALPUFF.

4.2 Descripción del Modelo Meteorológico

El modelo de investigación y pronóstico del tiempo (Weather Research and Forecasting - WRF) es un sistema de predicción numérico de mesoscala de nueva generación, diseñado para servir pronósticos operacionales y para estudio de la atmósfera.

Se crearon cuatro dominios anidados con resoluciones de grilla de 27, 9, 3 y 1 kilómetro correspondientemente, los cuales se muestran en la Figura 4.1, en rojo se indica el dominio de modelación más pequeño, el cual se utilizará para alimentar el modelo de dispersión CALPUFF. La Tabla 4.1 y la Tabla 4.2 muestran la definición de los dominios anidados utilizados en WRF y la proyección geográfica, respectivamente.

Figura 4.1: Extensiones de los dominios 1, 2, 3 y 4 en WRF.



Fuente: Elaboración propia, en base a Google Earth.

Tabla 4.1: Definición de dominio de modelación.

	DX	DY	NX	NY	KMx	KMy	Nº Celdas
Dominio 1	27	27	82	82	2214	2214	6724
Dominio 2	9	9	82	82	738	738	6724
Dominio 3	3	3	64	64	192	192	4096
Dominio 4	1	1	55	55	55	55	3025

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2: Definición proyección dominios de modelación.

Origen centro Dominio 1 y proyección LCC	
ref_lat	-27.45
ref_lon	-70.3
truelat1	-22.45
truelat2	-32.45
stand_lon	-70.3

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la simulación con el modelo WRF se obtuvo la información de uso de suelos a partir de información satelital de MODIS[1] de la NASA con resolución de 15 segundos de grado, información que fue refinada con Wtools utilizando imágenes satelitales (ver Figura 4.2); e información de elevación de terreno a partir de la información topográfica del SRTM (Misión de Radar Topográfico del Transbordador Espacial de la NASA[2]) con resolución de 3 segundos de grado, es decir 90 metros aproximadamente. Condiciones iniciales y de borde fueron generadas a partir de los "datos operacionales de análisis global"[3] de NCEP[4] con un grado de resolución espacial de 1° y temporal de 6 horas, complementada con información de temperaturas de la superficie del mar obtenidas a partir de archivos en tiempo real de "Sea Surface Temperature" de NCEP con resolución de 1/12 de grado.

Se utilizó prácticamente la misma configuración publicada por el SEA con la única salvedad de que se utilizó Noah Land Surface Model para utilizar información de uso de suelo de mayor resolución. Además se activaron para todos los dominios de la simulación las opciones de "slope_rad" y "topo_shading", las cuales consideran el efecto de la pendiente del terreno en el flujo de la radiación solar superficial y consideran los efectos de sombra que pueden generar las celdas circundantes que posean elevación terreno mayor a la celda considerada, respectivamente.

Las principales parametrizaciones y configuraciones de las opciones físicas del modelo son las siguientes:

a) Se utilizaron 44 niveles verticales ETA.

b) Para la estimación de la capa limite planetaria se utilizó el esquema de eliminación de escala cuasi-normal de la capa limite (QNSE) para los 4 dominios, el cual es un modelo predicción de TKE ("turbulent kinetic energy", energía cinética turbulenta) que utiliza una nueva teoría para zonas establemente estratificadas.

1 https://modis.gsfc.nasa.gov/

2 https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/

3 FNL (Final) Operational Global Analysis data

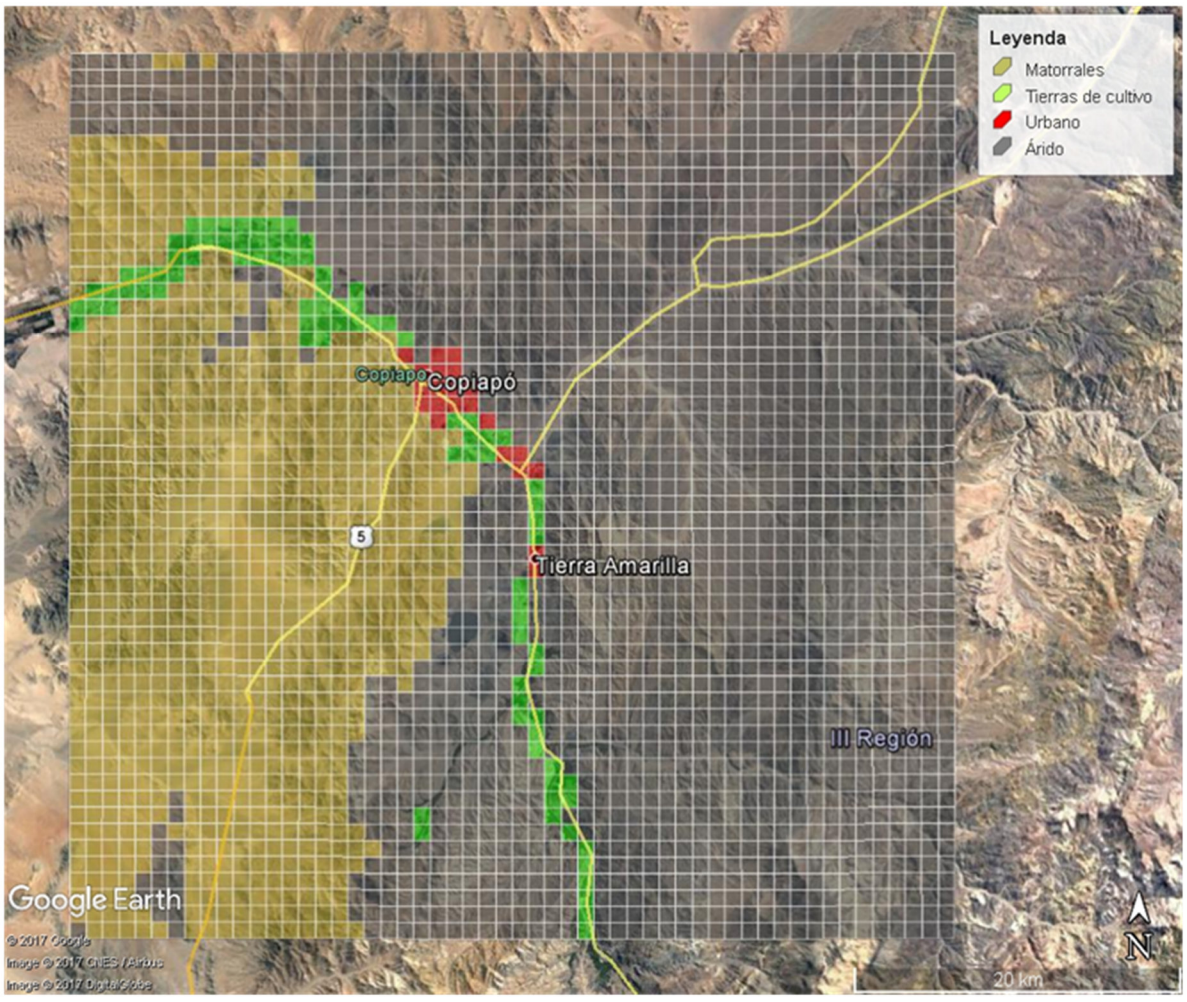
4 U.S. National Center of Environmental Prediction perteneciente a la NOAA

c) Para la estimación de la capa límite superficial se utilizó el esquema de eliminación de escala cuasi-normal de la capa limite (QNSE) desarrollado por Sukoriansky, Galperin y Perov, (Sukoriansky, Galperin et al. 2006).

d) Para la simulación de los intercambios de calor entre superficie y atmosfera se utilizó el "Noah Land Surface Model", opción compatible con la clasificación de uso de suelos utilizada en la información satelital de MODIS de la NASA.

e) Por último para la estimación de formación de nubes se utilizó el esquema convectivo de Betts-Miller-Janjic (Betts and Miller 1986, Janjic 1994)

Figura 4.2: Uso de suelo dominio 4 WRF.



Fuente: Elaboración propia, en base a Google Earth y Wtools.

4.3 Dominio Modelación

El dominio de modelación considerado para el presente Proyecto corresponde a una grilla rectangular de 44 x 44 km, compuesta por celdas de 1 km por lado, la cual tiene la misma proyección utilizada por el modelo WRF y corresponde a un subdominio del dominio 4 modelado con WRF, eliminando 5 celdas por borde, siguiendo la recomendación de la guía de MMIF, el cual es el post-procesador utilizado para extraer datos de WRF a CALPUFF. En la El dominio elegido abarca a lo menos el área de influencia del Proyecto para los distintos componentes ambientales que pueden verse afectados por las emisiones atmosféricas de éste, lo que se corrobora más adelante en las gradientes de concentraciones estimadas por el modelo.

Tabla 4.3 se presentan las características del área correspondiente al dominio de modelación. El dominio elegido abarca a lo menos el área de influencia del Proyecto para los distintos componentes ambientales que pueden verse afectados por las emisiones atmosféricas de éste, lo que se corrobora más adelante en las gradientes de concentraciones estimadas por el modelo.

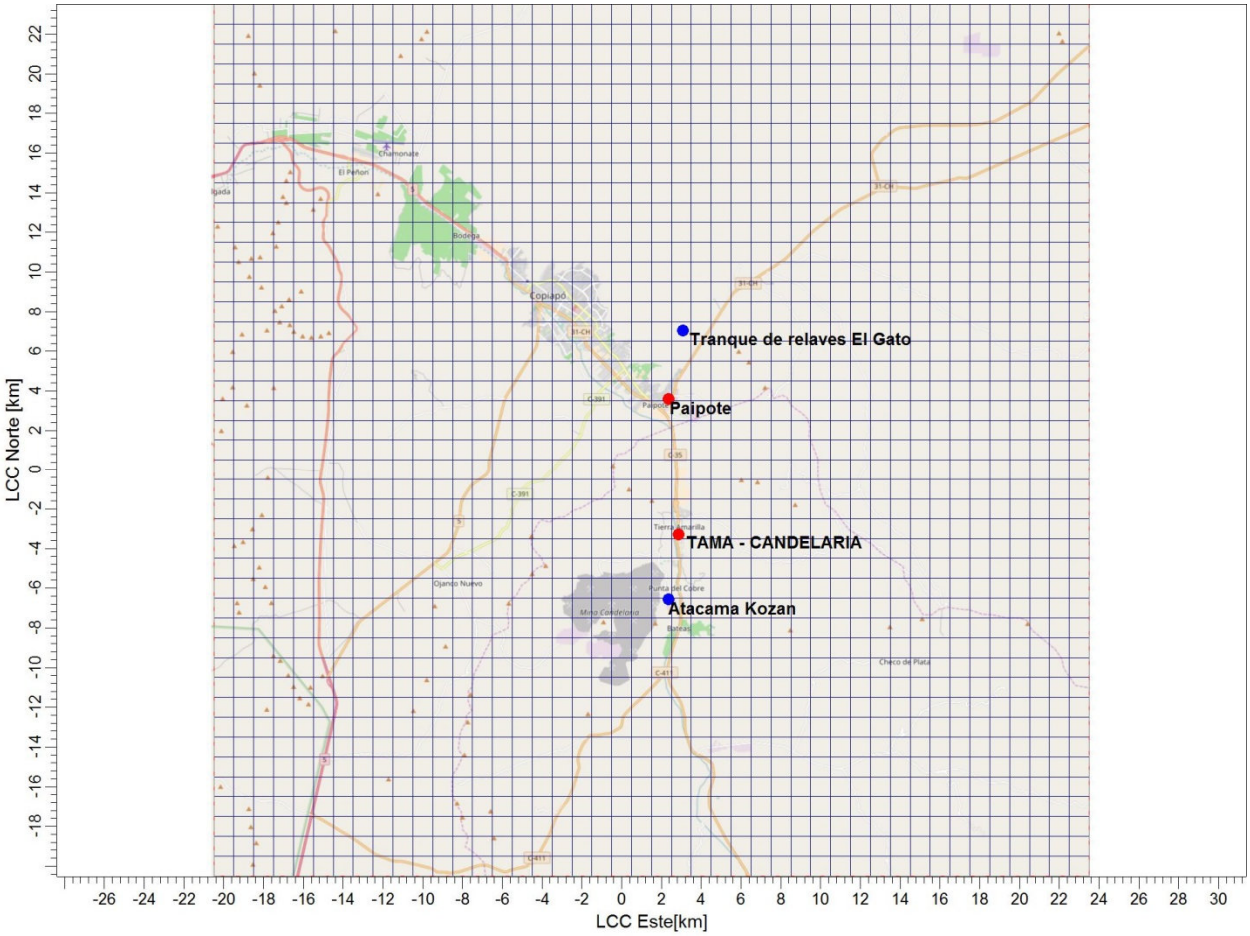
Tabla 4.3: Características del Dominio de Modelación.

Característica	Eje X (km)	Eje Y (km)
Espaciamiento	1	1
Longitud	44	44

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.3, se presenta el dominio de modelación utilizado en CALPUFF, donde se destaca en azul las principales ubicaciones del Proyecto y rojo las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis de incertidumbre del modelo WRF.

