



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL**

---

Análisis del comportamiento del Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y  
su relación con la temperatura: Caso Zona Metropolitana  
del Valle de Toluca (ZMVT) 2011-2016

**TESIS**

Que para obtener el título de:

**LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta:

Daniela Salazar Ávila

Director:

Dra. Ana Marcela Gómez Hinojos



**Junio 2018**

# Índice

Introducción .....	17
Metodología .....	22
a. Alcance de la investigación .....	23
b. Diseño de la investigación .....	23
c. Población de estudio .....	24
d. Instrumentos de medición .....	25
e. Recolección de datos .....	25
f. Análisis estadísticos .....	26
1. Antecedentes .....	28
1.1. Ámbito Internacional .....	28
1.1.1. Trabajos de investigadores .....	28
1.1.2. Casos históricos .....	29
1.1.2.1. 1950-1970 Periodos fríos .....	29
1.1.2.2. 1952 Niebla en Londres .....	29
1.1.2.3. 1972 Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano	30
1.1.2.4. 1982 Erupción El Chichonal .....	30
1.1.2.5. 1987 Organización Mundial de la Salud (OMS) .....	30
1.1.2.6. 1988 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) .....	30
1.1.2.7. 1990 Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) .....	30
1.1.2.8. 1991 Erupción Volcán Pinatubo, Filipinas .....	31
1.1.2.9. 1992 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)	31
1.1.2.10. 2001 Aumento en la temperatura de EUA .....	31
1.1.2.11. 2014 Disminución en mediciones de SO <sub>2</sub> .....	31
1.1.3. El Bióxido de Azufre en el ámbito internacional .....	32
1.2. Ámbito Nacional .....	39
1.2.1. Trabajos de investigadores .....	39
1.2.2. Casos históricos .....	39
1.2.2.1. 1972 Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (LFPCCA-71) .....	39
1.2.2.2. 1988 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	39
1.2.2.3. 1990 Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) .....	40
1.2.2.4. 2002 Reducción de concentración para SO <sub>2</sub> .....	41

1.2.2.5.	2008 Redes de Monitoreo para Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	41
1.2.2.6.	2012 Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG).....	44
1.2.2.7.	Actual: Límites recomendados por la OMS .....	44
1.2.3.	El Bióxido de Azufre en el ámbito nacional .....	45
1.3.	Ámbito Estatal y Regional.....	47
1.3.1.	Casos históricos .....	47
1.3.1.1.	Década de los 90's Menores temperaturas en Toluca .....	47
1.3.1.2.	2005 Islas de calor .....	47
1.3.1.3.	2005 Interrupción de datos de SO <sub>2</sub> .....	47
1.3.1.4.	2009 Falta de información en indicadores para la ZMVT .....	48
	Epílogo.....	49
2.	Marco Conceptual .....	51
2.1.	Contaminación ambiental .....	51
2.2.	Contaminación atmosférica .....	52
2.2.1.	Contaminación atmosférica de procedencia natural .....	53
2.2.2.	Contaminación atmosférica de procedencia antropogénica .....	53
2.3.	Contaminantes del aire .....	54
2.3.1.	Clasificación por su origen .....	54
2.3.2.	Clasificación fisiológica .....	55
2.3.3.	Clasificación por su estado físico .....	55
2.3.4.	Contaminantes criterio.....	57
2.3.5.	Gases Efecto Invernadero (GEI).....	57
2.3.5.1.	Gases Efecto Invernadero de Larga Vida (GEILV) .....	58
2.3.5.2.	Gases de corta vida .....	58
2.3.5.3.	Gases de Efecto Invernadero (GEI) regulados por la Convención Mundial de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) .....	59
2.3.6.	Contaminación atmosférica en la ZMVT.....	59
2.4.	Aerosoles.....	60
2.4.1.	Propiedades generales.....	60
2.4.2.	Origen.....	60
2.4.3.	Composición.....	61
2.4.4.	Fuentes .....	61
2.4.5.	Efectos de los aerosoles .....	61
2.4.6.	Aerosoles y el albedo.....	62
2.4.7.	Forzamiento radiativo .....	62

2.4.8.	Aerosoles y el Efecto Invernadero .....	63
2.4.9.	Aerosoles en el Cambio Climático .....	64
2.4.10.	Aerosoles Sulfato.....	64
2.5.	Óxidos de Azufre.....	65
2.5.1.	Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	65
2.5.1.1.	Reacciones del SO <sub>2</sub> .....	67
2.5.1.1.1.	Formación de lluvia ácida .....	67
2.5.1.1.2.	Formación de aerosoles Sulfato .....	68
2.5.1.2.	Fuentes de emisión de SO <sub>2</sub> .....	68
2.5.1.3.	Impacto en la salud del SO <sub>2</sub> .....	70
2.5.1.4.	Comportamiento anual y diario del SO <sub>2</sub> .....	71
2.5.1.5.	Característica de enfriamiento del SO <sub>2</sub> .....	74
2.5.1.6.	Medidas de control para SO <sub>2</sub> .....	74
2.6.	El tiempo atmosférico y el clima .....	75
2.6.1.	Sistema climático.....	75
2.6.2.	Elementos del Clima Terrestre .....	76
2.6.2.1.	Temperatura.....	76
2.6.2.1.1.	Oscilación térmica .....	78
2.6.2.1.2.	Inversiones de temperatura .....	78
2.6.2.1.3.	Forzamiento radiativo .....	78
2.6.2.1.4.	Actores hídricos y temperatura .....	79
2.6.2.1.5.	Efecto invernadero y temperatura .....	79
2.7.	Radiación solar .....	80
2.7.1.	Balance calorífico .....	80
2.7.2.	Interacción de la radiación con los gases .....	80
2.7.3.	Radiación nocturna .....	81
2.8.	Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA-ZMVT).....	82
2.8.1.	Diseño .....	82
2.8.2.	Funcionamiento .....	83
2.8.3.	Distribución de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT .....	84
2.8.3.1.	Mediciones de las estaciones de la RAMA-ZMVT.....	85
2.8.4.	Técnicas de medición .....	87
2.9.	Normatividad en torno al SO <sub>2</sub> .....	88
2.9.1.	Normatividad internacional .....	88
2.9.2.	Nivel nacional.....	88

2.9.2.1.	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) ....	88
2.9.2.2.	Normas Oficiales Mexicanas (NOM's).....	90
2.9.2.2.1.	NOM-039-SEMARNAT-1993 .....	90
2.9.2.2.2.	NOM-022-SSA1-2010.....	91
2.9.2.3.	IMECA .....	92
2.9.2.4.	Reportes de calidad del aire .....	93
Epílogo.....		94
3.	Marco Contextual.....	96
3.1.	Localización y conformación .....	96
3.2.	Características naturales de la ZMVT.....	99
3.2.1.	Orografía y relieve.....	99
3.2.2.	Clima .....	101
3.2.3.	Épocas climáticas .....	102
3.2.4.	Meteorología .....	102
3.2.5.	Dinámica de vientos .....	103
3.3.	El tiempo atmosférico y el clima en la ZMVT .....	105
3.3.1.	Escenarios futuros para el Estado de México.....	105
3.4.	Características socioeconómicas de la ZMVT .....	106
3.4.1.	Sistema territorial .....	106
3.4.1.1.	Dinámica poblacional .....	106
3.4.1.2.	Usos de suelo .....	107
3.4.1.3.	Vías de comunicación.....	107
3.4.2.	Sistema económico .....	109
3.4.2.1.	Actividades económicas primarias.....	110
3.4.2.2.	Actividades económicas secundarias .....	110
3.4.2.3.	Actividades económicas terciarias .....	111
3.4.2.4.	Características socioeconómicas de municipios de la RAMA-ZMVT .....	111
3.4.2.4.1.	Metepc .....	111
3.4.2.4.2.	San Cristóbal Huichochitlán .....	112
3.4.2.4.3.	San Mateo Atenco.....	112
3.4.2.4.4.	Toluca de Lerdo .....	112
Epílogo.....		113
4.	Resultados y Observaciones .....	115
4.1.	Concentraciones de SO <sub>2</sub> .....	116
4.1.1.	Concentraciones por hora .....	116

4.1.1.1.	Año 2011 .....	116
4.1.1.1.1.	(OX) Oxtotitlán.....	116
4.1.1.1.2.	(CE) Centro.....	118
4.1.1.1.3.	(MT) Metepec .....	119
4.1.1.1.4.	(CB) Ceboruco.....	120
4.1.1.1.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	121
4.1.1.1.6.	(AP) Aeropuerto .....	122
4.1.1.1.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	123
4.1.1.1.8.	2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	124
4.1.1.2.	Año 2012 .....	125
4.1.1.2.1.	(OX) Oxtotitlán.....	125
4.1.1.2.2.	(CE) Centro.....	126
4.1.1.2.3.	(MT) Metepec .....	127
4.1.1.2.4.	(CB) Ceboruco.....	128
4.1.1.2.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	129
4.1.1.2.6.	(AP) Aeropuerto .....	130
4.1.1.2.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	131
4.1.1.2.8.	2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	132
4.1.1.3.	Año 2013 .....	133
4.1.1.3.1.	(OX) Oxtotitlán.....	133
4.1.1.3.2.	(CE) Centro.....	134
4.1.1.3.3.	(MT) Metepec .....	135
4.1.1.3.4.	(CB) Ceboruco.....	136
4.1.1.3.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	137
4.1.1.3.6.	(AP) Aeropuerto .....	138
4.1.1.3.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	139
4.1.1.3.8.	2013 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	140
4.1.1.4.	Año 2014 .....	141
4.1.1.4.1.	(OX) Oxtotitlán.....	141
4.1.1.4.2.	(CE) Centro.....	142
4.1.1.4.3.	(MT) Metepec .....	143
4.1.1.4.4.	(CB) Ceboruco.....	144
4.1.1.4.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	145
4.1.1.4.6.	(AP) Aeropuerto .....	146
4.1.1.4.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	147

4.1.1.4.8.	2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	148
4.1.1.5.	Año 2015 .....	149
4.1.1.5.1.	(OX) Oxtotitlán.....	149
4.1.1.5.2.	(CE) Centro.....	150
4.1.1.5.3.	(MT) Metepec.....	151
4.1.1.5.4.	(CB) Ceboruco.....	152
4.1.1.5.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	153
4.1.1.5.6.	(AP) Aeropuerto .....	154
4.1.1.5.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	155
4.1.1.5.8.	2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	156
4.1.1.6.	Año 2016 .....	157
4.1.1.6.1.	(OX) Oxtotitlán.....	157
4.1.1.6.2.	(CE) Centro.....	158
4.1.1.6.3.	(MT) Metepec.....	159
4.1.1.6.4.	(CB) Ceboruco.....	160
4.1.1.6.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	161
4.1.1.6.6.	(AP) Aeropuerto .....	162
4.1.1.6.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	163
4.1.1.6.8.	2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	164
4.1.1.7.	Periodo de estudio 2011-2016.....	165
4.1.1.7.1.	2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	165
4.1.1.7.2.	2011-2016 Reporte por hora .....	168
4.1.2.	Concentraciones por mes .....	171
4.1.2.1.	Año 2011 .....	171
4.1.2.1.1.	(OX) Oxtotitlán.....	171
4.1.2.1.2.	(CE) Centro.....	173
4.1.2.1.3.	(MT) Metepec.....	174
4.1.2.1.4.	(CB) Ceboruco.....	175
4.1.2.1.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	176
4.1.2.1.6.	(AP) Aeropuerto .....	177
4.1.2.1.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	178
4.1.2.1.8.	2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	179
4.1.2.2.	Año 2012 .....	180
4.1.2.2.1.	(OX) Oxtotitlán.....	180
4.1.2.2.2.	(CE) Centro.....	181

4.1.2.2.3.	(MT) Metepec.....	182
4.1.2.2.4.	(CB) Ceboruco.....	183
4.1.2.2.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	184
4.1.2.2.6.	(AP) Aeropuerto .....	185
4.1.2.2.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	186
4.1.2.2.8.	2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	187
4.1.2.3.	Año 2013 .....	188
4.1.2.3.1.	(OX) Oxtotitlán.....	188
4.1.2.3.2.	(CE) Centro.....	189
4.1.2.3.3.	(MT) Metepec.....	190
4.1.2.3.4.	(CB) Ceboruco.....	191
4.1.2.3.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	192
4.1.2.3.6.	(AP) Aeropuerto .....	193
4.1.2.3.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	194
4.1.2.3.8.	2013 siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	195
4.1.2.4.	Año 2014 .....	196
4.1.2.4.1.	(OX) Oxtotitlán.....	196
4.1.2.4.2.	(CE) Centro.....	197
4.1.2.4.3.	(MT) Metepec.....	198
4.1.2.4.4.	(CB) Ceboruco.....	199
4.1.2.4.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	200
4.1.2.4.6.	(AP) Aeropuerto .....	201
4.1.2.4.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	202
4.1.2.4.8.	2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	203
4.1.2.5.	Año 2015 .....	204
4.1.2.5.1.	(OX) Oxtotitlán.....	204
4.1.2.5.2.	(CE) Centro.....	205
4.1.2.5.3.	(MT) Metepec.....	206
4.1.2.5.4.	(CB) Ceboruco.....	207
4.1.2.5.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	208
4.1.2.5.6.	(AP) Aeropuerto .....	209
4.1.2.5.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	210
4.1.2.5.8.	2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	211
4.1.2.6.	Año 2016 .....	212
4.1.2.6.1.	(OX) Oxtotitlán.....	212

4.1.2.6.2.	(CE) Centro.....	213
4.1.2.6.3.	(MT) Metepec.....	214
4.1.2.6.4.	(CB) Ceboruco.....	215
4.1.2.6.5.	(SM) San Mateo Atenco .....	216
4.1.2.6.6.	(AP) Aeropuerto .....	217
4.1.2.6.7.	(SC) San Cristóbal Huichochitlán.....	218
4.1.2.6.8.	2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	219
4.1.2.7.	Periodo de estudio 2011-2016.....	220
4.1.2.7.1.	2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT .....	220
4.1.2.7.2.	2011-2016 Reporte por mes.....	223
4.1.3.	Concentraciones por año.....	226
4.1.3.1.	2011-2016 Siete estaciones RAMA-ZMVT.....	226
4.1.3.2.	2011-2016 Concentraciones de Bióxido de Azufre.....	229
4.2.	Relación de SO <sub>2</sub> -Temperatura .....	231
4.2.1.	2011 a 2016 SO <sub>2</sub> -Temperatura por hora .....	232
4.2.1.1.	Correlación lineal simple .....	233
4.2.2.	2011 a 2016 SO <sub>2</sub> -Temperatura por mes .....	235
4.2.2.1.	Correlación lineal simple .....	236
4.2.3.	2011 a 2016 SO <sub>2</sub> -Temperatura por estación .....	238
4.2.3.1.	Correlación lineal simple .....	239
5.	Conclusiones .....	242
5.1.	Conclusiones .....	242
5.2.	Recomendaciones.....	246
	Bibliografía .....	248

# Índice de Figuras

## Capítulo 1. Antecedentes

Figura 1.1. Emisiones de Bióxido de Azufre 1970-2010 .....	32
Figura 1.2. Emisiones de GEI Indirectos México (1990-2002).....	41
Figura 1.3. Tendencias de las concentraciones diarias de SO <sub>2</sub> en la ZMVT.....	47

## Capítulo 2. Marco Conceptual

Figura 2.1. Clasificación con base en la procedencia de la contaminación atmosférica.....	52
Figura 2.2. Clasificación de contaminantes.....	54
Figura 2.3. Clasificación de contaminantes atmosféricos por estado físico.....	56
Figura 2.4. Formación de lluvia ácida.....	67
Figura 2.5. Contribución (%) de SO <sub>2</sub> por fuentes antropogénicas móviles.....	69
Figura 2.6. Causas y efectos de GEI y de Contaminantes Criterio.....	71
Figura 2.7. Comportamiento anual del SO <sub>2</sub> en cuatro zonas metropolitanas de México en 2008.....	72
Figura 2.8. Comportamiento diario del SO <sub>2</sub> en cuatro zonas metropolitanas de México en 2008....	73
Figura 2.9. Elementos que constituyen al clima.....	76
Figura 2.10. Mapa de distribución de las estaciones de monitoreo.....	85
Figura 2.11. Escala IMECA.....	92
Figura 2.12. IMECA para SO <sub>2</sub> .....	93

## Capítulo 3. Marco Contextual (Ubicación y descripción del área de estudio)

Figura 3.1. Red Carretera de la ZMVT.....	109
---	-----

# Índice de Gráficos

## Capítulo 4. Resultados y Observaciones

### Concentraciones de SO<sub>2</sub>

Gráfico 4.1.1. 2011 Oxtotitlán por hora.....	117
Gráfico 4.1.2. 2011 Centro por hora.....	118
Gráfico 4.1.3. 2011 Metepec por hora.....	119
Gráfico 4.1.4. 2011 Ceboruco por hora.....	120
Gráfico 4.1.5. 2011 San Mateo Atenco por hora.....	121
Gráfico 4.1.6. 2011 Aeropuerto por hora.....	122
Gráfico 4.1.7. 2011 San Cristóbal Huichochitlán por hora.....	123
Gráfico 4.1.8. 2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	124
Gráfico 4.1.9. 2012 Oxtotitlán por hora.....	125
Gráfico 4.1.10. 2012 Centro por hora.....	126
Gráfico 4.1.11. 2012 Metepec por hora.....	127
Gráfico 4.1.12. 2012 Ceboruco por hora.....	128
Gráfico 4.1.13. 2012 San Mateo Atenco por hora.....	129
Gráfico 4.1.14. 2012 Aeropuerto por hora.....	130
Gráfico 4.1.15. 2012 San Cristóbal Huichochitlán por hora.....	131
Gráfico 4.1.16. 2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	132
Gráfico 4.1.17. 2013 Oxtotitlán por hora.....	133
Gráfico 4.1.18. 2013 Centro por hora.....	134
Gráfico 4.1.19. 2013 Metepec por hora.....	135
Gráfico 4.1.20. 2013 Ceboruco por hora.....	136
Gráfico 4.1.21. 2013 San Mateo Atenco por hora.....	137
Gráfico 4.1.22. 2013 Aeropuerto por hora.....	138
Gráfico 4.1.23. 2013 San Cristóbal Huichochitlán por hora.....	139
Gráfico 4.1.24. 2013 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	140
Gráfico 4.1.25. 2014 Oxtotitlán por hora.....	141
Gráfico 4.1.26. 2014 Centro por hora.....	142
Gráfico 4.1.27. 2014 Metepec por hora.....	143

Gráfico 4.1.28. 2014 Ceboruco por hora.....	144
Gráfico 4.1.29. 2014 San Mateo Atenco por hora.....	145
Gráfico 4.1.30. 2014 Aeropuerto por hora.....	146
Gráfico 4.1.31. 2014 San Cristóbal Huichochitlán por hora.....	147
Gráfico 4.1.32. 2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	148
Gráfico 4.1.33. 2015 Oxtotitlán por hora.....	149
Gráfico 4.1.34. 2015 Centro por hora.....	150
Gráfico 4.1.35. 2015 Metepec por hora.....	151
Gráfico 4.1.36. 2015 Ceboruco por hora.....	152
Gráfico 4.1.37. 2015 San Mateo Atenco por hora.....	153
Gráfico 4.1.38. 2015 Aeropuerto por hora.....	154
Gráfico 4.1.39. 2015 San Cristóbal Huichochitlán por hora.....	155
Gráfico 4.1.40. 2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	156
Gráfico 4.1.41. 2016 Oxtotitlán por hora.....	157
Gráfico 4.1.42. 2016 Centro por hora.....	158
Gráfico 4.1.43. 2016 Metepec por hora.....	159
Gráfico 4.1.44. 2016 Ceboruco por hora.....	160
Gráfico 4.1.45. 2016 San Mateo Atenco por hora.....	161
Gráfico 4.1.46. 2016 San Cristóbal Huichochitlán por hora.....	163
Gráfico 4.1.47. 2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	164
Gráfico 4.1.48. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora.....	166
Gráfico 4.1.49. 2011-2016 Reporte por hora.....	169
Gráfico 4.1.50. 2011 Oxtotitlán por mes.....	171
Gráfico 4.1.51. 2011 Centro por mes.....	173
Gráfico 4.1.52. 2011 Metepec por mes.....	174
Gráfico 4.1.53. 2011 Ceboruco por mes.....	175
Gráfico 4.1.54. 2011 San Mateo Atenco por mes.....	176
Gráfico 4.1.55. 2011 Aeropuerto por mes.....	177
Gráfico 4.1.56. 2011 San Cristóbal Huichochitlán por mes.....	178
Gráfico 4.1.57. 2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	179

Gráfico 4.1.58. 2012 Oxtotitlán por mes.....	180
Gráfico 4.1.59. 2012 Centro por mes.....	181
Gráfico 4.1.60. 2012 Metepec por mes.....	182
Gráfico 4.1.61. 2012 Ceboruco por mes.....	183
Gráfico 4.1.62. 2012 San Mateo Atenco por mes.....	184
Gráfico 4.1.63. 2012 Aeropuerto por mes.....	185
Gráfico 4.1.64. 2012 San Cristóbal Huichochitlán por mes.....	186
Gráfico 4.1.65. 2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	187
Gráfico 4.1.66. 2013 Oxtotitlán por mes.....	188
Gráfico 4.1.67. 2013 Centro por mes.....	189
Gráfico 4.1.68. 2013 Metepec por mes.....	190
Gráfico 4.1.69. 2013 Ceboruco por mes.....	191
Gráfico 4.1.70. 2013 San Mateo Atenco por mes.....	192
Gráfico 4.1.71. 2013 Aeropuerto por mes.....	193
Gráfico 4.1.72. 2013 San Cristóbal Huichochitlán por mes.....	194
Gráfico 4.1.73. 2013 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	195
Gráfico 4.1.74. 2014 Oxtotitlán por mes.....	196
Gráfico 4.1.75. 2014 Centro por mes.....	197
Gráfico 4.1.76. 2014 Metepec por mes.....	198
Gráfico 4.1.77. 2014 Ceboruco por mes.....	199
Gráfico 4.1.78. 2014 San Mateo Atenco por mes.....	200
Gráfico 4.1.79. 2014 Aeropuerto por mes.....	201
Gráfico 4.1.80. 2014 San Cristóbal Huichochitlán por mes.....	202
Gráfico 4.1.81. 2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	203
Gráfico 4.1.82. 2015 Oxtotitlán por mes.....	204
Gráfico 4.1.83. 2015 Centro por mes.....	205
Gráfico 4.1.84. 2015 Metepec por mes.....	206
Gráfico 4.1.85. 2015 Ceboruco por mes.....	207
Gráfico 4.1.86. 2015 San Mateo Atenco por mes.....	208
Gráfico 4.1.87. 2015 Aeropuerto por mes.....	209

Gráfico 4.1.88. 2015 San Cristóbal Huichochitlán por mes.....	210
Gráfico 4.1.89. 2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	211
Gráfico 4.1.90. 2016 Oxtotitlán por mes.....	212
Gráfico 4.1.91. 2016 Centro por mes.....	213
Gráfico 4.1.92. 2016 Metepec por mes.....	214
Gráfico 4.1.93. 2016 Ceboruco por mes.....	215
Gráfico 4.1.94. 2016 San Mateo Atenco por mes.....	216
Gráfico 4.1.95. 2016 San Cristóbal Huichochitlán por mes.....	218
Gráfico 4.1.96. 2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	219
Gráfico 4.1.97. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes.....	221
Gráfico 4.1.98. 2011-2016 Reporte por mes.....	224
Gráfico 4.1.99. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT.....	227
Gráfico 4.1.100. 2011-2016 Bióxido de Azufre.....	229
<b>Relación SO<sub>2</sub>-Temperatura</b>	
Gráfico 4.3.1. 2011-2016 Correlación lineal simple SO <sub>2</sub> -Temperatura por hora.....	243
Gráfico 4.3.2. 2011-2016 Correlación lineal simple SO <sub>2</sub> -Temperatura por mes.....	246
Gráfico 4.3.3. 2011-2016 Correlación lineal simple SO <sub>2</sub> -Temperatura por estación.....	249

# Índice de Mapas

## Capítulo 3. Marco contextual (Ubicación y descripción del área de estudio)

Mapa 3.1. Mapa de localización de la ZMVT.....	97
Mapa 3.2. Mapa de distribución de las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT...	99
Mapa 3.3. Mapa de elevaciones de la ZMVT.....	101
Mapa 3.4. Mapa de dirección de vientos de la ZMVT.....	104

# Índice de Tablas

## Capítulo 1. Antecedentes

Tabla 1.1. Informes del IPCC para SO <sub>2</sub> .....	33
Tabla 1.2. Cronología de PICCA y PROAIRE.....	40
Tabla 1.3. Redes de Monitoreo para medición de SO <sub>2</sub> en México.....	42
Tabla 1.4. Clasificación de las ciudades según su grado de contaminación por SO <sub>2</sub> .....	43
Tabla 1.5. El SO <sub>2</sub> en México.....	45
Tabla 1.6. Diagnóstico de la calidad del aire en la ZMVT. Indicadores relacionados con el cumplimiento de las NOM, 2008-2009.....	48

## Capítulo 2. Marco Conceptual

Tabla 2.1. Clasificación de Bióxido de Azufre.....	65
Tabla 2.2. Clasificación antropogénica del Bióxido de Azufre.....	66
Tabla 2.3. Clasificación del SO <sub>2</sub> como contaminante.....	66
Tabla 2.4. Estaciones de la RAMA-ZMVT.....	83
Tabla 2.5. Equipos de medición para gases contaminantes en la RAMA-ZMVT.....	86
Tabla 2.6. Equipo de medición para meteorología en la RAMA-ZMVT.....	87
Tabla 2.7. Artículos del Capítulo II, LGEEPA.....	89
Tabla 2.8. Niveles máximos permisibles para plantas productoras de Ácido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), en zonas no críticas.....	91

## Capítulo 3. Marco Contextual (Ubicación y descripción del área de estudio)

Tabla 3.1. Zonas y municipios de RAMA-ZMVT.....	98
Tabla 3.2. Actividad en cantidad de pasajeros del AICT 2011-2017.....	108

## Capítulo 4. Resultados y Observaciones

Tabla 4.1. SO <sub>2</sub> (ppm)-Temperatura (°C) por hora.....	232
Tabla 4.2. SO <sub>2</sub> -Temperatura (%) por hora.....	232
Tabla 4.3. SO <sub>2</sub> (ppm)-Temperatura (°C) por mes.....	235
Tabla 4.4. SO <sub>2</sub> -Temperatura (%) por mes.....	235
Tabla 4.5. SO <sub>2</sub> (ppm)-Temperatura (°C) por estación.....	238
Tabla 4.6. SO <sub>2</sub> -Temperatura (%) por estación.....	238

# Introducción

La contaminación del aire es uno de los principales problemas con el cual se enfrenta la sociedad, pues se ha desarrollado de manera internacional, sin distinguir entre países desarrollados o países en desarrollo. Este problema no sólo se ve reflejado a nivel mundial, sino que también, se observa en un contexto nacional y regional; pudiendo ser ocasionado por actividades antropogénicas, o bien, por la dinámica natural del planeta. En este sentido, las consecuencias que han derivado de la contaminación atmosférica se han visto reflejadas en diversos problemas de salud en todo el mundo (OMS, 2011).

De manera específica, en el Estado de México, se encuentra la “Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca” (RAMA-ZMVT)<sup>1</sup>. En ella se manejan, como bases de información, los registros de los “contaminantes criterio”<sup>2</sup>, los cuales ayudan a la realización de proyecciones evolutivas de concentraciones para los gases contaminantes de esta zona; dichos contaminantes son: Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Ozono (O<sub>3</sub>), Material Particulado 10 y 2.5 (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) y Monóxido de Carbono (CO) (García, 2014). De igual manera, la RAMA-ZMVT incluye las técnicas de medición y la normatividad para todos los contaminantes criterio, ya que las concentraciones de éstos en el aire de la ZMVT han ido al alza en los últimos años (RAMA-ZMVT, 2014).

Es importante mencionar que la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) es una metrópoli que se coloca como una de las principales zonas con mala calidad del aire a nivel nacional (INE, 2009)<sup>3</sup>. En este tenor, la ZMVT no sólo ha sufrido un rápido desarrollo de la Zona Industrial en los alrededores de la ciudad de Toluca (Hernández & Madrigal, 2004), sino que también es una de las entidades federativas con un crecimiento poblacional, mediante el saldo neto migratorio, ubicado entre los más elevados de México (COESPO, 2012). De igual manera, el aumento en el parque vehicular de la zona, destaca como uno de

---

<sup>1</sup> RAMA-ZMVT: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

<sup>2</sup> Contaminante criterio: Sustancias en la atmósfera que generan afecciones fisiológicas y que se encuentran bajo normatividades de límites máximos permisibles a nivel internaciona y nacional.

<sup>3</sup> INE: Instituto Nacional de Ecología, surgido en 1992.

\*Nota: A partir de 2012, el INE cambia sus siglas a INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático).

los factores que merman la calidad del aire (García, 2014) y en el mismo orden de ideas, cabe resaltar que, la ZMVT también se ve altamente influenciada en sus niveles de contaminación atmosférica, debido al traslado de contaminantes producto de la dirección de vientos provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) lo que contribuye al incremento en los niveles de dicha contaminación (Hernández & Madrigal, 2004).

Entre los contaminantes que mide la RAMA-ZMVT, figura el Bióxido de Azufre, el cual es considerado como un gas contaminante debido a sus afecciones en la salud, con especial injerencia en enfermedades respiratorias, cardiovasculares, alergias y asma (OMS, 1999). En este tenor, a nivel nacional, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), ya trabaja en una modificación de los límites máximos permisibles de  $\text{SO}_2$  en la Norma Oficial Mexicana-022 de la Secretaría de Salud (NOM-022-SSA1-2010), debido a que los límites internacionales y nacionales difieren entre sí, con un valor en México que es 14 veces más elevado que el límite que recomienda la OMS; sin mencionar que existen datos que relacionan a la sustancia entre los elementos que pueden aumentar el número de casos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares a nivel nacional (El Economista, 2015).

Así mismo, este gas cuenta con dos tendencias de comportamiento diario: bimodal y unimodal, por su parte, el comportamiento unimodal es aquel que presenta únicamente una elevación en las gráficas de concentración, normalmente de 9:00 a 12:00 horas. Por otra parte, el comportamiento bimodal hace alusión a dos cambios de concentración diaria por diversos factores, intensificándose entre las 9:00 y 12:00 horas y posterior a esto, se presenta la segunda elevación, a cualquier hora del día (INE, 2009 b); de esta manera, se presentan diversas teorías sobre las causas multifactoriales de este fenómeno, tales como circulación del parque vehicular, desempeño de actividades económicas manufactureras y otras; a su vez, se abre la interrogativa de la posible relación inversamente proporcional del  $\text{SO}_2$  con la temperatura (INE, 2009 b).

De manera contrastante, el  $\text{SO}_2$  no está contemplado en la lista de los seis principales Gases Efecto Invernadero de larga vida, regulada por la “Convención Marco Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (CMNUCC) (Moreno, 2009), aun cuando al  $\text{SO}_2$  se le ha atribuido el rasgo distintivo de ser precursor de los aerosoles Sulfato, mismos que desempeñan un papel importante en el balance radiativo de la atmósfera, teniendo dos resultados en general y son:

1) Efecto directo en la dispersión y absorción de la radiación y 2) Efecto indirecto sobre la composición de las nubes, generando así, una mayor reflexión nubosa. En conjunto, ambos resultan en un enfriamiento regional, localizándose en diferentes partes del mundo (IPCC Working Group I, 1990).

El objetivo del presente trabajo es analizar la concentración de los registros de SO<sub>2</sub>, en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y su relación con los registros de temperatura, con los datos reportados por la RAMA-ZMVT, en un periodo de 2011 a 2016, pues en este lapso se encuentran disponibles los parámetros de las bases de datos de la RAMA-ZMVT.

En este sentido, la correlación entre dichos valores se busca debido a que la temperatura registrada del lugar pudiese reaccionar ante las concentraciones de Bióxido de Azufre, viéndose afectada por la presencia de aerosoles Sulfato y no importando que este gas no sea un Gas de Efecto Invernadero (GEI) de larga vida, ni que su tiempo de permanencia en la atmósfera es corto (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007). De esta manera, al correlacionar estos actores, se entenderá que, si bien el SO<sub>2</sub> no figura como GEI de larga vida, sí interacciona con otros GEI, resultando así, en un aumento mutuo de concentraciones atmosféricas (IPCC Working Group III, 2014). Aunado a ello, este gas posee la característica de ser precursor de aerosoles troposféricos, mismos que generan cambios en el balance radiativo terrestre y, consecuentemente, una baja en las temperaturas de la Tierra (IPCC Working Group III, 1995).

En tanto, los objetivos particulares a desarrollar en la presente investigación son:

Elaborar un marco teórico conceptual que fundamente el desarrollo del presente trabajo.

Analizar datos de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, de concentraciones promedio diarias, mensuales y anuales para Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), desde 2011 hasta 2016.

Correlacionar datos de concentraciones de SO<sub>2</sub>-Temperatura de la ZMVT, en un periodo de 2011 a 2016, de manera diaria y mensual, para cada una de las estaciones de la RAMA-ZMVT.

Demostrar la relación existente entre concentraciones de Bióxido de Azufre con los registros de temperatura, en la ZMVT, de 2011 a 2016.

De igual manera, en el presente trabajo, se manejan dos hipótesis, las cuales son:

H<sub>1</sub>: Derivado de la concentración de industrias en la parte norte y norte-sur de la ZMVT, la concentración de SO<sub>2</sub> será mayor en estas áreas.

H<sub>2</sub>: Las concentraciones de Bióxido de Azufre en la ZMVT generan una baja en las temperaturas de 2011 a 2016.

De forma general el presente trabajo se encuentra dividido en cinco secciones o capítulos. En el capítulo 1 se plasman los antecedentes, mismos que describen la evolución de casos históricos y de trabajos de investigación, relacionados con los temas de contaminación atmosférica y/o variabilidad en temperatura respecto al SO<sub>2</sub>; todo ello, desarrollado a lo largo de los años de 1950 a 2016; y en un contexto internacional, nacional y regional.

En el segundo capítulo o marco conceptual, se persigue el fin desarrollar los conceptos en materia de contaminación atmosférica, Gases de Efecto Invernadero (GEI) y por supuesto, en torno al SO<sub>2</sub>; de la misma manera, se contemplan temas en torno a la temperatura, tales como radiación solar y aerosoles; por otro lado, en este mismo apartado, también se desarrolla una descripción del funcionamiento y monitoreo de la RAMA-ZMVT, para el gas en cuestión, así como temas en materia normativa que giran en torno a este contaminante.

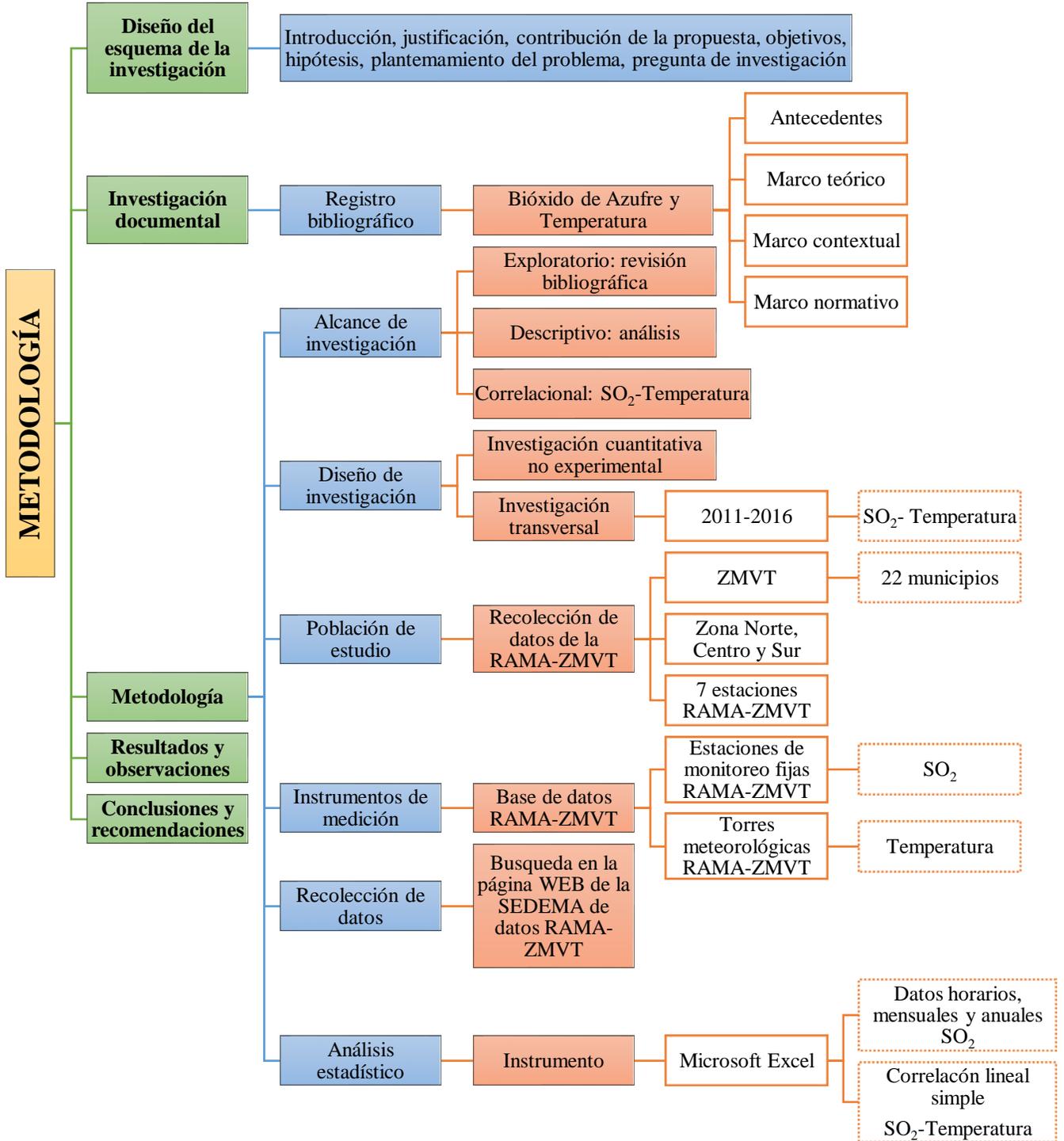
Para el capítulo 3 o marco contextual, se describe el lugar donde se desarrolla el estudio del fenómeno de las variables climáticas y de la contaminación atmosférica de la presente investigación. De esta manera, se analiza desde un contexto general a uno particular; en temas tales como: características naturales de la ZMVT (orografía y relieve, clima, meteorología, entre otros); y características socioeconómicas de la región (dinámica poblacional, vías de comunicación, sistema económico, entre otros).