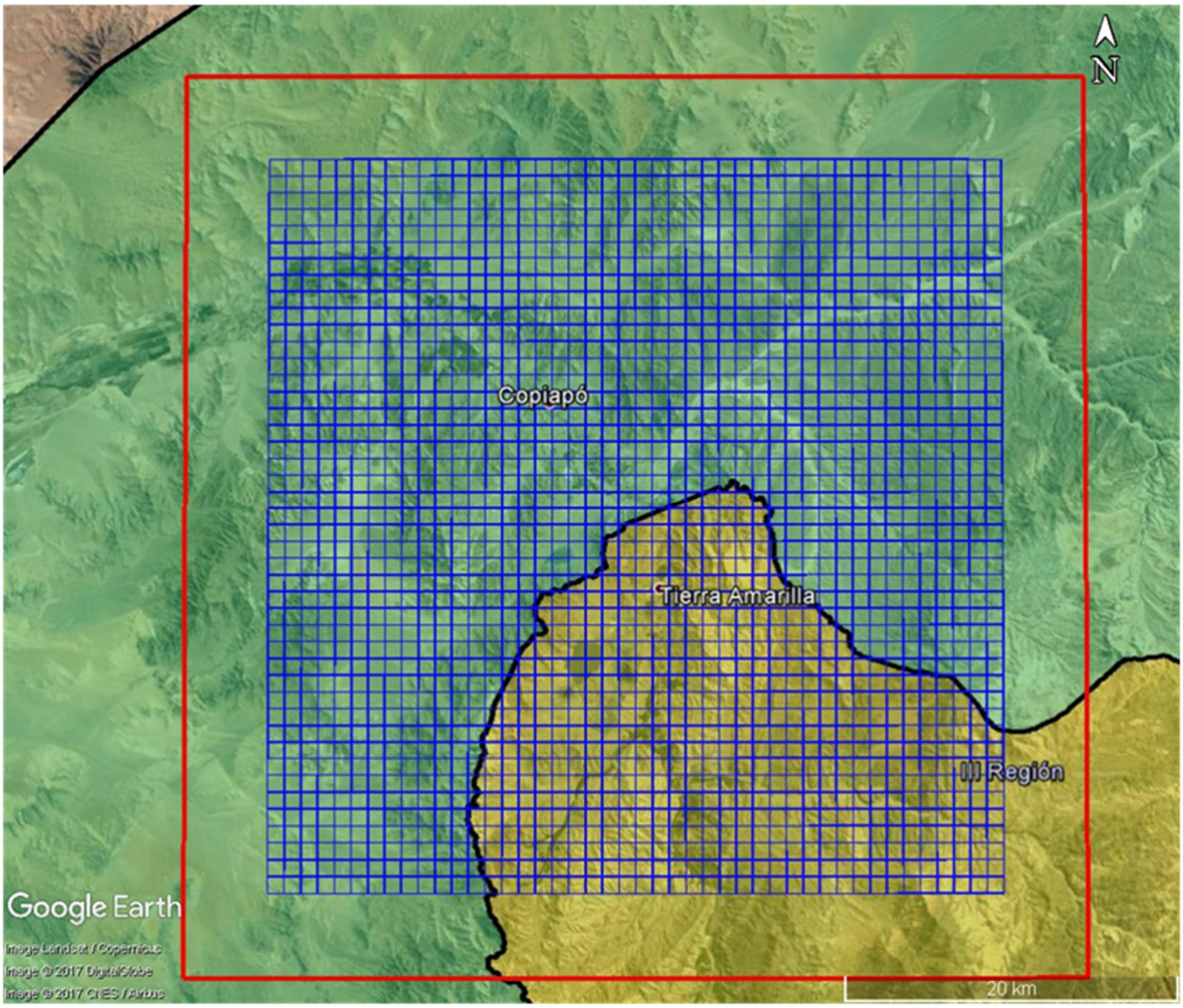
Figura 4.3: Dominio de Modelación del Proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.5 muestra la grilla de modelación utilizada en el modelo CALPUFF respecto al dominio 4 del modelo WRF, el cual se muestra en color rojo. En color verde se muestra la comuna de Copiapo y en amarillo la comuna de Tierra Amarilla. Es posible apreciar que el dominio de modelación abarca fracciones de las comunas de Copiapo y Tierra Amarilla.

Figura 4.4: Dominio de Modelación del Proyecto y límites comunales.



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Topografía y Uso de Suelos

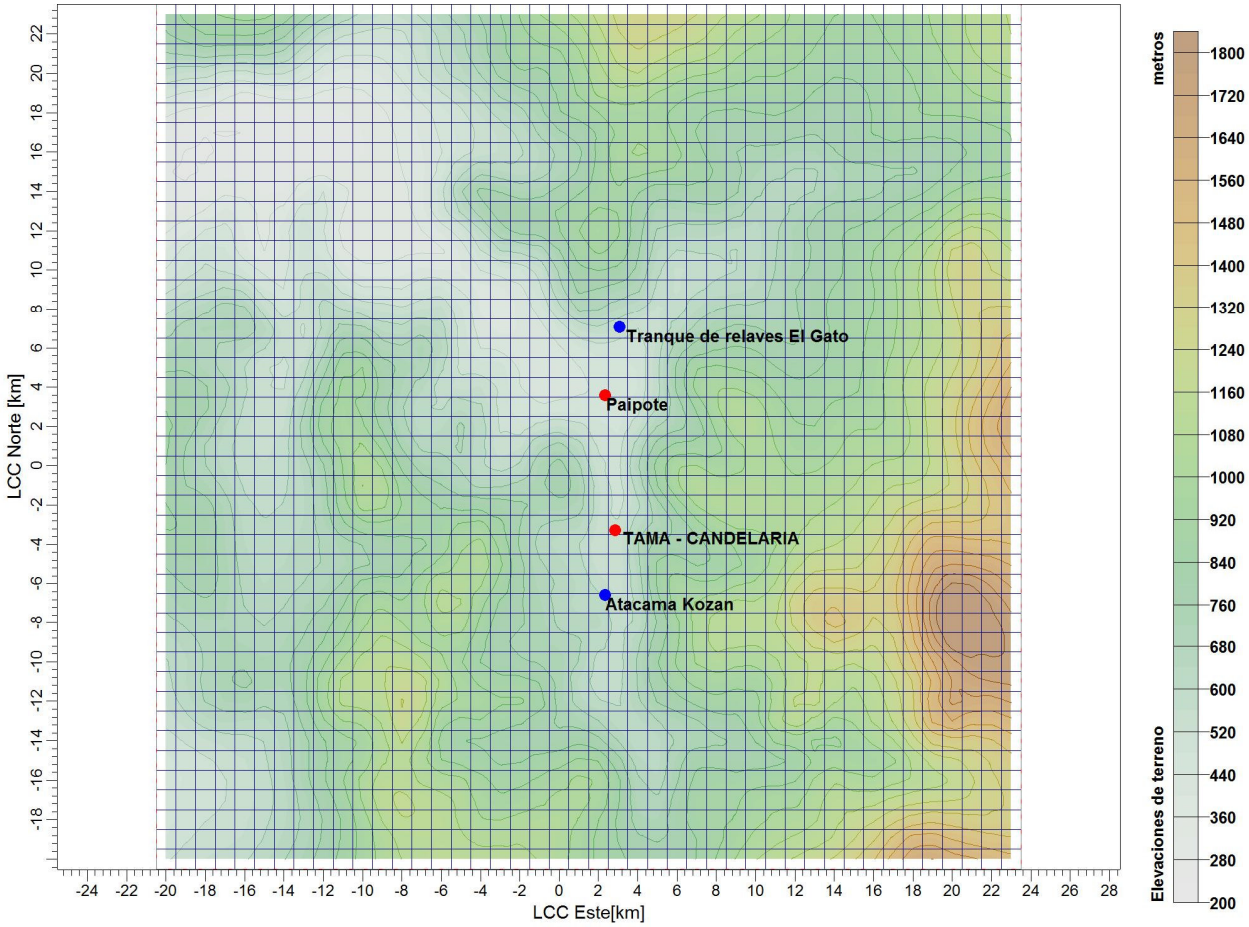
La fuente de información topográfica del dominio de modelación considerado en CALPUFF corresponde a cartas topográficas digitales SRTM3[5] de 90 metros de resolución, las cuales se utilizan el modelo WRF. En CALPUFF se utilizó la información topográfica considerada por el modelo WRF. A continuación, se presenta una imagen de la topografía, que corresponde al SRTM3 interpolado a la resolución de grilla de 1 kilometro que utilizan los modelos WRF y CALPUFF en este caso.

La información relacionada con el uso de suelo, de igual manera que la elevación de terreno, es utilizada directamente del modelo WRF, la cual corresponde a información satelital de MODIS de la NASA con resolución de 15 segundos de arco, la caracterización de uso de suelos para cada celda del dominio 4 de WRF se puede observar en la

A continuación, en la Figura 4.5, se presenta gráficamente la topografía del dominio modelado, indicando la ubicación del Proyecto y las estaciones meteorológicas que se utilizaron en el análisis de incertidumbre del modelo WRF.

5 https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/

Figura 4.5: Topografía del dominio de modelación.



Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por NASA.

4.5 Evaluación del Modelo Meteorológico

Para evaluar el desempeño de la modelación meteorológica utilizada en el modelo, se han analizado estadísticamente los datos medidos en el año 2016 en las estaciones meteorológicas Tierra Amarilla (TAMA), ubicada 3 kilómetros al norte de Atacama Kozan y a la estación Paipote ubicada a 2,5 kilómetros al sur del proyecto. Por tal motivo, para efectos de evaluar el modelo meteorológico se ha procedido a comparar sólo las variables para las cuales se tienen datos medidos y modelados. Para ello se han extraído los resultados del modelo meteorológico para la coordenada (*x,y*) donde se emplazan la estaciones meteorológica, a 10 metros de altura, coincidente con la altura del anemómetro en estas últimas. Las variables consideradas para la evaluación corresponden a: velocidad del viento y dirección del viento. Para cada una, se evaluó el ciclo diario y la serie de tiempo. Es importante tener en cuenta que los datos de la estación monitora corresponden a datos medidos en un punto, mientras que los datos obtenidos del modelo corresponden a datos representativos de una celda de 1 x 1 kilómetros.

Para la evaluación del modelo, además de comparaciones gráficas, se han utilizado distintos estadígrafos, los que se describen a continuación:

- **n** corresponde al número total de pares completos
- **Sesgo:** Corresponde a la diferencia entre el promedio modelado y el promedio observado
- **FAC2:** Predicción fraccionada, o factor de predicciones dentro de un factor de dos de las observaciones

$$0{,}5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2$$

- **Sesgo medio (SM):** Éste representa la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar las condiciones reales, cuantificando así el error sistemático del modelo. Para valores negativos el modelo tiende a subestimar el valor de las variables modeladas, y para valores positivos, el modelo tiende a sobreestimar.

$$SP = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}(M_i - O_i)$$

- **Error absoluto medio (MAE):** Este coeficiente se utiliza para medir el desempeño de modelos y consiste en el promedio de los errores absolutos, este coeficiente ignora punto a punto si el error es una subestimación o sobreestimación del modelo.

$$\text{MAE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\left(M_i - O_i\right)\right|}{n}$$

- **Sesgo medio normalizado (SMN):** Sesgo medio pero normalizado respecto a los valores observados.

$$SMN = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n}(O_i)}$$

- **Error absoluto medio normalizado (NMAE**): Corresponde al MAE pero normalizado respecto a los valores observados.

$$NMAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|\left(M_i - O_i\right)\right|}{O_i}}{n}$$

- **Error Cuadrático Medio (ECM):** Éste entrega la diferencia promedio entre los valores modelados y observados.

$$ECM = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(M_i - O_i)^2}{n}}$$

- **Coeficiente de Correlación (r):** Este coeficiente entrega una medida de la relación lineal entre la variable modelada y la observada. El valor del coeficiente varía en el intervalo [-1,1]. Para el caso de la modelación, entre más cercano a 1, mejor es la capacidad del modelo de representar las condiciones atmosféricas.

$$r = \frac{1}{(1-n)}\sum_{i=1}^{N}\frac{(M_i - \bar{M})}{\sigma_M}\frac{(O_i - \bar{O})}{\sigma_o}$$

- **Índice de concordancia (IOA):** Éste corresponde al índice de concordancia revisado (Willmott et al. 2011). El valor del coeficiente varía en el intervalo [-1,1], donde 1 representa un modelo perfecto, un valor de 0,5 indica que la suma de las magnitudes de error son la mitad de las suma de las magnitudes de las desviaciones observadas, por lo general un IOA mayor que 0,5 indica un modelo con buen desempeño. Un coeficiente con valor de 0,0 indica que la suma de las magnitudes de error son equivalentes a la suma de las magnitudes de las desviaciones observadas y un valor de -0,5 indica que son el doble.

$$IOA = 1{,}0 - \frac{\sum_{i=1}^{n}|M_i - O_i|}{c\sum_{i=1}^{n}|O_i - \bar{O}|} \text{ cuando } \sum_{i=1}^{n}|M_i - O_i| \leq c\sum_{i=1}^{n}|O_i - \bar{O}|$$

$$IOA = \frac{c\sum_{i=1}^{n}|O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^{n}|M_i - O_i|} - 1{,}0 \text{ cuando } \sum_{i=1}^{n}|M_i - O_i| > c\sum_{i=1}^{n}|O_i - \bar{O}|$$

Con c = 2.

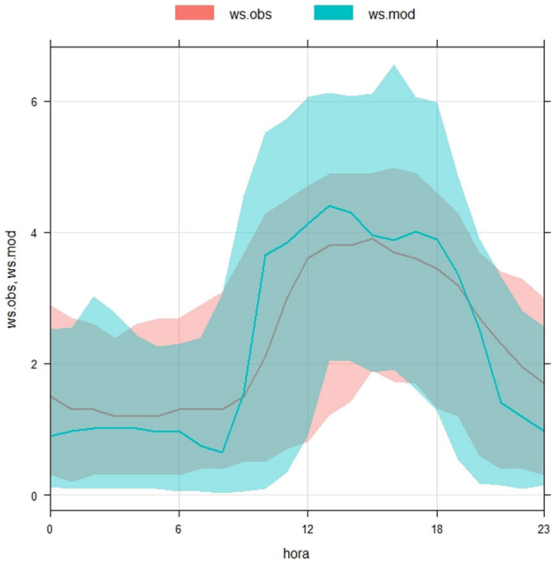
A continuación se presentan los resultados para las variables consideradas.