En el mismo orden de ideas, se encuentra el apartado de resultados y observaciones, donde se realiza un estudio detallado de las concentraciones de Bióxido de Azufre en la ZMVT desde 2011 hasta 2016, para las siete estaciones de RAMA-ZMVT, presentado en reportes horarios, mensuales y anuales. En este mismo capítulo se desarrolla la correlación lineal simple entre SO<sub>2</sub>-Temperatura.

Por último, al cabo de la presente investigación, se presentan las conclusiones y recomendaciones que surgen gracias al análisis realizado, las cuales abarcan al SO<sub>2</sub> como

contaminante y subproducto de las actividades industriales, así como de la interacción SO<sub>2</sub>-Temperatura; para poder dar un mayor entendimiento de la multifactorialidad del comportamiento de este gas.

# Metodología



### **a. Alcance de la investigación**

Para definir el alcance del presente estudio, se adopta la clasificación proporcionada por Hernández (2010), para definir los tipos de investigación, siendo: exploratorio, descriptivo y correlacional; mismos que se enlistan a continuación (Hernández R. , 2010).

- Exploratorio: Característica alusiva a la previa, pero, limitada existencia de estudios del problema de investigación sobre el Bióxido de Azufre como tal y su relación con la temperatura.
- Descriptivo: Esto debido a la recolección de datos, medición y evaluación de diversas dimensiones de concentraciones de Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) en la ZMVT, desde 2011 hasta 2016; especificando las características y propiedades de estas dimensiones variables. Se midieron y recolectaron datos para determinar cómo es y cómo se manifiestan dichas variaciones. Bajo este rubro el estudio se limita a medir los cambios de los datos y recolectar información al respecto.
- Correlacional: El estudio mide la relación existente entre las variables del presente, las concentraciones de Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y las temperaturas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, de 2011 a 2016; analizando así, su correlación.

### **b. Diseño de la investigación**

La investigación cuantitativa fue realizada de tipo no experimental, ya que no hubo ningún tipo de manipulación intencional de variables, pues estas ya habían ocurrido, al igual que sus efectos. Los fenómenos por estudiar se observaron de manera natural en su contexto, para después ser analizados (Hernández R. , 2010).

La presente investigación fue transaccional o transversal, ya que existe una recolección de datos que busca describir las variables involucradas: Bióxido de Azufre y temperatura; para así analizar su incidencia e interrelación en un momento dado (2011-2016).

Aunado a ello, este diseño de investigación deviene al tipo estudio transaccional-exploratorio, pues el tema de investigación del incremento de niveles de SO<sub>2</sub> en relación con la temperatura; ha sido poco desarrollado a nivel nacional.

De igual manera, el trabajo se clasifica como un estudio “transaccional correlacional-causal”, gracias a la descripción de la relación entre las variables de estudio, en este caso, SO<sub>2</sub>-Temperatura (Hernández R. , 2010).

### **c. Población de estudio**

La población sobre la cual se describen los resultados, la constituye la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), integrada por los siguientes 22 municipios: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xalatlaco, Xonacatlán, Zinacantepec (GEM, 2007); mismos que se estudian en el lapso de tiempo de 2011 a 2016.

Para el desarrollo del presente estudio, se consideran las siete estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA-ZMVT), distribuidas en Zona Norte, Centro y Sur; pues con base en los parámetros de la de la RAMA-ZMVT sustentados con la Organización Panamericana de la Salud, para los programas de vigilancia atmosférica en las zonas urbanas e industriales, como el Valle de Toluca, se debe contar con al menos dos estaciones de monitoreo atmosférico y no rebasar las diez estaciones, para así obtener las mediciones atmosféricas. Aunado a ello, el Valle de Toluca cuenta con una población de 1,846,116 habitantes, número que requiere un mínimo de cinco estaciones para el programa de vigilancia. Como resultado, las estaciones de la RAMA-ZMVT, son (RAMA-ZMVT, 2014):

1. Zona Centro
  - a. Toluca Centro
  - b. Oxtotitlán
2. Zona Norte
  - a. Aeropuerto
  - b. San Cristóbal Huichochitlán
3. Zona Sur
  - a. Metepec
  - b. Ceboruco
  - c. San Mateo Atenco.

El censo aquí presente, de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, desde 2011 hasta 2016, se debe a la disponibilidad de datos que reporta la RAMA-ZMVT, pues ésta inicia a reportar a partir de 2011 y termina con los datos de 2016.

Las razones de inclusión total de las estaciones son:

- No caer en generalizaciones arriesgadas.
- Evitar obtener muestras que no condujeran a resultados representativos.
- No presentar limitaciones importantes de tiempo o de recursos para la recolección.
- Las facilidades mostradas por la RAMA-ZMVT para la recolección de información.

#### **d. Instrumentos de medición**

Los instrumentos utilizados para llevar a cabo la presente investigación fueron dos: 1) Las estaciones de monitoreo fijas y 2) Las torres meteorológicas de la RAMA-ZMVT.

Para la medición de los contaminantes, caso específico, el SO<sub>2</sub>, se manejan las siete estaciones de monitoreo fijas de la RAMA-ZMVT. Estas son cabinas metálicas climatizadas con 3.3 metros de largo, 2.3 m. de ancho y 2.0 m. de alto; en ellas se encuentran instalados los analizadores automáticos para el monitoreo de los seis contaminantes criterios, incluyendo así, al SO<sub>2</sub> (RAMA-ZMVT, 2014).

Por otro lado, para la temperatura se utilizan las seis torres meteorológicas de la RAMA-ZMVT, ubicadas en las estaciones fijas de monitoreo. Estas torres cuentan con sensores que miden los siguientes parámetros: temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, precipitación, radiación solar, humedad relativa y la presión atmosférica (RAMA-ZMVT, 2014).

De esta manera, ambos instrumentos generan una base de datos tanto de gases contaminantes, como de registros meteorológicos; mismos que se implementan para realizar el análisis y correlación de las variables de estudio: Bióxido de Azufre y temperatura.

#### **e. Recolección de datos**

La recolección de datos se llevó a cabo gracias a las bases de datos que genera la RAMA-ZMVT en la página Web de la Secretaría de Medio Ambiente de Toluca (SEDEMA)<sup>4</sup>, para

---

<sup>4</sup> SEDEMA: Secretaría de Medio Ambiente, Toluca.

las dos variables del presente estudio, pues los instrumentos de medición captaron registros de emisiones de SO<sub>2</sub> en la ZMVT, en un periodo de 2011 a 2016; de igual manera, estos instrumentos, recabaron también, datos de temperatura para la ZMVT, en el mismo periodo de tiempo.

Cabe mencionar que las bases de datos pueden ser consultadas en la página web de la SEDEMA, o bien, se pueden solicitar de manera presencial en la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, en Toluca, Estado de México (SEDAGRO).

#### **f. Análisis estadísticos**

El análisis estadístico de los datos recabados fue realizado, en primer lugar, con el software de Microsoft Office Excel® 2016, utilizando las herramientas que éste brinda, incluyendo depuración de datos, generación de gráficos, tablas dinámicas, entre otros. Dicho análisis contiene datos generados por la RAMA-ZMVT, mismos que se organizaron en dos grupos: concentración de Bióxido de Azufre y temperatura. El primero de ellos, con investigación horaria, mensual y anual, desde 2011 hasta 2016; y para la temperatura, únicamente se realiza la correlación de variables SO<sub>2</sub>-Temperatura, en mediciones horarias, mensuales y por estación.

En este tenor, con la herramienta Microsoft Office Excel® 2016, se generó una correlación lineal simple entre las mismas variables, todo ello destinado a la comprobación de las hipótesis de la presente investigación.

Dado que, en el alcance de la investigación las metas primarias son exploratorias y correlacionales, el análisis de datos partió de la descripción bibliográfica, contextual y normativa de cada una de las variables de estudio, concentraciones de Bióxido de Azufre y únicamente una investigación bibliográfica y contextual de la otra variable del presente. No obstante, de manera general, las dos variables se trabajan en el análisis de datos, gracias a la recolección de éstos en la página Web de la SEDEMA.

Posteriormente se realizó la descripción de las características del contaminante y de los cambios de temperatura vividos en la ZMVT de 2011 a 2016.

# Capítulo 1

## Antecedentes

# Antecedentes

En el siguiente capítulo se presenta información acerca del contexto histórico que engloban, tanto hechos históricos, como investigaciones en torno a concentraciones de Bióxido de Azufre en el aire, o bien, acerca de variaciones en la temperatura; con fuentes de información tales como: el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), revistas científicas, entre otros.

Ambas variantes de estudio se analizan en un contexto internacional, nacional y regional; mismos apartados en los que se subdivide el capítulo 1.

Para el caso específico de concentraciones del Bióxido de Azufre, se presenta un análisis evolutivo respecto a su regulación y presencia en cada apartado (internacional, nacional y regional).

## **1.1. Ámbito Internacional**

### **1.1.1. Trabajos de investigadores**

En el Reporte de Evaluación del Grupo de Trabajo 1 del IPCC (1990), se plantea la hipótesis de que las nubes como núcleos de condensación existen en mayor cantidad en el aire de los océanos que en el de las ciudades. En este sentido, las nubes como núcleos de condensación en el aire limpio del océano están mayormente compuestas por partículas Sulfato. Por ello, gracias a la falta de contaminación atmosférica en zonas marítimas, se plantea la posibilidad de que, aunque se hable de aerosoles Sulfato, éstos no generarán cambios drásticos en el clima, si el aire es tan limpio como en zonas marítimas (IPCC Working Group I, 1990).

Por otro lado, en la investigación de Almazán (1999), sobre “Variabilidad Climática y Disponibilidad de Agua en el Noroeste de México”, y en la investigación de Leyva (2009), sobre la “Variabilidad de la Irradiación Solar Superficial UV como Factor Externo del Cambio Climático”, se estudiaron los actores del cambio climático. A manera de causa, mencionan que el cambio climático está determinado por la irradiación solar, con el balance entre la energía solar absorbida y energía térmica emitida (Leyva, 2009). De igual manera estos estudios demostraron que el cambio climático no se limita a un único actor de calentamiento, sino que, también involucra actores como lo son los cambios en el ciclo

hidrológico (Almazán, 1999). De esta manera, ambos autores afirman que el cambio climático conjuga irradiación solar y ciclos hidrológicos, determinando así la temperatura promedio del planeta.

Las actividades antropogénicas juegan un papel importante en lo que concierne al cambio climático, es así como Pérez y otros autores (2010), refieren al cambio climático como un cambio antropogénico, originado por las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), derivado de actividades humanas que datan de la revolución industrial (Pérez, y otros, 2010). De esta manera, Leyva (2009), retoma la importancia de la capa más baja de la atmósfera, la tropósfera, en la cual se desarrolla la mayor parte de la dinámica climática, conteniendo el 75% de la masa gaseosa de la Tierra (Leyva, 2009).

Por último, en el Reporte "Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad", del Grupo de Trabajo 2, del IPCC (2014), se analiza el caso sequías en la línea climática Sahel, África; misma que sufrió grandes sequías, sin embargo, existió un aumento en el régimen de lluvia en esta zona, el cual pudo ser causado por el aumento de aerosoles en la región (IPCC Working Group II, 2014).

### **1.1.2. Casos históricos**

#### **1.1.2.1. 1950-1970 Periodos fríos**

El IPCC reportó que durante estos 30 años existió una variabilidad climática en el planeta, sin embargo, ésta ha sido de las pocas ocasiones que se registró con temperaturas bajas (Pérez, y otros, 2010).

#### **1.1.2.2. 1952 Niebla en Londres**

En la capital del Reino Unido, del 5 al 9 de marzo de 1952, una espesa niebla cubrió la ciudad. Dicha niebla no permitió la libre circulación de contaminantes, tales como el SO<sub>2</sub>, el cual aumentó siete veces su concentración normal; este suceso ocasionó la muerte de aproximadamente 4 mil personas.

Consecuentemente el Reino Unido promulga las Leyes del aire limpio (1956 y 1968), las cuales prohíben el uso de combustibles generadores de humos (Domínguez, 2015).

### **1.1.2.3. 1972 Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano**

En Estocolmo, 1972, la “Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano”, consideró por primera vez, al aire como un recurso natural del planeta Tierra, y como tal, debía preservarse en beneficio de aquellas generaciones, así como de las futuras, mediante una cuidadosa planificación u ordenación (NU, 1972).

### **1.1.2.4. 1982 Erupción El Chichonal**

En 1982, el volcán “El Chichonal”, en Chiapas, México; arrojó grandes cantidades de emisiones a la atmósfera, tales como ceniza y gases, tales como aerosoles (estratosféricos) de  $H_2SO_4$ . En consecuencia, éste generó un forzamiento radiativo terrestre en la década de 1980 a 1990 (IPCC Working Group I, 1990).

### **1.1.2.5. 1987 Organización Mundial de la Salud (OMS)**

En 1987 la Organización Mundial de la Salud (OMS), da inicio a temas sobre la calidad del aire atmosférico (OMS, 2016). A inicios de la década de los 90's, la OMS estableció los primeros límites permisibles para Bióxido de Azufre ( $SO_2$ ) en las “Guías de Calidad del Aire”, mencionando también su injerencia en enfermedades respiratorias (OMS, 1999). En este tenor, la OMS recomienda a todos los países que adopten como límite máximo de Bióxido de Azufre ( $SO_2$ ), el valor de 0.008 ppm para la concentración promedio de 24 horas, y un máximo de 0.188 ppm para el promedio de diez minutos (INE, 2009 b).

### **1.1.2.6. 1988 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**

En 1988 se crea el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático), persiguiendo el objetivo de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta (IPCC, 2016).

### **1.1.2.7. 1990 Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA)**

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), surge en mayo de 1990, ésta apoya a la Unión Europea (UE), prestando asesoramiento e información a los responsables políticos en el desarrollo de estrategias a largo plazo para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera (AEMA, 2016). Dentro de las acciones sugeridas por la AEMA, se encuentra, que

desde 2009 la gasolina con Azufre está prohibida en la Unión Europea, pues los límites de contaminación y calidad establecidos por la AEMA aseguraban que el 90% de la población está expuesta a contaminantes como el SO<sub>2</sub> (López, 2016).

#### **1.1.2.8. 1991 Erupción Volcán Pinatubo, Filipinas**

En 1991, el Volcán Pinatubo, Filipinas, hace erupción y arroja a la atmósfera más de 20 millones de toneladas de Bióxido de Azufre. Dicha cantidad de este gas se propagó alrededor del planeta en dos meses; sin embargo, en los próximos dos años, durante la década de los 90's, la temperatura media terrestre descendió 0.7°C (MAC Mesoamerican and Caribbean Air Quality, 2009).

#### **1.1.2.9. 1992 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)**

En 1992 la “Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo”, popularmente conocida como “Cumbre de Río 92”, fue testigo de la firma de la “Convención Marco Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (CMNUCC); dicha convención fue la primera en establecer principios que coadyuvasen a mitigar el Cambio Climático a nivel internacional, mediante el establecimiento de parámetros de concentración para Gases Efecto Invernadero (GEI) (NU, 1992).

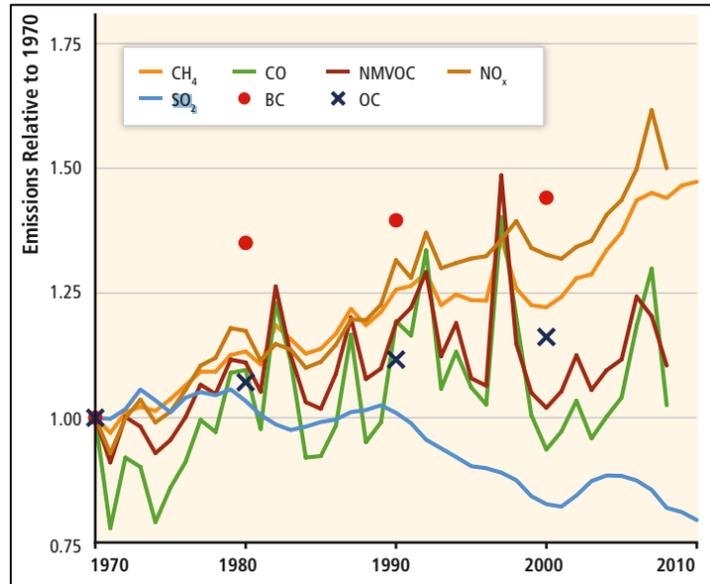
#### **1.1.2.10. 2001 Aumento en la temperatura de EUA**

Después de los atentados del 11 de septiembre de 2001, el espacio aéreo fue cerrado durante tres días, causando un descenso en las emisiones de gases contaminantes atmosféricos, producto de combustión fósil. De manera paralela, se registró un incremento en la temperatura media de 1.2 °C en todo el país; en este sentido, durante estos mismos días, las nubes que reflejaban los rayos solares disminuyeron por falta de tránsito aéreo (Benavides & León, 2007).

#### **1.1.2.11. 2014 Disminución en mediciones de SO<sub>2</sub>**

En 2014 el IPCC libera el Quinto Reporte de Evaluación para el Cambio Climático, en el cual, el Grupo de Trabajo 3, reporta, positivamente, que las mediciones para emisiones de Bióxido de Azufre han decrecido desde la década de los 70's hasta el año 2010 (ver **Figura 1.1.**).

**Figura 1.1. Emisiones de Bióxido de Azufre 1970-2010**



Fuente: (IPCC Working Group III, 2014) \*SO<sub>2</sub> Azul.

### 1.1.3. El Bióxido de Azufre en el ámbito internacional

Para este apartado, el estudio se realiza en torno a las publicaciones del IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (ver **Tabla 1.1.**), ya que ellos son quien sustenta los trabajos de la CMNUCC (IPCC, 2017).

**Tabla 1.1. Informes del IPCC para SO<sub>2</sub>**

Informe IPCC	Grupo de trabajo	Año	Información sobre SO <sub>2</sub>
<p><b>Primer Reporte de Evaluación</b></p>	<p>Grupo de Trabajo 1: Evaluación Científica del Cambio Climático</p>	<p>1990</p>	<p>Gran parte del aerosol presente en la atmósfera se debe a gases precursores como el Bióxido de Azufre y de hidrocarburos.</p> <p>Conversión fotoquímica de SO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se condensa sobre el aerosol presente en la atmósfera.</p> <p>El SO<sub>2</sub> como precursor de los aerosoles impacta en el clima, pues éstos tienen injerencia en los procesos de precipitación y en el equilibrio de radiación global.</p> <p>Cualquier predicción climática debe tomar en cuenta el comportamiento de emisiones regionales y globales, de Azufre (IPCC Working Group I, 1990).</p>
	<p>Grupo de Trabajo 2: Evaluación de Impactos del Cambio Climático</p>	<p>1990</p>	<p>Existe un flujo en aumento de sustancias como el Azufre, desde la atmósfera hacia los océanos, lo cual crea procesos de eutrofización en los mismos (IPCC Working Group II, 1990).</p>
<p><b>Informes Complementarios</b></p>	<p>Grupo de Trabajo 1: Evaluación Científica</p>	<p>1992</p>	<p>Debido a la combustión, se generan diferentes contaminantes y entre los cuales destaca el SO<sub>2</sub>, por sus grandes concentraciones en el aire.</p> <p>El Potencial de Calentamiento Global (PCG), no se considera aplicable para el NO<sub>x</sub>, CO y SO<sub>2</sub> a causa de su distribución no uniforme (IPCC Supplementary Report, 1992).</p>

<p><b>Segundo Reporte de Evaluación</b></p>	<p>Grupo de Trabajo 1: La Ciencia del Cambio Climático</p>	<p>1995</p>	<p>Los aerosoles troposféricos derivados del Bióxido de Azufre, proveniente de la combustión de productos fósiles y de la quema de biomasa, puede absorber y reflejar radiación solar.</p> <p>Los aerosoles troposféricos tienden a provocar un forzamiento radiativo negativo y un clima más frío.</p> <p>Los aerosoles poseen una vida más corta (días a semanas), que los GEI de larga vida (décadas a siglos), por lo que la concentración de los primeros responde más rápido a las emisiones.</p> <p>La contribución de aerosoles de Sulfatos es quizá, la parte más incierta del futuro forzamiento radiativo. Un control sobre las emisiones de Sulfuros reduciría de inmediato la cantidad de aerosol Sulfato.</p> <p>Las actividades humanas contribuyen a la formación de partículas de aerosol, principalmente, a través de la introducción de SO<sub>2</sub> a la atmosfera; contribuyendo así a la formación de lluvia ácida.</p> <p>El Potencial de Calentamiento Global de los gases de Azufre con corta vida, no fueron incluidos en este informe debido a que no se pueden calcular de manera certera, pues producen un forzamiento radiativo por medio de los aerosoles.</p> <p>Los dos gases más fito-tóxicos del planeta son el Ozono y el SO<sub>2</sub>.</p>
---	--	-------------	---

			<p>El SO<sub>2</sub> puede afectar el proceso de fotosíntesis y así, la captura de Carbono en el suelo.</p> <p>Los radicales OH<sup>·</sup> pueden convertir el SO<sub>2</sub> a aerosol Sulfato (IPCC Working Group I, 1995)</p>
	<p>Grupo de Trabajo 3: Dimensiones Económicas y Sociales del Cambio Climático</p>	1995	<p>Los gases que tienen injerencia en el clima son: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, Aerosoles Sulfato y CFC's.</p> <p>Los aerosoles Sulfato poseen un efecto de enfriamiento local.</p> <p>Si bien el Bióxido de Azufre no es un GEI de larga vida, es un gas que impacta, indirectamente, en el balance radiativo terrestre, ya que éste genera una baja en las temperaturas del planeta, gracias a su actuar como precursor de aerosoles Sulfato (IPCC Working Group III, 1995)</p>
<b>Tercer Reporte de Evaluación</b>	<p>Grupo de Trabajo 1: Bases Científicas</p>	2001	<p>El Bióxido de Azufre es el único gas que se contempla reduccionista en escenarios futuros del IPCC.</p> <p>Ciertos pronósticos del IPCC estipulan que alrededor del año 2050 el efecto de enfriamiento del SO<sub>2</sub> puede reducir el calentamiento causado por el aumento de concentraciones de GEI de larga vida (IPCC Working Group I, 2001).</p>
	<p>Grupo de Trabajo 3: Mitigación</p>	2001	<p>Se identifican características de mortalidad a causa de emisiones de fuentes móviles del Bióxido de Azufre (IPCC Working Group III, 2001)</p>

<b>Cuarto Reporte de Evaluación</b>	Grupo de Trabajo 1: La Base de la Ciencia Física	2007	<p>Los gases de corta vida (SO<sub>2</sub> y CO), son químicamente reactivos y desaparecen de la atmósfera por procesos naturales de oxidación o por precipitación.</p> <p>Las emisiones de Bióxido de Azufre, aunque en decremento, se centran en las zonas industriales.</p> <p>El polvo mineral puede actuar como un sumidero para gases ácidos como el SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2007)</p>
	Grupo de Trabajo 3: Mitigación del Cambio Climático	2007	<p>Las gráficas del comportamiento de los aerosoles y sus precursores (SO<sub>2</sub>, Carbono Negro y Carbono Orgánico), los cuales poseen un efecto enfriamiento, han ido en aumento.</p> <p>Las emisiones de Bióxido de Azufre son paralelas a las emisiones de combustibles fósiles, sin embargo, desde la década de los 70's, éstos han evolucionado de manera más lenta (IPCC Working Group III, 2007)</p>
<b>Quinto Reporte de Evaluación</b>	Grupo de Trabajo 1 Cambio Climático 2013: La Base de Ciencia Física.	2013	<p>Emisiones de SO<sub>2</sub>, Carbono Negro y Amoniacó causan un forzamiento negativo.</p> <p>Los sectores energético e industrial son los principales responsables de los impactos de calentamiento a largo plazo, dirigiéndolos a una refrigeración a corto plazo (principalmente a causa del SO<sub>2</sub>).</p> <p>El Bióxido de Azufre es por si solo un gas “despreciable”, pero tiene un efecto indirecto sobre el efecto invernadero, pues altera la cantidad de gases importantes (CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub>) en la</p>

			<p>atmósfera y, por ende, a la propia química de ésta.</p> <p>Si se plantea una reducción de emisiones de Bióxido de Azufre, ésta traerá, como consecuencia, un aumento en la temperatura.</p> <p>Norte América y Europa han disminuido emisiones de SO<sub>2</sub> gracias a sus políticas internas, sin embargo, las emisiones de Asia han ido en aumento las últimas tres décadas.</p> <p>Se prevé que del 2000 a 2030, las emisiones de Bióxido de Azufre disminuyan de 15% a 8% cada década.</p> <p>Se propone investigación de un nuevo gas SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2013).</p>
	<p>Grupo de Trabajo 2: Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad</p>	2014	<p>Las reducciones de emisiones de Bióxido de Azufre en Europa Central han tenido un efecto positivo en el crecimiento de bosques (IPCC Working Group II, 2014).</p>
	<p>Grupo de Trabajo 3: Cambio Climático 2014: Mitigación del Climático</p>	2014	<p>Ha existido una transición hacia una combustión más eficiente, reduciendo así, contaminantes atmosféricos, tales como el SO<sub>2</sub>.</p> <p>La reducción para mediciones de Bióxido de Azufre se debe gracias a lo estricto de políticas de control para el mismo.</p>

		<p>El aerosol Sulfato, formado del <math>\text{SO}_2</math>, tiene un efecto de enfriamiento por la interacción con las nubes.</p> <p>Las políticas reduccionistas en torno al <math>\text{CO}_2</math> también tienen injerencia, de manera secundaria, con la disminución de <math>\text{SO}_2</math>.</p> <p>El aerosol atmosférico asociado con el forzamiento radiativo, son influenciados por los gases precursores como el <math>\text{SO}_2</math>.</p> <p>El Bióxido de Azufre es la fuente antropogénica más grande de aerosol y es emitido por la combustión de hidrocarburos. Las emisiones de <math>\text{SO}_2</math> alcanzaron niveles máximos en los 70's y han decrecido desde entonces.</p> <p>Por otro lado, existen dudas para las emisiones de <math>\text{SO}_2</math> a nivel global, pues las correlaciones regionales para contenido de Azufre en los combustibles alcanzan un 35% de incertidumbre. (IPCC Working Group III, 2014)</p> <p>Los motores de combustión fósil afectan tanto emisiones de <math>\text{CO}_2</math>, como de <math>\text{SO}_2</math>.</p> <p>El sector de transporte emite forzadores climáticos como: <math>\text{SO}_2</math>, <math>\text{CO}</math>, <math>\text{NO}_x</math> y aerosoles no absorbentes (IPCC Working Group III, 2014).</p>
--	--	--

Fuente: Elaboración propia con base en (IPCC, 2017).

## **1.2. Ámbito Nacional**

### **1.2.1. Trabajos de investigadores**

En la investigación de Almazán (1999), sobre “Variabilidad Climática y Disponibilidad de Agua en el Noroeste de México”, se menciona literalmente:

*“A muchos nos gustaría pronosticar en forma precisa el clima de la Ciudad de México en diez años, bajo los efectos, por ejemplo, del aumento de los gases de efecto invernadero, pero esto aún no es posible”* (Almazán, 1999).

Asimismo, Gómez (2007), a la letra dice:

*“Es bien conocido que los valores y las proporciones del cambio de la temperatura y la precipitación en años extremos bajo el clima actual, no son semejantes a los que se espera”* (Gómez, 2007, p. 54).

Por lo cual, se puede observar que la variabilidad climática y los eventos extremos han sido considerados como una aproximación a los escenarios del cambio climático (Gómez, 2007).

### **1.2.2. Casos históricos**

#### **1.2.2.1. 1972 Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (LFPCCA-71)**

Bajo la temática de la Conferencia de Estocolmo en 1972, México expide la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (LFPCCA 1971), siendo el primer ordenamiento jurídico con disposiciones en materia de aire, agua y suelos; haciendo énfasis en la contaminación de dichos elementos (Gil, 2009).

#### **1.2.2.2. 1988 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)**

En 1988 entró en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (INE, 2000), disposición que contenía un capítulo en materia de “Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera” (LGEEPA, 2012); generando así, una importancia jerárquica en lo que respecta a calidad del aire.

Simultáneamente a la fecha antes descrita, por primera vez el Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), estuvo considerado dentro de una Norma Oficial, la NTE-CCAT-001/88, la cual establecía

que los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de Bióxido de Azufre no debían superar las 0.3 ppm (INE, 2000).

### 1.2.2.3. 1990 Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire)

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), surge en 1990, el “Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” (PICCA), el cual buscaba abatir los niveles de contaminación atmosférica, y así, lograr cierta protección a la salud de los capitalinos. Consecuentemente, surgen una serie de “Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire” o ProAire (ver **Tabla 1.1**); siendo instrumentos de gestión creados para revertir las tendencias del deterioro de la calidad del aire (Departamento del Distrito Federal, 2016).

Se puede observar en la **Tabla 1.2.** el desarrollo cronológico del “PICCA” y de los “PROAIRE”, con cuatro ejemplares desde 1990 hasta 2020.

**Tabla 1.2. Cronología de PICCA y PROAIRE**

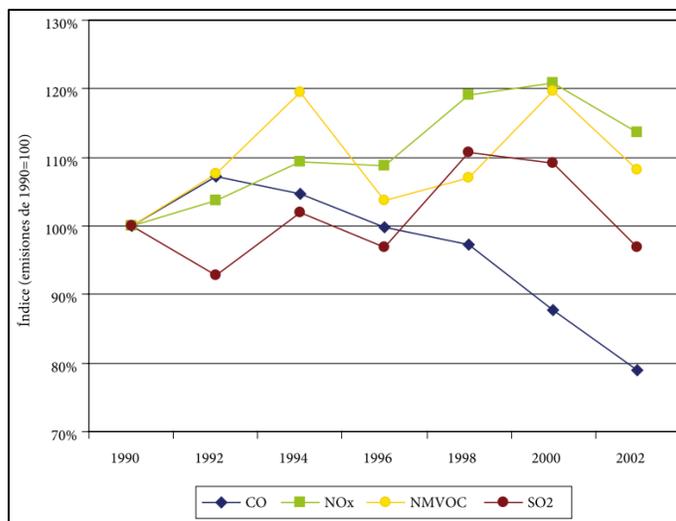
Programas	Años	Información del programa
<b>PICCA</b>	1990-1995	Se logró reducir significativamente las cantidades de Plomo, de Óxidos de Azufre, y en menor medida, las partículas suspendidas (INE, 2007).
<b>PROAIRE 1</b>	1995-2000	Demostró tener efectividad, pues se redujeron, significativamente, los niveles de Bióxido de Azufre y Monóxido de Carbono (Delgado, 2016).
<b>PROAIRE 2</b>	2002-2010	Para el material particulado PM <sub>10</sub> , se aprecia que para 2008 ya hay reducciones, aun cuando la disminución de partículas en toda la ZMVM se alcanzará hasta el año 2010 (Mugica, Figueroa, & Hernández, 2010).
<b>PROAIRE 3</b>	2011-2020	Sigue vigente.

Fuente: Elaboración propia, con base en: (Departamento del Distrito Federal, 2016).

#### 1.2.2.4. 2002 Reducción de concentración para SO<sub>2</sub>

En el “Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002” se presenta información sobre la reducción en mediciones de concentraciones para el Bióxido de Azufre, la cual baja un 3% a nivel nacional, para el año 2002 (ver **Figura 1.2.**) (SEMARNAT, 2002).

**Figura 1.2. Emisiones de GEI Indirectos México (1990-2002)**



Fuente: (SEMARNAT, 2002) \*SO<sub>2</sub>: Bióxido de Azufre (rojo).

#### 1.2.2.5. 2008 Redes de Monitoreo para Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

De acuerdo con el “Cuarto Almanaque Datos y Tendencias de la Calidad del Aire en 20 Ciudades Mexicanas (2000-2009)”, del INE, en México había 14 redes de monitoreo destinadas a la medición de Bióxido de Azufre (INE, 2009 b).

En la **Tabla 1.3.** se enlistan las 14 redes de monitoreo estatales, mostrando su nomenclatura y ubicación de acuerdo con el INE (2009)b e INE (2007):

**Tabla 1.3. Redes de Monitoreo para medición de SO<sub>2</sub> en México**

<b>Nombre de la red (Zona Metropolitana o Ciudad)</b>	<b>Nombre oficial</b>	<b>Ubicación</b>
<b>1. León</b>	León	León; Guanajuato
<b>2. Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla</b>	REMA o Puebla	Puebla; Puebla
<b>3. Red de Monitoreo Atmosférico de Tijuana</b>	Tijuana	Tijuana; Baja California
<b>4. San Luis Potosí</b>	San Luis Potosí	San Luis Potosí; San Luis Potosí
<b>5. Irapuato</b>	Irapuato	Irapuato; Guanajuato
<b>6. Salamanca</b>	Salamanca	Salamanca; Guanajuato
<b>7. Celaya</b>	Celaya	Celaya; Guanajuato
<b>8. Silao</b>	Silao	Silao; Guanajuato
<b>9. Rosarito</b>	Rosarito	Rosarito; Baja California
<b>10. Zona Metropolitana de Guadalajara</b>	ZMG	Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan; Jalisco
<b>11. Zona Metropolitana del Valle de México</b>	ZMVM	16 delegaciones; Ciudad de México 59 municipios; Estado de México 1 municipio; Hidalgo

<b>12. Área Metropolitana de Monterrey</b>	AMM	Apodaca, García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y Santa Catarina; Nuevo León
<b>13. Zona Metropolitana del Valle de Toluca</b>	ZMVT	Lerma, Metepec, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec; Estado de México
<b>14. Zona Metropolitana de Mexicali</b>	ZM-Mexicali	Mexicali; Baja California

Fuente: Elaboración propia, con base en: (INE, 2009 b) e (INE, 2007).

En 2009, sólo 7 de ellas tuvieron información suficiente para obtener un diagnóstico de la exposición de la población ante el SO<sub>2</sub> y así lograr una clasificación según su grado de contaminación por SO<sub>2</sub> (ver **Tabla 1.4.**); sin embargo, la ZMVT no obtuvo datos suficientes para poder realizar el diagnóstico ni obtener un grado en la clasificación (INE, 2009 b).

**Tabla 1.4. Clasificación de las ciudades según su grado de contaminación por SO<sub>2</sub>**

Zona metropolitana/ciudad	Clasificación
Salamanca	1°
Irapuato	2°
León	3°
ZMVM	4°
AMM	5°
ZMG	6°
Silao	7°

Fuente: (INE, 2009 b).

#### **1.2.2.6. 2012 Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)**

Otro caso fue en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), donde García y otros autores (2012), realizaron un trabajo sobre Inversiones Térmicas (IT), en el mismo se concluye que, en la ZMG, aunque existe diferencia climática y topográfica, se comienzan a ver riesgos ambientales similares a los de la Ciudad de México, por contaminantes atmosféricos e inversiones térmicas (García, Ulloa, Arias, & Pérez, 2012).

#### **1.2.2.7. Actual: Límites recomendados por la OMS**

La OMS recomienda a todos los países que adopten como límite máximo de Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), el valor de 0.008 ppm para la concentración promedio de 24 horas, y un máximo de 0.188 ppm para el promedio de diez minutos. Sin embargo, México es uno de los países que aún no ha establecido el límite para la medición de diez minutos (INE, 2009 b), ya que la normatividad oficial mexicana, únicamente considera promedio de 24 horas y promedio anual (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

Por otro lado, la publicación en “El Economista”, expone que la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), anunció que trabaja en una modificación en los niveles de Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) de la Norma Oficial Mexicana (NOM-022-SSA1-2010) debido a que existen datos que muestran que la sustancia está entre los elementos que pueden generar problemas a la salud, alertó el comisionado federal de esta entidad (El Economista, 2015).

### 1.2.3. El Bióxido de Azufre en el ámbito nacional

**Tabla 1.5. El SO<sub>2</sub> en México**

<b>Acción</b>	<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Información sobre SO<sub>2</sub></b>
<b>Instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico en el SIMAT</b>	CAME	1986	Instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, la cual mide el SO <sub>2</sub> (CAME, 2010).
<b>Las 21 Acciones para Reducir la Contaminación del Aire y las 100 Medidas Necesarias</b>	CAME	1986-1987	Plantean la importancia de tratar temas del combustóleo con alto contenido de Azufre (CAME, 2010).
<b>Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002</b>	SEMARNAT INECC	1990-2002	Con base en la CMNUCC, el inventario considera al Bióxido de Azufre como un Gas de Efecto Invernadero Indirecto (SEMARNAT, 2002).
<b>NOM-022-SSA1-1993</b>	Secretaría de Salud	1994	Entrada en vigor de la norma, la cual establece un límite máximo permisible de 0.13 ppm para concentraciones promedio en 24 horas (Secretaría de Salud, 1994).
<b>RAMA-ZMVT con el SINAICA</b>	SINAICA	2004	Incorporación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico-ZMVT al “Sistema Nacional de Información sobre Calidad del Aire” (SINAICA, 2017).

<p><b>PICCA- Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en el Valle de México 2002-2010</b></p>	<p>CAME</p>	<p>2010</p>	<p>Se plantean esfuerzos para reducir emisiones de Bióxido de Azufre, por medio del mejoramiento de la calidad de los combustibles y de la reducción de emisiones por parte de las fuentes móviles (CAME, 2010).</p>
<p><b>NOM-022-SSA1- 2010</b></p>	<p>Secretaría de Salud</p>	<p>2010</p>	<p>Derogación de la NOM-022-SSA1-1993.  Entrada en vigor de la NOM-022-SSA1-2010, la cual disminuye el límite máximo permisible para concentraciones promedio en 24 horas, pasando de las 0.13 ppm a las 0.110 ppm (NOM-022-SSA1-2010, 2010).</p>
<p><b>NOM-156- SEMARNAT- 2012</b></p>	<p>SEMARNAT</p>	<p>2012</p>	<p>Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Entre otras cosas, esta norma define a los contaminantes criterio como: Aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo de concentración en el ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población, siendo: O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, Pb y partículas suspendidas totales, así como las PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (NOM-156-SEMARNAT-2012, 2012).  Para el límite máximo permisible del SO<sub>2</sub>, esta norma se utiliza la NOM-022-SSA1-2010 (NOM-156-SEMARNAT-2012, 2012).</p>

Fuente: Elaboración propia, con base en: (CAME, 2010), (NOM-022-SSA1-2010, 2010), (NOM-156-SEMARNAT-2012, 2012), (Secretaría de Salud, 1994), (SEMARNAT, 2002) y (SINAICA, 2017).

## 1.3. Ámbito Estatal y Regional

### 1.3.1. Casos históricos

#### 1.3.1.1. Década de los 90's Menores temperaturas en Toluca

Desde 1991 hasta 1997 la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (ZMCT) reportó las temperaturas más bajas desde 1960, con temperaturas medias anuales de entre 11°C y 11.3°C, con la temperatura más baja registrada en 1993 y 1997 (Pérez, y otros, 2010).

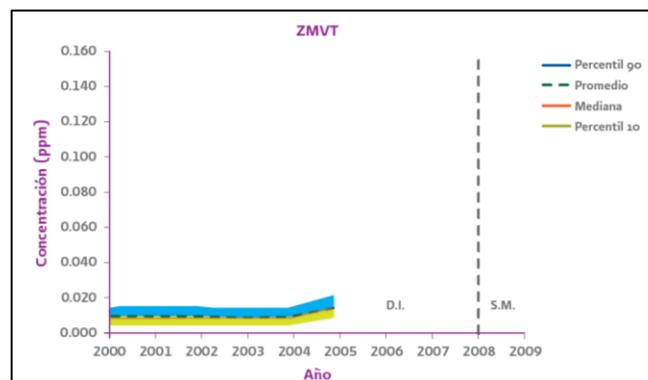
#### 1.3.1.2. 2005 Islas de calor

Pérez y otros autores (2010), mencionan que en 2005 la temperatura en la ZMVT fue irregular, teniendo dos Islas de Calor, la primera ubicada en el centro de la ciudad y la segunda en la zona del Aeropuerto Internacional de Toluca (AICT), ambas con los valores térmicos más altos (15°C); remarcando así, que existe una concurrencia entre las zonas con mayor infraestructura urbana con las actividades humanas de la zona (Pérez, y otros, 2010).

#### 1.3.1.3. 2005 Interrupción de datos de SO<sub>2</sub>

De acuerdo al INE, (2009)b, en su “Cuarto Almanaque de datos tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)”, a la ZMVT no le fue posible distinguir una tendencia de concentraciones diarias de Bióxidos de Azufre (SO<sub>2</sub>) de 2000 a 2008, pues el comportamiento del mismo se dejó de apreciar en 2005 por falta de datos; sin embargo, aún con esto, se logró distinguir un incremento en las concentraciones anuales del mismo de 2004 a 2005 (ver **Figura 1.3.**) (INE, 2009 b).

**Figura 1.3. Tendencias de las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la ZMVT**



Fuente: (INE, 2009 b). \*D.I.: Datos insuficientes. \*S.M.: Sin Medición.

#### 1.3.1.4. 2009 Falta de información en indicadores para la ZMVT

En 2009, los indicadores, no sólo de SO<sub>2</sub>, sino que también de CO y NO<sub>2</sub> se calcularon con la información que se reportó únicamente del primer semestre del año, por lo que los resultados pudieron no fueron presentados (INE, 2009).

Por otro lado, de acuerdo con el INE (2009), se menciona que, aunque existió esta falta de información, el SO<sub>2</sub> no significó un problema para la calidad del aire en el Valle de Toluca (ver **Tabla 1.6.**) (INE, 2009).

**Tabla 1.6. Diagnóstico de la calidad del aire en la ZMVT. Indicadores relacionados con el cumplimiento de las NOM, 2008-2009**

Año	Contaminante	Norma	Evaluación del cumplimiento de la NOM			Número de días en los que se rebasó el valor de la norma
			Estaciones que no cumplieron con el criterio de suficiencia de información	Estaciones donde no se cumplió con la NOM	Diagnóstico <sup>a</sup> para la ZMVT	
2009	PM <sub>10</sub>	24 horas	AP, CE y SM	OX, SC	No se cumplió	154
		Anual		OX, SC y SL	No se cumplió	
2008	O <sub>3</sub>	1 hora	-	CE, MT, SC y SL	No se cumplió	4 <sup>b</sup>
		Anual	CE, MT, SC y SL	-	D.I.	
2008	CO <sup>c</sup>	8 horas	-	-	Se cumplió	0
2008	NO <sub>2</sub> <sup>c</sup>	1 hora	-	-	Se cumplió	0
2008	SO <sub>2</sub> <sup>c</sup>	24 horas	-	-	Se cumplió	0
		Anual	-	-	Se cumplió	

Fuente: (INE, 2009). \*D.I.: Datos insuficientes.

## **Epílogo**

El estudio del Bióxido de Azufre como contaminante atmosférico ha ido evolucionando de manera paulatina, creciendo conforme a las demandas socioeconómicas, ya sea en materia de salud, de calidad de aire o bien, para entender los subproductos derivados de las actividades industriales de transformación manufacturera.

Si bien los antecedentes presentados son de poco más de 60 años, queda en claro que el SO<sub>2</sub> ha estado presente en acontecimientos históricos, tanto de índole mundial, como nacional. En ambos casos, el SO<sub>2</sub> ha sido actor clave en circunstancias de mala calidad del aire o bien, en alteraciones de los parámetros meteorológicos en ciertas regiones del mundo.

Gracias al estudio constante que les compete a las instituciones en materia de calidad de aire y contaminación atmosférica, tales como el IPCC, el INECC o la RAMA-ZMVT, es posible observar que el SO<sub>2</sub> es un gas con un comportamiento que no se conoce en su totalidad, debido a diferentes características peculiares que el contaminante posee, tales como: su corta estadía en la atmósfera, su característica como precursor de aerosoles Sulfato, su interacción con otros GEI, ya sea de vida corta o larga e incluso, las reacciones que éste tiene ante el efecto invernadero en meses invernales.

# **Capítulo 2**

**Marco**

**Conceptual**

# Marco Conceptual

En el segundo capítulo o marco conceptual, se pretende desarrollar, ahondar y contrastar temas en torno a las dos vertientes de la presente investigación, mismas que son: concentración de Bióxido de Azufre en el aire y regímenes de temperatura.

La estructura de este capítulo se subdivide en nueve secciones: 1) contaminación ambiental, 2) contaminación atmosférica, 3) contaminantes del aire, 4) aerosoles, 5) Óxidos de Azufre, 6) tiempo atmosférico, 7) radiación solar, 8) Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA-ZMVT) y 9) normatividad en torno al SO<sub>2</sub>.

Gracias a esta estructura es posible analizar temas tales como: Gases de Efecto Invernadero de larga y corta vida, comportamiento del Bióxido de Azufre, tiempo atmosférico e incluso, el propio diseño de la RAMA-ZMVT. Estos temas arrojan información clave para poder comprender la individualidad de cada vertiente del tema de estudio, así como su propia interacción.

## 2.1. Contaminación ambiental

A lo largo de los años, las civilizaciones humanas se han ido desarrollando, trayendo consigo una serie de afecciones inevitables para con la naturaleza (Martínez L. , 2003).

Esta situación no representó un problema en los primeros años de existencia, pues los impactos generados se limitaban de una manera local; sin embargo, en la actualidad, con el crecimiento poblacional y el rápido desarrollo tecnológico, dichos impactos se acrecentaron para generar problemas más significativos (Martínez L. , 2003).

La definición que proporciona la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a la letra dice:

*“Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico”* (SEMARNAT, 2012).

Por su parte, en la investigación de Ruíz y Hernández (2006), la contaminación ambiental se define como:

“La introducción a través de cualquier mecanismo, natural o antropogénico, de sustancias químicas al medio natural, ocasionando problemas en seres vivos, materiales e incluso, en los propios ecosistemas” (Ruíz & Hernández, 2006, p. 13).

De esta manera, las similitudes se encuentran en la presencia o introducción de sustancias químicas, ya sea de manera natural o antropogénica, que causen alguna alteración ecológica (Ruíz & Hernández, 2006) y (SEMARNAT, 2012).

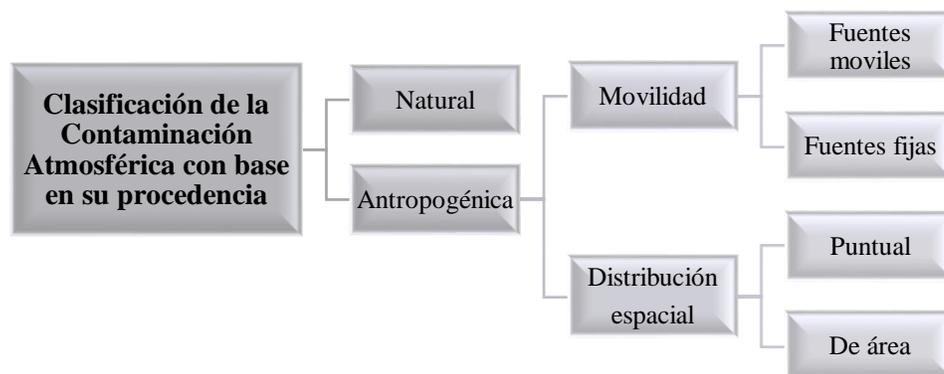
## 2.2. Contaminación atmosférica

La contaminación del aire siempre ha estado presente en el planeta, pues los fenómenos naturales, tales como las erupciones volcánicas, han favorecido dicha polución desde antes de la aparición del hombre. Al hablar de contaminación atmosférica en la actualidad, se habla entonces de una sustancia que perjudica al medio ambiente o bien, a la salud humana y que tiene injerencia dentro de las capas atmosféricas Tropósfera y Estratósfera (OMS, 2010).

Martínez (2003), define a la contaminación atmosférica como el resultado de la alteración de la composición química de la atmósfera al introducir en ella sustancias distintas de las que la forman, o bien, al modificar las cantidades en las que se hallan sus componentes (Martínez L. , 2003).

De acuerdo con la procedencia de la contaminación atmosférica, ésta se divide en dos tipos: antropogénica y natural (ver **Figura 2.1**).

**Figura 2.1. Clasificación con base en la procedencia de la contaminación atmosférica**



Fuente: Elaboración propia, con base en (Domínguez, 2015).

A continuación, se desglosa la clasificación de la contaminación atmosférica, de acuerdo con la procedencia de esta:

### **2.2.1. Contaminación atmosférica de procedencia natural**

Contaminación producto de la dinámica natural del planeta, incluyendo fenómenos meteorológicos, geológicos y/o metabólicos, por ejemplo: incendios forestales, actividad volcánica o emisiones de procesos metabólicos vegetativos (Domínguez, 2015).

### **2.2.2. Contaminación atmosférica de procedencia antropogénica**

Este tipo de contaminación es aquella que se genera como producto de las actividades humanas, tales como: combustión de vehículos de autotransporte, actividad industrial, combustión energética, entre otras (García, 2014).

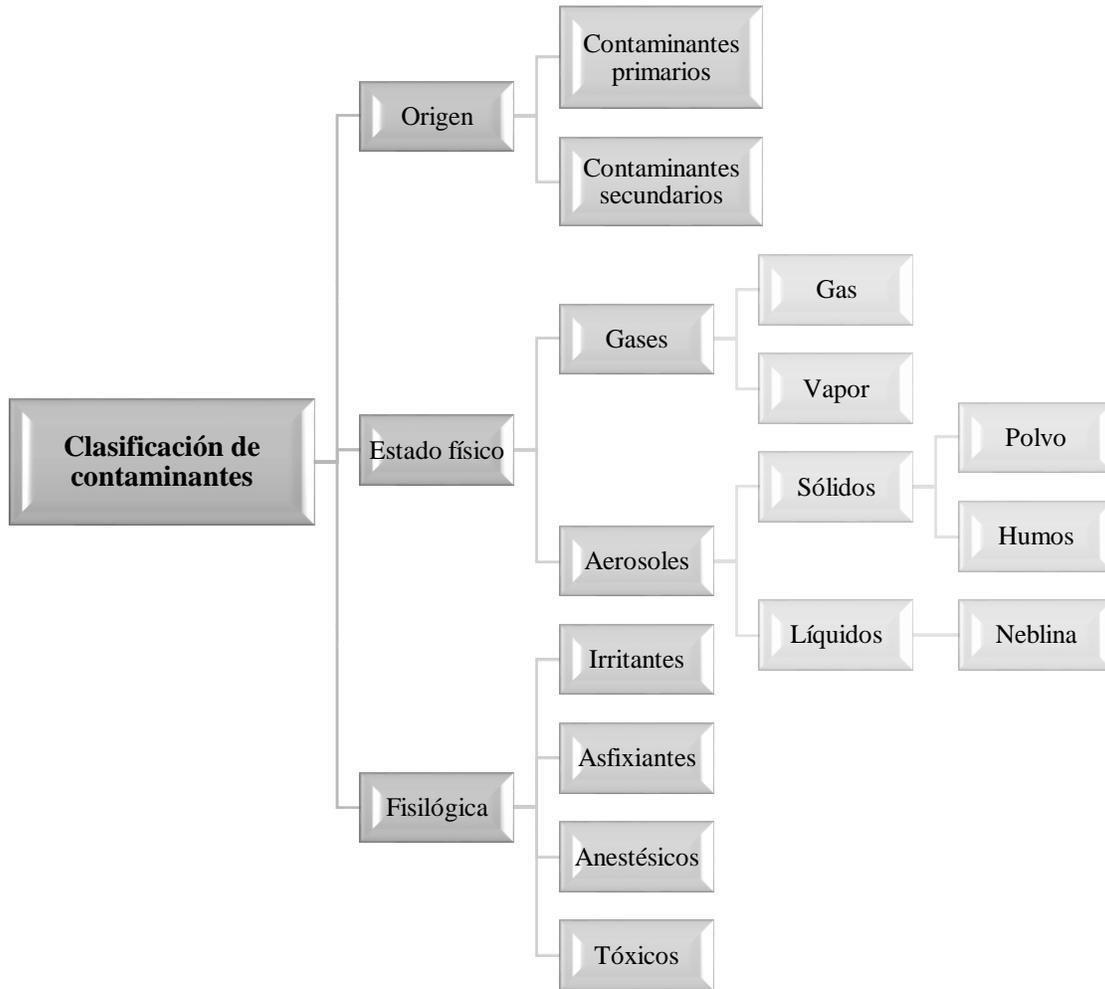
De acuerdo con Domínguez (2015) y García (2014), la misma contaminación antropogénica se clasifica con base en: movilidad y distribución espacial.

- **Movilidad**
  - **Fuentes móviles:** Instalación establecida en un lugar que genere bienes y/o servicios y que, a su vez, produzca contaminación atmosférica.
  - **Fuentes fijas:** Equipos y maquinaria no fija que generen contaminación atmosférica (García, 2014).
  
- **Distribución espacial**
  - **Puntuales:** Fuentes cuya totalidad de emisiones se reportan a nivel sectorial (farmacéutica, metalúrgica, etc.).
  - **De área:** Las contribuciones particulares no pueden cuantificarse (hogares, establecimientos, etc.) (García, 2014).

## 2.3. Contaminantes del aire

Por su parte, los contaminantes del aire se clasifican según su emisión a la atmósfera (ver Figura 2.2).

Figura 2.2. Clasificación de contaminantes



Fuente: Elaboración propia, con base en: (Domínguez, 2015) y (García, 2014).

A continuación, se desglosa la clasificación de los contaminantes, con base en su origen, estado físico y fisiología:

### 2.3.1. Clasificación por su origen

- **Contaminantes primarios:** Este grupo de contaminantes se denominan así, al existir en la atmósfera sin haber experimentado ninguna alteración en su composición, ya sea antropogénica y/o natural. Entre estos se encuentran el Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y el Monóxido de Carbono (CO) (Cebrián, 2006).

- **Contaminantes secundarios:** Este tipo de contaminantes son producto de una reacción química con los contaminantes primarios y/o secundarios, o con algunos componentes de la atmósfera. Entre estos figuran el Ozono (O<sub>3</sub>) y los Sulfatos (Cebrián, 2006).

La interacción de estos contaminantes genera diferentes factores de igual o mayor relevancia para la alteración de la atmósfera. Por ejemplo: la generación de smog es consecuencia de la reacción fotoquímica de los Óxidos de Nitrógeno, mismo se considera como un Gas de Efecto Invernadero (GEI) y contribuye en la formación de la lluvia ácida (Domínguez, 2015).

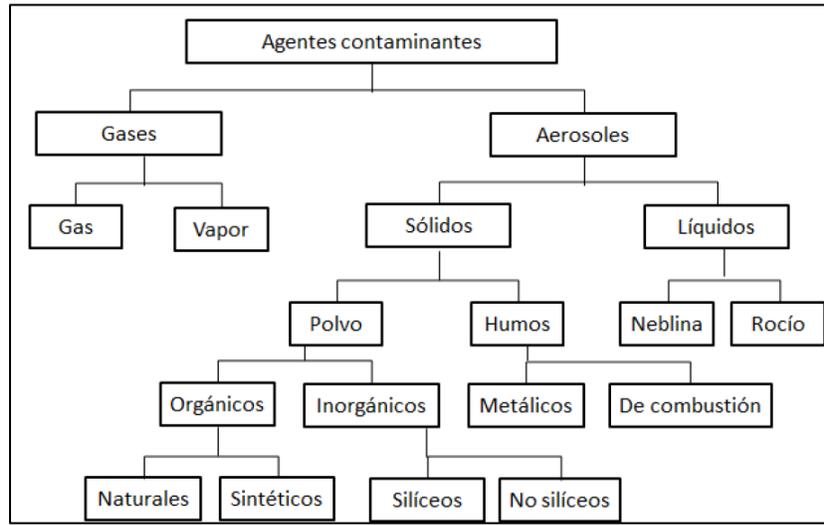
### 2.3.2. Clasificación fisiológica

- **Irritantes:** Sustancias corrosivas con afectación en las mucosas. Su afección se mide por concentración más que por tiempo de exposición.
- **Asfixiantes:** Sustancias no necesariamente tóxicas, sin embargo, con elevadas concentraciones desplazan al Oxígeno.
- **Anestésicos:** Pueden causar insensibilidad y/o inconciencia.
- **Tóxicos:** Tiene consecuencias sobre algún órgano o incluso, sobre un sistema del cuerpo humano (Domínguez, 2015).

### 2.3.3. Clasificación por su estado físico

Los contaminantes atmosféricos pueden encontrarse en diferentes estados físicos, tales como los que muestra la **Figura 2.3**.

**Figura 2.3. Clasificación de contaminantes atmosféricos por estado físico**



Fuente: (Domínguez, 2015).

A continuación, se desglosa la clasificación de los contaminantes atmosféricos con base en su estado físico:

- **Gases**
  - **Gas:** Sustancias con un punto de ebullición menor a la temperatura ambiente (Domínguez, 2015).
  - **Vapor:** Partículas formadas por condensación, sublimación o por una reacción química predominante (García, 2014).
- **Aerosoles**
  - **Aerosoles:** Soluciones de sólidos o líquidos en fase gaseosa o bien, dispersiones coloidales. Los aerosoles que dispersan sólidos lo hacen en forma de humos o polvos (partículas sólidas) (Domínguez, 2015).
  - **Polvos:** Partículas sólidas de un mayor tamaño que un coloide, capaces de estar en suspensión temporal en el aire (García, 2014).
  - **Humos:** Los humos emanan de las sustancias cuando son sometidas a ciertos procesos, por ejemplo: calentamiento (Comisión Europea, 2012).
  - **Neblina:** La neblina es un hidrometeoro, que consiste en la suspensión de muy pequeñas gotas de agua en la atmósfera o de partículas higroscópicas húmedas. Es común en una atmósfera fría y cabe mencionar que, es posible inducir artificialmente la neblina con el uso de aerosoles (EcuRed, 2018).

#### 2.3.4. Contaminantes criterio

Con base en las afecciones fisiológicas que poseen algunos de los contaminantes atmosféricos, algunos de ellos se han normado con límites máximos permisibles y se han establecido guías para los mismos, mediante recomendaciones para los niveles de exposición; manejándose todo en diferentes países del mundo. Estas sustancias adquieren el nombre de “Contaminantes criterio” (Domínguez, 2015), y son:

- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>)
- Partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>)
- Plomo (Pb) (OMS, 2010).

#### 2.3.5. Gases Efecto Invernadero (GEI)

Caballero y otros autores (2007), definen literalmente al efecto invernadero de la siguiente manera:

*“El efecto invernadero es un mecanismo por el cual los Gases de Efecto Invernadero (GEI), en la atmósfera de la Tierra conservan e incrementan la temperatura de la superficie del planeta y ha existido desde que la Tierra tiene atmósfera (hace unos 4,000 millones de años)”* (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007).

Por su parte, el IPCC considera dos tipos de GEI, basándose en la estabilidad química de los gases. A los primeros se les asigna el nombre de “Gases de Efecto Invernadero de Larga Vida (GEILV)”, mismos que abarcan gases tales como: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, entre otros; por otro lado, a los segundos se les denomina como “Gases de Efecto Invernadero de Corta Vida”, caso específico del SO<sub>2</sub> y del CO (IPCC, 2007 b).

La mayoría de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), se producen de manera natural, sin embargo, el aumento de concentraciones en la atmósfera durante los últimos años se debe,

principalmente, a actividades humanas; sin mencionar que existen algunos GEI que son resultado único del desempeño de dichas actividades antropogénicas (IPCC, 2007 b).

En este tenor, el “Informe del Grupo de Trabajo I - Base de las Ciencias Físicas”, del IPCC (2007), menciona que las variaciones en el clima se determinan, entre otras cosas, gracias al cambio en la concentración atmosférica de estos GEI, durante un periodo de tiempo determinado (IPCC, 2007 b).

#### **2.3.5.1. Gases Efecto Invernadero de Larga Vida (GEILV)**

Los GEILV son químicamente estables, lo cual favorece su permanencia en la atmósfera terrestre por décadas, e incluso por siglos; consecuentemente, sus emisiones tienden a ejercer una mayor influencia en el clima a largo plazo (IPCC, 2007 b).

Gracias a su larga vida, estos gases se mezclan en la atmósfera más rápido de lo que se llegan a eliminar de la misma (IPCC, 2007 b).

Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: CO<sub>2</sub>, Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) y Halocarbonos (grupo de gases que contienen Flúor, Cloro o Bromo). Las concentraciones de GEI en la atmósfera aumentan cuando las emisiones son superiores en magnitud a los procesos de detracción (IPCC, 2007).

#### **2.3.5.2. Gases de corta vida**

Los gases de corta vida son químicamente reactivos y se presiden por procesos naturales de oxidación en la atmósfera, logrando así, su eliminación en la superficie o por precipitaciones. Consecuentemente, las concentraciones de estos gases llegan a ser muy variables (IPCC, 2007 b).

En este contexto, algunos gases que forman parte de esta lista son: El Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y el Monóxido de Carbono (CO) (IPCC, 2007 b).

### **2.3.5.3. Gases de Efecto Invernadero (GEI) regulados por la Convención Mundial de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)**

La Convención Mundial de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto (2005), hacen hincapié en los siguientes seis principales GEI:

- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>) (CMNUCC, 2007).

### **2.3.6. Contaminación atmosférica en la ZMVT**

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), integrada por 22 municipios, presenta índices importantes de contaminación atmosférica.

El Gobierno del Estado de México opera la “Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca” (RAMA-ZMVT), con el fin de medir los principales contaminantes atmosféricos, mismos que se enlistan a continuación:

- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Partículas suspendidas fracción respirable (PM<sub>10</sub>)
- Partículas suspendidas fracción respirable (PM<sub>2.5</sub>) (RAMA-ZMVT, 2014).

Cabe mencionar que algunos de los gases anteriormente enlistados, difieren de los principales GEI, establecidos por la CMNUCC; tal es el caso del Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), gas que se describirá posteriormente.

## 2.4. Aerosoles

De manera estricta, se denomina aerosol a la mezcla heterogénea formada por partículas (sólidas o líquidas) y el gas en el que se encuentran suspendidas, en otras palabras, también se les denominan partículas (Santiago, 2013).

Los aerosoles atmosféricos o troposféricos son las partículas y las pequeñas gotitas líquidas suspendidas en el aire (Préndez, Ortíz, Zolezzi, Campos, & Apablaza, 1991). De igual manera, los aerosoles sirven como núcleos de condensación, para una posterior presencia de lluvia (IPCC Working Group I, 2013).

### 2.4.1. Propiedades generales

- **Tamaño:** El rango de tamaños de los aerosoles va desde 0.001 micrómetros hasta más de 100 micrómetros (visibles) (Préndez, Ortíz, Zolezzi, Campos, & Apablaza, 1991).
- **Tiempo de vida:** El tiempo de vida de partículas de aerosoles troposféricos es de días a semanas y de aerosoles estratosféricos es de años (IPCC Supplementary Report, 1992).
- **Precursores:** Gases tales como el SO<sub>2</sub> e Hidrocarburos (IPCC Working Group I, 1990).
- **Remoción:** Las partículas de aerosol que contribuyen a los efectos radiativos se remueven gracias a procesos de precipitación (IPCC Supplementary Report, 1992).
- **Comportamiento con radiación de onda larga:** La opacidad de los aerosoles disminuye (IPCC Supplementary Report, 1992).
- **Mayor concentración (presencia):** Los aerosoles se concentran en capas bajas de la troposfera, donde la temperatura, que además tiene injerencia en las emisiones, es prácticamente igual a la temperatura de la superficie terrestre (IPCC Supplementary Report, 1992).

### 2.4.2. Origen

Los orígenes de los aerosoles son: continentales (polvos), marinos (evaporación de sales marinas) y fuentes antropogénicas (Préndez, Ortíz, Zolezzi, Campos, & Apablaza, 1991).

Gran parte de los aerosoles deriva de la conversión de gas a partículas fotoquímica que involucra la oxidación de  $\text{SO}_2$  y otros gases Azufre, a Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Posterior a la formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y gracias su baja presión de vapor, inmediatamente se condensa con aerosoles ya existente o formando nuevos (IPCC Working Group I, 1990).

Otro proceso de formación Sulfato, se da en las gotas de las nubes, toda vez que éstas se evaporan y dejan al Sulfato en su fase aerosol. Una gran proporción de los aerosoles que tienen influencia en los procesos nubosos y en el balance radiativo terrestre, son de origen Sulfato, producto de actividades económicas. En este sentido, se entiende que existirá mayor presencia de aerosoles en zonas industriales (IPCC Working Group I, 1990).

### 2.4.3. Composición

Los aerosoles antropogénicos se constituyen de:

- **Partículas sólidas (humos):** Formados por la combustión de fuentes fijas o móviles.
- **Partículas menores a 0.2 micrómetros:** Producto de reacciones fotoquímicas entre  $\text{NO}_x$  e hidrocarburos, ambos siendo generadores de “smog” fotoquímico (Préndez, Ortíz, Zolezzi, Campos, & Apablaza, 1991).

### 2.4.4. Fuentes

- Actividad industrial, con mayor presencia en el hemisferio Norte, donde su impacto sobre los aerosoles Sulfato es mayor (IPCC Supplementary Report, 1992).
- Quema de biomasa (IPCC Working Group II, 2014).
- Erupciones volcánicas (IPCC Supplementary Report, 1992).
- Importación y exportación en masa de alimentos, materiales y otros (IPCC Working Group II, 2014).

### 2.4.5. Efectos de los aerosoles

#### Directos

- Los aerosoles reducen la irradiación solar en regiones industriales.
- Pueden reducir el haz de luz solar.
- Generan un aumento en el albedo de los océanos y un descenso en el mismo, pero en las ciudades.

## **Indirectos**

- El tamaño, el número y la composición química de las partículas de aerosoles, determinan el número de gotas en las nubes.
- Por medio de la modificación física de las nubes, los aerosoles afectan las propiedades radiativas de éstas.
- A mayor cantidad de polución por aerosoles, mayor será la capacidad reflectiva de las nubes.
- Un aumento en las partículas de aerosol generaría un incremento en el albedo terrestre y, probablemente, contrarrestar los efectos de algunos GEI (IPCC Working Group I, 1990).

### **2.4.6. Aerosoles y el albedo**

El albedo del planeta se puede ver alterado por cambios en la cantidad de partículas de aerosol en la atmósfera (IPCC Working Group I, 2013).

En la estratósfera se concentra la mayor cantidad de aerosoles provenientes de erupciones volcánicas; y en la tropósfera, éstos pueden provenir de manera natural o antropogénica (IPCC Working Group I, 1990).

Por su parte, las partículas de aerosol tienen el potencial para alterar las características ópticas, físicas y radiativas de las nubes; cambiando así, sus propiedades reflectivas y, posiblemente, su persistencia (IPCC Supplementary Report, 1992).

Las nubes desempeñan un papel importante, ya que, si hubiese un mayor número de nubes como núcleos de condensación, ya sea naturales o antropogénicos, el albedo terrestre cambiaría, en este sentido, se entiende que los aerosoles pueden aumentar o disminuir el albedo del planeta (IPCC Working Group I, 1990).

### **2.4.7. Forzamiento radiativo**

Cuando se produce un aumento de la temperatura, se dice que el forzamiento radiativo es positivo y cuando ocurre lo contrario, por ejemplo, el efecto provocado por algunos aerosoles como el polvo, el SO<sub>2</sub> y otros, se plantea que el forzamiento radiativo es negativo (Fernández, 2016).

El clima en la Tierra está determinado por cambios en el forzamiento radiativo y algunos de los agentes con actuar en el clima son: GEI, radiación solar, aerosoles y albedo (IPCC Working Group I, 1990).

Los aerosoles desempeñan un papel importante en el balance atmosférico de radiación (Santiago, 2013), ya que éstos absorben y dispersan radiación solar y terrestre; afectando así, el balance radiativo terrestre (Préndez, Ortíz, Zolezzi, Campos, & Apablaza, 1991), y consecuentemente al propio sistema climático (IPCC Working Group I, 1990).

A los aerosoles se les atribuye la capacidad de generar un enfriamiento en la superficie terrestre, caso contrario a lo que generan los GEI de larga vida; sin embargo, el papel que ejercen los gases de calentamiento parece ser dominante (Martínez & Fernández, 2004).

El incremento de las emisiones de aerosoles en la atmósfera, principalmente de emisiones Sulfato, tiene dos resultados y son: 1) Efecto directo de los aerosoles en la dispersión y absorción de la radiación y 2) Efecto indirecto sobre la composición de las nubes, generando así, una mayor reflexión nubosa. En conjunto, ambos resultan un enfriamiento regional (IPCC Working Group I, 1990).

Por sus propiedades físicas, los aerosoles juegan un papel fundamental como núcleos higroscópicos de condensación sobre los cuales se van a formar las gotas que componen las nubes (Martínez & Rodríguez, 2000).

El relacionar los GEI, el efecto invernadero, gases precursores de GEI y aerosoles, es la base para conocer los impactos que éstos tienen en el balance radiativo (IPCC Supplementary Report, 1992).

#### **2.4.8. Aerosoles y el Efecto Invernadero**

Los principales componentes del Efecto Invernadero son: 1) Gases atmosféricos, 2) Nubes y 3) Aerosoles (IPCC Working Group I, 1990), ya que estos tres elementos son capaces de absorber radiación terrestre (IPCC Working Group II, 2014).

Al proporcionar mayor superficie de condensación y una química heterogénea en la atmósfera, los aerosoles pueden tener influencia en el balance químico de los gases atmosféricos. En este sentido, se debe considerar su impacto en el balance de Ozono (O<sub>3</sub>) en

las capas bajas de la estratósfera y consecuentemente, en el propio efecto invernadero (IPCC Supplementary Report, 1992).

#### **2.4.9. Aerosoles en el Cambio Climático**

Si bien el Cambio Climático apunta a un calentamiento, los aerosoles pueden estar teniendo influencia sobre éste, ya que gracias a su actuar sobre las nubes, éstos pueden causar una baja en el calentamiento terrestre esperado (IPCC Supplementary Report, 1992).

El efecto de enfriamiento de los aerosoles, producto de las emisiones Sulfato puede tener un impacto significativo sobre el calentamiento causado por el efecto invernadero, ya que los aerosoles producto de emisiones Sulfato, ya sea industriales o volcánicas, pueden absorber y reflejar radiación; causando así, un efecto de enfriamiento en el clima. No obstante, cualquier cambio en el balance radiativo terrestre, traerá como consecuencia una alteración en la temperatura atmosférica y oceánica; generando así, cambios en el clima (IPCC Working Group I, 2013).

En escenarios hipotéticos, si existiese una reducción en el uso de combustibles fósiles, los GEI de larga vida continuarían con un forzamiento debido a que las emisiones de CO<sub>2</sub> continuaría creciendo; caso contrario a los aerosoles, los cuales, al haber dicha reducción, éstos continuarían constantes con su forzamiento. No obstante, no es posible considerar que los aerosoles compensen el forzamiento de los GEI de larga vida, ya que su distribución espacial es heterogénea (IPCC Supplementary Report, 1992).

Por último, si bien el Cambio Climático apunta a temperaturas variantes, no se debe perder de vista los cambios que también ocurren en los regímenes de lluvia. En este sentido, la interacción nubes-aerosoles puede también tener un actuar en la presencia de tormentas y precipitaciones intensas en el planeta (IPCC Working Group I, 2013).

#### **2.4.10. Aerosoles Sulfato**

Las emisiones de gases azufrosos afectan el balance radiativo, ya que éstos se transforman a aerosoles Sulfato que causan: 1) Dispersión de luz solar hacia el espacio y reduciendo así, la radiación que llega al planeta, 2) Aumentan la cantidad de nubes como núcleos de condensación y consecuentemente alteran las características físicas de las nubes; y 3) Afectan la composición química de la atmósfera (IPCC Working Group I, 2013).

## 2.5. Óxidos de Azufre

Los gases de la familia de los Óxidos de Azufre son incoloros y de olor irritante; estos se forman al quemar combustibles con Azufre, y tienden a disolverse fácilmente en agua (INE, 2007).

Los Óxidos de Azufre son un grupo de gases compuestos por Trióxido de Azufre ( $\text{SO}_3$ ) y Dióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ). El más común es el  $\text{SO}_2$ , ya que el  $\text{SO}_3$  es solo un intermediario en la formación del Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007), proceso que más adelante se describirá.

### 2.5.1. Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ )

El Bióxido de Azufre es un gas incoloro, no inflamable, de olor irritante y no explosivo. Su vida media en la atmósfera es de dos a cuatro días, para que posterior a esto, el 50% de éste se vuelva a depositar en la superficie terrestre y el resto reaccione para la formación de diferentes compuestos químicos (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

En materia normativa, el Bióxido de Azufre es considerado un contaminante criterio en función del efecto demostrado que ejerce sobre la salud (RAMA-ZMVT, 2014); sin embargo, éste no funge como un GEI de larga vida por su falta de injerencia sobre el clima terrestre, debido a su corta vida atmosférica (IPCC, 2007 b).

En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se describen las clasificaciones que posee el  $\text{SO}_2$

**Tabla 2.1. Clasificación de Bióxido de Azufre**

Criterio	$\text{SO}_2$	Descripción
Origen	Natural	Producto de la actividad volcánica, incendios forestales.
	Antropogénico	Subproducto de la combustión de autotransportes, así como de la actividad industrial y energética.

Fuente: Elaboración propia, con base en (Domínguez, 2015).

**Tabla 2.2. Clasificación antropogénica del Bióxido de Azufre**

<b>Criterio</b>	<b>Origen del SO<sub>2</sub></b>	<b>Caso específico SO<sub>2</sub></b>
<b>Movilidad</b>	<b>Fuentes fijas:</b> Instalaciones fijas que desarrollen bienes o servicios y que generan contaminación atmosférica.	Centrales energéticas
	<b>Fuente móviles:</b> Instalaciones no fijas que generan contaminación atmosférica por el desarrollo de sus actividades.	Medios de transporte (Aviones, automóviles, transporte público, etc.).