4.5.1 Velocidad del Viento

Estación Tierra Amarilla

En la Figura 4.6 se presenta el ciclo diario de la mediana de la velocidad del viento horaria modelada y observada junto con los percentiles 5 y 95 de los datos en el punto correspondiente a la estación Tierra Amarilla. En ella, se puede observar la que la velocidad del viento esta levemente sobrestimada por el modelo durante las horas de la mañana y tarde y levemente subestimada durante horas de la noche y madrugada. La amplitud entre los percentiles 5 y 95 de los datos modelados es en general mayor respecto a la amplitud de los datos observados, especialmente en las horas de la mañana y tarde.

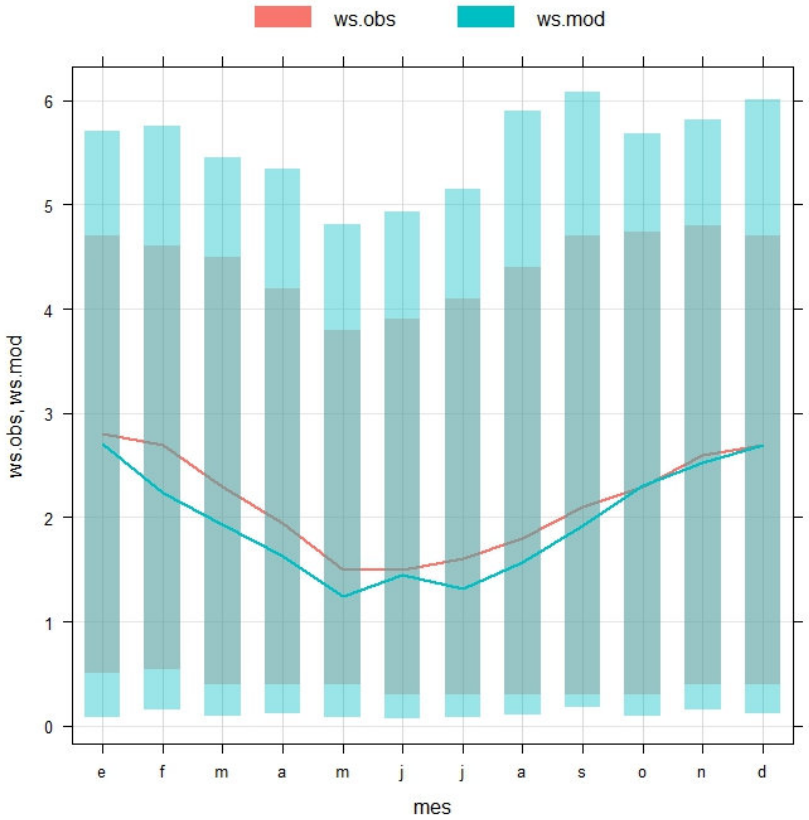
Figura 4.6: Ciclo diario de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Las Tierra Amarilla, año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.7 se presenta el ciclo mensual de la mediana de la velocidad del viento observada y modelada con los percentiles 5 y 95 en la estación Tierra, donde es posible apreciar que el modelo subestima levemente la velocidad del viento en los meses de febrero a mayo y de julio a septiembre, y además que la amplitud o dispersión entre los percentiles 5 y 95 de los datos modelados es mayor respecto a la amplitud de los datos observados. Tanto los datos observados como los modelados muestran una clara estacionalidad en la velocidad de los vientos.

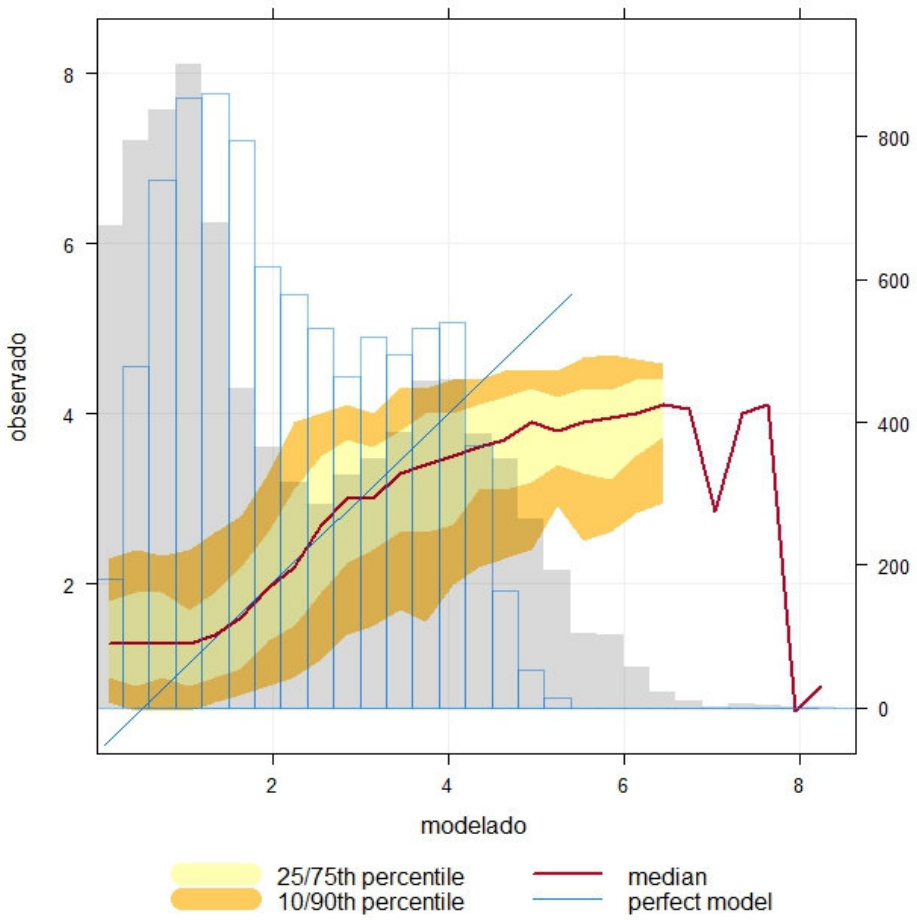
**Figura 4.7: Ciclo mensual de la velocidad del viento modelada y observada.
Estación Tierra Amarilla, año 2016.**



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.8 es posible apreciar que el modelo presenta mayor frecuencia de vientos de baja magnitud y de alta magnitud que los datos medidos en estación Tierra Amarilla, pero presenta menor frecuencia de velocidades medias, entre los 1,6 m/s y 4 m/s, que los datos medidos. Respecto a la concordancia de los datos modelados y observados, se puede ver que según la mediana el modelo presenta muy buena correlación para vientos de magnitud media, es decir entre unos 1 y 4 m/s, pero subestima vientos de baja magnitud y sobrestima vientos de alta magnitud, lo que concuerda con las frecuencias comentadas anteriormente.

Figura 4.8: Cuantiles condicionales e histograma de velocidad del viento observada y modelada, estación Tierra Amarilla, año 2016.

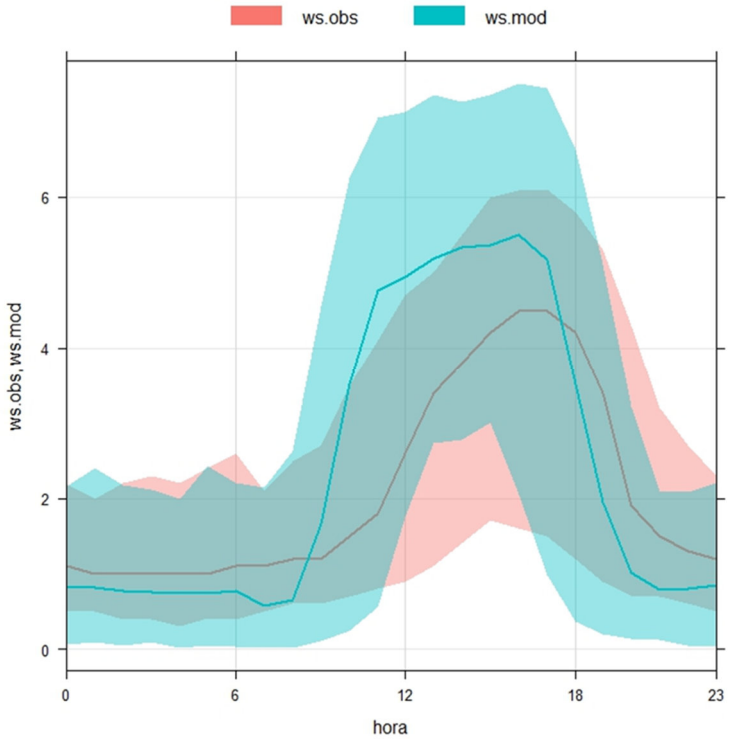


Fuente: Elaboración propia.

Estación Paipote

En la Figura 4.9 se presenta el ciclo diario de la mediana de la velocidad del viento horaria modelada y observada junto con los percentiles 5 y 95 de los datos en el punto correspondiente a la estación Paipote. En ella, se puede observar la que la velocidad del viento esta sobrestimada por el modelo de mayor manera que en la estación Tierra Amarilla durante horas de la mañana y tarde, pero la subestimación de velocidades del viento durante horas de la madrugada y noche respecto a los datos observados es menor en comparación con la situación en estación Tierra Amarilla.

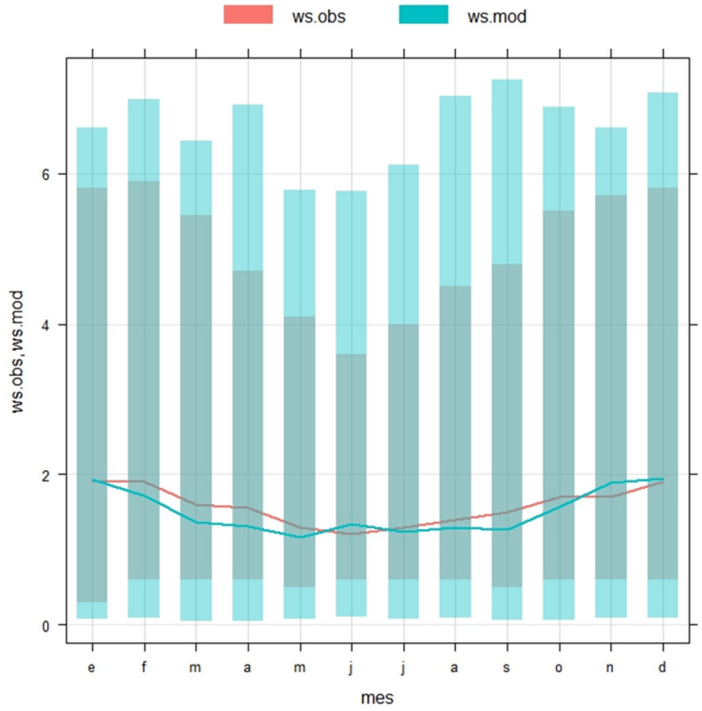
Figura 4.9: Ciclo diario de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Paipote, año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.10 se presenta el ciclo mensual de la mediana de la velocidad del viento observada y modelada con los percentiles 5 y 95 en la estación Paipote, donde se puede apreciar que tanto los datos observados como modelados de la velocidad del viento presentan una clara estacionalidad, pero ésta es menos pronunciada que la que se presenta para el caso de la estación Tierra Amarilla. El modelo muestra una muy buena correlación y un sesgo pequeño entre las medianas mensuales respecto a los datos observados, pero el modelo tiende a sobreestimar las horas con mayores velocidades de vientos respecto a los datos observados.

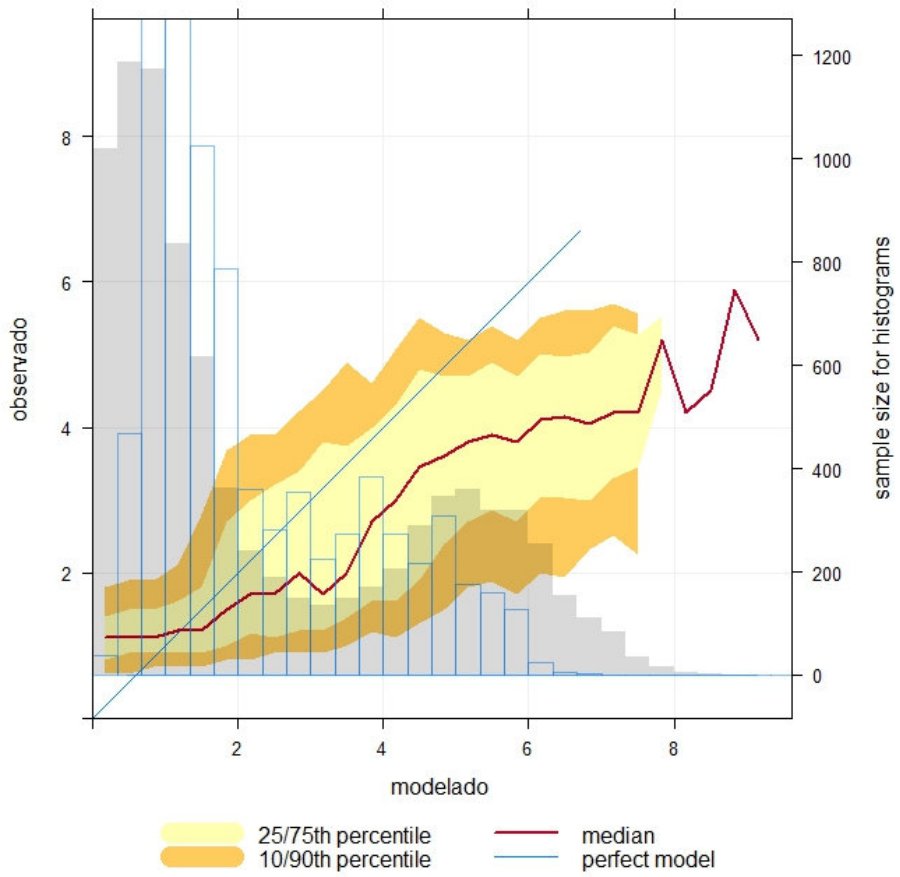
Figura 4.10: Ciclo mensual de la velocidad del viento modelada y observada. Estación Paipote, noviembre 2014 a octubre 2015.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.11 es posible apreciar que el modelo presenta mayor frecuencia de vientos de muy baja magnitud (menores a 0,8 m/s) que los datos medidos y mayor frecuencia de vientos de alta magnitud (magnitudes mayores a 4,4 m/s) que los datos medidos en estación Paipote. Al comparar la mediana de datos observados y modelados, línea roja, respecto al escenario de modelo perfecto, línea celeste, es posible observar que el modelo sobreestima las velocidades de vientos para vientos observados con magnitudes mayores a 2 m/s.