Fuente: Elaboración propia, con base en (Domínguez, 2015).

**Tabla 2.3. Clasificación del SO<sub>2</sub> como contaminante**

<b>Clasificación</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>Descripción</b>
<b>Origen</b>	Contaminantes primarios	Contaminantes que se encuentran en el mismo estado en el que fueron emitidos a la atmósfera.
<b>Estado físico</b>	Gas	Sustancia con un punto de ebullición menor a la temperatura atmosférica. En este caso -10°C (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).
<b>Fisiológica</b>	Irritante	Sustancia corrosiva que actúa sobre las mucosas.

Fuente: Elaboración propia, con base en (Domínguez, 2015) y (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

### 2.5.1.1. Reacciones del SO<sub>2</sub>

El Bióxido de Azufre es un gas incoloro y muy soluble en agua, que puede oxidarse para formar Trióxidos de Azufre (SO<sub>3</sub>) y iones Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>), los cuales forman sales inorgánicas y Ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), siendo éstos los componentes importantes de las partículas secundarias (INE, 2009 b).

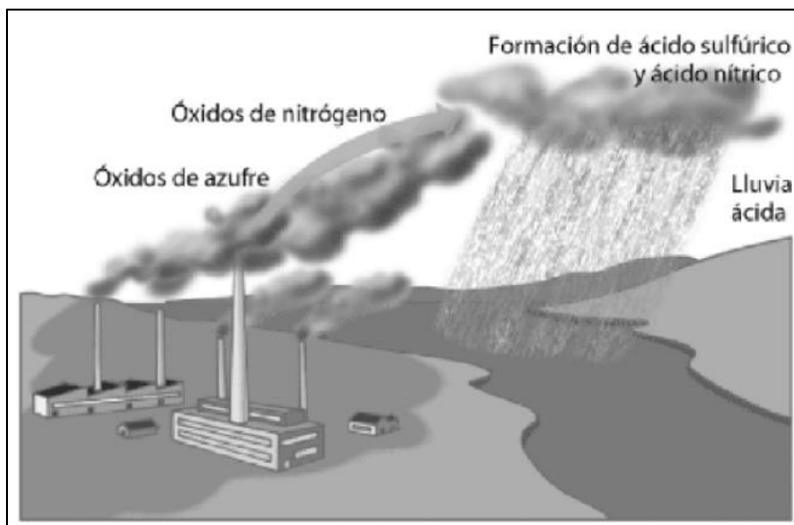
- **Formación de Ácido Sulfúrico:**  $\text{SO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac})$
- **Formación de Trióxido de Azufre:**  $\text{SO}_2(\text{g}) + \text{NO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SO}_3(\text{g}) + \text{NO}(\text{g})$  (Textos Científicos, 2006).

En este tenor, cabe mencionar que, el SO<sub>2</sub> es un actor importante en la formación de partículas finas en la atmósfera de lluvia ácida (INE, 2007), así como de aerosoles (RETC- Registro de Emisiones y Transeferencias de Contaminantes- Chile, 2017).

#### 2.5.1.1.1. Formación de lluvia ácida

La lluvia ácida se forma a partir de la reacción química de sus precursores: Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y la humedad atmosférica; de manera consecuente, los Ácidos Sulfúrico y Nítrico formados, se manifiestan en una depositación seca (jardines, monumentos, etc.) o húmeda (niebla), además de contener otros gases disueltos como NO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> (Puppo, 2012).

**Figura 2.4. Formación de lluvia ácida**



Fuente: (Puppo, 2012)

El  $\text{SO}_2$  es higroscópico, es decir, cuando está en la atmósfera reacciona con la humedad, forma aerosoles de ácido sulfúrico y sulfuroso que luego forman parte de la llamada lluvia ácida (Puppo, 2012).

- **Efectos ecosistémicos de la lluvia ácida:** La lluvia ácida puede afectar prácticamente a todos los ecosistemas, ya que ésta genera acidificación de los cuerpos de agua, afecciones en las redes tróficas, lixiviación, nutrimentos del suelo, alteraciones fotosintéticas en las hojas de las plantas y árboles, entre otros (Puppo, 2012).
- **Efectos en la salud de la lluvia ácida:** Los efectos en la salud de la lluvia ácida se deben a las micropartículas que ingresan a las vías respiratorias, causando enfermedades como: asma, bronquitis, neumonía, por mencionar algunas (EPA, 2017).

#### **2.5.1.1.2. Formación de aerosoles Sulfato**

Las partículas de aerosol o núcleos de condensación de nubes son un factor fundamental en la formación de nubes, pues gracias a ellas ocurre la condensación.

En primer lugar, al ocurrir la evaporación del estado líquido del agua, las moléculas  $\text{H}_2\text{O}$  se separan de manera significativa; en este punto, las partículas de aerosol actúan como factor conglomerante para unir nuevamente a las moléculas de agua, formando así, las nubes (CAICE Media, 2015).

Por su parte, la formación de aerosoles Sulfato se da durante de oxidación en la atmósfera del Bióxido de Azufre, misma que forma Sulfatos. En presencia de humedad el  $\text{SO}_2$  forma ácidos en forma de aerosoles y consecuentemente, lluvia ácida (UJA Esp., 2005).

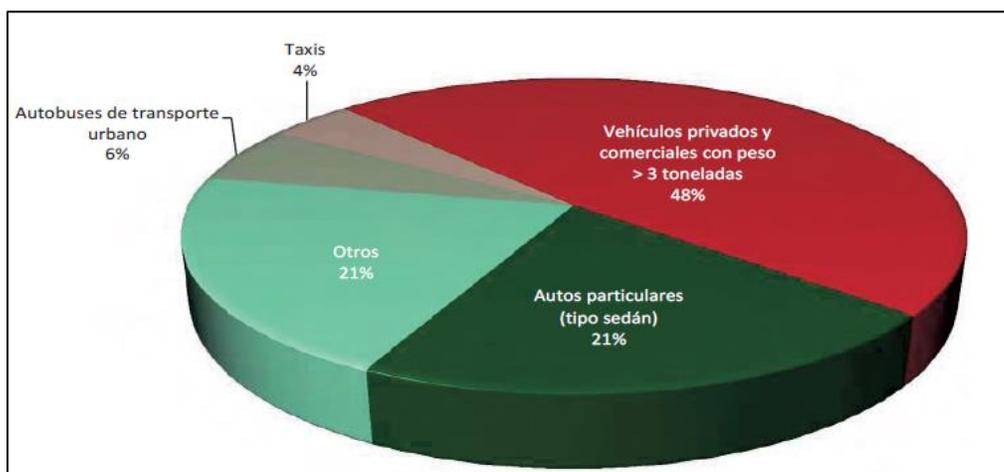
#### **2.5.1.2. Fuentes de emisión de $\text{SO}_2$**

En conjunto, más de la mitad de las emisiones de Óxidos de Azufre que llegan a la atmósfera se producen por actividades humanas, sobre todo por la combustión de carbón, petróleo y por la industria metalurgia; todo ello debido a que el Azufre reacciona con el Oxígeno en el proceso de combustión, formando así,  $\text{SO}_2$  (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007). En México algunas de las actividades económicas que más participan en la formación de Bióxido de Azufre son: Industria energética, manufacturera y de construcción (SEMARNAT, 2002).

En este tenor, Romero y otros autores (2004), sugieren que los vehículos de automotor se encuentran en un estado técnico insatisfactorio por el largo tiempo que llevan en circulación y por la falta de mantenimiento, lo cual genera un parque vehicular altamente contaminante; mismo que aumenta, potencialmente, la contaminación del aire (Romero, y otros, 2004).

En la **Figura 2.5.** se muestra, que de acuerdo con el “ProAire de la ZMVT 2012-2017”, los vehículos privados son los que más contribuyen con las emisiones de SO<sub>2</sub>.

**Figura 2.5. Contribución (%) de SO<sub>2</sub> por fuentes antropogénicas móviles**



Fuente: (GEM, 2012).

En el mismo rango de importancia se encuentra la densidad poblacional, ya que esta también juega un papel importante en cuanto a la cantidad de Bióxido de Azufre en el aire, pues de acuerdo con la investigación de actuaria de Ballesteros & Rotter (2014), la densidad de población puede explicar cerca de un 35% los niveles de SO<sub>2</sub> en el aire, toda vez que a mayor número de habitantes, mayor el uso de autotransportes, mayor actividad industrial y consecuentemente, mayor cantidad de emisiones de SO<sub>2</sub> (Ballesteros & Rotter, 2014).

Por su parte, la naturaleza contribuye a la emisión de este gas, toda vez que el Bióxido de Azufre se encuentra sobre todo en las proximidades de los volcanes, pues las erupciones pueden liberar cantidades importantes del mismo (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007). Esta actividad también libera pequeñas cantidades de Trióxido de Azufre, Azufre elemental, Sulfuro de Hidrógeno y Sulfatos en forma de partículas. Sin embargo, la mayor fuente natural es la oxidación del material orgánico que contiene Azufre (RAMA-ZMVT, 2014).

### **2.5.1.3. Impacto en la salud del SO<sub>2</sub>**

Casi todo el aire contiene componentes potencialmente dañinos para la salud humana. Además de los componentes naturales como Oxígeno e Hidrogeno, el aire que respiramos contiene Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Hidrocarburos Poli aromáticos (PAHs), Monóxido de Carbono (CO), partículas sólidas microscópicas y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y, dependiendo del clima, Ozono (O<sub>3</sub>), conocido, en algunos casos, como smog; siendo estos los contaminantes más comunes, pues hay cientos más (Levy, Ropeik, & Cray, 2002).

Los óxidos de Azufre son solubles en agua, por lo que pueden formar ácidos agresivos; algunos escenarios con cierta humedad en el cuerpo humano son: la humedad de mucosa conjuntival y de la mucosa respiratoria. Gracias a ello, al penetrar los óxidos de Azufre en los pulmones, estos se convierten en agentes irritantes (RAMA-ZMVT, 2014).

La exposición al SO<sub>2</sub> se ha asociado con daños respiratorios temporales en niños y adultos; presentándose en diferentes casos; por ejemplo, las personas asmáticas que realizan actividades al aire libre con exposición aguda a magnitudes elevadas de SO<sub>2</sub>, pueden presentar reducción de la función pulmonar, estado que se puede acompañar de síntomas como estornudos, opresión en el pecho y falta de aire (INE, 2007).

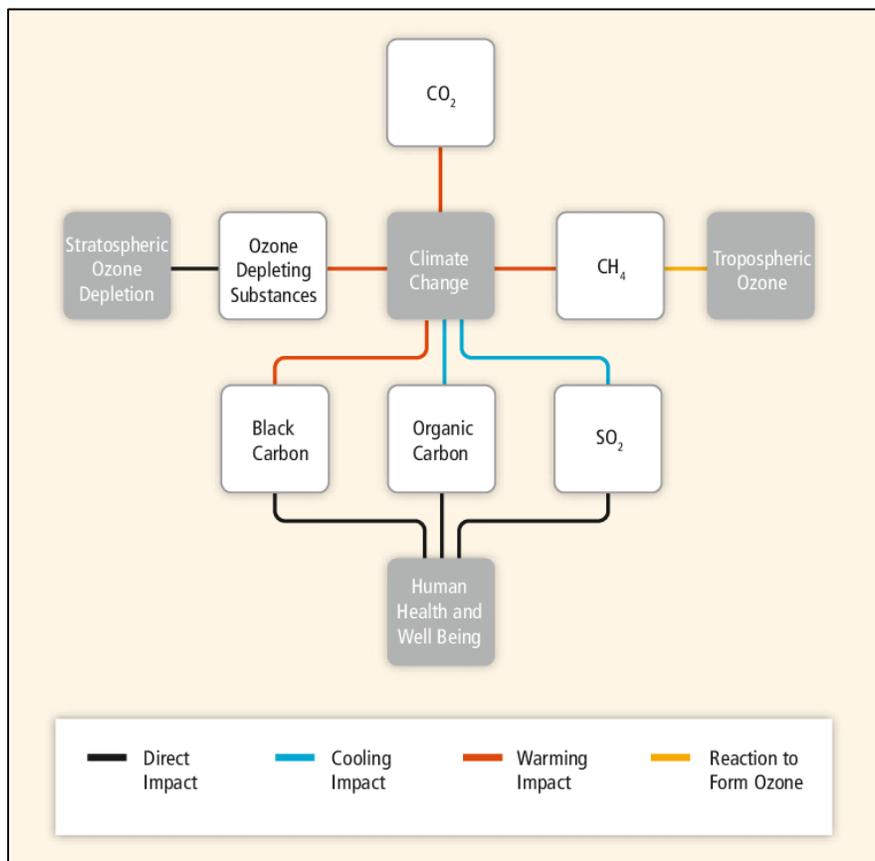
En este sentido, los efectos que también se han asociado a exposiciones crónicas de SO<sub>2</sub> aunadas a concentraciones elevadas de partículas en el ambiente, incluyen enfermedades respiratorias, alteraciones en las defensas pulmonares y agravación de enfermedades cardiovasculares preexistentes (INE, 2007).

El Bióxido de Azufre es causante de enfermedades respiratorias como bronco- constricción, bronquitis, traqueítis e incluso la muerte. Si bien dichos padecimientos dependen de cada individuo, aún existe un sector de la población más vulnerable que el resto, siendo los infantes y adultos mayores, sin mencionar a las personas con enfermedades pulmonares y asmáticas (RAMA-ZMVT, 2014).

Por último, otra de las principales afecciones que se dan por parte de este gas, es en el clima y calidad del aire, pues como se ha descrito anteriormente, este contaminante no sólo merma la calidad del aire que se respira, sino que también desempeña un papel importante como

precursor de aerosoles con efectos de enfriamiento en la temperatura terrestre (ver **Figura 2.6.**) (IPCC Working Group III, 2014).

**Figura 2.6. Causas y efectos de GEI y de Contaminantes Criterio**



Fuente: (IPCC Working Group III, 2014).

#### **2.5.1.4. Comportamiento anual y diario del SO<sub>2</sub>**

El Bióxido de Azufre es un gas que presenta dos tipos de comportamientos, que de acuerdo con el INE (2009), se pueden identificar como: comportamiento anual y comportamiento diario; mismos que hacen referencia al número de cambios que este contaminante presenta en las mediciones hechas por las autoridades correspondientes (INE, 2009 b).

- **Comportamiento anual**

Con base en el “Instituto Nacional de Ecología” (2009), el comportamiento anual del Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) se observa con concentraciones mensuales más elevadas entre los meses

más fríos de las zonas donde se realizan las mediciones; en el caso específico de la ZMVT, con los registros más elevados entre noviembre y enero de 2009 (INE, 2009 b).

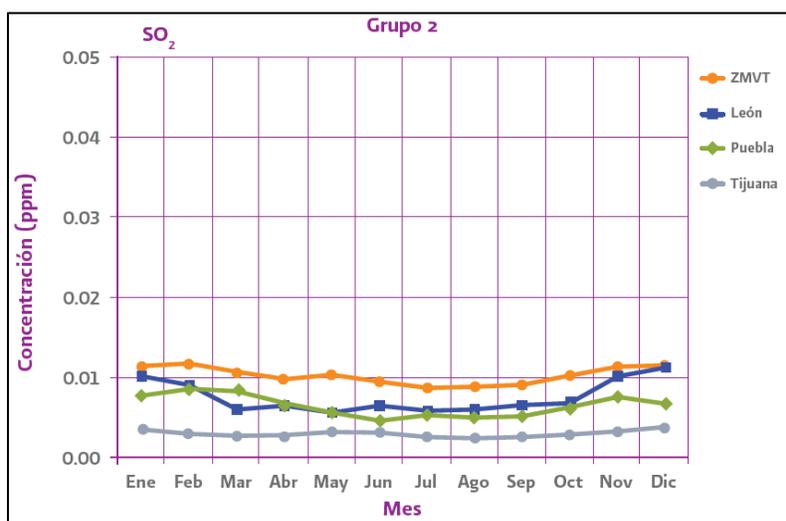
Por otro lado, aun dentro de la ZMVT, las mediciones más bajas reportadas en el “Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2008-2009)”, se establecieron en los meses de verano (INE, 2009 b).

De esta manera, se plantea la posibilidad de que, en los meses de mayo a agosto, existan condiciones meteorológicas que promuevan la depositación húmeda de dicho contaminante (INE, 2009 b).

Para obtener una idea más clara de lo que esto significa, a continuación, se presenta una gráfica (Figura 2.7.), elaborada por el INE con la información de cuatro zonas metropolitanas con estaciones de medición para este contaminante.

Si bien las zonas de Tijuana y Puebla cuentan con una mayor densidad de población, rebasando el millón de habitantes y, por su parte, la ZMVT únicamente oscila los 800 mil habitantes; es preciso mencionar que las concentraciones de SO<sub>2</sub> responden ante diversos factores, entre los cuales figuran no sólo la densidad poblacional, sino que también se habla de actividad industrial, parque vehicular, dinámica de vientos, época estacional, entre otros (SEMARNAT, 2002).

**Figura 2.7. Comportamiento anual del SO<sub>2</sub> en cuatro zonas metropolitanas de México en 2008**



Fuente: (INE, 2009 b).

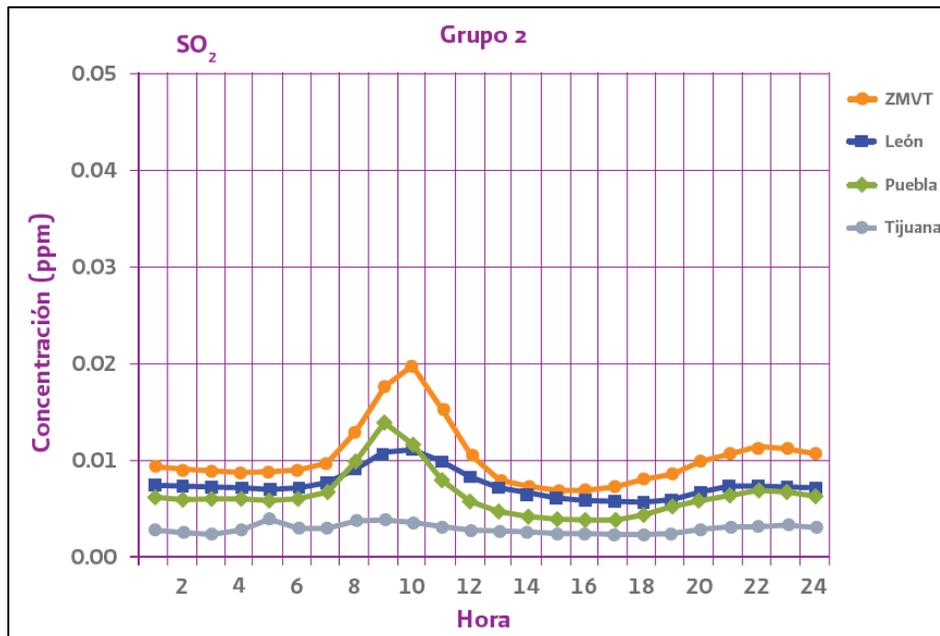
- **Comportamiento diario**

El comportamiento diario de este contaminante se refiere a los cambios de concentración que éste experimente en un periodo de 24 horas. El comportamiento diario del SO<sub>2</sub>, tiene dos vertientes y son: unimodal y bimodal (INE, 2009 b).

- Unimodal: Es aquel comportamiento que no presenta picos en las gráficas de concentración gracias a niveles constantes de medición diarios (INE, 2009 b).
- Bimodal: Se refiere al cambio de concentración diaria de SO<sub>2</sub> por diversos factores, intensificándose entre las 9:00 y 12:00 horas (INE, 2009 b).

En la siguiente gráfica (**Figura 2.8.**) se observa un comportamiento bimodal del gas en la ZMVT (naranja). Esto debido a que la principal fuente SO<sub>2</sub> es la actividad industrial y el uso de combustóleo y diésel, se podría esperar que este comportamiento obedezca patrones de operación de las principales industrias de la ciudad (INE, 2009 b).

**Figura 2.8. Comportamiento diario del SO<sub>2</sub> en cuatro zonas metropolitanas de México en 2008**



Fuente: (INE, 2009 b).

#### **2.5.1.5. Característica de enfriamiento del SO<sub>2</sub>**

El Bióxido de Azufre es considerado una contaminante atmosférica pero igual contribuye al enfriamiento global (MAC Mesoamerican and Caribbean Air Quality, 2009).

Al haber formación de aerosoles ya sean de Sulfato o no, la radiación solar se refleja y así no permite el Sol a calentar la Tierra. Por ejemplo, en 1991 el volcán Pinatubo, en Filipinas, hizo erupción y eyectó aproximadamente 20 millones toneladas de SO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por un lado, la calidad de aire se mermó de manera significativa y, por otro lado, la temperatura promedio, del planeta de forma coincidente descendió 0.7 °C durante toda la década de los 90's (MAC Mesoamerican and Caribbean Air Quality, 2009).

#### **2.5.1.6. Medidas de control para SO<sub>2</sub>**

A lo largo de los años, se han llevado a cabo medidas que, si bien no mitigan las concentraciones de SO<sub>2</sub>, sí ayudan a controlarlas y consecuentemente, a reducirlas.

Tal es el caso de la eliminación de Plomo (Pb) de la gasolina y la reducción de contenido de Azufre en la misma, pues gracias a ambas, los niveles de concentración para Bióxido de Azufre han ido a la baja y en el caso de México, han respetado la normatividad vigente de cada época (SEMARNAT, 2012).

Por otro lado, la introducción al mercado de gasolina oxigenada y reformulada, así como la implementación de límites de emisión más estrictos o bien, la propia adopción de tecnologías vehiculares eficientes, han coadyuvado a que los límites del SO<sub>2</sub> no sobrepasen las normas a nivel nacional (SEMARNAT, 2012).

## 2.6. El tiempo atmosférico y el clima

Fuentes (2012), define a los meteoros como los fenómenos ocurridos en la atmósfera y a su vez los clasifica con base en sus partículas constitutivas y en los procesos físicos que intervienen en su propia formación, dando como resultado meteoros aéreos, acuosos, luminosos, eléctricos y de polvo (Fuentes, 2012).

En este tenor, se considera al tiempo meteorológico o atmosférico, como aquel estado o característica física de la atmósfera, dada en un tiempo (corto) y lugar determinado; incluyendo también, su distribución espacial y evolución temporal en un periodo de horas o días (Primo, 2015).

Por otro lado, el clima se define como el estado promedio del tiempo meteorológico y, en estricto sentido, como una estadística del tiempo atmosférico, con base en valores medios y de variabilidad de magnitudes que abarquen meses o, incluso, miles de años; dichas magnitudes, frecuentemente son: temperatura, precipitación o viento (Primo, 2015).

Es así como se puede determinar que un área llega a presentar diversos tiempos meteorológicos y a su vez, mantiene un mismo tipo de clima (OMM, 2016).

El clima terrestre depende del balance radiativo en la atmósfera, mismo que se generan gracias a radiación solar, abundancia de gases con efecto radiativo, nubes y aerosoles (IPCC Working Group II, 2014).

### 2.6.1. Sistema climático

El sistema climático está constituido por cinco componentes principales:

- **Atmósfera:** Capa de aire formada por diferentes estratos, donde la temperatura varía conforme la altura. En esta misma capa, se presenta la absorción y distribución de la radiación terrestre.
- **Hidrosfera:** Capa constituida por agua líquida y donde se almacena gran cantidad de energía solar.
- **Criósfera:** Representada por regiones de hielo.
- **Biósfera:** Capa constituida por seres vivos. En ella se presenta el albedo terrestre y la evaporación de agua de suelos.

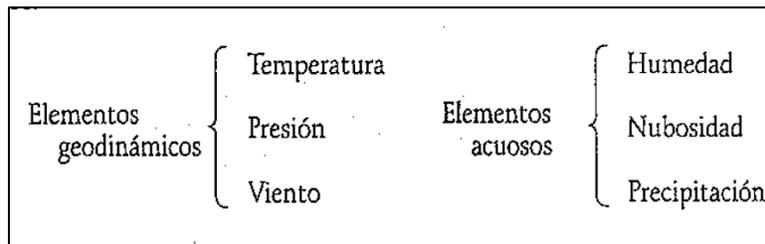
- **Litósfera:** Capa donde se presenta el intercambio de materia y energía con la atmósfera, respondiendo como suelos, sedimentos, rocas y polvos; los últimos, con un papel importante en la absorción de radiación solar (Primo, 2015).

### 2.6.2. Elementos del Clima Terrestre

Los elementos del tiempo y del clima son aquellas características físicas de la atmósfera y que, gracias al conocimiento de sus valores y variaciones, es posible determinar el tiempo o el clima (Gariola, 2015).

De acuerdo con Ayllón (2003), (**Figura 2.9.**) se muestran los elementos que constituyen clima, clasificados en dos: geodinámicos y acuosos.

**Figura 2.9. Elementos que constituyen al clima**



Fuente: (Ayllón, 2003).

A continuación, se desglosan algunos de los elementos:

#### 2.6.2.1. Temperatura

Dentro de la atmósfera, se encuentra la tropósfera, capa donde no sólo se encuentran las nubes, sino que también es en donde se da a lugar a la ocurrencia de fenómenos climáticos, tales como: lluvias, vientos, cambios de temperatura, entre otros. Cabe mencionar que, en esta misma capa, la temperatura disminuye conforme aumenta la altitud (Sarochar, 2013).

La temperatura de la superficie terrestre está determinada por el calor almacenado, mismo que depende del flujo de calor; en este sentido, se habla de “radiación solar” o de entrada y, de “radiación terrestre” o de salida; aunado a ello, existen mecanismos tales como la evaporación y el escurrimiento superficial, que, de igual manera, intervienen en dichos procesos. Cabe mencionar que la distribución del calor terrestre, se da gracias a la circulación atmosférica y oceánica (Fuentes, 2012).

La temperatura del aire se define como el grado sensible de calor, debiéndose a la radiación de onda larga, principalmente. En este sentido, el calor puede transmitirse por medio de: continentes (conducción), océanos y atmósfera (conducción, convección, turbulencia, radiación) (Ayllón, 2003).

- **Conducción:** Transferencia de calor con cuerpos en contacto.
- **Convección:** Partículas caldeadas se dilatan, pierden densidad y ascienden; mientras que las partículas frías descienden, provocando corrientes de ascenso y descenso.
- **Turbulencia:** Movimiento desordenado de partículas.
- **Radiación:** Transferencia de calor sin que existe contacto (Ayllón, 2003).

La temperatura es entonces la unidad de medida de la cantidad de calor (Ayllón, 2003).

La temperatura, entonces, puede variar en función de los siguientes factores:

- **De acuerdo con la cantidad de energía solar recibida**, variando también de acuerdo con el día, estación del año y latitud.
- **De acuerdo con la distribución de la radiación solar** y así, en función de la altura.
- **Variación diurna:** Cambio de temperatura producido por el cambio entre el día y la noche, a causa de la rotación terrestre.
- **Variación con la latitud:** El cambio de temperatura se da gracias al ángulo de incidencia de los rayos solares.
- **Variación estacional:** La temperatura varía de acuerdo con el ángulo de incidencia para la recepción de rayos solares, diferente en cada hemisferio, a causa también, de las estaciones del año.
- **Variación con los tipos de superficie terrestre:** Al establecer diferentes capacidades de absorción y emisión de radiación entre los tipos de suelos, se entiende que en las zonas áridas o con escasez de vegetación, los cambios abruptos de temperatura se dan con mayor facilidad.
- **Variaciones con la altura:** Gracias al gradiente vertical de temperatura se entiende que la temperatura decrece en función del aumento de la altura. Sin embargo, al caso contrario, donde la temperatura aumenta con la altura, se le conoce como inversión térmica o de temperatura.

- **Temperatura máxima:** Es la mayor temperatura registrada en el día, normalmente presente entre las 14:00 y 16:00 horas.
- **Temperatura mínima:** Es el registro con la menor temperatura del día, presente entre las 6:00 y 8:00 horas (Sarochar, 2013).

#### **2.6.2.1.1. Oscilación térmica**

Durante los meses cálidos, el número de horas de insolación es mayor, generando así, una mayor cantidad de calor recibida. A diferencia de los meses de invierno, cuando los rayos solares inciden con menor inclinación, se recibe menos insolación en la Tierra, causando un enfriamiento invernal. No obstante, este fenómeno se presenta con menos fuerza en las zonas de elevadas altitudes (Ayllón, 2003).

Por otro lado, las nubes también participan en este proceso, toda vez que absorben más radiación infrarroja y retienen más radiación terrestre. En conjunto, ambos causan un fuerte enfriamiento nocturno en noches despejadas y por ello, en zonas con nubosidad constante, la oscilación térmica es menor que en zonas con poca nubosidad o con aire sucio (Ayllón, 2003).

#### **2.6.2.1.2. Inversiones de temperatura**

Las inversiones térmicas son producto de la irradiación nocturna de la Tierra; antes de la salida del Sol, en la capa cercana al suelo, la temperatura aumenta hacia arriba y consecuentemente, en las capas inferiores la temperatura disminuye (Sarochar, 2013).

Las inversiones térmicas pueden tener lugar en las capas de la atmósfera que estén en contacto con la superficie terrestre, a menudo en noches despejadas, con vientos suaves y frías (Sarochar, 2013).

En este sentido, es fácil observar que en las zonas urbanas se producen problemas de índole de calidad del aire, ya que los contaminantes se concentran en las capas inferiores y se agudiza durante el invierno (Sarochar, 2013).

#### **2.6.2.1.3. Forzamiento radiativo**

La temperatura del planeta se regula mediante la radiación absorbida y emitida. Al existir un exceso en la radiación absorbida, la temperatura tiende a aumentar.

Cuanto más fuerte sea el aumento de emisiones radiativas terrestres, menores serán las temperaturas de la Tierra para mantener un equilibrio radiativo (Benavides & León, 2007).

Los cambios en el balance radiativo, incluyendo aquellos que engloban los aumentos en las concentraciones de los GEI, alteran el ciclo hidrológico, lo que se manifiesta en cambios de la temperatura terrestre (Martínez & Fernández, 2004).

#### **2.6.2.1.4. Actores hídricos y temperatura**

Los parámetros clave para determinar la temperatura de la Tierra son: Emisividad (grado en el que la atmosfera emite radiación) y el albedo de la superficie terrestre (relación entre radiación solar recibida y reflejada). La temperatura de la Tierra aumenta si la emisividad aumenta; caso contrario al albedo, toda vez que, si éste aumenta, la temperatura de la Tierra disminuye (Martínez & Fernández, 2004).

En este tenor, las nubes pueden generar tanto un calentamiento como un enfriamiento en el planeta; el primero se debe a que éstas son capaces de atrapar el calor debajo de ellas y el segundo, se da gracias al albedo que las nubes poseen (Benavides & León, 2007).

De manera específica el efecto de las nubes en la radiación terrestre se da de dos maneras: 1) las nubes bajas reflejan la luz solar de vuelta al espacio y 2) las nubes elevadas atrapan el calor que irradia el planeta. De esta manera, se entiende que la temperatura del aire cercano al suelo puede estar propensa a un aumento (Benavides & León, 2007).

#### **2.6.2.1.5. Efecto invernadero y temperatura**

En las urbes los GEI, tanto de corta y larga vida, así como los aerosoles, se acumulan de manera mucho más significativa, ambos con efectos térmicos contrapuestos, sin embargo, cuando los primeros predominan las islas de calor aparecen (Benavides & León, 2007).

En este tenor, en el artículo de Córdova (2011), las islas de calor se definen literalmente como:

*“Las islas de calor o islas térmicas urbanas, se refieren al gradiente térmico que se observa entre los espacios urbanos densamente ocupados y construidos y la periferia rural o periurbana”* (Córdova, 2011, p. 97).

## **2.7. Radiación solar**

La radiación solar influye en el estado del planeta, ya que, debido a la contaminación, la Tierra es capaz de absorber mayor cantidad de radiación solar, provocando un calentamiento (Flores & Delgado, 2012)

En la dinámica del planeta se producen dos tipos de radiación: 1) De entrada o solar, de onda corta y 2) Saliente o terrestre, de onda larga. Siendo la segunda la que posee mayor injerencia en el calentamiento de la Tierra (Martínez & Fernández, 2004).

El aire tiene la capacidad de absorber poca energía de los rayos solares, para que, en su mayoría, éstos se dispersen; dicha capacidad es conocida como diatermancia. En este sentido, el vapor de agua tiene poca diatermancia, ya que gran parte del calor que emite el suelo es retenido por las capas nubosas y remitido nuevamente por las mismas (Ayllón, 2003).

### **2.7.1. Balance calorífico**

La radiación solar que llega al planeta lo hace sin gran absorción o diatermancia.

La radiación de entrada puede ser reflejada gracias al albedo, mismo que se da por las nubes, no obstante, este reflejo o albedo es mínimo, ya que el aire es muy transparente para la longitud de onda corta y muy opaco para la longitud de onda larga (Martínez & Fernández, 2004).

De igual manera, el albedo también se da gracias a la superficie terrestre y al polvo del aire. Consecuentemente existe un total del 40% como promedio de albedo terrestre y del 60% restante, casi la mitad de éste es absorbido por la superficie de la Tierra, fenómeno conocido como insolación (Ayllón, 2003).

### **2.7.2. Interacción de la radiación con los gases**

La capacidad de un gas para absorber y remitir radiación varía en función la longitud de onda (corta o larga); esta capacidad se conoce como Potencial de Calentamiento Terrestre (PCT) (Flores & Delgado, 2012).

El CO<sub>2</sub> y el vapor de agua tiene la capacidad de absorber la radiación de salida y remitirla a la Tierra nuevamente (PCT). En este tenor, se entiende el aire se mantiene caliente al haber mayor presencia de nubes, acentuando así, el efecto invernadero (García, y otros, 2006).

Por su parte el SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub>, de igual manera poseen interacción con la radiación, la humedad y la lluvia; sin embargo, esto deviene en la formación de Sulfatos y Nitratos ácidos (García, y otros, 2006).

Existen otros factores que también influyen en la intensidad de radiación y de la temperatura, tales como parque vehicular, hora del día y época del año (Martín, Fernández, & Atienza, 2015).

### **2.7.3. Radiación nocturna**

La radiación nocturna depende de dos factores: Radiación difusa y contra radiación. La radiación difusa depende de la cantidad y tipo de nubes que existan y la contra radiación es la emisión de radiación por parte de las capas bajas del aire hacia el suelo; en conjunto ocasionan que el aire nocturno no presente temperaturas bajas extremas (Ayllón, 2003).

## 2.8. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA-ZMVT)

La Red de Automática Monitoreo Atmosférico (RAMA-ZMVT), surge en 1982 (Hernández & Madrigal, 2004), como un programa de vigilancia atmosférica en el Estado de México y, específicamente, para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca; dicho programa está vinculado con algunos objetivos como:

1. “Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores de la calidad del aire.
2. Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo.
3. Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia.
4. Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.
5. Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos; por mencionar algunos” (RAMA-ZMVT, 2014).

### 2.8.1. Diseño

Con el fin de proporcionar datos confiables y representativos por parte de la RAMA-ZMVT, se consideran los siguientes aspectos:

- **Zona de estudio:** Lugar donde se desarrolla el estudio, con especial énfasis en la ubicación geográfica.
- **Clima:** Los factores más significativos para la medición son: presión, temperatura, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento.
- **Selección del sitio de muestreo:** De acuerdo con la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), los sitios de muestreo deben ser representativos del área, proporcionar datos comparables con el resto de los equipos de monitoreo y tener un tiempo de vida útil largo.
- **Inventario de emisiones:** El inventario de emisiones proporciona fuentes de emisión, enumerándolas y, posteriormente, definiendo el tipo de contaminante emitido (RAMA-ZMVT, 2014).

- **Número mínimo de estaciones:** Con base en los parámetros de la Organización Panamericana de la Salud, las zonas urbanas e industriales, como el Valle de Toluca, deben contar con al menos dos estaciones de monitoreo atmosférico y no rebasar las diez estaciones, para así obtener las mediciones atmosféricas.

El Valle de Toluca cuenta con una superficie territorial de 2669.6 km<sup>2</sup> y una densidad poblacional de 811.3 hab/km<sup>2</sup> (GEM, 2012). Con ello y de acuerdo con los cálculos establecidos por los “Manuales de monitoreo atmosférico de México” del INECC y del SINAICA (Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire), el número de estaciones mínimas para la ZMVT deben ser 5 o 6 (INE-SINAICA, 2010). Es preciso mencionar que la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT), cuenta con siete estaciones (RAMA-ZMVT, 2014).

### 2.8.2. Funcionamiento

Como ya se mencionó, la RAMA-ZMVT, se compone de siete estaciones de monitoreo (ver **Tabla 2.4.**), además, la red también cuenta con una unidad móvil (UM) y un centro de control (CC) (RAMA-ZMVT, 2014).

**Tabla 2.4. Estaciones de la RAMA-ZMVT**

Número	Clave	Nombre
1	OX	Oxtotitlán
2	CE	Toluca Centro
3	MT	Metepec
4	CB	Ceboruco
5	SM	San Mateo Atenco
6	AP	Aeropuerto
7	SC	San Mateo Huichochitlán

Fuente: Elaboración propia, con base en: (RAMA-ZMVT, 2014).

Para dar pauta a la medición de la contaminación del aire, la RAMA-ZMVT, a la letra dice: *“De forma general, la medición de la contaminación del aire, se inicia con la obtención de la muestra de aire ambiente en la caseta, la cual pasa a los analizadores y se procesa, para generar datos, los cuales posteriormente se envían al Centro de Control, vía Internet (TCP/IP), donde se almacenan y se validan, para integrar los diferentes reportes de calidad del aire”* (RAMA-ZMVT, 2014, p.3).

Los periodos de esta operación son de 24 horas al día, los 365 días del año, generando así, datos constantes y en tiempo real (RAMA-ZMVT, 2014).

En materia de gases contaminantes, La RAMA-ZMVT mide seis contaminantes:

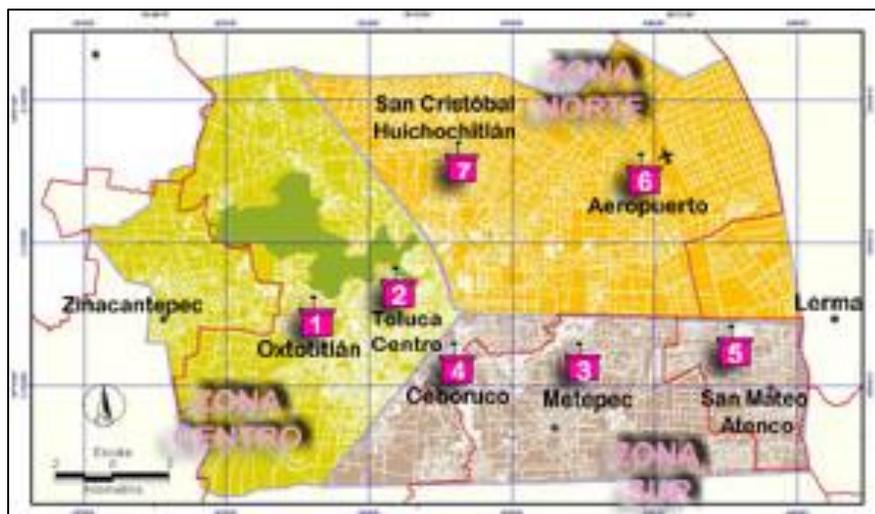
- Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Partículas Suspendidas Menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>)
- Partículas Suspendidas Menores a 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>) (RAMA-ZMVT, 2014).

### **2.8.3. Distribución de las estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT**

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), se encuentra dividida en 3 regiones, teniendo en cada una de ellas, estaciones de monitoreo distribuidas de la siguiente manera (ver **Figura 2.12.**):

- **Zona Centro:** Toluca Centro (2) y Oxtotitlán (1).
- **Zona Norte:** Aeropuerto (6) y San Cristóbal Huichochitlán (7).
- **Zona Sur:** Metepec (3), Ceboruco (4) y San Mateo Atenco (5) (RAMA-ZMVT, 2014).

**Figura 2.10. Mapa de distribución de las estaciones de monitoreo**



Fuente: (RAMA-ZMVT, 2014).

### **2.8.3.1. Mediciones de las estaciones de la RAMA-ZMVT**

Las estaciones de monitoreo cuentan con:

- Analizadores automáticos para el monitoreo de los seis contaminantes atmosféricos ( $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ).
- Torre meteorológica con sensores para temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, precipitación, radiación solar, humedad relativa y la presión atmosférica (RAMA-ZMVT, 2014).

A continuación, se muestra la disponibilidad de analizadores para cada uno de los seis contaminantes, en las siete estaciones fijas y en la Unidad Móvil (UM) (ver **Tabla 2.5**).

**Tabla 2.5. Equipos de medición para gases contaminantes en la RAMA-ZMVT**

Contaminante	Estaciones de monitoreo							
	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC	UM
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>PM<sub>10</sub></b>	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>O<sub>3</sub></b>	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>NO<sub>2</sub></b>	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>SO<sub>2</sub></b>	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>CO</b>	*	*	*	*	*	*	*	*

Fuente: Elaboración propia, con base en: (RAMA-ZMVT, 2014).

Como se puede observar, en todas las estaciones es posible analizar los seis contaminantes, a diferencia de los parámetros meteorológicos, los cuales, varían en cuanto a su posibilidad de medición (ver **Tabla 2.6.**) (RAMA-ZMVT, 2014).

**Tabla 2.6. Equipo de medición para meteorología en la RAMA-ZMVT**

Factores del clima	Estaciones de monitoreo							
	OX	CE	MT	CB	SM	AP	SC	UM
Velocidad del viento	*	*	*	*	*	*	*	*
Dirección del viento	*	*	*	*	*	*	*	*
Humedad relativa	*	*	*	*	*	*	*	*
Temperatura	*	*	*	*	*	*	*	*
Presión atmosférica		*	*			*		*
Precipitación pluvial	*	*	*	*	*	*	*	*
Radiación solar		*	*			*		*

Fuente: Elaboración propia, con base en: (RAMA-ZMVT, 2014).

#### **2.8.4. Técnicas de medición**

El funcionamiento de esta técnica, de acuerdo con la RAMA-ZMVT, literalmente dice:

*“La molécula de SO<sub>2</sub>, tiene la propiedad de que tras ser apagada una fuente de luz Ultravioleta (UV), que la ilumina, emite un pulso de energía luminosa dentro de la región del ultravioleta, pero en una longitud de onda diferente. Si esta luz es encendida y apagada de forma constante y con mucha frecuencia, obtenemos una serie de pulsos muy rápidos. Cuanto mayor sea la concentración de moléculas de SO<sub>2</sub>, más intensos serán los pulsos de luz emitidos. Midiendo la intensidad de la luz correspondiente a cada pulso, podremos conocer la concentración de SO<sub>2</sub> presente en la muestra de aire que se analiza”* (RAMA-ZMVT, 2014, p. 5).

## **2.9. Normatividad en torno al SO<sub>2</sub>**

En esta sección, se desarrolla la disciplina jurídica en torno a la legislación ambiental para con el Bióxido de Azufre.

Cabe mencionar que dicha legislación se encuentra vigente a nivel nacional y mundial, toda vez que existen instituciones y normas, tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), para el ámbito internacional, o bien, las NOM's, para el caso de México; mismas que ayudan a regular lo que al cuidado del medio ambiente concierne

### **2.9.1. Normatividad internacional**

Como ya se mencionó, la Organización Mundial de la Salud (OMS), es la institución a cargo de las regulaciones en torno al SO<sub>2</sub>, en este tenor, la OMS adopta dos parámetros de medición para la recomendación de niveles permisibles, a nivel mundial; el primero, consta de un límite máximo para la concentración de 24 horas y, el segundo, establece un máximo para la medición promedio de cada diez minutos (INE, 2009 b).

La OMS recomienda a todos los países que establezcan como límite máximo de concentración en 24 horas, el valor de 0.008 ppm y, para el caso del valor promedio de diez minutos, sugiere un máximo de 0.188 ppm, pues la evidencia más reciente apunta a que la exposición aguda es muy importante, por sus diversas afecciones a la salud (INE, 2009 b).

### **2.9.2. Nivel nacional**

En México existe una máxima Ley en cuestiones ambientales, siendo la “Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente”, conocida también, por sus siglas, como LLGEEPA.

#### **2.9.2.1. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)**

La LGEEPA abarca cinco títulos en materia ambiental, siendo el segundo capítulo, el mismo que aborda los temas de contaminación atmosférica (LGEEPA, 2012).

Los artículos comprendidos en el capítulo II, “Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera”, son del 110 al 116, mismos que se desglosan a continuación.

**Tabla 2.7. Artículos del Capítulo II, LGEEPA**

Artículo	Resumen
110	<p>Considera criterios de:</p> <p>Calidad del aire debe ser satisfactoria.</p> <p>Emisiones deben ser controladas y reducidas.</p>
111	<p>La Secretaría tiene facultades de:</p> <p>Expedir normas.</p> <p>Actualizar y coordinar inventarios de emisiones.</p> <p>Formular y aplicar programas de regulación de emisiones.</p> <p>Requerir a responsables el cumplimiento de límites máximos permisibles.</p> <p>Definir niveles máximos permisibles de contaminación.</p>
112	<p>Los diferentes niveles de gobierno:</p> <p>Controlarán contaminación del aire a nivel local.</p> <p>Con criterio, definirán zonas permitidas para la industria.</p> <p>Integran y actualizan inventario de fuentes de contaminación.</p> <p>Establecerán y operarán sistemas de verificación para automotores.</p> <p>Regulación de transporte público.</p> <p>Tomarán medidas necesarias para evitar contingencia ambiental.</p> <p>Impondrán sanciones por infracciones a las leyes.</p>
113	<p><i>“No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente. En todas las emisiones a la atmósfera, deberán ser observadas las previsiones de esta Ley y de las disposiciones reglamentarias que de ella emanen, así como las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría (LGEEPA, 2012)”</i></p>

<b>114</b>	En las zonas determinadas como aptas para uso industrial, próximas a áreas habitacionales, se buscará la instalación de industrias que utilicen tecnologías y combustibles que generen menor contaminación.
<b>115</b>	En los programas de desarrollo urbano, se considerarán las condiciones topográficas, climatológicas y meteorológicas, para asegurar la adecuada dispersión de contaminantes.
<b>116</b>	Para estímulos fiscales se consideran a quienes:  Adquieran o instalen equipos de control de emisiones.  Den mantenimiento a equipos de tratamiento de emisiones contaminantes.  Investiguen para reducir generación de contaminantes.  Ubiquen o relocalicen instalaciones para evitar contaminación.

Tabla de elaboración propia con base en: (LGEEPA, 2012).

### **2.9.2.2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM's)**

A nivel nacional, existen las “Normas Oficiales Mexicanas” (NOM's), algunas de las cuales, refieren a la contaminación atmosférica y son expedidas por dependencias de la administración pública federal.

Respecto al Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), en México se encuentran tres NOM's que regulan algunos aspectos de la emisión de dicho contaminante y son:

- 1) NOM-039-SEMARNAT-1993
- 2) NOM-022-SSA1-2010 (Antes 1993)

#### **2.9.2.2.1. NOM-039-SEMARNAT-1993**

Norma Oficial Mexicana NOM-039-SEMARNAT-1993 que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de Bióxido y Trióxido de Azufre y neblinas de Ácido Sulfúrico, en plantas productoras de Ácido Sulfúrico (NOM-039-SEMARNAT-1993, 1993).

#### **Especificaciones:**

Esta norma considera algunas zonas críticas por sus altas concentraciones de contaminantes en la atmósfera y son: Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara,

entre otras; sin embargo, cabe mencionar que, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), no figura dentro de estas zonas (NOM-039-SEMARNAT-1993, 1993), aun cuando existen plantas productoras o proveedoras de Ácido Sulfúrico.

**Tabla 2.8. Niveles máximos permisibles para plantas productoras de Ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en zonas no críticas**

Capacidad la planta (ton/día)	Niveles máximos permisibles (Kg de SO <sub>2</sub> / ton H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 100%)
<b>1-500</b>	28.0
<b>501-700</b>	20.0
<b>701-1 000</b>	14.0
<b>&gt;1 000</b>	7.0

Fuente: Elaboración propia, con base en: (NOM-039-SEMARNAT-1993, 1993).

Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera, dentro del límite del predio, deben ser inferiores a 0.234 ppm de SO<sub>2</sub> para las zonas críticas y para zonas no críticas, tales como la ZMVT, 0.13 ppm de SO<sub>2</sub>. Ambas concentraciones referidas a un promedio horario y aplicables para cualquier época del año (NOM-039-SEMARNAT-1993, 1993).

#### **2.9.2.2.2. NOM-022-SSA1-2010**

Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

Esta NOM establece los valores de límites permisibles de concentración para el Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), en el aire ambiente para la protección de la salud humana (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

#### **Especificaciones:**

- La concentración de SO<sub>2</sub>, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 288 µg/m<sup>3</sup> o lo que son, 0.110 ppm, promedio en 24 horas, una vez al año, para protección a la salud de la población (NOM-022-SSA1-2010, 2010).
- La concentración de Bióxido de Azufre no debe rebasar el límite máximo normado de 66 µg/m<sup>3</sup> o 0.025 ppm promedio anual, para protección a la salud de la población mexicana (NOM-022-SSA1-2010, 2010).
- La concentración del promedio de ocho horas de SO<sub>2</sub>, debe ser menor o igual a 524 µg/m<sup>3</sup>, o bien, 0.200 ppm promedio horario y a su vez, no debe ser rebasado más de dos veces al año (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

Por otro lado, es importante destacar que, de acuerdo con los valores establecidos para México, por la NOM-022-SSA1-2010, estos rebasan por 13 veces los límites permisibles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

### 2.9.2.3. IMECA

El Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), es una medida para conocer si los niveles de contaminación del aire son satisfactorios o no (RAMA-ZMVT, 2014).

El límite considerado como “satisfactorio”, para cada uno de los contaminantes atmosféricos, se representa con un valor de 100 puntos, ya que esto corresponde al valor que establecen las normas de calidad del aire para dichos contaminantes (ver **Figura 2.13.**) (RAMA-ZMVT, 2014).

**Figura 2.11. Escala IMECA**

Intervalos	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300
Calidad del aire	Buena	Regular	Mala	Muy Mala	Extremadamente Mala

Fuente: (RAMA-ZMVT, 2014).

Para el caso específico del Bióxido de Azufre, la NOM-022-SSA1-2010, en el numeral 4; se considera como límite satisfactorio a los 0.110 ppm de concentración en mediciones de 24 horas, ubicándose así, en el intervalo amarillo de 51 a 100 puntos (ver **Figura 2.14.**) (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

**Figura 2.12. IMECA para SO<sub>2</sub>**

INTERVALO	INTERVALO DE CONCENTRACION ppm
0 - 50	0 – 0.065
51 - 100	0.066 – 0.130
101 - 150	0.0131 – 0.195
151 - 200	0.196 – 0.260
> 200	> 0.260

Fuente: (RAMA-ZMVT, 2014).

#### **2.9.2.4. Reportes de calidad del aire**

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico, brinda reportes diarios, reportes mensuales y mosaicos (RAMA-ZMVT, 2014); en esta sección, únicamente se describirán los dos primeros, debido a la injerencia que tienen para con el desarrollo de la presente investigación:

- **Reporte diario:** En él se registra la calidad del aire registrada durante el día, teniendo corte a la 16:00 horas. Los datos que este arroja se muestran como IMECA máximo para cada zona de la ZMVT, así como para cada uno de los contaminantes criterio.
- **Reporte mensual:** Como su nombre lo indica, este reporte muestra día a día como ha variado la calidad del aire durante todo un mes. Gracias a él se registra el IMECA para cada uno de los contaminantes criterio; sin mencionar el IMECA máximo del día y especificando a qué contaminante corresponde, en que estación se presentó y a que zona pertenece esa estación. De manera individual, también exhibe los valores máximos del mes para cada uno de los contaminantes (RAMA-ZMVT, 2014).

## Epílogo

La contaminación atmosférica deviene en diferentes subtemas, entre los cuales figura la presencia del El Bióxido de Azufre, siendo éste un gas que no sólo se emite de manera antropogénica, sino que también es y ha sido producto de la dinámica natural del planeta Tierra (vulcanismo). No obstante, la actividades económicas y sociales, tales como industria manufacturera, combustión fósil de autotransportes, aumento en el parque vehicular, entre otros, han ocasionado un alza en los registros de  $\text{SO}_2$  en la ZMVT, teniendo diferentes consecuencias y entre las cuales, la más alarmante, es su injerencia en enfermedades pulmonares y cardiovasculares.

El  $\text{SO}_2$  no sólo actúa como contaminante, sino que también tiene un papel clave como precursor de aerosoles Sulfato, mismos que también ocasionan una variación poco predecible en los meteoros climáticos de la zona.

Si bien el  $\text{SO}_2$  no está catalogado como un GEI de larga vida, sí pudiese existir evidencia de que este gas, como precursor de aerosoles, es causante de variaciones en la dinámica hídrica y, consecuentemente, radiativa en ciertas zonas.

Queda claro que el  $\text{SO}_2$  no es un gas que deba menospreciarse, toda vez que este contaminante; aún con su actuar sobre la salud humana, sobre meteoros climáticos y que incluso es subproducto abundante del desempeño de ciertas actividades económicas secundarias; a nivel nacional, no está normado de manera estricta ni en relación con lo que establece la OMS, como parámetros máximos permisibles ideales para no perjudicar la salud humana.

# **Capítulo 3**

**Marco**

**Contextual**

## Marco Contextual

Para este capítulo se desarrollarán aspectos físicos y socioeconómicos del área de estudio, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Este capítulo se divide en diferentes apartados: localización y conformación de la ZMVT, características naturales, el tiempo atmosférico y sistema económico de la misma.

En el apartado que concierne al análisis y descripción de característica físicas, se incluyen temas tales como: orografía y relieve, climatología, y meteorología. Gracias a los cuales se puede comprender, el comportamiento natural y climático que presenta la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Por otro lado, en la sección de características socioeconómicas, se refiere al análisis del sistema territorial y del sistema económico de la ZMVT.

### 3.1. Localización y conformación

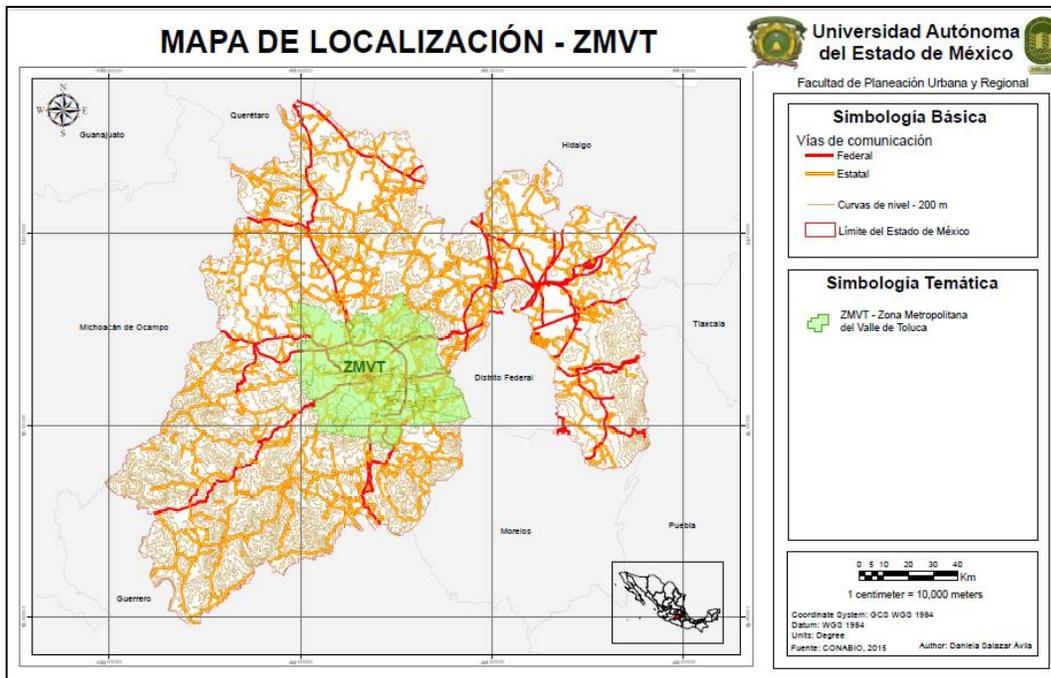
La ZMVT se localiza en la parte central del Estado de México, entre los paralelos 18°59'07'' y 19°34'47'' de latitud norte y los meridianos 99°38'22'' y 99°56'13'' de longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich (GEM, 2007).

De acuerdo al “Programa para Mejorar la Calidad del Aire Valle de Toluca 2012-2017”, o “ProAire 2012-2017” y al “Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004”; la ZMVT está conformada por 22 municipios (ver **Mapa 3.1.**), los cuales comprenden una extensión de 2,669.6 km<sup>2</sup>, correspondiente al 11.9% del territorio estatal y, se enlistan a continuación (GEM, 2012):

- 1) Almoloya de Juárez
- 2) Almoloya del Río
- 3) Atizapán
- 4) Calimaya
- 5) Capulhuac
- 6) Chapultepec
- 7) Lerma
- 8) Metepec

- 9) Mexicaltzingo
- 10) Ocoyoacac
- 11) Oztolotepec
- 12) Rayón
- 13) San Antonio la Isla
- 14) San Mateo Atenco
- 15) Temoaya
- 16) Tenango del Valle
- 17) Texcalyacac
- 18) Tianguistenco
- 19) Toluca
- 20) Xalatlaco
- 21) Xonacatlán
- 22) Zinacantepec (GEM, 2007).

**Mapa 3.1. Mapa de localización de la ZMVT**



Fuente: Elaboración propia, con base en (CONABIO, 2012).

Si bien la ZMVT está integrada por 22 municipios, en la temática de contaminación del aire, únicamente se consideran siete municipios, divididos en Zona Centro, Norte y Sur, respectivamente (ver **Tabla 3.1**):

**Tabla 3.1. Zonas y municipios de RAMA-ZMVT**

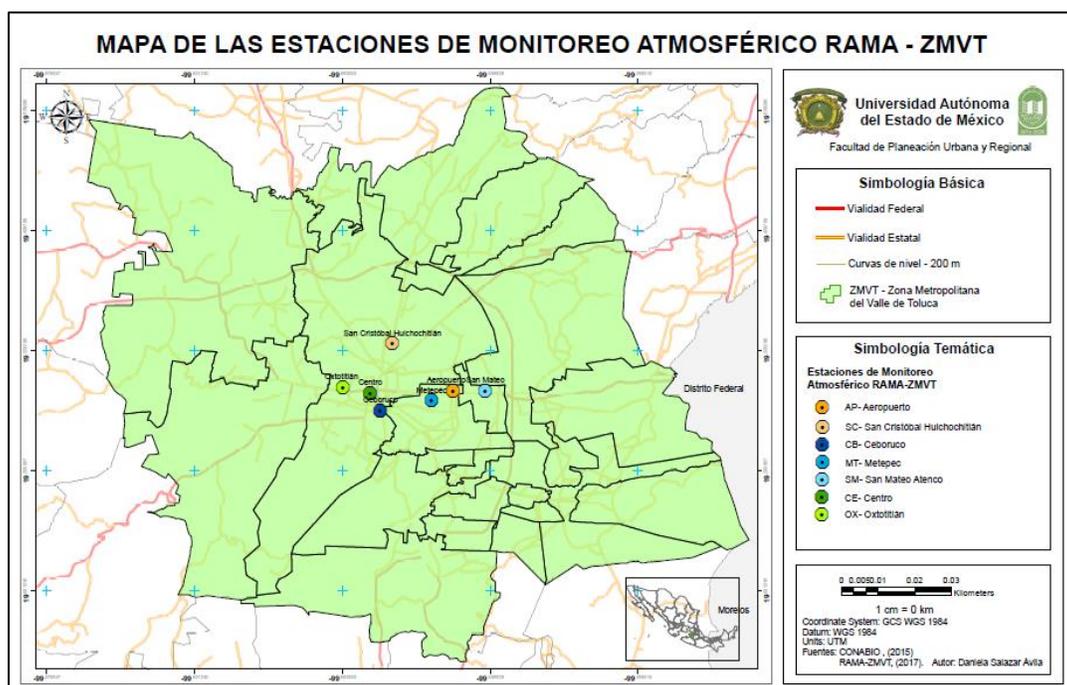
Zona	Municipio
<b>Z. Centro</b>	Toluca Centro
	Oxtotitlán
<b>Z. Norte</b>	Aeropuerto
	San Cristóbal Huichochitlán
<b>Z. Sur</b>	Metepec
	Ceboruco
	San Mateo Atenco

Tabla de elaboración propia con base en (RAMA-ZMVT, 2014).

La reducción de éstos se debe a la cobertura que puede brindar la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA-ZMVT), pues existen siete estaciones de monitoreo atmosférico ubicadas en los siete municipios mencionados.

En el **Mapa 3.2**, se muestra la distribución de las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA.

**Mapa 3.2. Mapa de distribución de las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT**



Fuente: Elaboración propia, con base en (CONABIO, 2012) y (RAMA-ZMVT, 2014).

La ZMVT colinda con los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya, Oztolotepec y Jilotzingo; en la parte sur, limita con Tenango del Valle, Coatepec Harinas, Calimaya, Mexicaltzingo, Tianguistenco y Capulhuac. En la parte este se encuentra la Ciudad de México, Huixquilucan y Naucalpan; por último, en el oeste colinda con Almoloya de Juárez, Amanalco y Temascaltepec (García, 2014).

### **3.2. Características naturales de la ZMVT**

Las características naturales hacen referencia a aspectos importantes para la presente investigación, ya que involucran características orográficas y de relieve, climatológicas, meteorológicas y de dinámica de vientos; toda vez que estos apartados sientan bases para la comprensión del tema en cuestión.

#### **3.2.1. Orografía y relieve**

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca está rodeada por sierras y volcanes, destacándose; al suroeste, la Sierra Nevado de Toluca; al este, la Sierra de las Cruces y Sierra de

Ocoyotepec; al noreste, la Sierra de Monte Alto y al sur, la Sierra Matlazinca (ver **Mapa 3.3**) (GEM, 2012).

El volcán “Nevado de Toluca”, juega un papel importante en la dinámica de vientos del valle, pues se generan sistemas de baja y alta presión sobre esta región, a lo largo del año (GEM, 2012).

El “Programa para Mejorar la Calidad del Aire Valle de Toluca 2012-2017”, menciona al volcán Nevado de Toluca, haciendo énfasis en su papel para con dicha dinámica de vientos en el valle y a la letra dice:

*“En el área de su pie de monte, dentro del municipio de Zinacantepec existen elevaciones menores como el cerro la Calera y el volcán Gordo, que son elementos determinantes en la dirección del viento que sopla del sur”* (GEM, 2012, p.25).

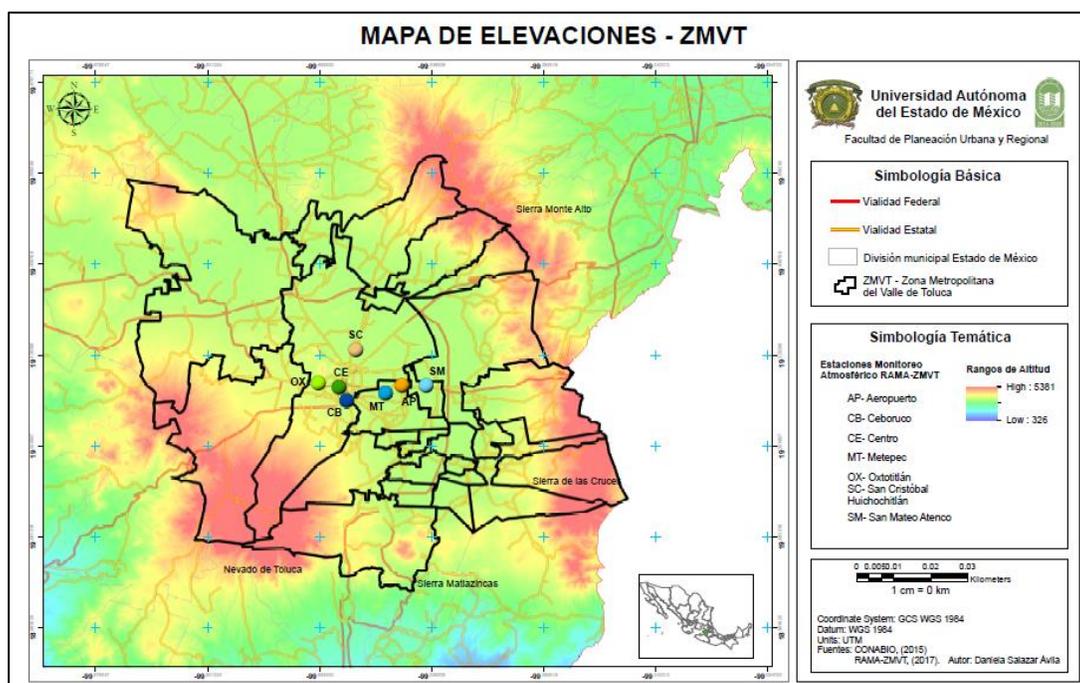
Este mismo programa, hace referencia a los otros sistemas montañosos de la zona y así los menciona literalmente:

*“En la parte que corresponde a la Sierra de Monte Alto, entre las principales elevaciones está el cerro Xeshadi, y en la Sierra de las Cruces destacan el cerro El Gavilán, y los volcanes cerros: La Palma y La Campana, los cuales conforman una obstrucción considerable para los vientos alisios a su arribo sobre este valle”* (GEM, 2012, p.25).

Es así como las elevaciones más pequeñas se encuentran en la parte norte, noroeste y sur del valle, tal es el caso de la “Sierra de los Matlazincas”; siendo estas las que facilitan la circulación del viento y de los propios contaminantes (GEM, 2012) y (García, 2014).

Por otro lado, las zonas que generan obstrucción del aire y almacenamiento de contaminantes, son aquellas que cuentan con las elevaciones de mayor altitud, es decir, la zona suroeste con el volcán “Nevado de Toluca”; la parte este del valle, con la “Sierra de las Cruces” y en el noreste, con la “Sierra de Monte Alto” (GEM, 2012) y (García, 2014).

**Mapa 3.3. Mapa de elevaciones de la ZMVT**



Fuente: Elaboración propia, con base en (CONABIO, 2012) y (RAMA-ZMVT, 2014).

### 3.2.2. Clima

En ZMVT, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen y de Enriqueta García, se aprecian tres tipos de clima: templado húmedo, semifrío subhúmedo y frío (GEM, 2012).

- **Clima templado húmedo [C(W2)(w)b(i)g]:** El clima templado subhúmedo abarca la mayor parte de los municipios que corresponden a la ZMVT (GEM, 2012).
- **Clima Semifrío [C(E)]:** Por su parte, este clima presenta dos subtipos:
  - **Semifrío subhúmedo [C(E)(W2)(w)b(i)g]:** Clima característico de aquellas zonas con altitud considerable, como el Nevado de Toluca, la Sierra de Monte Alto y la Sierra de las Cruces (GEM, 2012).
  - **Semifrío húmedo [C(E)(m)(w)b(i)g]:** Únicamente existe una región semi-fría húmeda y se localiza en una porción del municipio de Xalatlaco (GEM, 2012).
- **Clima frío [E(T)H]:** Este tipo de clima es característico de zonas altas y se encuentra en lugares como el volcán Nevado de Toluca (GEM, 2012).

### 3.2.3. Épocas climáticas

Respecto a las épocas climatológicas se presentan únicamente tres, debido a la regularidad del tiempo atmosférico anual.

- **Época seca-fría:** Esta época expresa la temperatura promedio mensual más baja durante el año y comprende los meses de noviembre a febrero, con un rango de entre 9° y 11° C. Las heladas son un fenómeno meteorológico importante que se presenta en los alrededores de la zona y que está relacionado con las bajas temperaturas, registradas periódicamente, y las nevadas, en forma ocasional por las temperaturas bajo cero registradas en esta época (GEM, 2012).
- **Época seca-cálida:** Los meses de esta época son de marzo a mayo, cuando se presenta un ascenso en la temperatura hasta llegar a los 15° C, siendo la temperatura media que se expresa como máxima en la zona a lo largo del año.  
Durante estas dos épocas, la precipitación pluvial es poco significativa con registros inferiores a los 40 mm de precipitación (GEM, 2012).
- **Época de lluvia:** La época de lluvia se encuentra definida por los meses de junio a octubre y se caracteriza por la presencia de precipitaciones de entre 160 y 210 mm. En cuanto a la temperatura de esta época, se manifiesta un decremento para mantenerse entre los 11°C y 13° C (GEM, 2012).

### 3.2.4. Meteorología

Por su posición geográfica, la ZMVT se encuentra bajo la influencia de sistemas meteorológicos tropicales durante la época de lluvia, aportando así, la humedad más importante del año en forma de nublados y lluvias; lo cual contribuye a la remoción de los contaminantes presentes en la atmósfera (GEM, 2012).

En la época seca-fría existen dos sistemas meteorológicos predominantes, el primero, el desplazamiento de frentes fríos; y el segundo, masas de aire polar. Al intensificarse estos fenómenos, la ZMVT se ve afectada con sistemas anticiclónicos (tiempo atmosférico estable y seco), los cuales generan inversiones térmicas y consecuentemente, originando condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes (GEM, 2012).

### 3.2.5. Dinámica de vientos

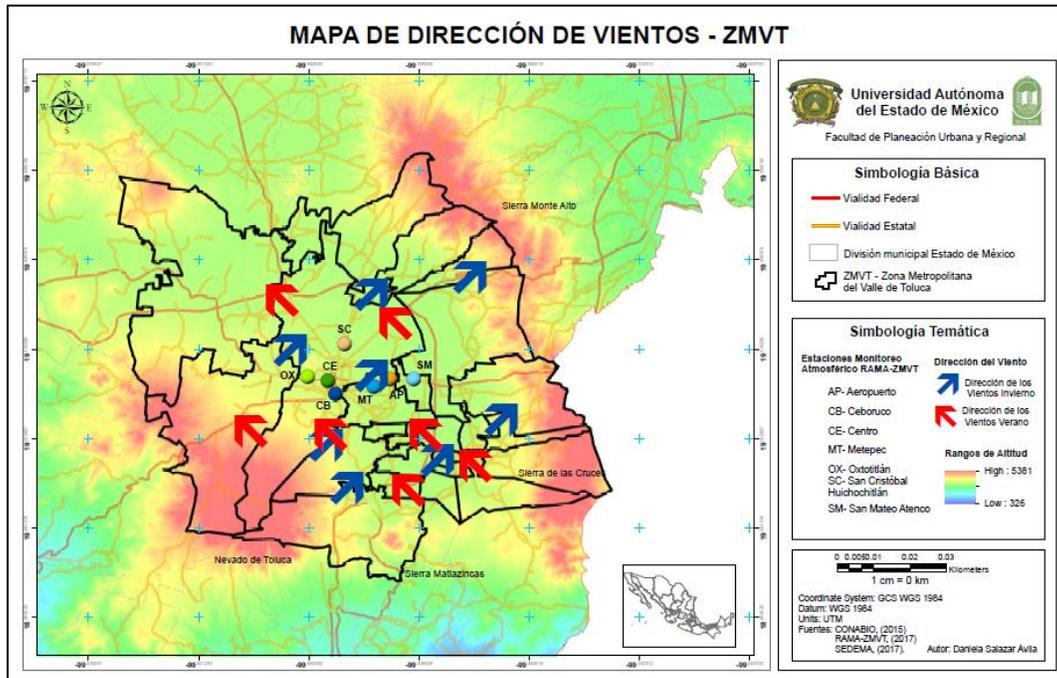
A diferencia de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la ZMVT no está encerrada por completo por barreras naturales, lo cual favorece la circulación del viento y, por tanto, su ventilación se ve favorecida la mayor parte del año (GEM, 2012).

La dinámica de viento en la ZMVT es altamente compleja debido a su relieve y por supuesto, gracias a los vientos alisios. Estos vientos se registran estables y débiles en la época seca-fría (marzo-mayo) del Valle de Toluca; de esta manera los vientos predominantes son aquellos provenientes del sur con dirección al norte, obedeciendo a las manecillas del reloj a causa del propio relieve de la zona; en este sentido, el volcán “Nevado de Toluca”, es la elevación que no permite la circulación de vientos provenientes del sur (García, 2014).

En la época seca-cálida (noviembre-febrero), gracias a la aceleración de los vientos alisios, los vientos se intensifican y cambian su curso. En este tenor, se habla de la “Sierra de las Cruces”, ubicada de norte a sur y que obstruye así, el paso del viento hacia el este del valle (ver **Mapa 3.4.**) (García, 2014).

Por último, en la época de lluvia de la ZMVT, la dinámica se modifica al existir una dirección de este y sureste hacia noroeste y norte, respectivamente (ver **Mapa 3.4.**), generando un transporte de contaminantes provenientes de la zona industrial del municipio de Lerma (García, 2014).

**Mapa 3.4. Mapa de dirección de vientos de la ZMVT**



Fuente: Elaboración propia, con base en: (CONABIO, 2012), (RAMA-ZMVT, 2014) y (SEDEMA, 2017).

### **3.3. El tiempo atmosférico y el clima en la ZMVT**

El clima del Valle de Toluca es “C(w2)(w)b(i)g” y se define como clima templado subhúmedo con precipitación suficiente, veranos largos y lluvias invernales inferiores a 5%, así como clima isotermal y con la temperatura más elevada registrada antes del solsticio de verano; todo ello es resultado de la confluencia entre fenómenos continentales y regionales meteorológicos, así como de la dinámica de los factores geográficos y meteorológicos locales (Hernández & Madrigal, 2004).

Por otro lado, el cambio de uso de suelo y los factores relacionados con la dinámica demográfica coadyuvan a las variaciones climáticas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) (Pérez, y otros, 2010).

#### **3.3.1. Escenarios futuros para el Estado de México**

Existen estudios sobre Cambio Climático a manera de apoyo para ideas futuras; tal es el caso del trabajo de Orozco y otros autores (2015), pues ellos afirman que los estudios de Cambio Climático son una representación posible y simplificada del futuro, pero no un pronóstico. En el caso de México, la reconstrucción de escenarios de temperatura muestra una tendencia de calentamiento en el norte y centro del país (Orozco, y otros, 2015).

En el mismo artículo, se plantea un escenario de “Emisiones Altas” para el Estado de México de 2020 a 2080, lo cual quiere decir que, consideraron un crecimiento constante de población, desarrollo económico orientado y un cambio tecnológico fragmentado (Orozco, y otros, 2015).