Figura 4.11: Cuantiles condicionales velocidad del viento observada y modelada, estación Paipote, año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4.4 muestra los promedios y máximos de la velocidad del viento en conjunto con el porcentaje de calmas, observado y modelado para ambas estaciones. Como ya se mencionó anteriormente, el viento es sobrestimado por el modelo en ambas estaciones, presentando una sobreestimación marginal, casi nula, en estación Tierra Amarilla y una sobreestimación leve en Paipote. Para ambas estaciones se puede observar que el modelo sobreestima las horas de calmas, lo que conlleva una sobreestimación en la concentraciones de contaminantes estimados por el modelo de dispersión CALPUFF durante horas de la noche.

Tabla 4.4: Estadígrafos velocidad del viento, estaciones Tierra Amarilla y Paipote. Año 2016.

	Observado		Modelado	
Variable	**T. Amarilla**	**Paipote**	**T. Amarilla**	**Paipote**
Promedio (m/s)	2,28	2,12	2,31	2,41
Máximo (m/s)	5,40	6,70	8,23	9,16
Porcentaje de calmas	5,3%	2,8%	13,1%	18,5%

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos para distintos estadígrafos de desempeño del modelo WRF en las estaciones Tierra Amarilla y Paipote para la velocidad del viento.

Tabla 4.5: Estadígrafos de desempeño velocidad del viento, estaciones Tierra Amarilla y Paipote. Año 2016.

Estación	n	Sesgo	FAC2	SM	MAE	SMN	NMAE	ECM	r	IOA
Tierra Amarilla	8778	0,03	0,70	0,03	0,91	1,2%	40,0%	1,18	0,71	0,58
Paipote	8734	0,29	0,62	0,29	1,11	13,7%	52,6%	1,51	0,73	0,54

Fuente: Elaboración propia.

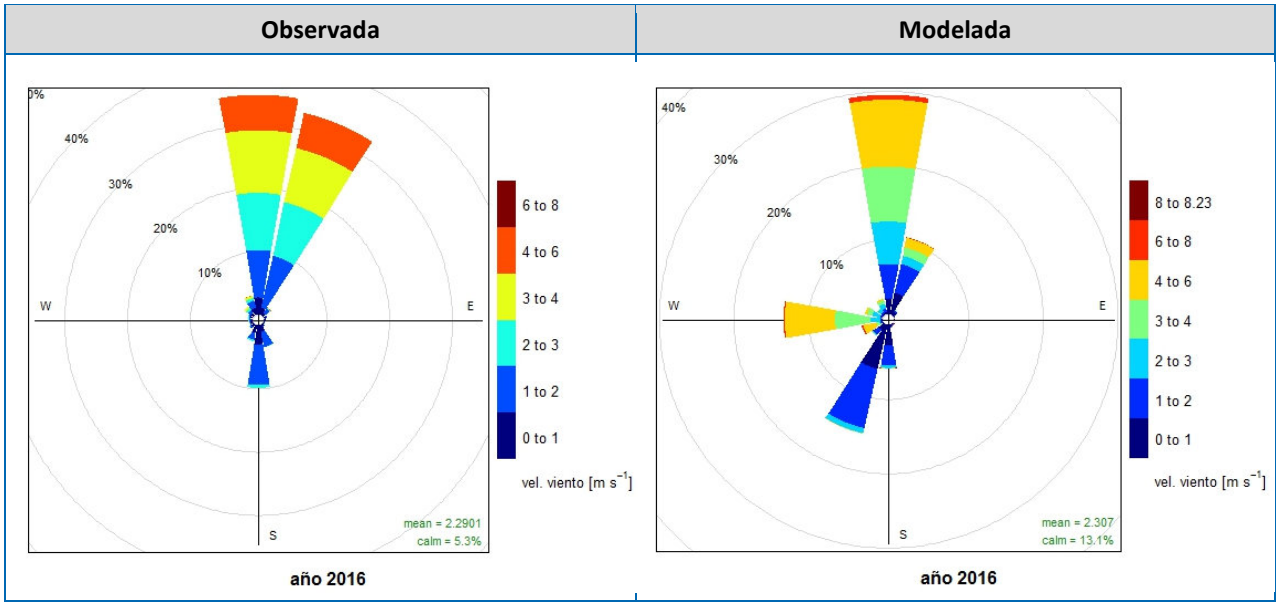
Los resultados de la tabla anterior indican que para ambas estaciones, el modelo tiende a sobrestimar levemente los valores de velocidad del viento, sobreestimación que para el caso de Tierra Amarilla es marginal, muy cercana a 0. Es posible apreciar que para todos los estadígrafos, la estación Tierra Amarilla presenta mejor precisión en la estimación de la velocidad que la estación Paipote, con la única excepción del índice de correlación r, donde Paipote muestra mejor concordancia. Según el índice de concordancia (IOA), el modelo presenta un mejor desempeño en la estación Tierra Amarilla, con un valor cercano a 0,6, lo que implica un nivel de desempeño alto del modelo, si bien el desempeño del modelo en Paipote, según el IOA, es menor, este sigue siendo mayor a 0,5, lo que indica un buen desempeño. Debido al alto IOA y a los bajos valores de sesgo de las velocidades del viento modelada versus los datos observados, en conjunto con el hecho de que el modelo sobreestima las situaciones de calma en ambas estaciones, lo que conlleva a que el modelo de dispersión CALPUFF sobreestime las concentraciones de contaminantes estimados durante horas de la noche, no se considera necesario utilizar un factor de corrección para la velocidad del viento.

4.5.2 Dirección del Viento

Estación Tierra Amarilla

En la Figura 4.12 se presenta la rosa de los vientos correspondiente a los valores de dirección del viento modelada y observada en el punto correspondiente a la estación Tierra Amarilla. Es posible observar que el modelo es capaz de obtener las principales componentes de la dirección del viento norte (N) y nor-noreste (NNE), pero con cierta rotación hacia el oeste (O). El modelo sobrestima las frecuencias del componente sur (S) y sur-suroeste (SSO) de la estación Tierra Amarilla y además estima direcciones de vientos oeste (O) las cuales no se observan en los datos medidos.

Figura 4.12: Rosa de los vientos modelada y observada.
Estación Tierra Amarilla. Año 2016.

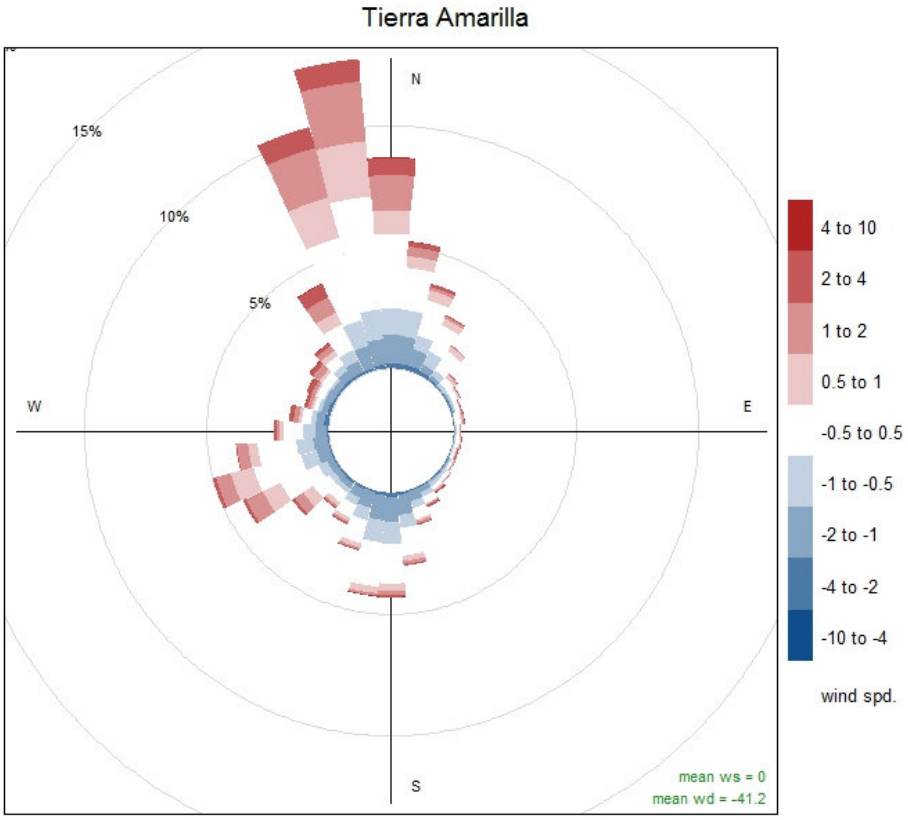


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.13 se presenta un gráfico polar que indica la frecuencia de datos para la desviación del viento modelado en grados respecto a la dirección del viento observado, es decir para las 8760 horas del año se obtiene la diferencia (o delta) entre el viento modelado y observado, además en tonos de rojo se indica frecuencia de datos con magnitudes de viento sobreestimadas respecto a lo observado y en tonos de azul frecuencia de datos con magnitudes de viento subestimadas respecto a lo observado. A modo de explicación, un modelo con direcciones de viento que coincidieran perfectamente con lo observado presentaría un solo componente norte (0°) con una frecuencia del 100 % en el gráfico polar expuesto.

El gráfico muestra una mayor cantidad de frecuencia de datos en tonos burdeos pero una gran frecuencia de datos en color blanco, lo que indica en promedio una sobrestimación muy leve de velocidades de viento modeladas, el delta promedio de la velocidad del viento modelada es de un 0,03 m/s, por esta razón en la imagen aparece como 0. Respecto a las direcciones de viento se puede ver que la mayoría de los datos no presentan desviaciones en la dirección de viento mayores a los 45 grados respecto a los datos observados. Sin embargo, es posible observar cierta frecuencia de desviaciones en 90 - 110 grados en contra de los punteros del reloj, esto asociado a un componente oeste que estima el modelo en horas de la tarde, componente que no se observa en los datos medidos

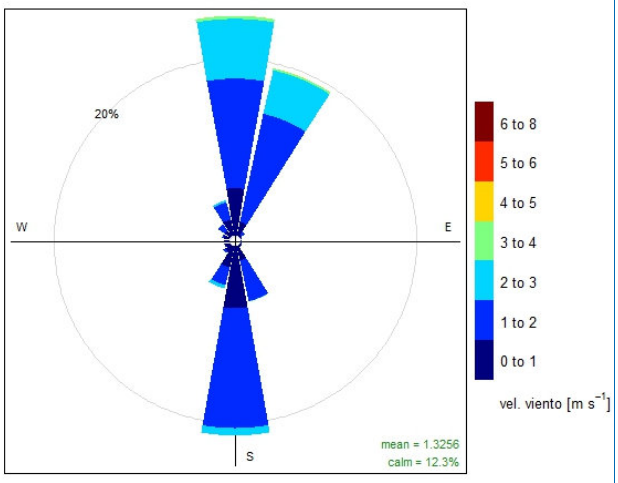
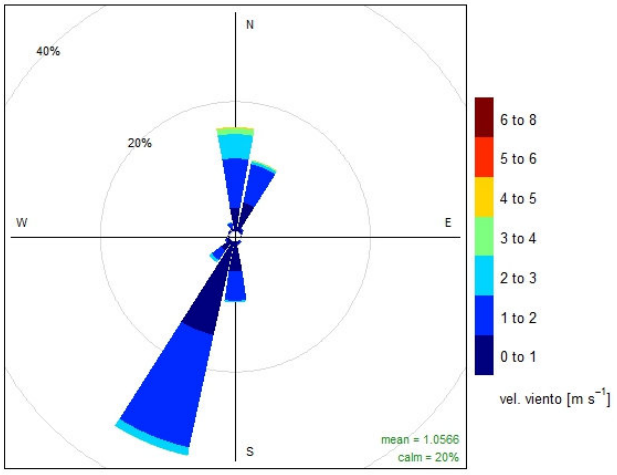
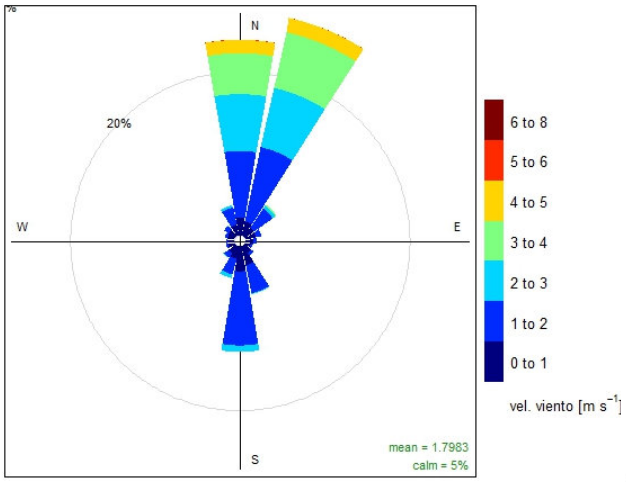
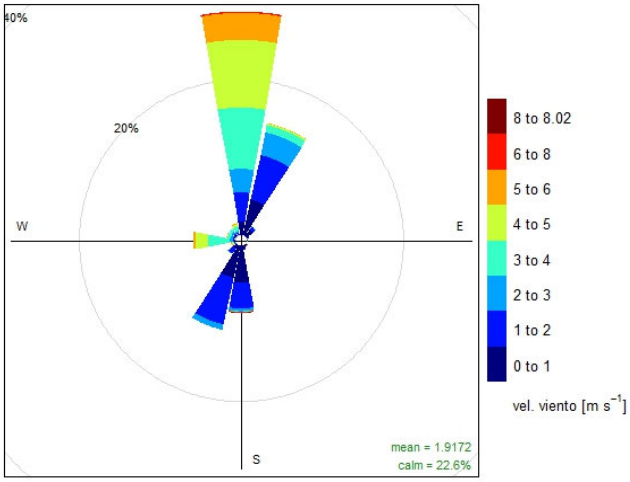
Figura 4.13: Gráfico polar con frecuencia de desviación entre direcciones de viento modeladas y observadas por intervalos de diferencia en magnitud de velocidad del viento. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.