Más allá de los escenarios con aumento de temperatura, se prevé un decremento de la precipitación; ambos estando condicionados por el crecimiento económico, uso racional de la energía fósil y no fósil y, el desarrollo de tecnologías eficientes y adecuadas (Orozco, y otros, 2015).

### **3.4. Características socioeconómicas de la ZMVT**

Las características socioeconómicas hacen referencia a aspectos tales como: sistema territorial, demografía y sistema económico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

#### **3.4.1. Sistema territorial**

El sistema territorial se entiende como su propio espacio como factor dado, para su territorialidad y su temporalidad significativa (Universidad Complutense Madrid, 2016).

##### **3.4.1.1. Dinámica poblacional**

Una zona metropolitana se conforma no sólo por una ciudad con una fuerte concentración demográfica, con una constante expansión política y socioeconómica; sino que también está integrada por las unidades administrativas en la periferia de dicha ciudad, mismas que desempeñan una interacción centro-periferia y viceversa (García, 2014).

La dinámica poblacional consta de dos componentes: crecimiento natural y crecimiento social. En el primer caso, el Estado de México es la entidad que concentra el mayor crecimiento natural a nivel nacional; por su parte, en el segundo caso, se hace referencia a la migración de población hacia dentro o hacia afuera de la entidad federativa en cuestión, conocido como “crecimiento social mediante el saldo neto migratorio”, parámetro del cual, el Estado de México es líder nacional, pues su saldo neto migratorio es el mayor positivo en México, indicando así, que el volumen de entrada es mayor al volumen de salida de migrantes (COESPO, 2012).

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), ha presentado el mayor dinamismo demográfico a nivel nacional en los últimos 60 años, pues la población en los municipios de la ZMVT se sextuplicó al pasar de 356 mil 754 habitantes en 1950 a un estimado de 2 millones 172 mil 35 habitantes en 2010. En otras palabras, dicho crecimiento fue casi lo doble del aumento poblacional en la Ciudad de México en los mismos diez años. De esta manera, se considera a la ZMVT como una de las diez metrópolis más importantes en la República Mexicana (COESPO, 2012).

De acuerdo con el “Consejo Estatal Poblacional”, la ZMVT se compone por 22 municipios e incluye, como lugar central, al municipio de Toluca, mismo que destaca por importancia política, económica y, sobre todo, poblacional (COESPO, 2012).

Toluca es el municipio con mayor concentración de habitantes, ya que albergó al 37.7% de la población de la ZMVT, con 819 mil 561 habitantes en 2010 (COESPO, 2012). Enseguida, en orden descendente, se encuentran los municipios de Metepec, Zinacantepec, Almoloya de Juárez y Lerma (García, 2014).

En este sentido, la dinámica poblacional, se entiende como aquellas actividades que se generan de manera consecuente tras haber un aumento de población, por ejemplo: mayor parque vehicular, mayor cantidad de unidades económicas (COESPO, 2012), incremento de traslados en vehículos automotores (García, 2014), entre otros.

#### **3.4.1.2. Usos de suelo**

La ZMVT alberga diferentes actividades económicas, sectores poblacionales y un alto índice de migración; en este sentido, se sabe que el uso de suelo destinado para agricultura es del 63%, mismo que es seguido por el uso de suelo forestal, con un 19% de la superficie total de la zona y por último, el uso de suelo urbano abarca, únicamente, un 4% del total de la superficie; el resto del suelo lo cubren rasgos tales como: áreas de vegetación, carreteras y otros (García, 2014).

#### **3.4.1.3. Vías de comunicación**

La ZMVT posee gran variedad de vías de comunicación gracias al dinamismo poblacional que ésta presenta.

Uno de los principales actores para este apartado es el “Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca” (AICT), ubicado en medio de las zonas industriales de la ZMVT y donde se lleva a cabo una interacción nacional e internacional de aerolíneas, que incluso lo posiciona como la quinta terminal aérea más importante del país (GEM, 2012).

En la **Tabla 3.2.** se presenta la actividad en cantidad de pasajeros que reporta el AICT desde 2011 hasta 2017. Cabe mencionar que, dicha actividad, ha ido a la baja desde el inicio del registro, hasta el año 2017; registrando más de 120 mil pasajeros en 2011 y poco más de 61 mil pasajeros para 2017 (SCT, 2017).

En este sentido, cabe mencionar que la turbosina es el combustible más utilizado en los aviones y presenta un 0.053% de concentración de SO<sub>2</sub> en su contenido (Herrera & Vales, 2013).

**Tabla 3.2. Actividad en cantidad de pasajeros del AICT 2011-2017**

Aeropuerto/Año/Vuelos	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
TOLUCA	120842	66395	105834	64666	70821	65115	61051

Fuente: (SCT, 2017).

En segundo lugar, se encuentran las vías de comunicación terrestre, pues en la zona de estudio se cuenta con una extensa red de carreteras de orden municipal, estatal y federal. Las principales vías de comunicación son: el Libramiento Nororiente de Toluca y Sur de Metepec; el Boulevard y Distribuidor Aeropuerto; las Autopistas: Toluca–Zitácuaro; Toluca–Naucalpan y Lerma-Santiago Tianguistenco-Tres Marías y Ramal a Tenango del Valle. Las Vialidades: Prolongación Avenida Isidro Fabela, Paseo Adolfo López Mateos, Vía Alfredo del Mazo, Vía José López Portillo, Paseo Tollocan, Paseo Colón, Calzada al Pacifico, Avenida Salvador Díaz Mirón, Avenida Tecnológico, Avenida de las Partidas-Zona Industrial-Lerma-El Cerrillo y las Carreteras: Toluca-Metepec-Tenango del Valle, Toluca-Temascaltepec-Valle de Bravo, Toluca-Temoaya, Toluca-Amanalco de Becerra-Valle de Bravo, Toluca-San Felipe Tlalmimilolpan, Santiago Tianguistenco-Chalma, Amomolulco-Xonacatlán, Xonacatlán-Presa José Antonio Álzate, Ocoyoacac-Santiago Tianguistenco, Tenango-Joquicingo, a Marquesa-Santiago Tianguistenco, Mexicaltzingo-Tianguistenco-Xalatlaco, Almoloya de Juárez; San Mateo Atenco-San Pedro Tultepec y Santiago Tianguistenco-Tenango del Valle (GEM, 2012).

Para dar una idea más clara de lo que algunas de estas vías de comunicación representan, se muestra la Red Carretera de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ver **Figura 3.1.**).



### **3.4.2.1. Actividades económicas primarias**

Gracias al relieve de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, las laderas de las montañas y las planicies se hacen presentes, dando pie a al desempeño de la actividad agrícola, en su mayoría de temporal y, en menor proporción, de riego (GEM, 2012).

Más allá del relieve de la región, existen otros factores que determinan qué clase de actividad económica se desempeña y, uno de ellos es el tipo de suelo; haciendo énfasis en ello, el tipo de suelo que predomina en la ZMVT es el Feozem, el cual es susceptible a la erosión moderada y alta, generando una situación favorable para el transporte de sedimentos o para la erosión de suelo y, consecuentemente, acarreado cierta porción de emisión de partículas de origen natural (GEM, 2012).

Con respecto a la ganadería, en la zona de estudio, se observa la invasión hacia áreas forestales, en donde se presenta, por un lado, la tala de árboles, y por otro, incendios provocados para la quema de pasto y generación de renuevo, beneficiando así el pastoreo de rebaños. Sin embargo, dicha actividad afecta la calidad del aire por la emisión de partículas durante la combustión y posteriormente por la erosión del suelo a consecuencia de la pérdida de cubierta vegetal (GEM, 2012).

### **3.4.2.2. Actividades económicas secundarias**

Según datos del INEGI y del GEM, en la industria manufacturera de la entidad destacan las unidades económicas micro, pequeñas y medianas, mismas que ocupan el 76% del personal estatal en este sector (GEM, 2012).

En las actividades del sector secundario de la ZMVT, destaca la industria manufacturera con once mil 364 unidades económicas en toda el área. Básicamente, el asentamiento industrial de la zona se concentra en el municipio de Toluca, en donde existen alrededor de tres mil 464 unidades económicas, lo que representa el 30.49% de la planta industrial de esta metrópoli; le sigue San Mateo Atenco con mil 763 unidades económicas y, por último, Metepec y Lerma con 967 y 740 unidades económicas, respectivamente (GEM, 2012).

La importancia de la industria en la ZMVT radica no sólo en su impacto como actividad económica, sino también en los efectos ambientales derivados de sus propios procesos; tal es el caso de las emisiones de hidrocarburos provenientes de la industria metalmeccánica, o bien,

la emisión de gases de combustión generados en la industria química y alimentaria de la zona (GEM, 2012). En este sentido, cabe mencionar que, las medidas de solución y cuidado para el ambiente tiene una fuerte injerencia para con las empresas medianas y grandes de la ZMVT, toda vez que estas suelen mantener un vínculo con el mercado internacional. De esta manera, se espera que dicho efecto vaya debilitándose conforme el tamaño de la empresa decrece (GEM, 2012).

#### **3.4.2.3. Actividades económicas terciarias**

Como resultado de la urbanización y de la expansión del mercado interno, este sector se ha incrementado en los últimos años. En este tenor, destacan las actividades de comercio al por menor de alimentos, bebidas y tabaco, servicios de apoyo a los negocios, manejo de desechos, servicios de remediación, servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (GEM, 2012).

Los municipios de la ZMVT que reflejan la mayor actividad en cuanto a bienes y servicios son: Metepec, Toluca, Almoloya de Juárez, Lerma y Zinacantepec, en tanto que la mayor concentración de servicios se presenta en Toluca, Metepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec (GEM, 2012).

#### **3.4.2.4. Características socioeconómicas de municipios de la RAMA-ZMVT**

##### **3.4.2.4.1. Metepec**

El municipio de Metepec es uno de los más poblados en la ZMVT, albergando una población total de 227, 827 personas hasta 2016 (IGCEM, 2016), a su vez, éste posee grandes cantidades de uso de suelo urbano con vialidades en el mismo (GEM, 2012).

El crecimiento poblacional que ha tenido este municipio ha sido constante, afectando no sólo al sector social, sino también al sector económico, pues de acuerdo con Ballesteros y Rotter (2014), el aumento poblacional de este municipio es de los más elevados en la ZMVT (Ballesteros & Rotter, 2014).

Por otro lado, el municipio de Metepec es uno de los lugares donde la dinámica económica y la tendencia ascendente de la densidad poblacional podrían impactar sobre la cantidad de emisiones de contaminantes a la atmósfera, tales como el Bióxido de Azufre (H. Ayuntamiento de Toluca, 2013).

#### **3.4.2.4.2. San Cristóbal Huichochitlán**

La población de San Cristóbal Huichochitlán es una sociedad campesina que se dedica principalmente a actividades económicas primarias (agricultura). Si bien también existen servicios correspondientes al sector terciario, éstos no representan algo significativo para la calidad del aire en la ZMVT (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011).

#### **3.4.2.4.3. San Mateo Atenco**

El municipio de San Mateo Atenco aloja una población de más de cinco mil habitantes por Km<sup>2</sup>. En este municipio existen grandes centros de empleo, unidades económicas industriales y de manera consecuente, una derrama económica para la población (GEM, 2012).

Este municipio posee una de las zonas industriales más importantes del área metropolitana del Valle de Toluca, con 569 unidades económicas de industria manufacturera (IGECEM, 2015), además de generar el segundo mayor aporte al PIB del Estado de México (COESPO, 2012). Si bien San Mateo Atenco es puntero en actividad industrial de la ZMVT, en 2014 el PIB con respecto al sector industria disminuyó (IGECEM, 2015).

Posteriormente, en 2015 es cuando San Mateo Atenco albergó gran cantidad de actividad industrial, la cual produjo más de 5,100 (millones de pesos) (IGECEM, 2015). En este sentido, cabe destacar que uno de los factores que más aporta a la generación de contaminantes atmosféricos es la actividad industrial (IPCC Working Group I, 2007).

#### **3.4.2.4.4. Toluca de Lerdo**

La capital mexiquense es un municipio en constante crecimiento e incluso registra un crecimiento poblacional de poco más de 20 mil habitantes desde 2014 (GEM, 2012).

Gracias a diversos factores, este municipio posee una supremacía económica sobre el resto de los municipios que conforman a la ZMVT, pues su aporte al PIB de la zona es de casi 8000 millones de pesos, mismos que genera gracias a sus actividades económicas (COESPO, 2012), y que pudiesen estar ligados a los niveles de calidad de aire del municipio (SEMARNAT, 2002). Por otro lado, el parque vehicular particular de Toluca ascendió de 30 mil en 2011, a 40 mil unidades en 2016 (IGECEM, 2016) y consecuentemente generando una merma en la calidad del aire de la ZMVT, pues el parque vehicular genera 3,363 toneladas de Bióxido de Azufre al año (GEM, 2012).

## Epílogo

La ZMVT es una metrópoli conformada por más de 22 municipios, donde no sólo convergen características naturales únicas, sino que también existe una relación entre factores sociales y factores económicos.

Por un lado, las características naturales del área denotan que, gracias a la presencia de un valle abierto en la ZMVT, el transporte de contaminantes se ve favorecido, sin que existe un estancamiento de estos, como en el caso de ZMVM. Por otro lado, los climas y épocas climáticas tienen consecuencias sobre la acumulación de contaminantes en el área, debido a que sus climas fríos intensifican el efecto invernadero y así, el atrapamiento de contaminantes atmosféricos, tales como el  $\text{SO}_2$ . En el mismo orden de ideas, las épocas secas que se viven en la ZMVT coadyuvan a dicho estancamiento, ya que no existen factores hídricos que favorezcan la depositación húmeda del  $\text{SO}_2$ .

Por otro lado, el dinamismo que alberga la ZMVT en cuestiones económicas y sociales, es otro foco de atención para el monitoreo de calidad del aire en la zona, pues en este lugar existen más de 11 mil unidades económicas industriales que generan emisiones de  $\text{SO}_2$ , así como lo hace la combustión de autotransportes, la industria energética, la industria manufacturera y otros.

No se debe dejar de lado el hecho de que la ZMVT sufre uno de los índices de migración, en el país, causando un aumento desmedido en el número de habitantes en dicha zona. Cabe resaltar que un aumento en este número causa un aumento en el parque vehicular y así, un aumento en las emisiones de  $\text{SO}_2$ .

Es importante monitorear a la ZMVT, ya que aún tiene características que la exentan de ciertos parámetros en mala calidad de aire, sin embargo, los puntos en contra que ésta posee, van en aumento con el paso de los años.

# **Capítulo 4**

## **Resultados y Observaciones**

## Resultados y Observaciones

En 1987 la Organización Mundial de la Salud (OMS), da inicio a temas sobre la calidad del aire atmosférico (OMS, 2016). A inicios de la década de los 90's, la OMS estableció los primeros límites permisibles para Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ) en las “Guías de Calidad del Aire”, mencionando también su injerencia en enfermedades respiratorias (OMS, 1999). En este tenor, la OMS recomienda a todos los países que adopten como límite máximo de Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ), el valor de 0.008 ppm para la concentración promedio de 24 horas, y un máximo de 0.188 ppm para el promedio de diez minutos (INE, 2009 b).

En este apartado se exponen y explican los diferentes resultados a los que la presente investigación ha llegado. A manera de organización, se dividen en resultados y observaciones de concentración de Bióxido de Azufre, por un lado y, por otro lado, resultados y observaciones tanto de registros de humedad, como de temperatura en la ZMVT.

Todos los resultados para concentraciones de Bióxido de Azufre se presentan para cada una las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, mismas que, en el presente trabajo, exhiben sus resultados a manera de gráficos y se encuentran divididas en Zona Centro (gráficos verdes), Zona Sur (gráficos azules) y zona Norte (gráficos amarillos); dichas estaciones son las siguientes:

- Zona Centro
  - OX: Oxtotitlán
  - CE: Centro
- Zona Sur
  - MT: Metepec
  - CB: Ceboruco
  - SM: San Mateo Atenco
- Zona Norte
  - AP: Aeropuerto
  - SC: San Cristóbal Huichochitlán (RAMA-ZMVT, 2014).

## **4.1. Concentraciones de SO<sub>2</sub>**

En las concentraciones de Bióxido de Azufre, se presentan los diferentes gráficos obtenidos, en un periodo de 2011 a 2016, de las siete estaciones la RAMA-ZMVT.

Los registros de concentración de Bióxido de Azufre se presentan en gráficos por hora, mes y año, para así poder generar información con el mayor detalle posible.

### **4.1.1. Concentraciones por hora**

Las concentraciones por hora son las mediciones más detalladas que presenta la RAMA-ZMVT, pues en éstas se reportan las mediciones en ppm (partes por millón), de las 24 horas del día, durante todo el año, de cada estación de la RAMA-ZMVT; como se ve en los siguientes gráficos, presentados desde 2011 hasta 2016, de las siete estaciones.

#### **4.1.1.1. Año 2011**

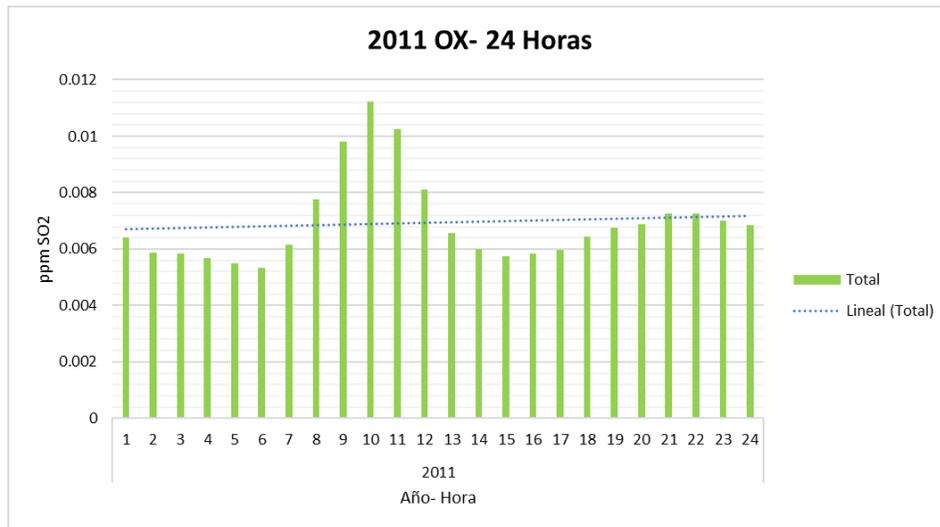
##### **4.1.1.1.1. (OX) Oxtotitlán**

En la estación de OX para el año 2011, se presenta una línea de tendencia anual (línea azul) ascendente, la cual pasa de las 0.006 ppm a las 0.007 ppm; arrojando así un promedio de 0.007 ppm en esta estación para 2011.

En las horas diurnas del **Gráfico 4.1.1.** se observa un aumento desde las 8:00 hasta a las 12:00 horas, marcando un máximo a las 10:00 horas de casi 0.012 ppm.

Por su parte, durante las horas nocturnas, se vuelven a elevar las mediciones, desde las 19:00 hasta las 23:00 horas, con un máximo a las 21:00 y 22:00 horas de 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.1. 2011 Oxtotitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el caso de este gráfico, es posible observar una tendencia al alza para la concentración de  $\text{SO}_2$ , gracias a las altas concentraciones al medio día y en horas crepusculares. En este tenor, el Instituto Nacional de Ecología, hoy INECC, en sus almanaques indica que únicamente se deberían presentar picos durante el mediodía (INE, 2009).

Las mediciones matutinas elevadas se pueden deber a la dinámica poblacional que genera emisiones de Bióxido de Azufre, tales como uso de vehículos automotores (Romero, y otros, 2004).

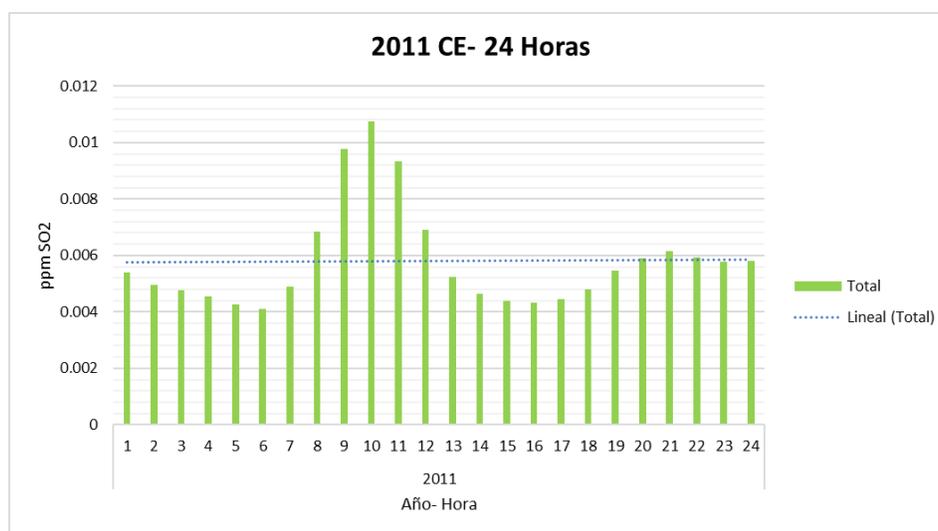
Por su parte, los registros nocturnos pueden deberse a la radiación nocturna, ya que, al bajar la insolación, la superficie terrestre se enfría, provocando un desprendimiento de calor, mismos que calienta las capas de aire inmediatas y genera un almacenamiento de impurezas en capas de los primeros niveles, como el  $\text{SO}_2$  (Ayllón, 2003).

#### 4.1.1.1.2. (CE) Centro

Durante 2011, se presenta un aumento en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 8:00 hasta las 12:00 horas, ambos con 0.007 ppm y llegando a un punto máximo con poco más de 0.01 ppm a las 10:00 horas; lo cual arroja un promedio de 24 horas de 0.006 ppm, en la estación CE.

Para las mediciones vespertinas y nocturnas, los valores se vuelven a elevar desde las 20:00 hasta las 24:00 horas, oscilando las 0.006 ppm en todas las horas. De esta manera, la línea de tendencia media (línea azul), se mantiene estable en las 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.2. 2011 Centro por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Con base en los almanaques del INE, hoy INECC, al SO<sub>2</sub> se le documenta de acuerdo con el comportamiento unimodal, mismo que hace alusión únicamente a elevaciones matutinas, de 9:00 a 12:00, tal y como se observa en el Gráfico 4.1.2. (INE, 2009).

Por su parte, las elevaciones nocturnas, que no se encuentran fundamentadas en la bibliografía del INE, pueden deberse a la interacción de la radiación nocturnas, ya que al enfriarse la superficie terrestre, ésta provoca un desprendimiento de calor, lo cual calienta las capas de aire inmediatas y genera un almacenamiento de impurezas en capas de los primeros niveles, tales como el SO<sub>2</sub> (Ayllón, 2003).

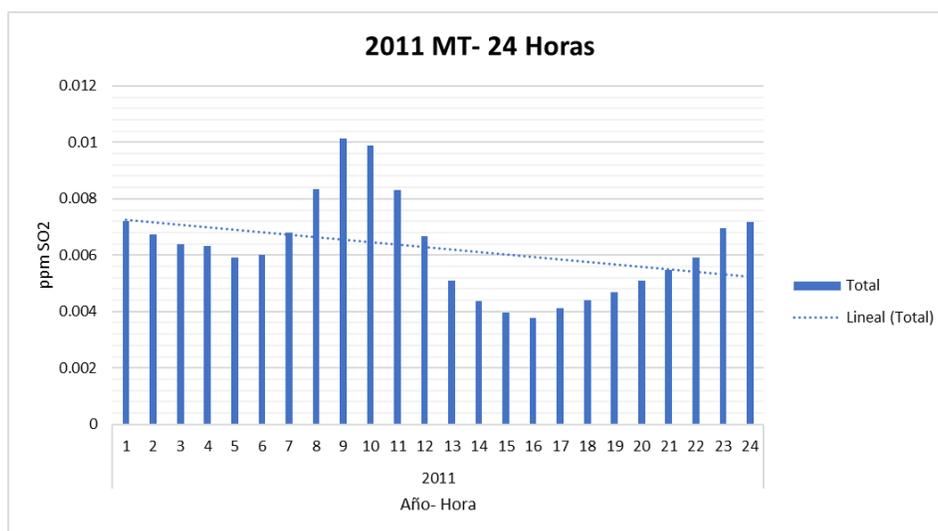
#### 4.1.1.1.3. (MT) Metepec

En el **Gráfico 4.1.3.** se observa una línea de tendencia media decreciente (línea azul), pues de la 1:00 a las 24:00 horas, ésta va de las 0.007 ppm hasta las 0.005 ppm; marcando un promedio en 24 horas, de 0.006 ppm para la estación MT.

Por un lado, los registros diurnos incrementan desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, ambos con 0.008 ppm; y alcanzan un máximo a las 9:00 y 10:00 horas, de 0.01 ppm.

Las horas crepusculares se vuelven a elevar después de un descenso que va desde las 14:00 hasta a las 17:00, con un mínimo de 0.004 ppm; por su parte, el aumento empieza a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.007 ppm a las 23:00 y 24:00 horas.

**Gráfico 4.1.3. 2011 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Los registros vespertinos bajos del **Gráfico 4.1.3.** alcanzan las 0.004 ppm, valor más bajo que registra esta estación en el periodo de estudio 2011-2016. Sin embargo, gracias a que los registros de SO<sub>2</sub> son tanto altos, como bajos; esta estación presenta un promedio de 0.006 ppm y se mantiene en niveles promedio de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT (SEDEMA, 2017).

Por otro lado, el municipio de Metepec es uno de los municipios que más dinamismo poblacional presenta desde 2011, lo cual pudiese estar ligado a la variabilidad en los registros de SO<sub>2</sub> en la estación MT (Ballesteros & Rotter, 2014).

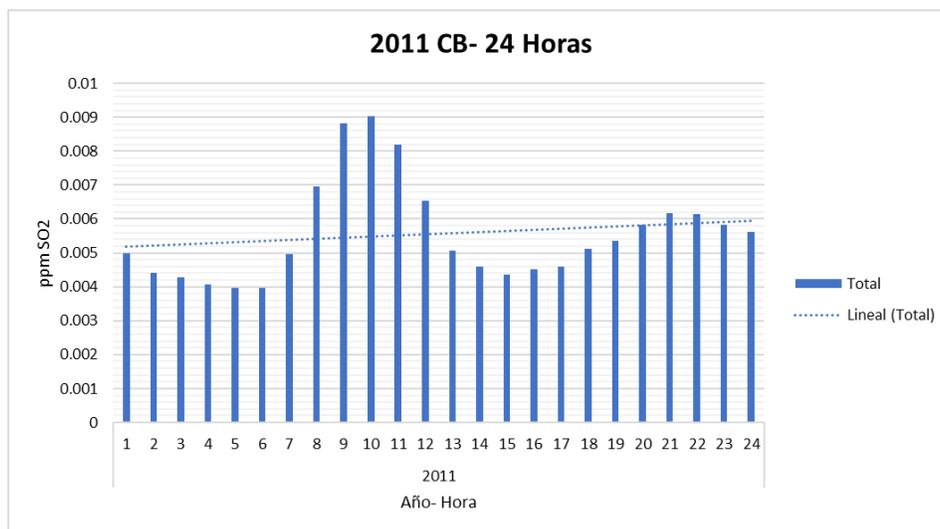
#### 4.1.1.1.4. (CB) Ceboruco

En la estación de CB, el comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pues pasa de las 0.005 ppm en la hora 1:00, a las 0.006 ppm en la hora 24:00; arrojando así, un promedio en 24 horas de 0.005 ppm.

En las horas diurnas se presentan registros altos para el SO<sub>2</sub>, iniciando a las 8:00 horas con 0.007 ppm y terminando a las 12:00 horas con casi 0.007 ppm; y a su vez, se presenta un máximo a las 9:00 y 10:00 horas de 0.009 ppm.

Durante la noche, es posible observar una segunda elevación en los registros, de 20:00 a 23:00 horas, todos cerca de las 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.4. 2011 Ceboruco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Las horas clave para elevaciones en las concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan en horas donde la humedad aparece como actor secundario, tales como las 8:00, 9:00, 10:00, 11:00 y 12:00; ya que es posible que estos ascensos se deban a la disminución en el contenido de humedad en la ZMVT (RETC- Registro de Emisiones y Transeferncias de Contaminantes- Chile, 2017).

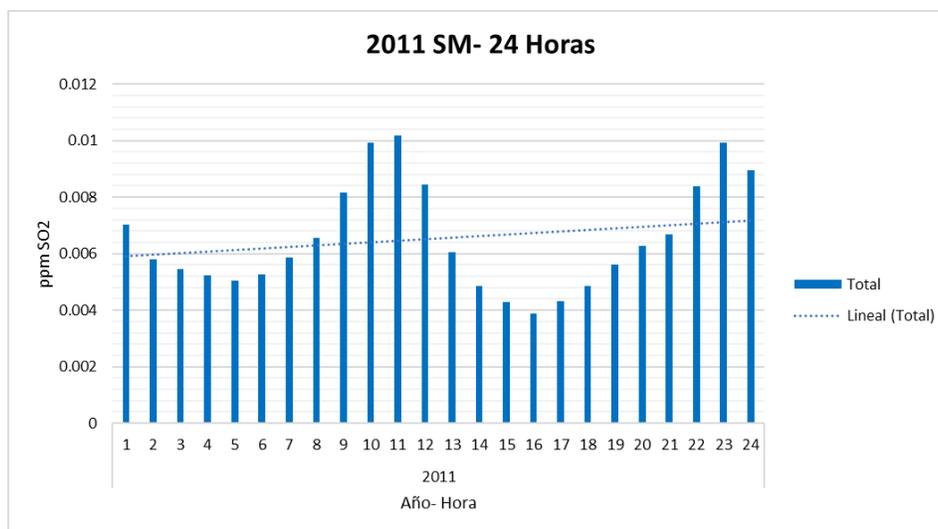
#### 4.1.1.1.5. (SM) San Mateo Atenco

En 2011 se presenta una línea de tendencia media (línea azul) creciente, que va de 0.006 ppm a casi 0.008 ppm, en 24 horas. En este sentido, el promedio de 24 horas es de 0.006 ppm

Para mediciones matutinas, éstas se elevan desde las 8:00 hasta las 12:00 horas, con 0.006 ppm al inicio y terminando con 0.008 ppm; presentando su registro más alto a las 10:00 y 11:00 horas de 0.01 ppm

Por su parte, durante la noche, las mediciones se elevan después de un marcado descenso que va desde las 14:00 hasta a las 18:00, con un mínimo de 0.004 ppm a las 16:00 horas; por su parte, el aumento empieza a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.01 ppm a las 23:00.

**Gráfico 4.1.5. 2011 San Mateo Atenco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.5.** se presentan elevaciones igualmente elevadas para registros diurnos y nocturnos, sin embargo, los registros vespertinos son los más bajos en la estación SM del periodo de estudio 2011-2016, compensando así, el promedio marcado por la estación.

Cabe mencionar que, la estación de SM se ubica en una de las zonas industriales y manufactureras más importantes de la ZMVT (IGECEM, 2015), lo cual podría influir en los registros de este gas en el área (SEMARNAT, 2002).

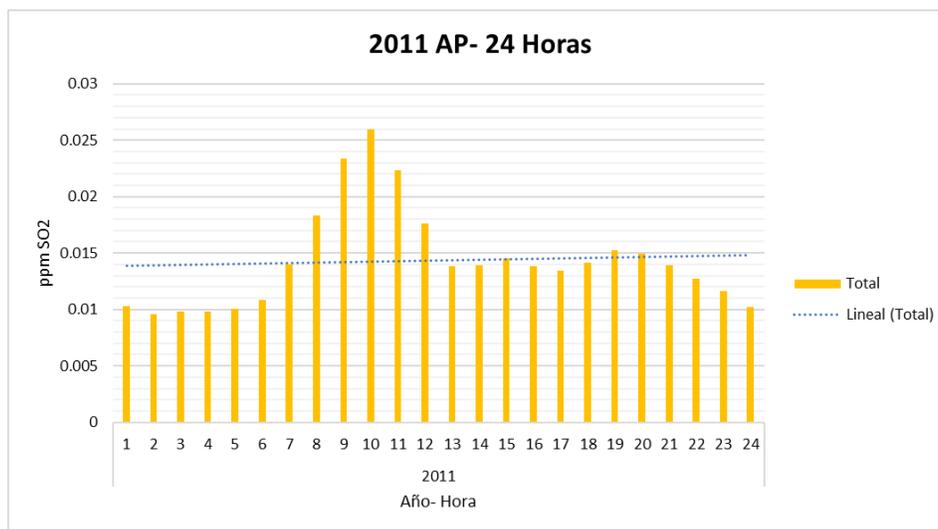
#### 4.1.1.1.6. (AP) Aeropuerto

En el **Gráfico 4.1.6.** se presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) constante, oscilando las 0.015 ppm y dando así, un promedio para las 24 horas de 0.14 ppm.

Por un lado, las mediciones en el día marcan elevaciones desde las 7:00 horas, con 0.015 ppm, hasta las 12:00 horas, con 0.017 ppm. Presentando su punto más alto a las 10:00 horas de más de 0.025 ppm.

Por otro lado, las mediciones vespertinas y nocturnas se mantienen constante en 0.015 ppm sin ascensos nocturnos, ni descensos vespertinos.

**Gráfico 4.1.6. 2011 Aeropuerto por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación de AP, se observa una tendencia de poca disminución de las concentraciones de SO<sub>2</sub>. Cabe mencionar que la estación de AP reporta el comportamiento de concentraciones de Bióxido de Azufre en torno al Aeropuerto Internacional de Ciudad de Toluca (AICT); el cual guarda una dinámica directa con medios de transporte, mismos que son responsables, en gran medida, de las concentraciones de gases contaminantes en el aire (ver **Figura 2.3.**) (GEM, 2012).

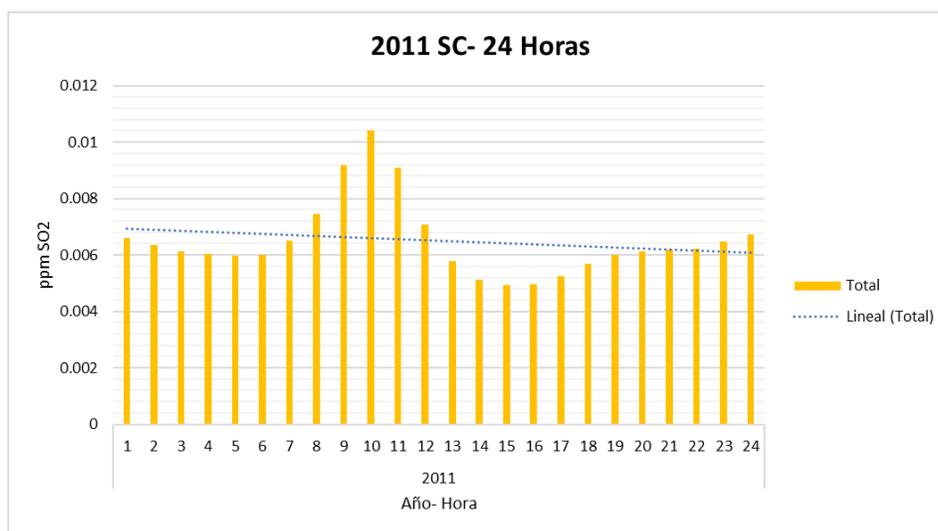
#### 4.1.1.1.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En la estación SC se observa un comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) decreciente, pasando de las 0.007 a las 0.006 ppm; arrojando así un promedio de 0.006 ppm en 24 horas.

En el horario matutino se observan registros superiores desde las 8:00 hasta las 12:00 horas, ambas con 0.007 ppm y, con un punto crítico a las 10:00 horas, de 0.01 ppm.

Durante la tarde se presenta una disminución en los niveles de SO<sub>2</sub>, desde las 14:00 hasta las 17:00 horas, fluctuando las 0.005 ppm; y posterior a ello, de 20:00 a 24:00 horas, se presenta un segundo pico en los registros, llegando a las 0.006 ppm en todas las horas.

**Gráfico 4.1.7. 2011 San Cristóbal Huichochitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Si bien la estación SC se ubica en una zona no tan urbanizada como AP o SM (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011), aún es posible observar registros que rebasan la media, desde las 8:00 hasta las 12:00 horas, tal y como se indica en la bibliografía, con base en la dinámica poblacional o bien, con base en fenómenos meteorológicos (INE, 2009).

Por su parte, el comportamiento nocturno es estable, pero no decreciente; caso contrario a lo que el comportamiento del Bióxido de Azufre pudiese presentar (INE, 2009).

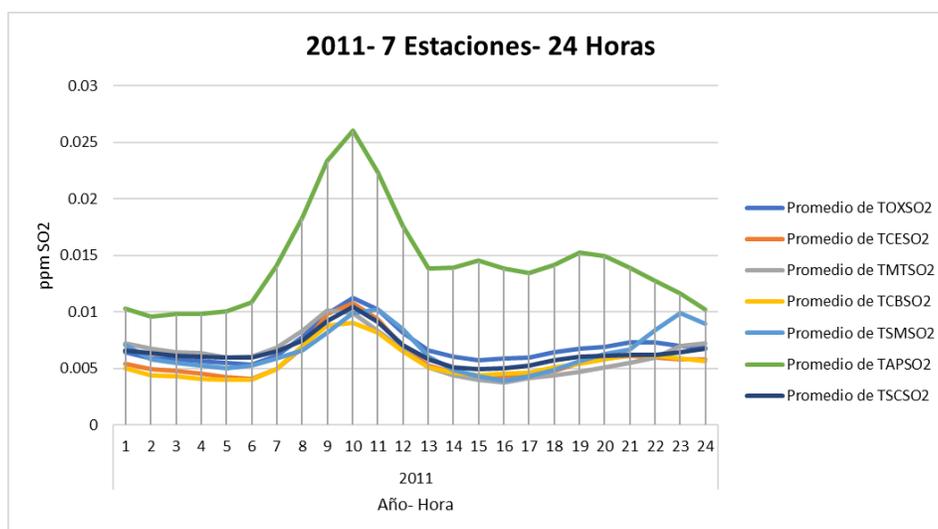
#### 4.1.1.1.8. 2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el último gráfico de 2011 (ver **Gráfico 4.1.8.**) se presentan las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, de manera conjunta.

Es posible observar que la estación con los registros más altos es AP (verde), con concentraciones de hasta 0.025 ppm a las 10:00 horas.

De manera general, las otras seis estaciones presentan registros similares de concentraciones, con elevaciones desde las 8:00 hasta las 12:00 horas, con una cúspide a las 10:00 horas, de aproximadamente 0.01 ppm.

**Gráfico 4.1.8. 2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Es posible apreciar que en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, se presentan las horas críticas con respecto a las concentraciones de SO<sub>2</sub> (INE, 2009).

Si bien existe una tendencia en aumento durante la noche, ésta es menor que la que se presenta durante el día, ya que estas mediciones no alcanzan las 0.01 ppm de Bióxido de Azufre. Esto se pudiese explicar gracias a la radiación nocturna que emana la ZMVT y que coadyuva al atrapamiento de contaminantes atmosféricos, tales como el SO<sub>2</sub> (Ayllón, 2003).

En materia jurídica, cabe resaltar que ninguna de las estaciones de la RAMA-ZMVT sobrepasa el límite máximo permisible que establece la NOM-022-SSA1-2010, para promedio de 24 horas, no mayor a 0.110 ppm (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

#### 4.1.1.2. Año 2012

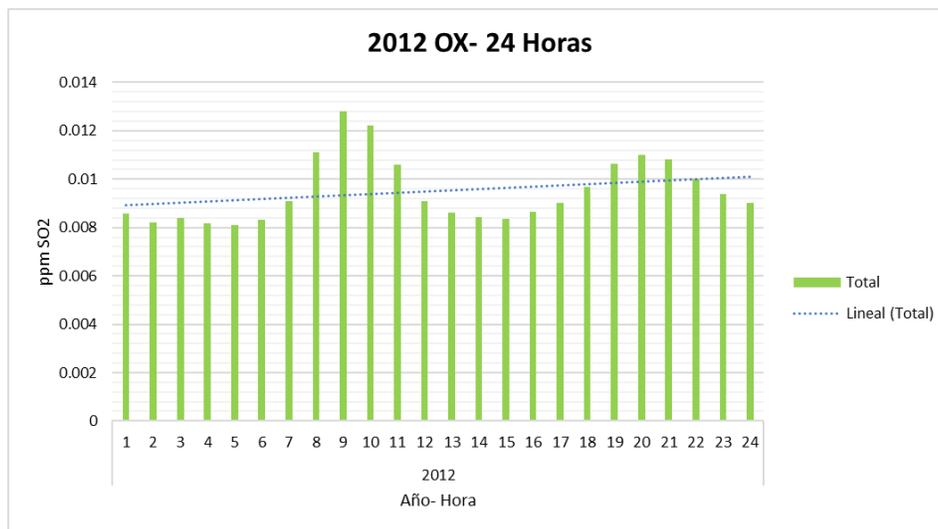
##### 4.1.1.2.1. (OX) Oxtotitlán

En la estación de OX para el año 2012, se presenta una línea de tendencia anual (línea azul) ascendente, la cual pasa de las 0.007 ppm a las 0.01 ppm; arrojando así un promedio de 0.009 ppm en esta estación para 2012.

En las horas diurnas del **Gráfico 4.1.9.** se observa un aumento desde las 8:00 hasta a las 11:00 horas, marcando un máximo a las 9:00 horas de casi 0.013 ppm.

Por su parte, durante las horas nocturnas, se vuelven a elevar las mediciones, desde las 18:00 hasta las 22:00 horas, con un máximo a las 20:00 horas de poco más de 0.01 ppm.

**Gráfico 4.1.9. 2012 Oxtotitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

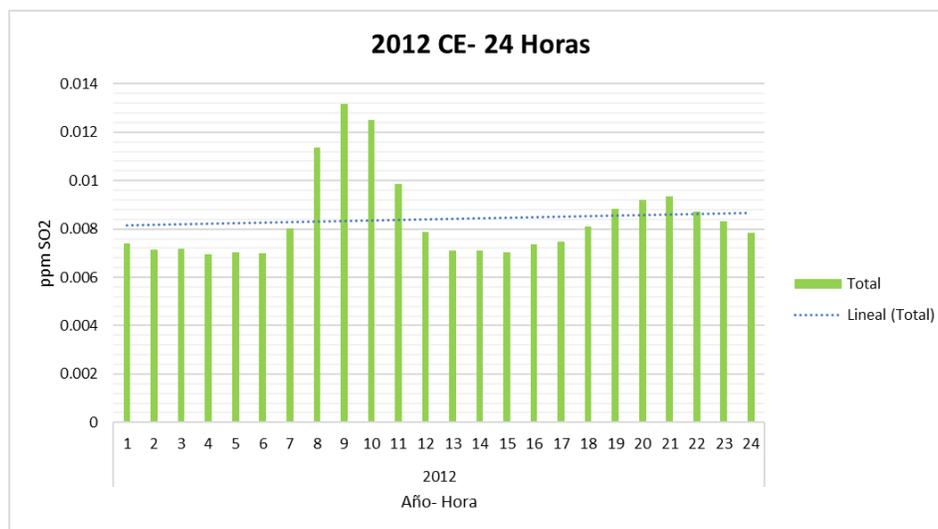
De manera general se observan concentraciones elevadas durante 2012 en esta estación, pues el registro más bajo es de 0.008 ppm y el más alto está por arriba de las 0.012 ppm. Cabe mencionar que el COESPO (2012), coloca al municipio de Toluca de Lerdo, como el municipio con mayor aporte económico al PIB para la ZMVT; mismo que genera gracias al desempeño de sus actividades económicas (COESPO, 2012) y que pudiese estar ligado a las altas concentraciones de contaminantes registradas en 2012 (SEMARNAT, 2002).

#### 4.1.1.2.2. (CE) Centro

Durante 2012, se presenta un aumento en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, pasando de las 0.008 ppm a las 0.01 ppm, respectivamente; y llegando a un punto máximo con de 0.013 ppm a las 9:00 horas; lo cual arroja un promedio para las 24 horas de 0.008 ppm, en la estación CE.

Para las mediciones vespertinas y nocturnas, los valores se vuelven a elevar desde las 19:00 hasta las 23:00 horas, oscilando las 0.009 ppm en todas las horas. De esta manera, la línea de tendencia media (línea azul), se mantiene al alza.

**Gráfico 4.1.10. 2012 Centro por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

El comportamiento elevado del **Gráfico 4.1.10.** se puede explicar, por un lado, gracias a las concentraciones por arriba de la media durante la noche; y, por otro lado, gracias a los registros tan elevados durante el día, con un máximo de 0.013 ppm en la estación CE.

De 2011 a 2012 la estación CE presenta un alza en su promedio de 24 horas, pues pasa de las 0.005 ppm a las 0.008 ppm. Una elevación tan pronunciada puede ser producto de la dinámica poblacional del Estado de México, ya que, en 2012 fue la entidad con el mayor crecimiento natural y con el mayor saldo neto migratorio nacional (COESPO, 2012), factores que coadyuvan a los registros de contaminantes atmosféricos en la zona (Ballesteros & Rotter, 2014).

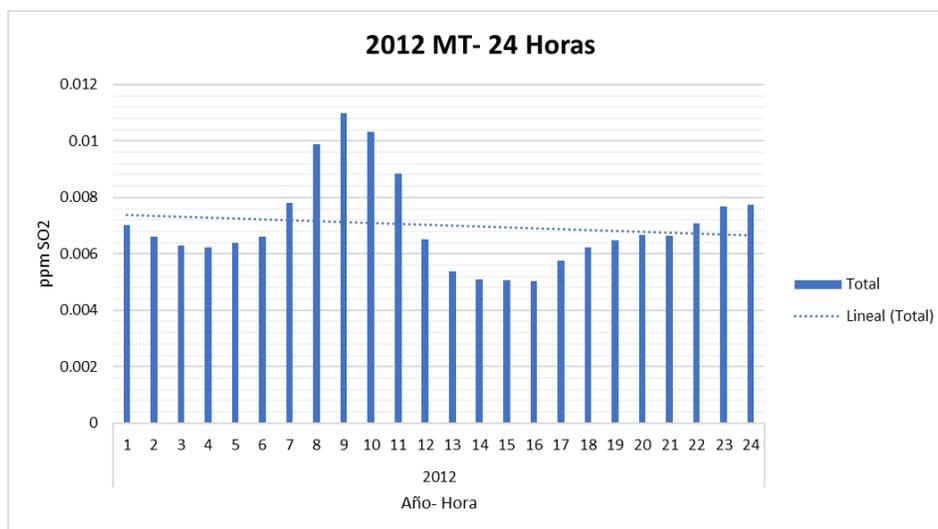
#### 4.1.1.2.3. (MT) Metepec

En el **Gráfico 4.1.11.** se observa una línea de tendencia media decreciente (línea azul), pues de la 1:00 a las 24:00 horas, ésta va de las 0.007 ppm hasta las 0.006 ppm; marcando un promedio en 24 horas, de 0.007 ppm para la estación MT.

Por un lado, los registros diurnos incrementan desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, con 0.008 ppm y 0.009 ppm, respectivamente; alcanzando un máximo a las 9:00 horas, de más de 0.01 ppm.

Las horas crepusculares se vuelven a elevar después de descenso que va desde las 14:00 hasta a las 16:00, con un mínimo de 0.005 ppm; por su parte, el aumento empieza a las 19:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.008 ppm a las 23:00 y 24:00 horas.

**Gráfico 4.1.11. 2012 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En los puntos altos del gráfico, se observa que en mediciones nocturnas se elevan después de haber alcanzado puntos mínimos; esta característica no está referenciada en la bibliografía del comportamiento del Bióxido de Azufre. Como el SO<sub>2</sub> es un gas producto de las actividades humanas, es posible explicar este comportamiento de altas y bajas en los registros, con el dinamismo que el municipio de Metepec ha presentado desde 2011 (Ballesteros & Rotter, 2014).

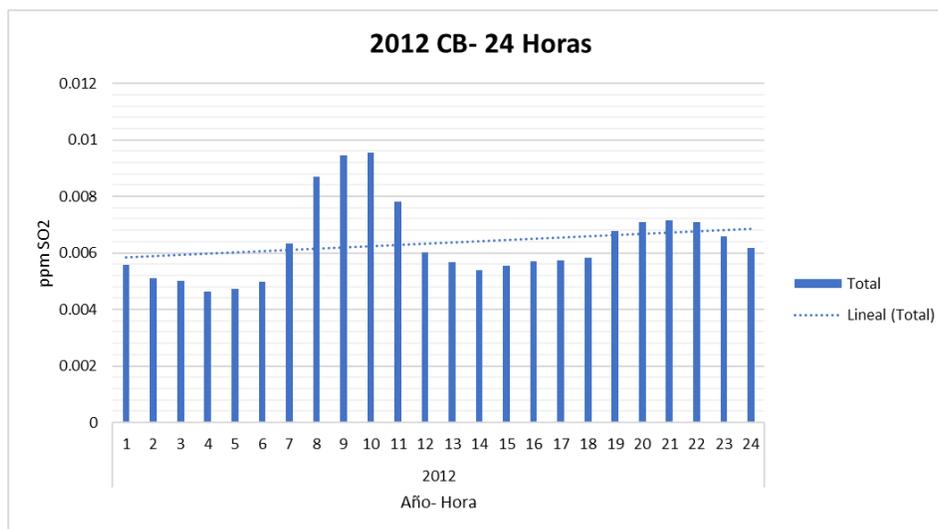
#### 4.1.1.2.4. (CB) Ceboruco

En la estación de CB, el comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pues pasa de las 0.006 ppm en la hora 1:00, a las 0.007 ppm en la hora 24:00; arrojando así, un promedio en 24 horas de 0.006 ppm.

En las horas diurnas se presentan registros altos para el SO<sub>2</sub>, iniciando a las 8:00 horas con 0.009 ppm y terminando a las 11:00 horas con casi 0.008 ppm; y a su vez, se presenta un máximo a las 9:00 y 10:00 horas de casi 0.01 ppm.

Durante la noche, es posible observar una segunda elevación en los registros, de 19:00 a 22:00 horas, todos cerca de las 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.12. 2012 Ceboruco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Los altos registros de concentración de SO<sub>2</sub> durante la noche concuerdan con el comportamiento de la zona, pues ésta es considerada como una isla de calor, lo cual, llega a influir como uno de los factores causantes en el aumento en las concentraciones de SO<sub>2</sub>; ya que, la ciudad de Toluca, al ser una isla de calor (Morales, Madrigal, & González, 2007), presenta un almacenamiento de calor diurno y liberación del mismo durante la noche, ocasionando así, almacenamiento de contaminantes en las capas bajas atmosféricas (Ayllón, 2003).

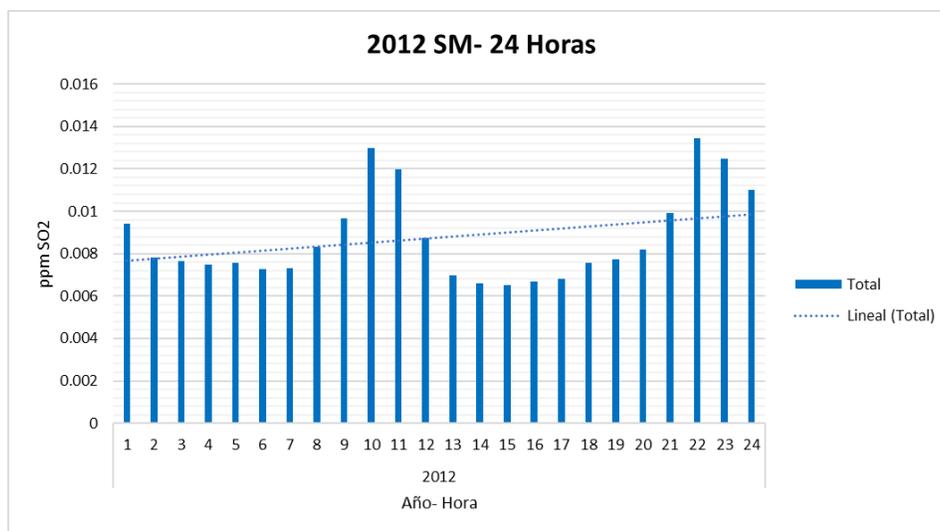
#### 4.1.1.2.5. (SM) San Mateo Atenco

En 2012 se presenta una línea de tendencia media (línea azul) creciente, que va de 0.008 ppm a casi 0.01 ppm, en 24 horas. En este sentido, el promedio de 24 horas es de 0.008 ppm

Para mediciones matutinas, éstas se elevan desde las 9:00 hasta las 11:00 horas, con 0.01 ppm al inicio y terminando con 0.012 ppm; presentando su registro más alto a las 10:00 horas de 0.013 ppm

Por su parte, durante la noche, las mediciones se elevan después de un marcado descenso que va desde las 14:00 hasta a las 17:00, oscilando las 0.006 ppm en todas las horas; por su parte, el aumento empieza a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.01 ppm a las 22:00 horas.

**Gráfico 4.1.13. 2012 San Mateo Atenco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.13.** se aprecia que los registros nocturnos son tan elevados como los registros matutinos, ambos con máximos de 0.013 ppm.

La estación SM se encuentra en una de las zonas económicas más importantes de la ZMVT, el municipio de San Mateo Atenco (IGCEM, 2015), lo cual genera emisiones de SO<sub>2</sub> gracias a que la dinámica económica de la zona genera un constante uso de vehículos de transporte, actividad industrial, etc. (GEM, 2012).

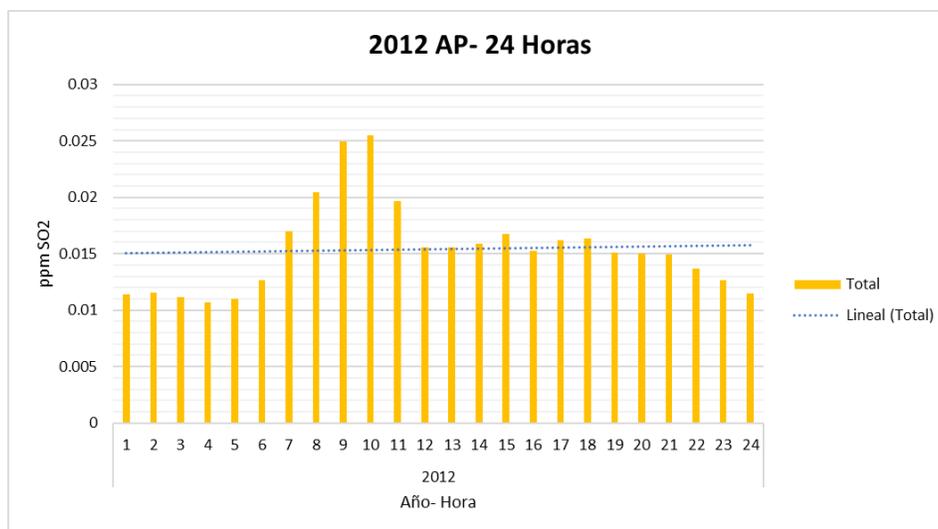
#### 4.1.1.2.6. (AP) Aeropuerto

En el **Gráfico 4.1.14.** se presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) constante, oscilando las 0.015 ppm y dando así, un promedio para las 24 horas de 0.15 ppm.

Por un lado, las mediciones en el día marcan elevaciones desde las 7:00 horas, con 0.016 ppm, hasta las 11:00 horas, con 0.02 ppm. Presentando su punto más alto a las 9:00 y 10:00 horas con 0.025 ppm.

Por otro lado, las mediciones vespertinas y nocturnas se mantienen constante en 0.015 ppm sin descensos vespertinos y con una baja nocturna en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 22:00 hasta las 24:00 horas, con un mínimo de 0.01 ppm a las 24:00 horas.

**Gráfico 4.1.14. 2012 Aeropuerto por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación de AP, muestra la dinámica que guarda el AICT en 2012, ya que las elevaciones no fluctúan hacia abajo, sino que permanecen constantes en alrededor de 0.015 ppm, alcanzando los registros más elevados de este año en las siete estaciones de la RAMA-ZMVT; por ello, se entiende que gracias a la actividad aeroportuaria cercana a la estación AP, se emite SO<sub>2</sub>, ya que la turbosina posee una concentración de 0.053% de SO<sub>2</sub> (Herrera & Vales, 2013), mismo que merma la calidad del aire en la zona y se refleja en los altos registros matutinos de la estación.

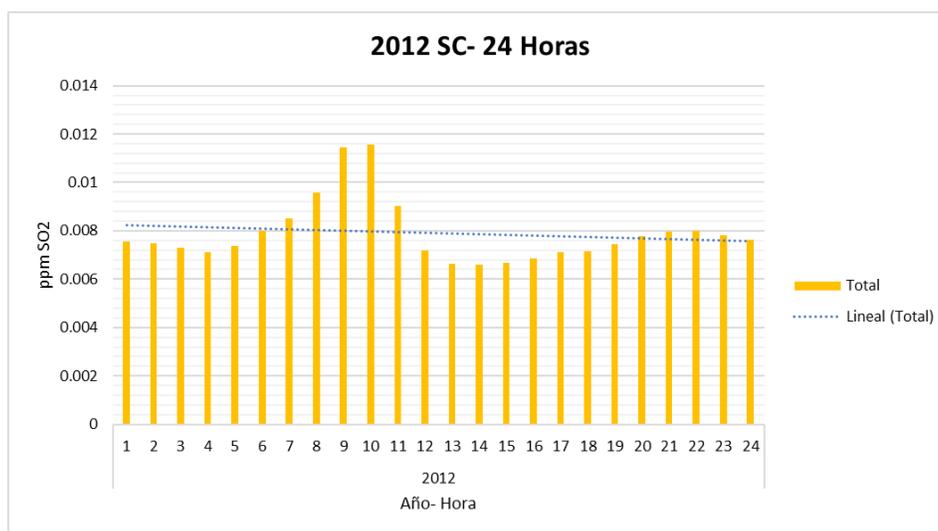
#### 4.1.1.2.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En la estación SC se observa un comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) constante, fluctuando las 0.008 ppm y arrojando así un promedio de 0.008 ppm en 24 horas.

En el horario matutino se observan registros superiores desde las 8:00 hasta las 10:00 horas, con 0.01 ppm y 0.012 ppm respectivamente, con un punto crítico a las 9:00 y 10:00 horas, de 0.012 ppm.

Durante la tarde se presenta una disminución en los niveles de SO<sub>2</sub>, desde las 13:00 hasta las 16:00 horas, fluctuando las 0.006 ppm; y posterior a ello, de 20:00 a 24:00 horas, se presenta un segundo pico en los registros, llegando a las 0.008 ppm en todas las horas.

**Gráfico 4.1.15. 2012 San Cristóbal Huichochitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación SC se presenta nuevamente el comportamiento de incrementos nocturnos, no obstante, éstos no llegan a ser tan pronunciados, lo cual puede ser gracias al desarrollo agrícola y no industrial que se presenta en San Cristóbal Huichochitlán (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011); ya que la industria es un gran aportador de emisiones atmosféricas de SO<sub>2</sub> (SEMARNAT, 2002).

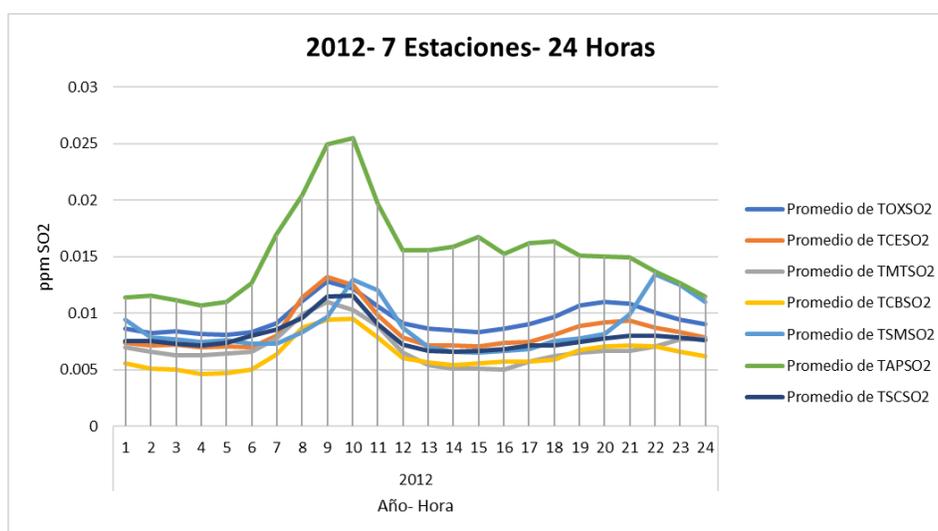
#### 4.1.1.2.8. 2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.16.** se presentan las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en 2012.

Como se aprecia en el gráfico, la estación AP (verde), es la estación con los registros más altos para promedio horario, pues ésta alcanza poco más de 0.025 ppm, a las 9:00 y 10:00 horas.

De manera general, todas las estaciones sufren de una baja vespertina, desde las 14:00 hasta las 18:00 horas, para presentar un ascenso nocturno que varía de acuerdo con cada estación.

**Gráfico 4.1.16. 2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La dinámica de las zonas industriales es visible en el **Gráfico 4.1.16.** pues las estaciones AP (verde) y SM (azul claro) son las que presentan picos más sobresalientes en la gráfica, dejando en claro que la actividad industrial y manufacturera son grandes aportadores para la emisión de contaminantes atmosféricos, tales como el SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2007).

En materia jurídica, cabe resaltar que ninguna de las estaciones de la RAMA-ZMVT sobrepasa el límite máximo permisible que establece la NOM-022-SSA1-2010, para promedio de 24 horas, no mayor a 0.110 ppm (NOM-022-SSA1-2010, 2010). No obstante, cabe resaltar que los límites establecidos a nivel nacional no son equiparables con lo que recomienda la OMS, para mantener una calidad del aire aceptable para la salud de la población (INE, 2009 b).

### 4.1.1.3. Año 2013

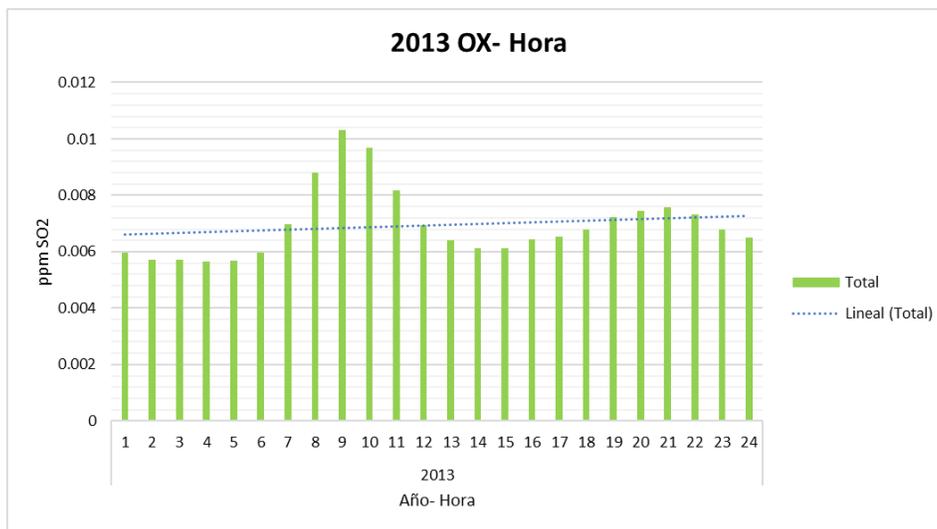
#### 4.1.1.3.1. (OX) Oxtotitlán

En la estación de OX para el año 2013, se presenta una línea de tendencia anual (línea azul) ascendente, la cual pasa de las poco más de 0.006 ppm a las casi 0.008 ppm; arrojando así un promedio de 0.007 ppm en esta estación para 2013.

En las horas diurnas del **Gráfico 4.1.17**, se observa un aumento desde las 7:00 hasta a las 12:00 horas, marcando un máximo a las 9:00 horas de poco más de 0.01 ppm.

Por su parte, durante las horas nocturnas, se vuelven a elevar las mediciones, desde las 19:00 hasta las 22:00 horas, con un máximo a las 20:00 y 21:00 horas de poco más de 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.17. 2013 Oxtotitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

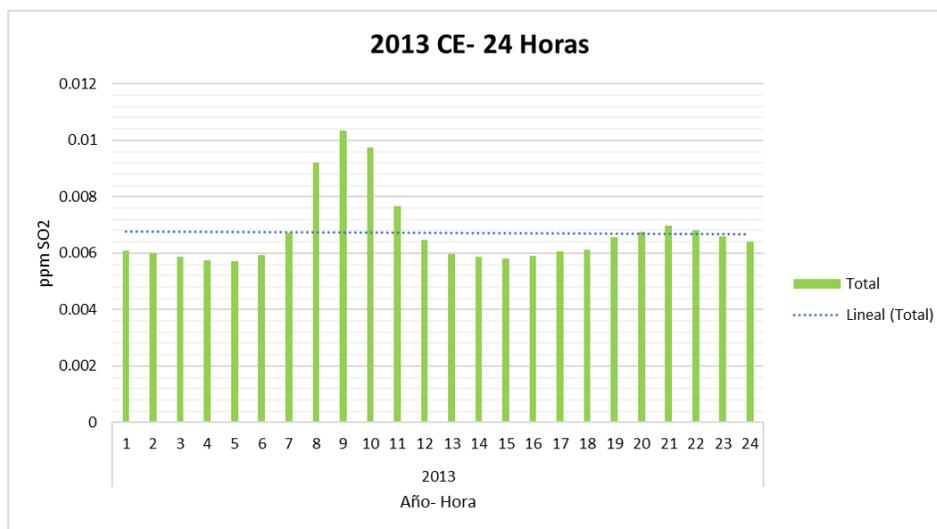
La dinámica poblacional de la ZMVT refiere a una serie de factores que pueden influir con los registros atmosféricos y tal es el caso del tiempo atmosférico y el clima en la ciudad de Toluca (Hernández & Madrigal, 2004). Cabe mencionar que de 2012 a 2013, las mediciones de SO<sub>2</sub> bajan, lo cual pudiese deberse a que en 2013 hubo un aumento histórico en la temperatura de la ciudad de Toluca de 1.96°C (Primo, 2015); en este sentido, de acuerdo con el IPCC en su “5° Reporte de Evaluación del Grupo de Trabajo 1”, plantea que si hubiese una disminución en los registros de SO<sub>2</sub>, existiría un aumento en la temperatura, gracias al efecto de enfriamiento del SO<sub>2</sub>.

#### 4.1.1.3.2. (CE) Centro

Durante 2013, se presenta un aumento en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, pasando de las 0.007 ppm a las 0.008 ppm, respectivamente; y llegando a un punto máximo con de 0.01 ppm a las 9:00 horas; lo cual arroja un promedio para las 24 horas de 0.007 ppm, en la estación CE.

Para las mediciones vespertinas y nocturnas, los valores se vuelven a elevar desde las 20:00 hasta las 22:00 horas, oscilando las 0.007 ppm en todas las horas. De esta manera, la línea de tendencia media (línea azul), se mantiene constante en 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.18. 2013 Centro por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación CE se presenta un comportamiento que va acorde con lo que indican los almanaques del INE, pues los registros obedecen el patrón de sobresaltos a las 9:00 horas. En este sentido, el comportamiento vespertino y nocturno, de igual manera, obedece a lo estipulado en la bibliografía, pues si existen elevaciones, pero éstas no son tan significativas como para rebasar el promedio (INE, 2009). Por ello, esta estación en 2013 denota registros del Bióxido de Azufre típicos (INE, 2009).

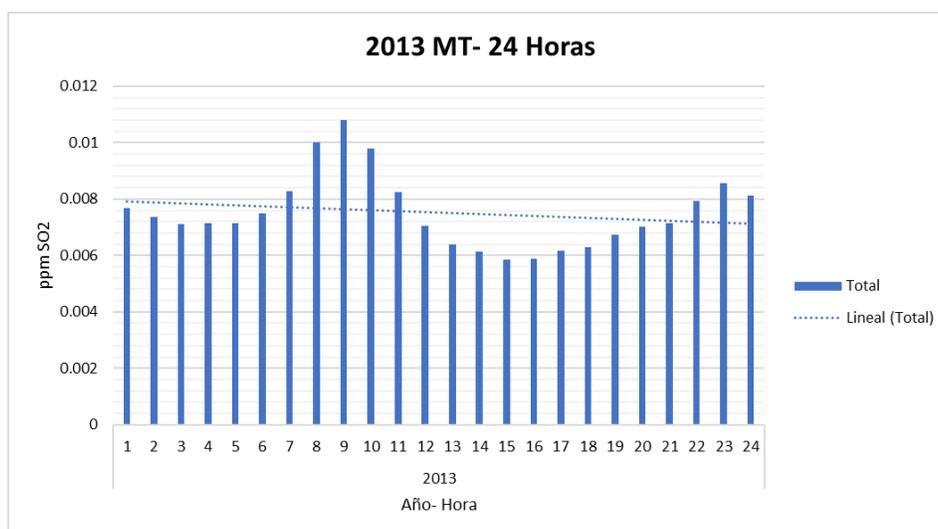
#### 4.1.1.3.3. (MT) Metepec

En el **Gráfico 4.1.19.** se observa una línea de tendencia media decreciente (línea azul), pues de la 1:00 a las 24:00 horas, ésta va de las 0.008 ppm hasta las 0.007 ppm; marcando un promedio en 24 horas, de 0.007 ppm para la estación MT.

Por un lado, los registros diurnos incrementan desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, ambos con 0.008 ppm; alcanzando un máximo a las 9:00 horas, de más de 0.01 ppm.

Las horas crepusculares se vuelven a elevar a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.009 ppm a las 23:00 horas.

**Gráfico 4.1.19. 2013 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Con el paso de los años, la estación MT, ubicada en el municipio de Metepec, se vuelve una de las zonas habitacionales con mayor crecimiento y la segunda más poblada de la ZMVT (COESPO, 2012). En este tenor, las concentraciones de SO<sub>2</sub> se vuelven más elevadas con el paso del tiempo, pues éstas obedecen, entre otras cosas, a la dinámica poblacional; tal es el caso del uso de medios de transporte (GEM, 2012).

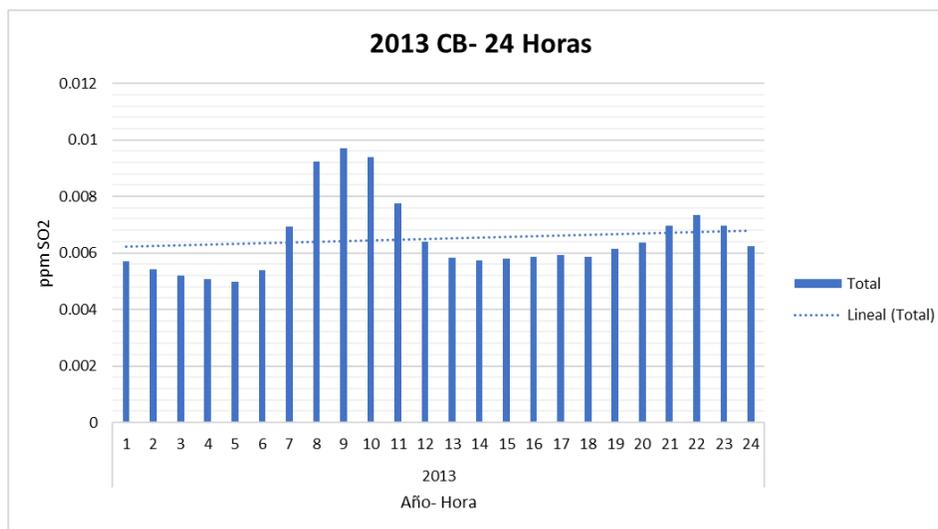
#### 4.1.1.3.4. (CB) Ceboruco

En la estación de CB, el comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pues pasa de las 0.006 ppm en la hora 1:00, a las 0.007 ppm en la hora 24:00; arrojando así, un promedio en 24 horas de 0.006 ppm.

En las horas diurnas se presentan registros altos para el SO<sub>2</sub>, iniciando a las 8:00 horas con 0.009 ppm y terminando a las 11:00 horas con casi 0.008 ppm; y a su vez, se presenta un máximo a las 9:00 horas de 0.01 ppm.

Durante la noche, es posible observar una segunda elevación en los registros, de 21:00 a 23:00 horas, todos cerca de las 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.20. 2013 Ceboruco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación CB registra el promedio más bajo de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT para el año 2013, no obstante, los valores elevados en el horario matutino son de los más altos registrados en la estación CB de todo el periodo de estudio 2011-2016. Con ello, es posible señalar a la estación CB como una estación poco constante en sus mediciones.

Por su parte, al presentarse incrementos durante la noche, es posible que, entre otras cosas, el causante ello sea la isla de calor que forma la ZMVT, pues es en la noche donde se replican temperaturas del día, lo cual pudiese generar aumentos en las concentraciones de Bióxido de Azufre (Morales, Madrigal, & González, 2007).

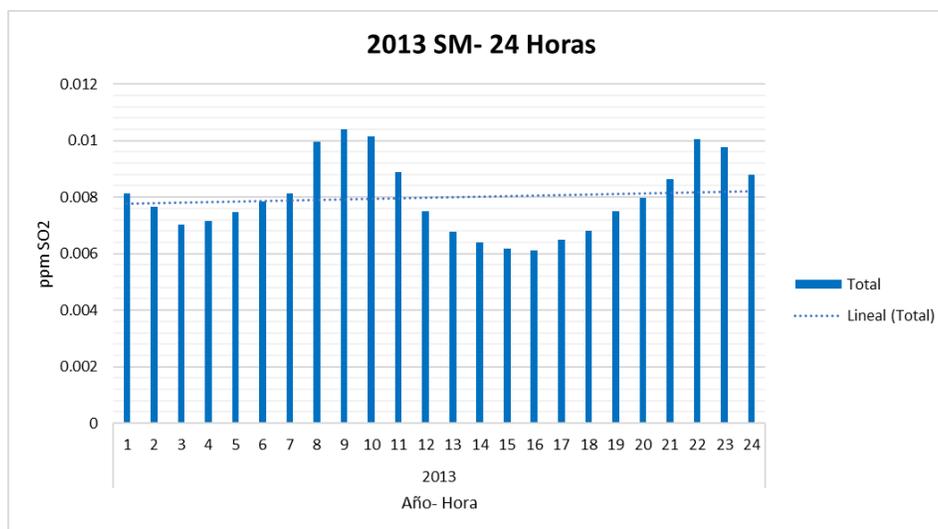
#### 4.1.1.3.5. (SM) San Mateo Atenco

En 2013 se presenta una línea de tendencia media (línea azul) constante en 0.008 ppm y en este sentido, el promedio de 24 horas es de 0.008 ppm para la estación SM.