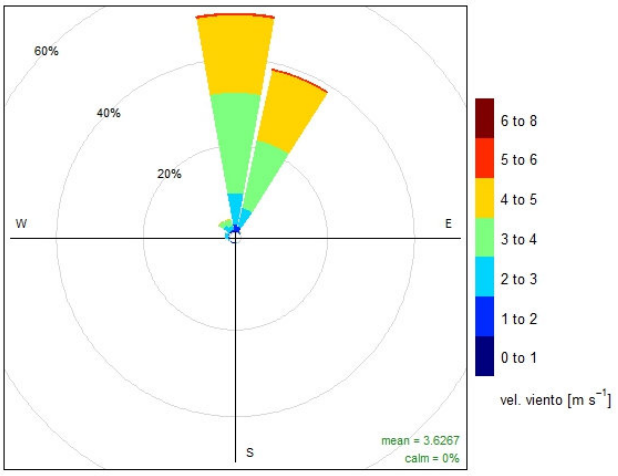
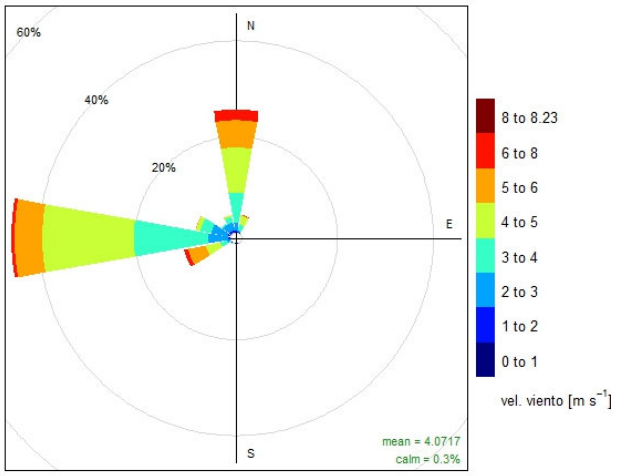
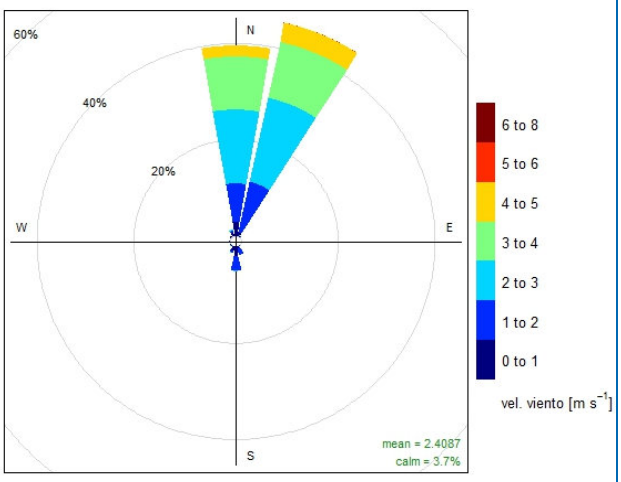
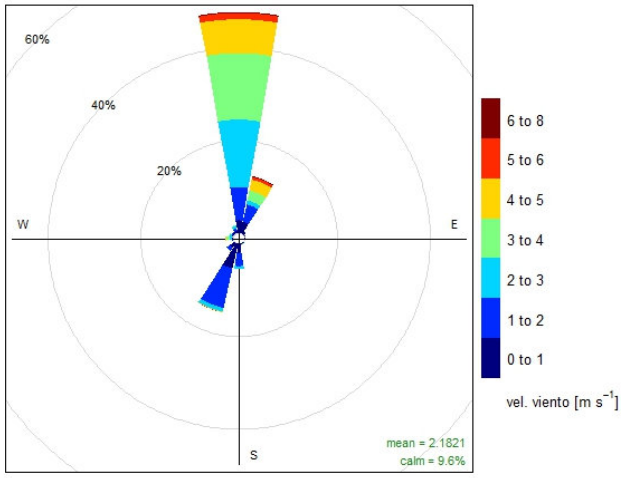


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.14 se muestra la comparación de rosas de los vientos con datos medidos y modelados en la estación Tierra Amarilla para 4 periodos de 6 horas del día, es posible apreciar que el modelo representa muy bien las frecuencias medidas para los periodos que van de las 06:00 a las 11:00 horas y de las 18:00 a las 23:00 horas. Para los otros dos periodos, para las horas de la madrugada, periodo de las 00:00 a las 05:00 horas el modelo subestima la componente de vientos norte (N) y sobreestima el viento sur (S) con dirección a Tierra Amarilla, para el periodo de las 12:00 a las 17:00 horas el modelo estima viento oeste (O) el cual no se registra en los datos medidos.

Figura 4.14: Rosa de los vientos modelada y observada por hora del día.
Estación Tierra Amarilla. Año 2016.

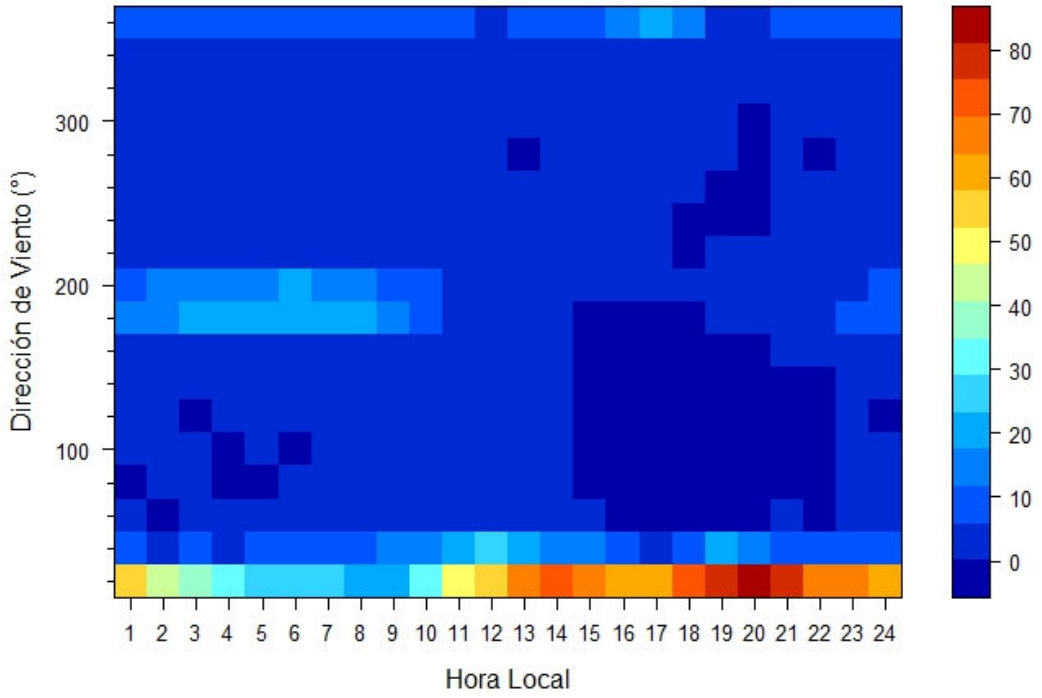
Observada	Modelada
	
00:00 a 05:00 horas	**00:00 a 05:00 horas**
	
06:00 a 11:00 horas	**06:00 a 11:00 horas**

Observada	Modelada
 12:00 a 17:00 horas	 12:00 a 17:00 horas
 18:00 a 23:00 horas	 18:00 a 23:00 horas

Fuente: Elaboración propia.

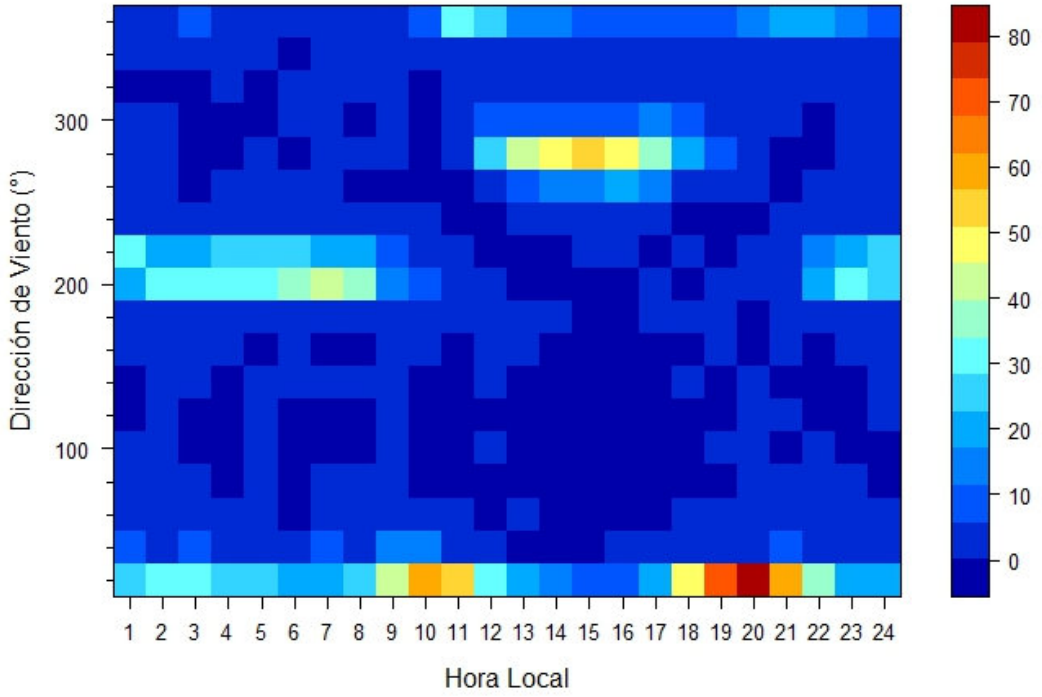
La Figura 4.15 y la Figura 4.16 muestran las frecuencias de vientos observadas y modeladas para distintas horas del día, donde es posible observar una leve sobreestimación del viento sur (S) durante horas de la madrugada y una marcada sobreestimación de viento oeste (O) entre las 12:00 y 17:00 horas.

Figura 4.15: Ciclo diario de la dirección del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

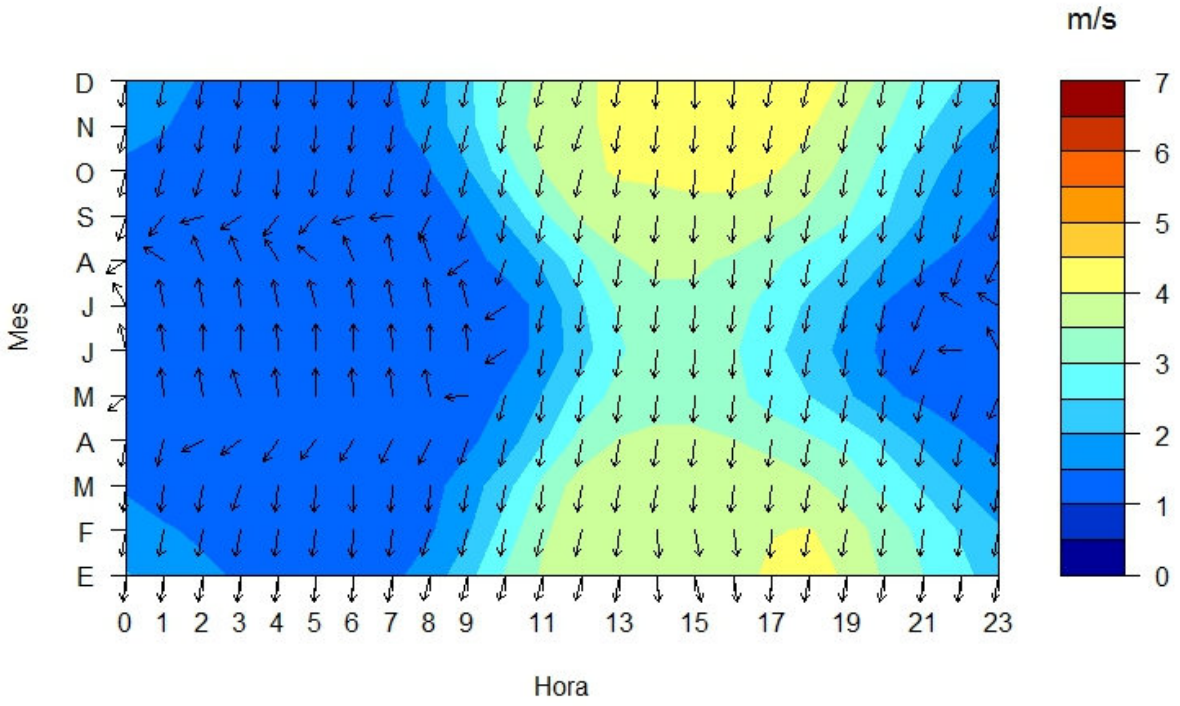
Figura 4.16: Ciclo diario de la dirección del viento modelada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

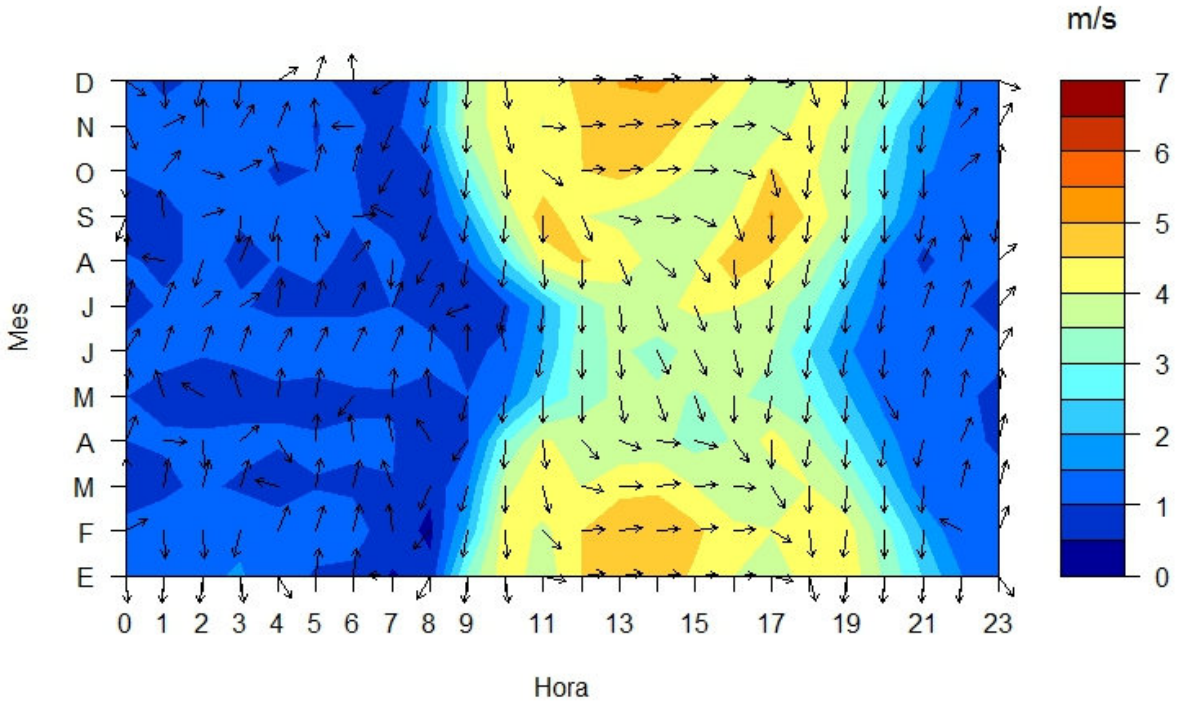
La Figura 4.17 y la Figura 4.18 muestran que tanto la velocidad del viento observada y modelada presentan máximos durante horas de la tarde, los cuales son más acentuados durante los meses de verano, es posible ver que el modelo representa muy bien los ciclos diarios según mes del año pero sobreestima levemente la velocidad del viento durante horas del mediodía y tarde en los meses de verano. Los vectores promedio muestran que los componentes oeste (O) estimados por el modelo, los cuales no se observan en los datos medidos, aparecen durante los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo entre las 11:00 y 17:00 horas.

Figura 4.17: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.18: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento modelada. Estación Tierra Amarilla. Año 2016.

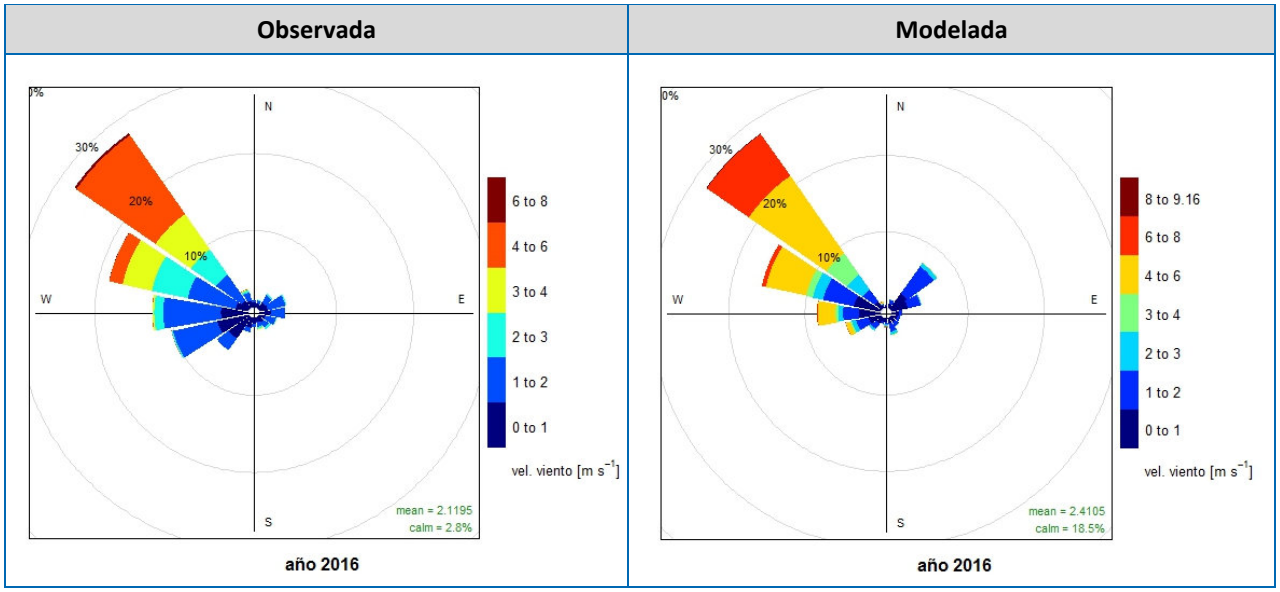


Fuente: Elaboración propia.

Estación Paipote

En la Figura 4.19 se muestran las rosas de viento correspondientes a los valores de dirección del viento modelada y observada en el punto donde se ubica la estación Paipote. Es posible observar que la distribución de las frecuencias de las direcciones de vientos observadas y modeladas es de gran similitud.

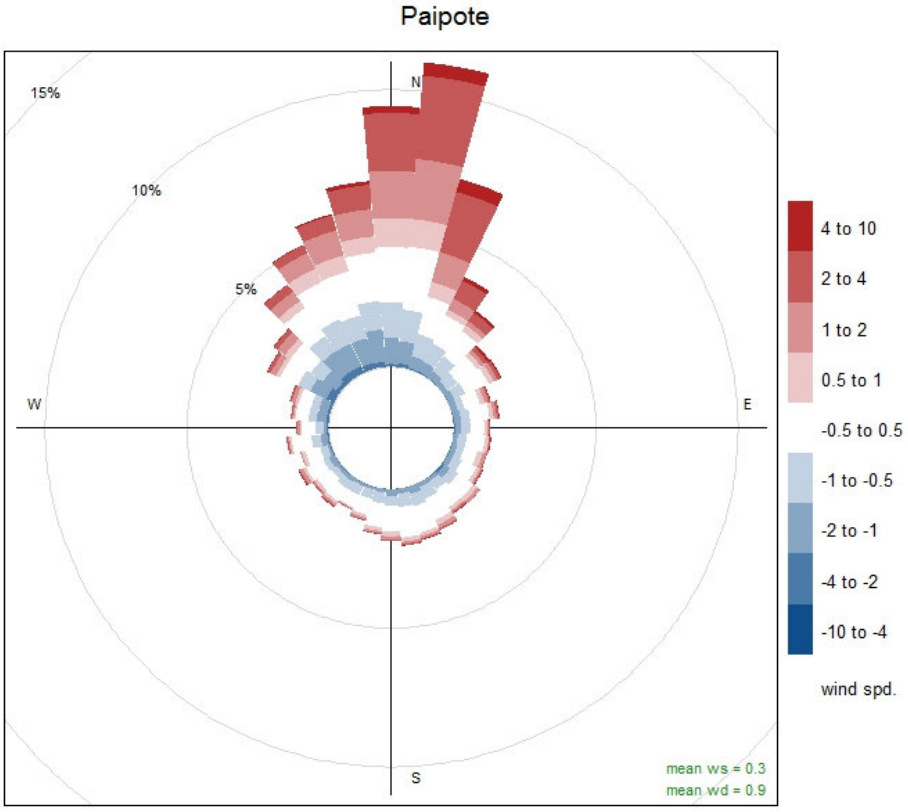
Figura 4.19: Rosa de los vientos modelada y observada.
Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.20 se presenta un gráfico polar que indica la frecuencia de datos para la desviación del viento modelado en grados respecto a la dirección del viento observado. El gráfico muestra de manera predominante los tonos burdeos, lo que concuerda con una sobrestimación promedio de velocidad el viento de 0,3 m/s. Respecto a las direcciones de viento se puede ver que la gran mayoría de los datos no presentan desviaciones en la dirección de viento mayores a los 45 grados respecto a los datos observados, más del 60 % de los datos aproximadamente. Se puede apreciar que en promedio el viento modelado presenta una insignificante rotación en 0,9 grados en el sentido de las agujas del reloj.

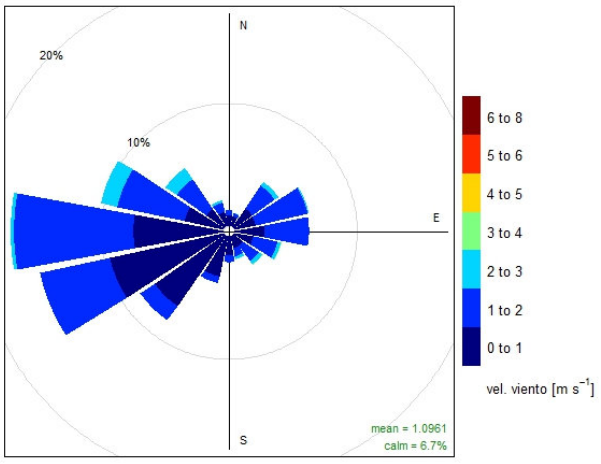
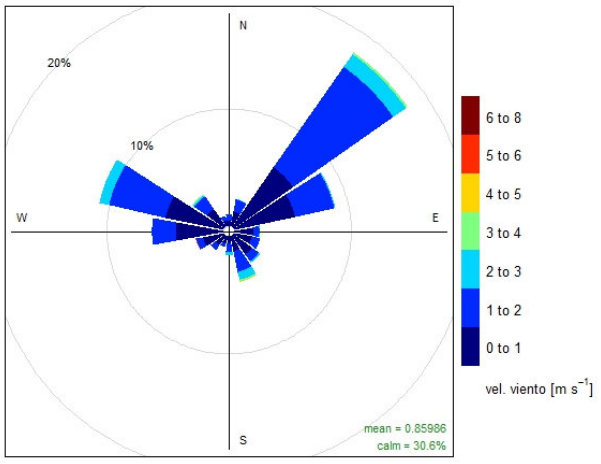
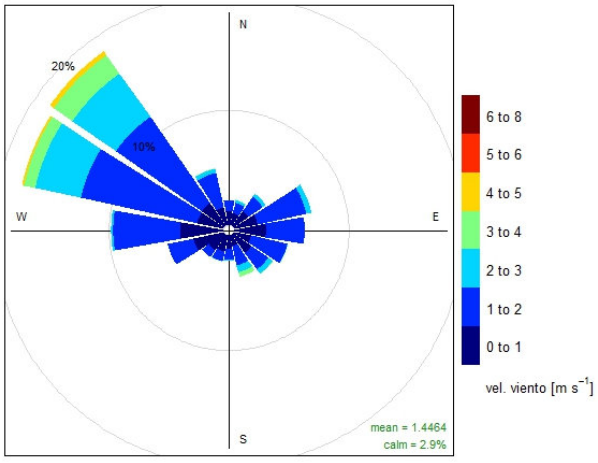
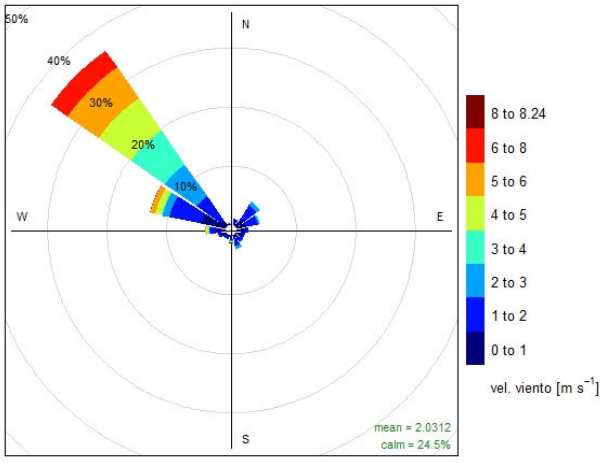
Figura 4.20: Gráfico polar con frecuencia de desviación entre direcciones de viento modeladas y observadas por intervalos de diferencia en magnitud de velocidad del viento. Estación Paipote. Año 2016.

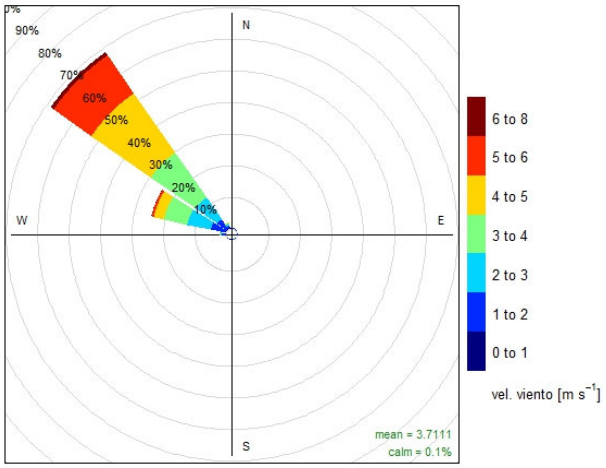
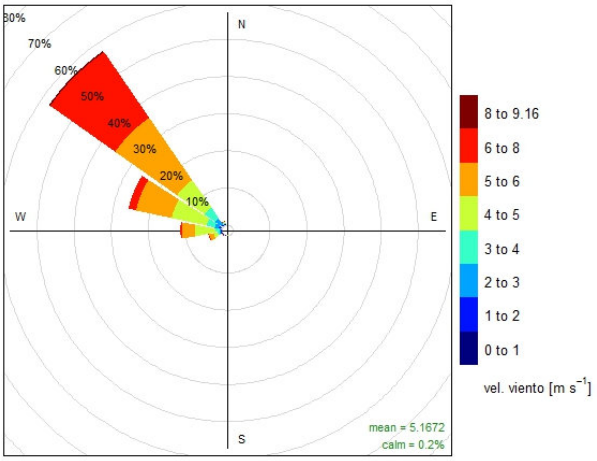
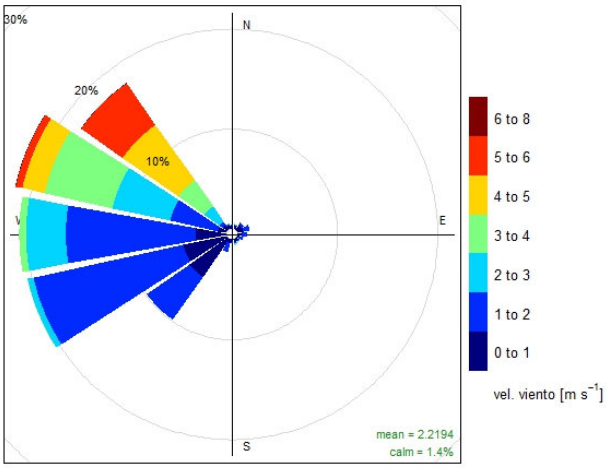
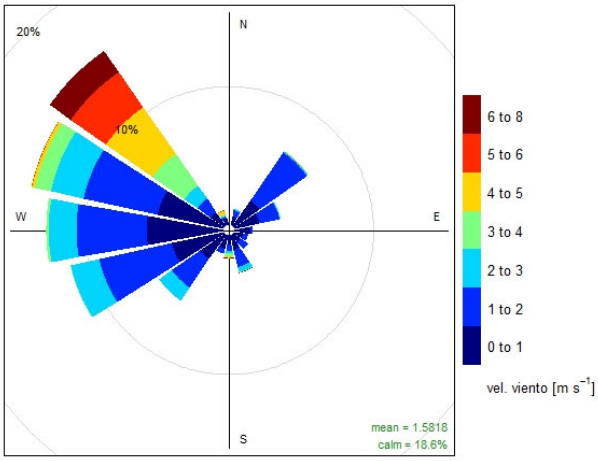


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.21 se muestra la comparación de rosas de los vientos con datos medidos y modelados en la estación Paipote para 4 periodos de 6 horas del día, es posible apreciar que el modelo representa muy bien las frecuencias medidas para los tres de los cuatro periodos, con la única excepción, del periodo que va desde las 00:00 a las 05:00 horas, donde el modelo sobreestima la componente de vientos noreste (NE), viento con dirección a Paipote respecto a la ubicación del tranque de relaves El Gato.

Figura 4.21: Rosa de los vientos modelada y observada por hora del día.
Paipote. Año 2016.

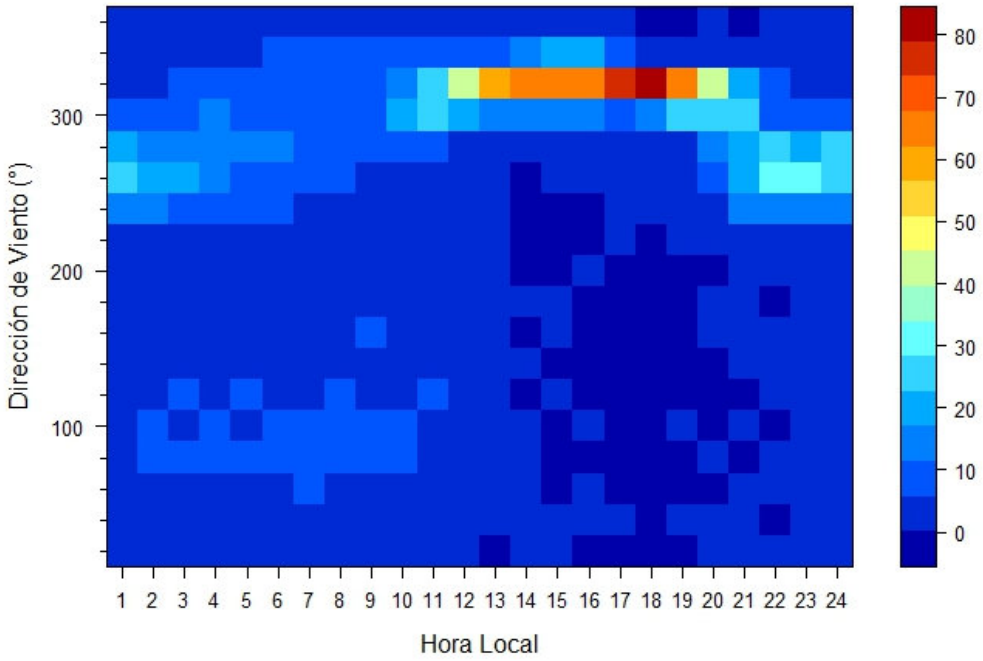
Observada	Modelada
 00:00 a 05:00 horas	 00:00 a 05:00 horas
 06:00 a 11:00 horas	 06:00 a 11:00 horas

Observada	Modelada
	
12:00 a 17:00 horas	**12:00 a 17:00 horas**
	
18:00 a 23:00 horas	**18:00 a 23:00 horas**

Fuente: Elaboración propia.

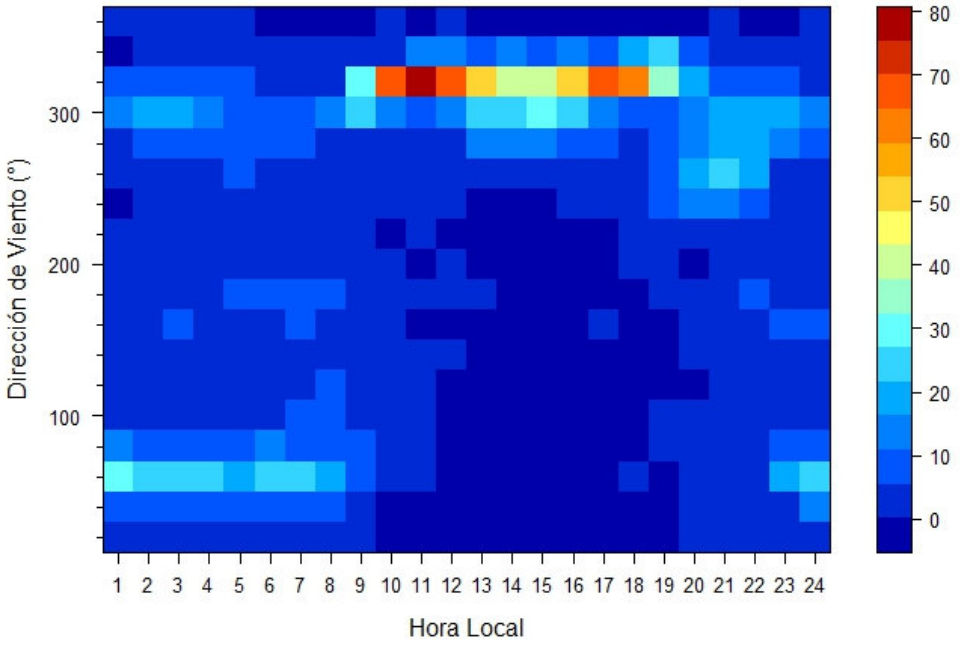
En las figuras 4.22 y 4.23 es posible apreciar una muy buena correlación de ciclos diarios de la frecuencia de direcciones del viento entre los datos observados y modelados, esto con la excepción en las sobreestimación de vientos con componente noreste (NE) entre las 23:00 y las 07:00 horas.

Figura 4.22: Ciclo diario de la dirección del viento observada. Estación Paipote. Estación Independencia. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

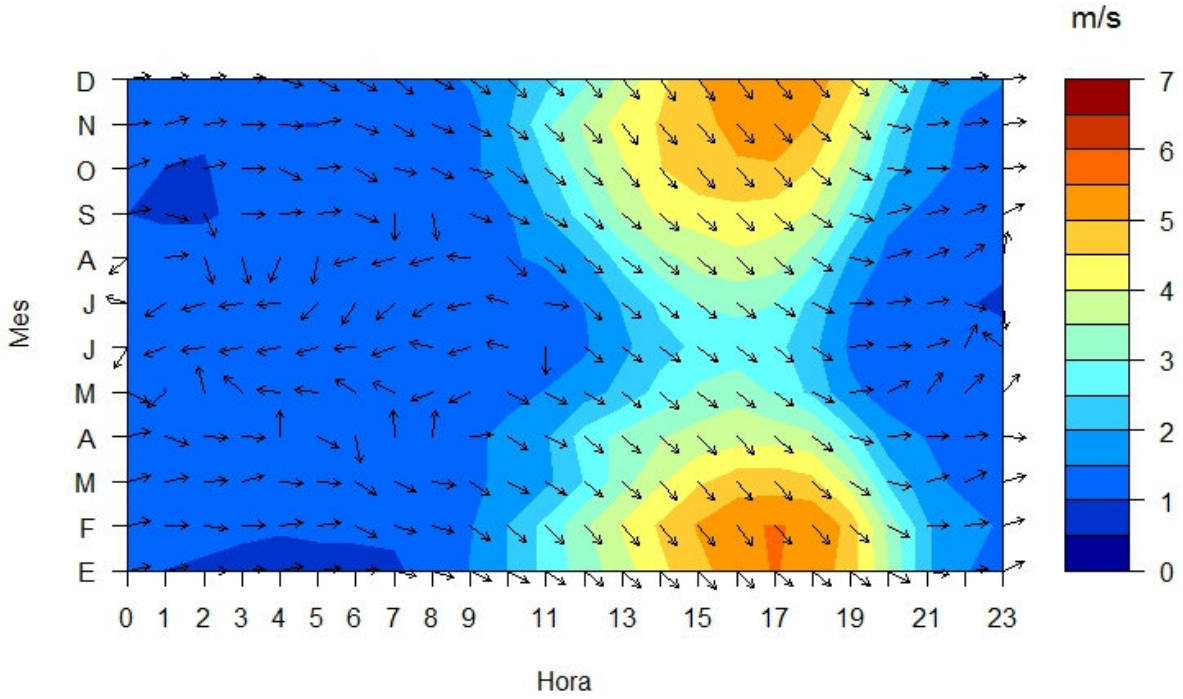
Figura 4.23: Ciclo diario de la dirección del viento modelada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

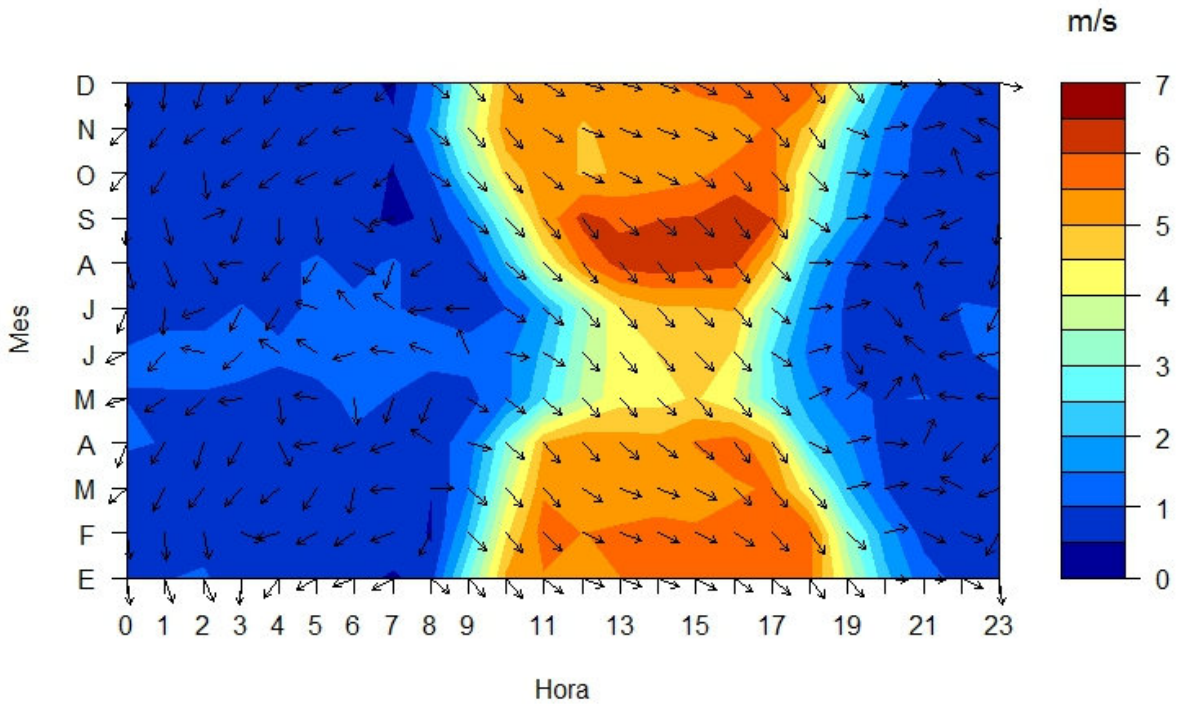
La Figura 4.24 y la Figura 4.25 muestran que tanto la velocidad del viento observada y modelada presentan máximos durante horas de la tarde, los cuales son más acentuados durante los meses de verano, es posible apreciar que la velocidad del viento es sobrestimada por el modelo de mayor manera durante las horas del mediodía y de la tarde y especialmente durante los meses de agosto y septiempre. El ciclo diario muestra vectores promedio de viento similares para la mayoría de las horas, para todos los meses del año entre los datos observados y modelados.

Figura 4.24: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.25: Ciclo estacional de la dirección y velocidad del viento observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

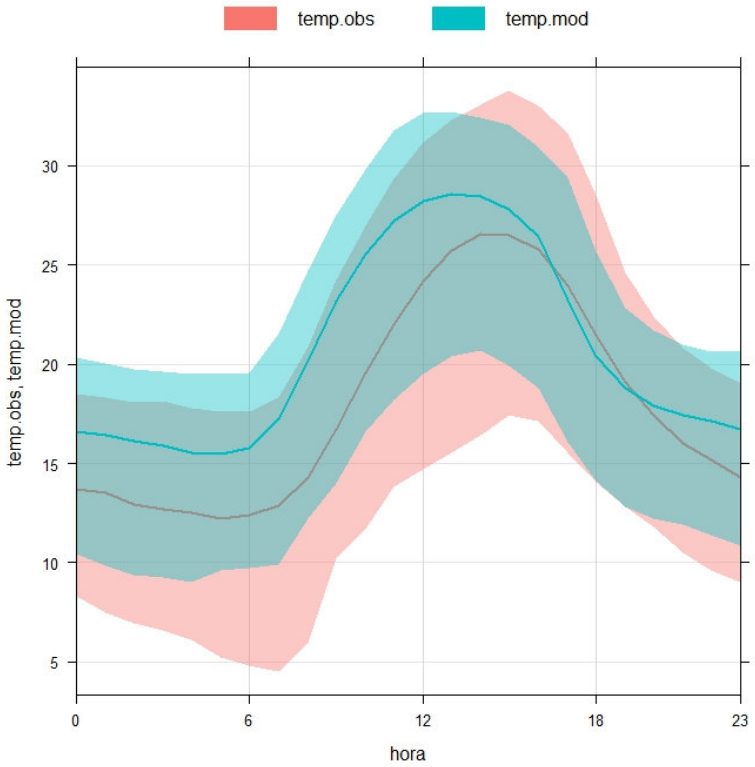
4.5.3 Temperatura

A continuación se analizan los ciclos diarios y mensuales de la temperatura observada y modelada en la estación Tierra Amarilla.

Estación Tierra Amarilla

En la Figura 4.26 se presenta el ciclo diario de las medianas de la temperatura horaria modelada y observada junto con los percentiles 5 y 95 de los datos en el punto correspondiente a la estación Tierra Amarilla. En ella, se puede observar que las magnitudes de la temperatura están sobrestimadas por el modelo durante gran parte del día y muy cercanas a lo observado entre las 16:00 y 20:00 horas

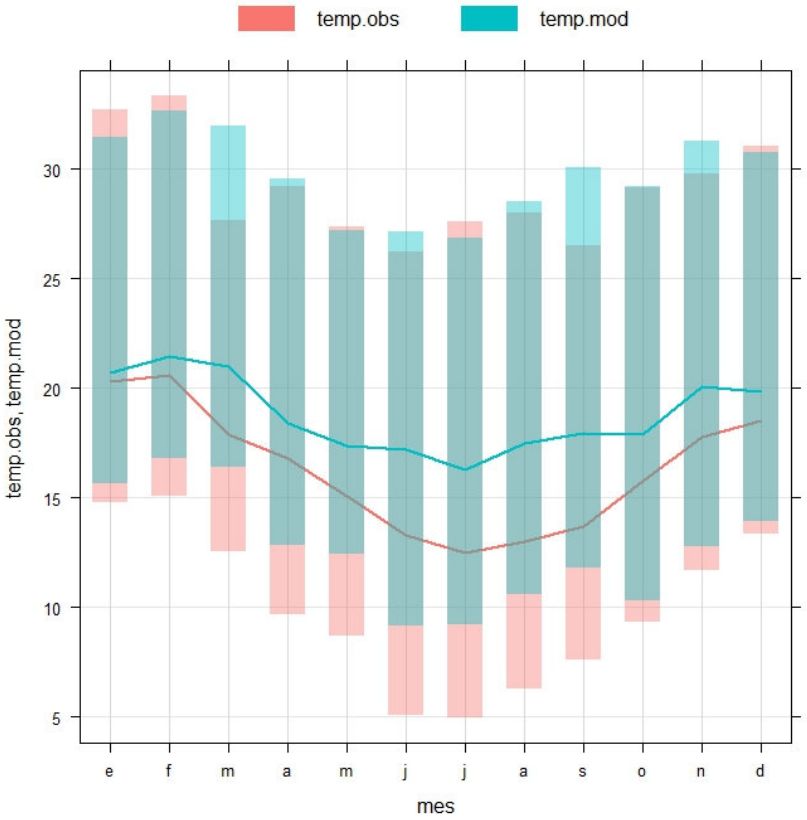
Figura 4.26: Ciclo diario de la temperatura modelada y observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.27 se presenta el ciclo mensual de temperatura observada y modelada con los percentiles 5 y 95 en la estación Tierra Amarilla, donde es posible apreciar que el modelo sobrestima la temperatura de manera sistemática todos los meses de año, esta sobrestimación es mucho más leve en los meses de verano.

Figura 4.27: Ciclo mensual de la temperatura modelada y observada. Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4.6 muestra los promedios y máximos, y mínimos de temperatura observada y modelada para la estación Tierra amarilla.

Tabla 4.6: Estadígrafos de temperatura, estación Tierra Amarilla, Año 2016.

	T. Amarilla	
Variable	**Observado**	**Modelado**
Promedio (°C)	17,7	20,3
Máximo (°C)	35,4	34,1
Mínimo (°C)	3,4	5,0

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos para distintos estadígrafos de desempeño del modelo WRF en estación Tierra Amarilla para la temperatura.

Tabla 4.7: Estadígrafos de desempeño de temperatura, estación Tierra Amarilla. Año 2016.

Estación	n	Sesgo	FAC2	SM	MAE	SMN	NMAE	ECM	r	IOA
T. Amarilla	8780	2,61	0,98	2,61	3,30	14,8%	18,7%	4,18	0,85	0,68

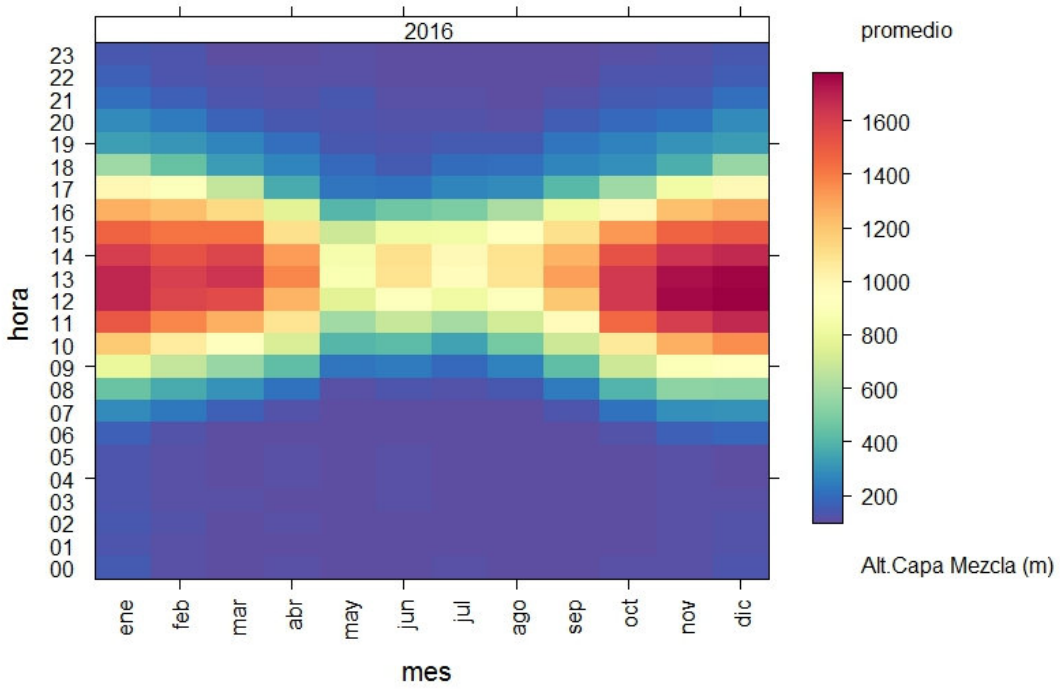
Fuente: Elaboración propia.

Los estadígrafos de sesgo y error de la tabla anterior indican que el modelo sobrestima la temperatura en estación Tierra Amarilla, pero los estadígrafos de coeficiente de correlación (r) y el índice de concordancia (IOA), muestran que el modelo presenta una buena tendencia temporal de los datos temperatura pese a la sobreestimación sistemática de las temperaturas.

4.5.4 Altura capa de mezcla en zona modelada

A continuación se presenta un análisis cualitativo del comportamiento estacional y horario de la altura de capa de mezcla modelada con el modelo WRF, se realiza un análisis cualitativo ya que no existen datos medidos para dicho parámetro. La Figura 4.28 muestra el perfil diario promedio por mes del año de la altura de capa de mezcla modelada en la estación Paipote. Se puede apreciar que los máximos diarios para todos los meses se alcanzan entre las 13:00 y 15:00 horas, alcanzando un promedio de unos 1700 metros en entre los meses de diciembre a febrero y un valor máximo diario considerablemente más bajo durante los meses de invierno, donde el promedio del máximo diario en el mes de julio alcanza solo unos 800 metros de altura. Se puede apreciar que la altura de capa de mezcla se levanta más temprano y baja más tarde durante los meses de verano, mientras que en los meses de invierno la capa de mezcla se mantiene durante más horas en niveles bajos, debido principalmente a que las horas de luz diurna son menores en invierno. La variación temporal de la altura de capa de mezcla modelada, tanto estacional como horaria, presenta un patrón típico de este parámetro.

Figura 4.28: Ciclo diario altura de capa de mezcla.
Estación Paipote. Año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

4.5.5 Factor de ajuste del modelo meteorológico en base a la velocidad del viento observada y modelada

A partir de los datos de velocidad del viento, observados y modelados en cada una de las dos estaciones meteorológicas consideradas (tablas 4.8 y 4.9), se obtiene un factor de corrección para las concentraciones estimadas con el modelo de dispersión, suponiendo de manera conservadora, que las concentraciones atmosféricas presentan una relación lineal inversa con la velocidad del viento promedio anual, en razón de 1:1. De esta manera se obtiene un factor de corrección a partir de la razón entre la velocidad del viento modelada y la velocidad del viento observada para cada estación. Promediando las razones obtenidas, las que se muestran en la Tabla 4.10, se obtiene un factor de corrección de 1,07. Pero considerando que el factor de corrección es de apenas un 7% y además que el modelo WRF sobreestima las situaciones del calma, lo que conllevaría a que el modelo CALPUFF sobreestime las concentraciones de contaminantes estimadas en horas de la noche y madrugada, se desestima la necesidad de utilizar el factor de corrección en las concentraciones estimadas por el modelo CALPUFF.

Tabla 4.8: Velocidad del viento observado, año 2016.

Variable	T. Amarilla	Paipote
Promedio (m/s)	2,28	2,12
Máximo (m/s)	5,40	6,70
Porcentaje de calmas	5,3%	2,8%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9: Velocidad del viento modelado, año 2016.

Variable	T. Amarilla	Paipote
Promedio (m/s)	2,31	2,41
Máximo (m/s)	8,23	9,16
Porcentaje de calmas	13,1%	18,5%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10: Razón velocidad del viento modelada y observada, año 2016.

	T. Amarilla	Paipote	Promedio
Razon VV mod/obs	1,01	1,14	1,07

Fuente: Elaboración propia.

4.5.6 Conclusiones modelo meteorológico

El desempeño del modelo meteorológico WRF se evaluó exhaustivamente para dos puntos: estación Tierra Amarilla al nor-noreste (NNE) de Planta Atacama Kozan y la estación Paipote al sur-suroeste (SSO) del Tranque El Gato. Se evaluaron los parámetros meteorológicos de velocidad y dirección del viento y temperatura. De estos tres parámetros el modelo mostró muy buen desempeño para los puntos mencionados para velocidad y dirección del viento. Para el caso de la temperatura si bien el índice de correlación (r) y índice de concordancia son altos (IOA), se puede apreciar que existe una sobreestimación sistemática de las temperaturas por parte del modelo. Respecto a las velocidades de vientos el modelo presenta muy buen desempeño respecto a los datos medidos, sobretodo en la estación Tierra Amarilla, por esta razón se desestima la necesidad de utilizar un factor de corrección de la velocidad del viento para ser aplicado posteriormente en las concentraciones estimadas por el modelo CALPUFF. Para el caso de la dirección del viento el modelo presenta muy buen desempeño en estación Paipote y buen desempeño en la estación Tierra Amarilla, con la excepción de la estimación de una componente oeste (O) del viento durante horas del mediodía y tarde para los meses de verano, componente que no se observa en los datos medidos.

Finalmente se analizó cualitativamente el comportamiento de la altura de capa de mezcla promedio horaria por mes del año, cualitativamente ya que no existen datos medidos del parámetro, la cual presenta un comportamiento estimado satisfactorio respecto al ciclo diario y estacional de dicho parámetro.