Para mediciones matutinas, éstas se elevan desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, con 0.01 ppm al inicio y terminando con 0.009 ppm; presentando su registro más alto a las 8:00, 9:00 y 10:00 horas de 0.01 ppm.

Por su parte, durante la noche, las mediciones se elevan después de un marcado descenso que va desde las 14:00 hasta a las 17:00, oscilando las 0.006 ppm en todas las horas; por su parte, el aumento empieza a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.01 ppm a las 22:00 y 23:00 horas.

**Gráfico 4.1.21. 2013 San Mateo Atenco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.21.** el comportamiento del cuarto municipio con mayor aporte económico al PIB de la ZMVT (COESPO, 2012), de esta manera se puede esperar que el dinamismo económico y poblacional, de la propia zona, sea uno de los factores que dispare las elevaciones registradas durante el día en SM (COESPO, 2012).

Por otro lado, las mediciones nocturnas pueden explicarse gracias a la radiación nocturna que se libera al bajar la insolación, provocando un desprendimiento de calor, mismo que calienta las capas de aire y genera un almacenamiento de impurezas como el SO<sub>2</sub> (Ayllón, 2003).

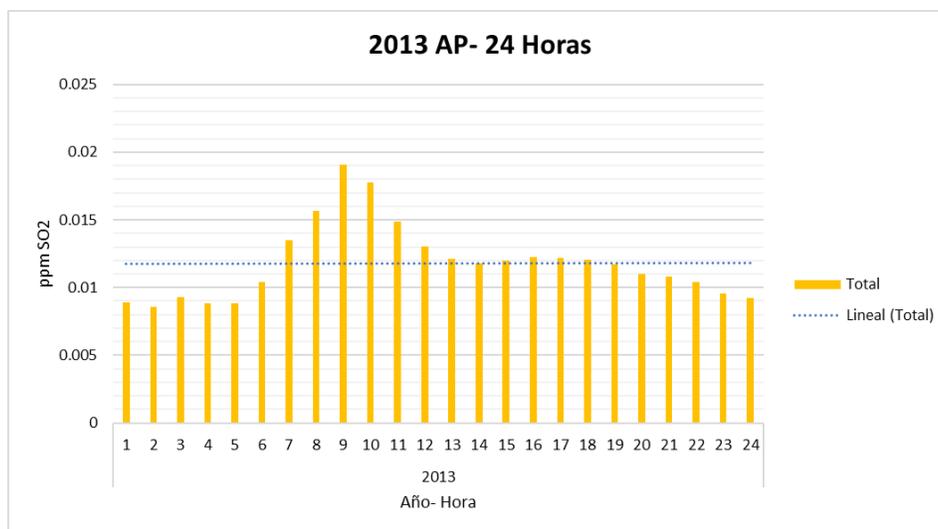
#### 4.1.1.3.6. (AP) Aeropuerto

En el **Gráfico 4.1.22.** se presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) constante, oscilando las 0.012 ppm y dando así, un promedio para las 24 horas de 0.12 ppm.

Por un lado, las mediciones en el día marcan elevaciones desde las 7:00 horas, con 0.014 ppm, hasta las 12:00 horas, con 0.012 ppm. Presentando su punto más alto a las 9:00 horas con 0.02 ppm.

Por otro lado, las mediciones vespertinas y nocturnas se mantienen constante en 0.012 ppm sin descensos vespertinos y con una baja nocturna en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 22:00 hasta las 24:00 horas, con un mínimo de 0.01 ppm a las 24:00 horas.

**Gráfico 4.1.22. 2013 Aeropuerto por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación AP se muestra la dinámica del AICT, la cual hace alusión a las consecuencias del constante movimiento de medios de transporte; claro ejemplo es la constante en los registros vespertinos y nocturnos, pues estos nunca bajan a menos de 0.008 ppm. De acuerdo con “ProAire” (2012-2017), los vehículos y medios de transporte son los que más contribuyen a los niveles de contaminación atmosférica (GEM, 2012), en este sentido, en 2013, el AICT reportó una actividad de aproximadamente 105 mil pasajeros transportados (SCT, 2017), lo cual se ve reflejado en el promedio de AP de 0.12 ppm.

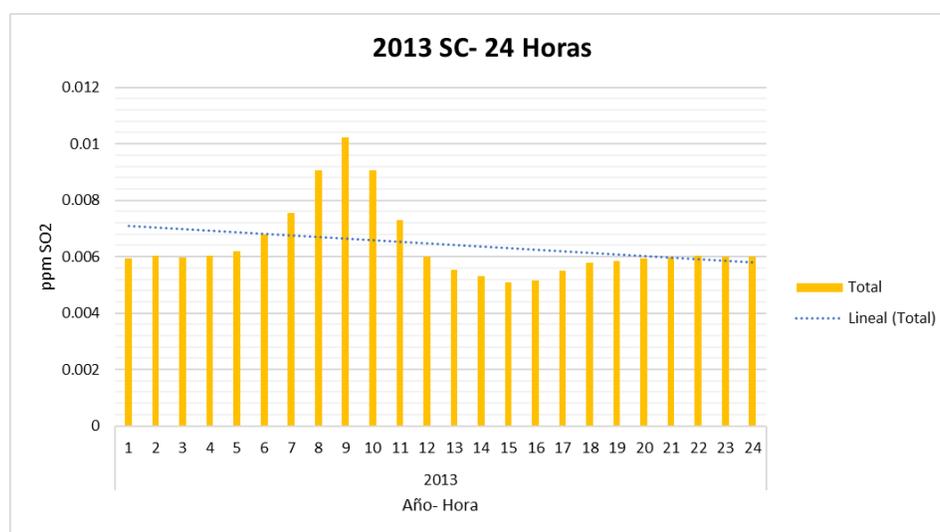
#### 4.1.1.3.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En la estación SC se observa un comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) descendiente, desde las 0.007 ppm hasta las 0.006 ppm; y arrojando así un promedio de 0.006 ppm en 24 horas.

En el horario matutino se observan registros superiores desde las 7:00 hasta las 10:00 horas, con 0.007 ppm y 0.009 ppm, respectivamente y, con un punto crítico a las 9:00 horas, de 0.01 ppm.

Durante la tarde se presenta una disminución en los niveles de SO<sub>2</sub>, desde las 13:00 hasta las 16:00 horas, fluctuando las 0.005 ppm; y posterior a ello, de 19:00 a 24:00 horas, se presenta un segundo pico en los registros, llegando a las 0.006 ppm en todas las horas.

**Gráfico 4.1.23. 2013 San Cristóbal Huichochitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación de SC se presenta un comportamiento que tiende a la baja y, de hecho, obedece el patrón de comportamiento establecido por la bibliografía en cuanto al comportamiento del Bióxido de Azufre, pues el valor más elevado se presenta a las 9:00 horas (INE, 2009).

Por otro lado, la estación de SC se ubica en una zona poco dedicada a actividades industriales o de comercio, pues su fuerte se halla en actividades primarias, tales como la agricultura (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011), lo cual no contribuye a concentraciones de SO<sub>2</sub> en esta zona.

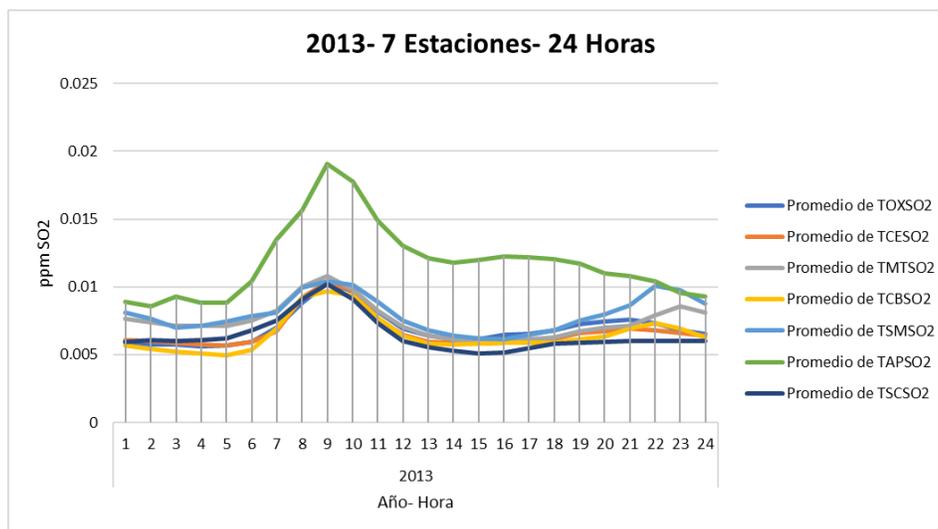
#### 4.1.1.3.8. 2013 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.24.** se presentan las siete estaciones la RAMA-ZMVT durante 2013, para los registros de Bióxido de Azufre en las mismas.

Como es posible observar, la estación AP (verde), es la que arroja los registros más elevados a lo largo del día, alcanzando las 0.02 ppm, a las 9:00 horas.

Por otro lado, en las mediciones vespertinas, parece haber una coincidencia en patrones de conducta, pues todas las estaciones generan una baja a partir de las 13:00 horas y hasta las 17:00 horas; para que esto sea seguido por ascensos nocturnos desde las 20:00 hasta las 24:00 horas en la mayoría de las estaciones.

**Gráfico 4.1.24. 2013 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

De manera general, las siete estaciones presentan puntos máximos matutinos, que van de las 0.001 a las 0.002 ppm de concentración de Bióxido de Azufre, en cada zona. En este sentido, la estación SM (azul claro), al contener un dinamismo poblacional y económico importante, genera los segundos datos más elevados del gráfico (COESPO, 2012), únicamente atrás de AP (verde), estación que reporta la actividad del AICT.

En materia jurídica, cabe resaltar que ninguna de las estaciones de la RAMA-ZMVT sobrepasa el límite máximo permisible que establece la NOM-022-SSA1-2010, para promedio de 24 horas, no mayor a 0.110 ppm (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

#### 4.1.1.4. Año 2014

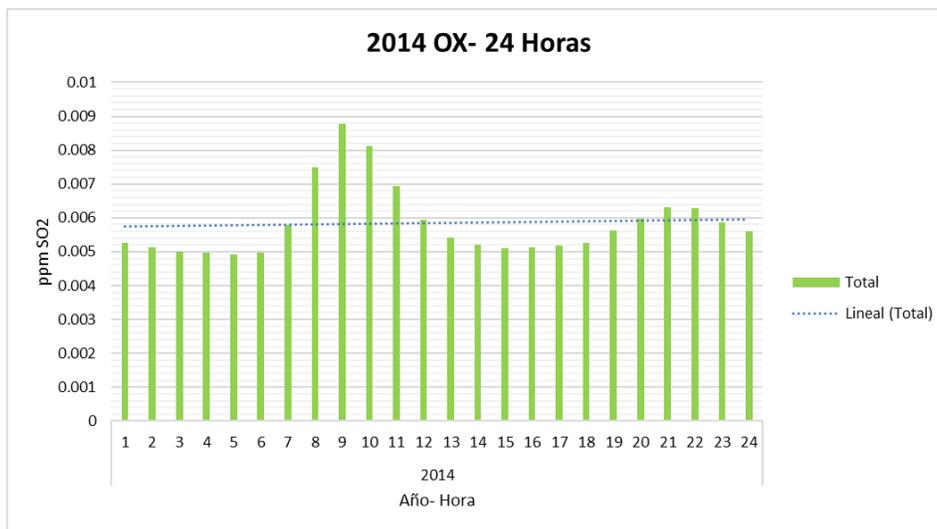
##### 4.1.1.4.1. (OX) Oxtotitlán

En la estación de OX para el año 2014, se presenta una línea de tendencia anual (línea azul) constante, la cual oscila las 0.006 ppm; arrojando así un promedio de 0.006 ppm en esta estación para 2014.

En las horas diurnas del **Gráfico 4.1.25.** se observa un aumento desde las 7:00 hasta a las 12:00 horas, marcando un máximo a las 9:00 horas de 0.009 ppm.

Por su parte, durante las horas nocturnas, se vuelven a elevar las mediciones, desde las 20:00 hasta las 23:00 horas, con un máximo a las 21:00 y 22:00 horas de poco más de 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.25. 2014 Oxtotitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Las mediciones matutinas elevadas se pueden deber a la hidrosolubilidad del Bióxido de Azufre, pues la humedad aumenta si la temperatura aumenta, ya que la capacidad de contención de vapor de agua del aire aumenta sí la temperatura aumenta (Ayllón, 2003).

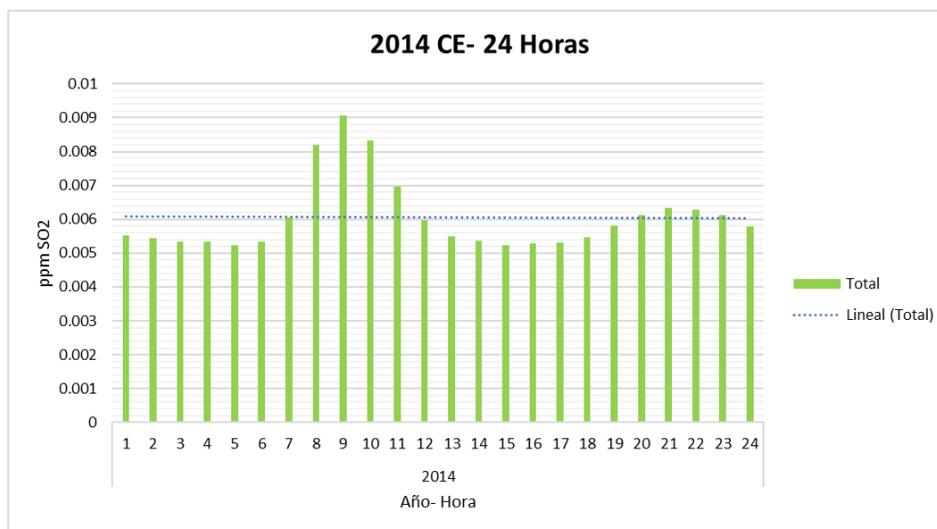
Por su parte, los registros nocturnos pueden deberse a la radiación nocturna, ya que, al bajar la insolación, la superficie terrestre se enfría, provocando un desprendimiento de calor, mismos que calienta las capas de aire inmediatas y genera un almacenamiento de impurezas en capas de los primeros niveles, como el SO<sub>2</sub> (Ayllón, 2003).

#### 4.1.1.4.2. (CE) Centro

Durante 2014, se presenta un aumento en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, pasando de las 0.006 ppm a las 0.007 ppm, respectivamente; y llegando a un punto máximo con de 0.009 ppm a las 9:00 horas; lo cual arroja un promedio para las 24 horas de 0.006 ppm, en la estación CE.

Para las mediciones vespertinas y nocturnas, los valores se vuelven a elevar desde las 20:00 hasta las 23:00 horas, oscilando las 0.006 ppm en todas las horas. De esta manera, la línea de tendencia media (línea azul), se mantiene constante en 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.26. 2014 Centro por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación CE se presenta un comportamiento que va acorde con lo que indican los almanaques del INE, pues los registros obedecen el patrón de sobresaltos matutinos. En este sentido, el comportamiento vespertino y nocturno, de igual manera, obedece a lo estipulado en la bibliografía, pues si existen elevaciones, pero éstas no son tan significativas como para rebasar el promedio (INE, 2009). Por ello, esta estación en 2014 denota registros del Bióxido de Azufre típicos (INE, 2009).

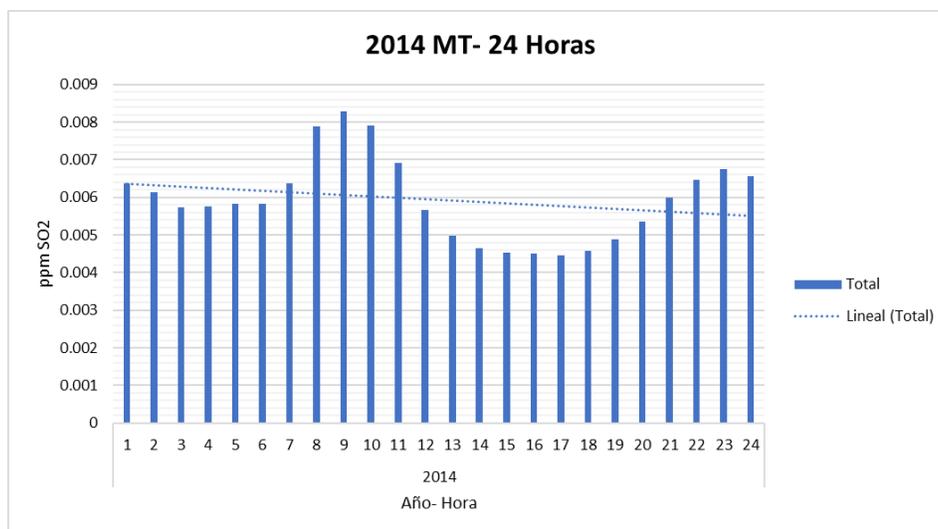
#### 4.1.1.4.3. (MT) Metepec

En el **Gráfico 4.1.27.** se observa una línea de tendencia media decreciente (línea azul), pues de la 1:00 a las 24:00 horas, ésta va de las poco más 0.006 ppm hasta las casi 0.005 ppm; marcando un promedio en 24 horas, de 0.006 ppm para la estación MT.

Por un lado, los registros diurnos incrementan desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, todas oscilando las 0.008 ppm, siendo éste el registro más alto en 2014 para MT.

Las horas crepusculares se vuelven a elevar después de un descenso marcado desde las 13:00 hasta las 18:00 horas, con 0.0045 ppm en todas las horas; posterior a ello, desde las 21:00 hasta las 24:00 horas, se vuelven a elevar los registros, con un máximo de 0.007 ppm a las 23:00 horas.

**Gráfico 4.1.27. 2014 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación MT se encuentra uno de los centros poblacionales más importantes de la ZMVT, sin embargo, en 2014 la estación MT registra los datos más bajos de medición en dicha estación, para todo el periodo de estudio 2011-2016. En este tenor, parece ser que la dinámica poblacional no juega un papel actor-reactor en los registros de Bióxido de Azufre durante 2014 en MT.

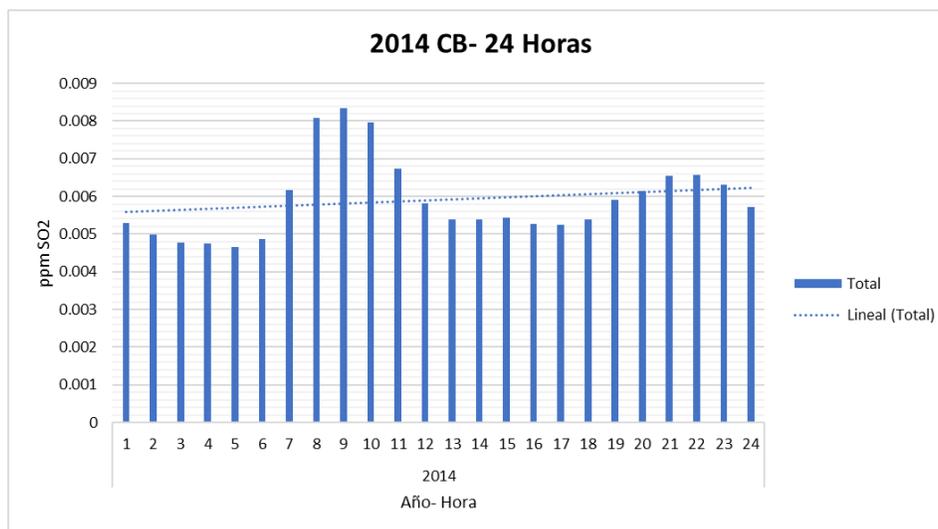
#### 4.1.1.4.4. (CB) Ceboruco

En la estación de CB, el comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pues pasa de las 0.0055 ppm en la hora 1:00, a las 0.006 ppm en la hora 24:00; arrojando así, un promedio en 24 horas de 0.005 ppm.

En las horas diurnas se presentan registros altos para el SO<sub>2</sub>, iniciando a las 7:00 horas con 0.006 ppm y terminando a las 11:00 horas con 0.007 ppm; y a su vez, se presenta un máximo a las 9:00 horas de 0.008 ppm.

Durante la noche, es posible observar una segunda elevación en los registros, de 20:00 a 23:00 horas, todos cerca de las 0.0065 ppm.

**Gráfico 4.1.28. 2014 Ceboruco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación CB se ubica en una zona dinámica, tanto poblacional, como económicamente; sí se observa el comportamiento del **Gráfico 4.1.28.** es posible pensar que exista una relación entre dicha dinámica y las concentraciones de SO<sub>2</sub> en esta zona (Ballesteros & Rotter, 2014); no obstante, la estación CB aún posee el promedio más bajo de las siete estaciones en 2014.

Por su parte, las mediciones elevadas en el día responden al propio comportamiento del SO<sub>2</sub>, generando los máximos de las 24 horas del día justo en el periodo de horas críticas (INE, 2009).

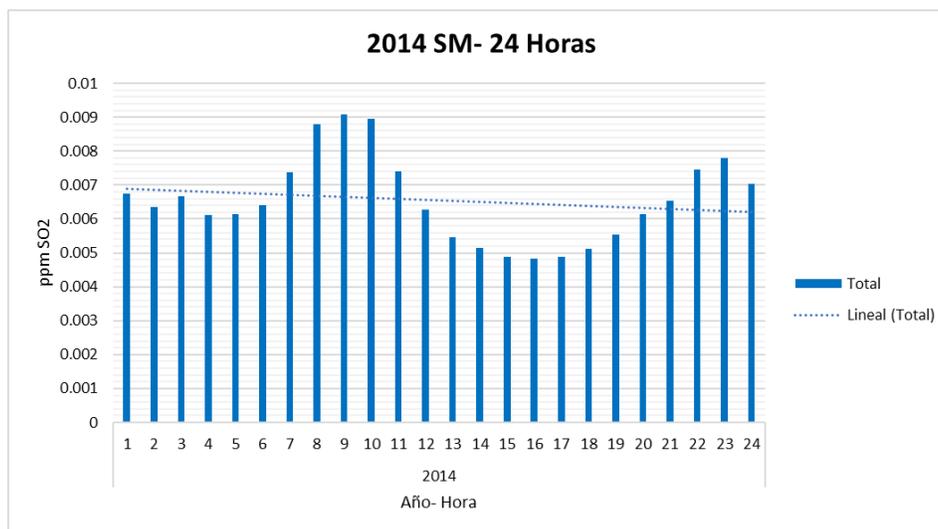
#### 4.1.1.4.5. (SM) San Mateo Atenco

En 2014 se presenta una línea de tendencia media (línea azul) descendente que va de 0.007 ppm a 0.006 ppm, arrojando así, un promedio para 24 horas de 0.006 ppm.

Para mediciones matutinas, éstas se elevan desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, con 0.0075 ppm en ambos casos y presentando su registro más alto de 8:00 a 10:00 horas de 0.009 ppm.

Por su parte, durante la noche, las mediciones se elevan después de un marcado descenso que va desde las 14:00 hasta a las 18:00, oscilando las 0.005 ppm en todas las horas; por su parte, el aumento empieza a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.008 ppm a las 23:00 horas.

**Gráfico 4.1.29. 2014 San Mateo Atenco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.29.** tanto las mediciones diurnas, como las nocturnas oscilan las 0.009 ppm. En este tenor, la estación SM se reporta gran parte de la situación atmosférica en una zona industrial importante del Estado de México (IGCEM, 2015).

En la zona de la estación de SM, se encuentra una de las regiones económicas más importante de la ZMVT, pues gracias a ella, se reporta una entrada significativa al PIB, para la ZMVT (COESPO, 2012), en este sentido, existe fuerte relación entre la dinámica económica y la contaminación atmosférica del área (SEMARNAT, 2002).

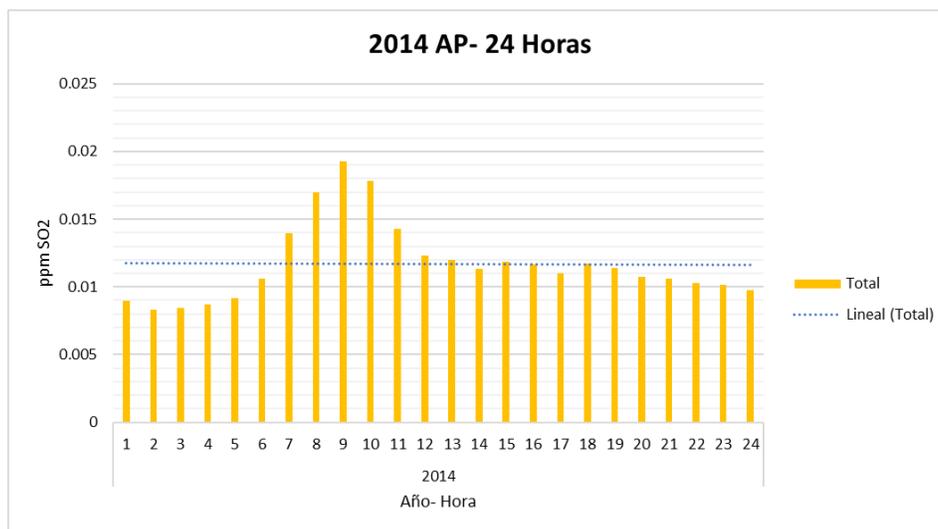
#### 4.1.1.4.6. (AP) Aeropuerto

En el **Gráfico 4.1.30.** se presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) constante, oscilando las 0.012 ppm y dando así, un promedio para las 24 horas de 0.11 ppm.

Por un lado, las mediciones en el día marcan elevaciones desde las 7:00 horas, con 0.015 ppm, hasta las 11:00 horas, con 0.015 ppm también. Presentando su punto más alto a las 9:00 horas con 0.02 ppm.

Por otro lado, las mediciones vespertinas y nocturnas se mantienen constante en 0.011 ppm sin descensos vespertinos ni nocturnos.

**Gráfico 4.1.30. 2014 Aeropuerto por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación AP se presentan los registros más elevados de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT, pues a diferencia de las otras seis, durante la tarde, la concentración de Bióxido de Azufre no se aleja decrecientemente de la media y marca 0.011 ppm.

La estación AP reporta la propia dinámica del AICT, la cual genera cantidades significativas de SO<sub>2</sub>, pues los medios de transporte son los principales actores en la contribución a niveles de contaminación atmosférica (GEM, 2012), y en este caso, los medios de transporte aéreo contribuyen significativamente gracias a su contenido del 0.053% de SO<sub>2</sub> en su combustible (Herrera & Vales, 2013).

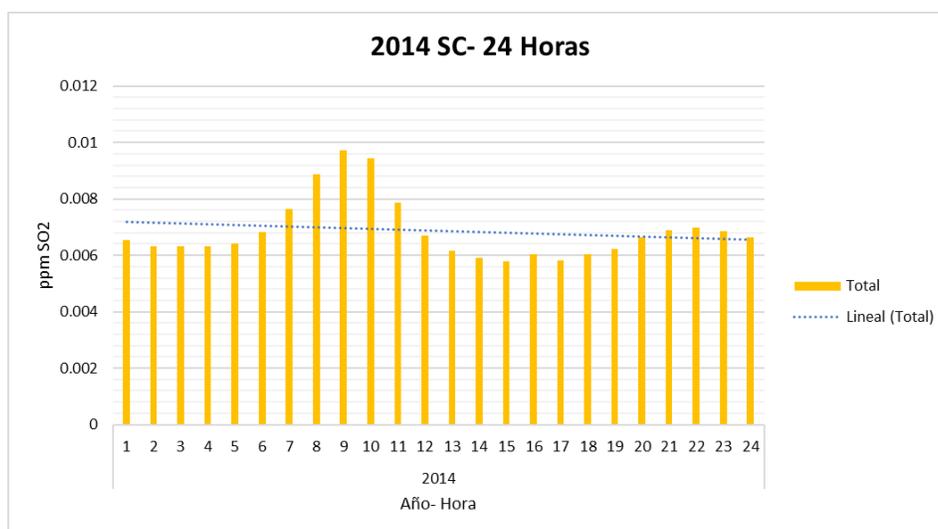
#### 4.1.1.4.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En la estación SC se observa un comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) constante que fluctúa las 0.007 ppm y arrojan así, un promedio de 0.007 ppm en 24 horas.

En el horario matutino se observan registros superiores desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, con 0.008 ppm en ambas horas y con un punto crítico a las 9:00 horas, de 0.01 ppm.

Durante la tarde se presenta una disminución en los niveles de SO<sub>2</sub>, desde las 14:00 hasta las 18:00 horas, fluctuando las 0.006 ppm; y posterior a ello, de 21:00 a 24:00 horas, se presenta un segundo pico en los registros, llegando a las 0.007 ppm en todas las horas.

**Gráfico 4.1.31. 2014 San Cristóbal Huichochitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación SC existe una dinámica poblacional inclinada hacia actividades primarias, mismas que incluyen a la propia agricultura (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011). Consecuentemente, la generación de contaminantes atmosféricos se ve menos afectada que en el resto de las estaciones (SEMARNAT, 2002); claro ejemplo es el comportamiento descendiente del promedio de esta estación en 2014.

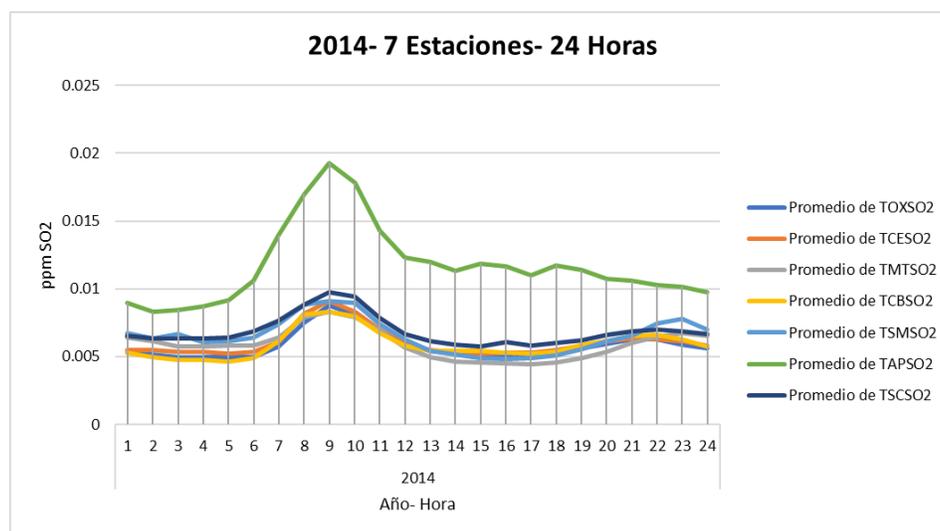
#### 4.1.1.4.8. 2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.32.** se presentan las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en 2014.

Como se aprecia en el gráfico, la estación AP (verde), es la estación con los registros más altos para promedio horario, pues ésta alcanza 0.02 ppm, a las 9:00 horas.

De manera general, todas las estaciones sufren de una baja vespertina, desde las 14:00 hasta las 18:00 horas, para presentar un ascenso nocturno que varía de acuerdo con cada estación.

**Gráfico 4.1.32. 2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

De 2013 a 2014, los registros de cada estación no incrementaron de manera significativa.

Por su parte, la estación SM (azul claro), es la segunda más sobresaliente de los registros nocturnos, ya que presenta un pico por encima de todas las demás. De esta manera, SM, se ve afectada por la dinámica económica de una de las zonas industriales de la ZMVT (COESPO, 2012).

Por su parte, la estación AP continua como puntero en mediciones de SO<sub>2</sub>. Posiblemente debido a la fuerte actividad de transporte aéreo que se presenta en la zona (SCT, 2017) y a su vez, a causa de la cantidad de centros industriales en dicho lugar (COESPO, 2012).

En materia jurídica, cabe resaltar que ninguna de las estaciones de la RAMA-ZMVT sobrepasa el límite máximo permisible que establece la NOM-022-SSA1-2010, para promedio de 24 horas, no mayor a 0.110 ppm (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

#### 4.1.1.5. Año 2015

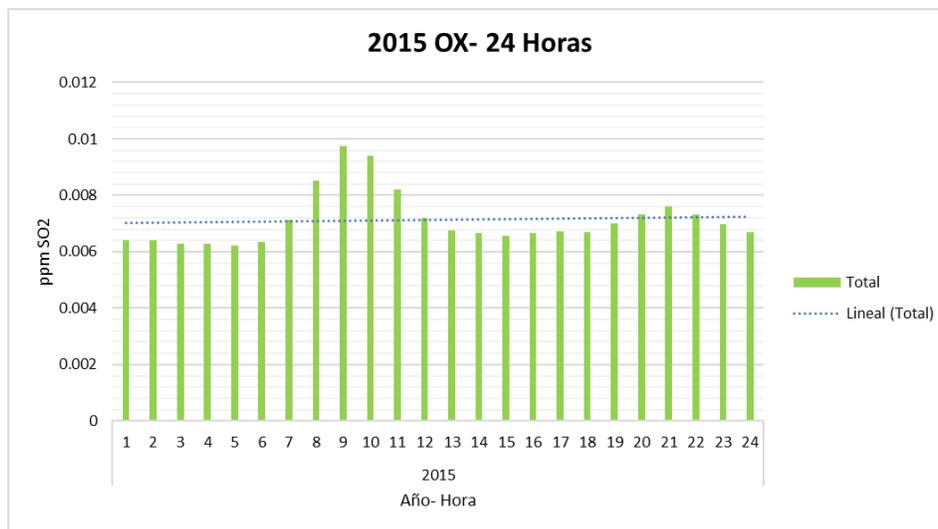
##### 4.1.1.5.1. (OX) Oxtotitlán

En la estación de OX para el año 2015, se presenta una línea de tendencia anual (línea azul) constante, la cual oscila las 0.007 ppm; arrojando así un promedio de 0.007 ppm en esta estación para 2015.

En las horas diurnas del **Gráfico 4.1.33**, se observa un aumento desde las 7:00 hasta a las 12:00 horas, marcando un máximo a las 9:00 horas de casi 0.01 ppm.

Por su parte, durante las horas nocturnas, se vuelven a elevar las mediciones, desde las 20:00 hasta las 22:00 horas, con un máximo a las 21:00 casi 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.33. 2015 Oxtotitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

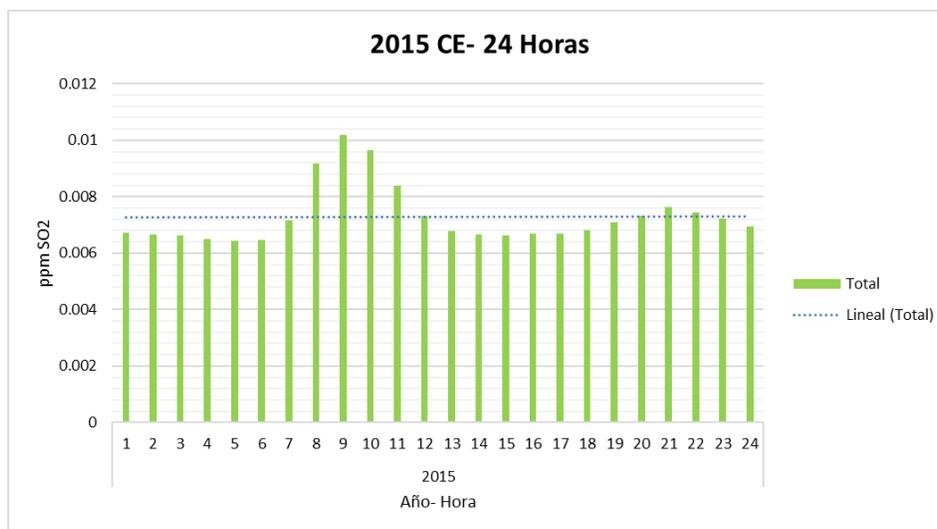
Los registros de SO<sub>2</sub> de 2014 a 2015 se elevan en la estación OX, pasando de las 0.005 ppm a las 0.007 ppm promedio. En este sentido, Orozco y otros autores (2015), plantean un escenario de “Emisiones Altas” para el Estado de México, ya que se considera un crecimiento constante de población, desarrollo económico orientado, un cambio tecnológico fragmentado y un uso de energía fósil; todos ellos factores que afectan las concentraciones de contaminantes, como el SO<sub>2</sub>, en la zona (Orozco, y otros, 2015).

#### 4.1.1.5.2. (CE) Centro

Durante 2015, se presenta un aumento en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, pasando de las 0.007 ppm a las poco más de 0.008 ppm, respectivamente; y llegando a un punto máximo con de 0.01 ppm a las 9:00 horas; lo cual arroja un promedio para las 24 horas de 0.007 ppm, en la estación CE.

Para las mediciones vespertinas y nocturnas, los valores se vuelven a elevar desde las 20:00 hasta las 23:00 horas, oscilando las 0.006 ppm en todas las horas. De esta manera, la línea de tendencia media (línea azul), se mantiene constante en 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.34. 2015 Centro por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la Zona Centro de la ZMVT, en el año 2015, se observa un comportamiento constante en ambas estaciones, con 0.007 ppm de promedio en 24 horas para ambos casos.

Si bien de 2014 a 2015 la estación CE presenta un aumento en el promedio de 24 horas, pasando de 0.006 ppm a 0.007 ppm; las mediciones de SO<sub>2</sub> en esta estación no presentan elevaciones abruptas y respetan lo estipulado en la bibliografía de los almanaques del INE (2009), ya que únicamente presenta elevaciones matutinas (INE, 2009).

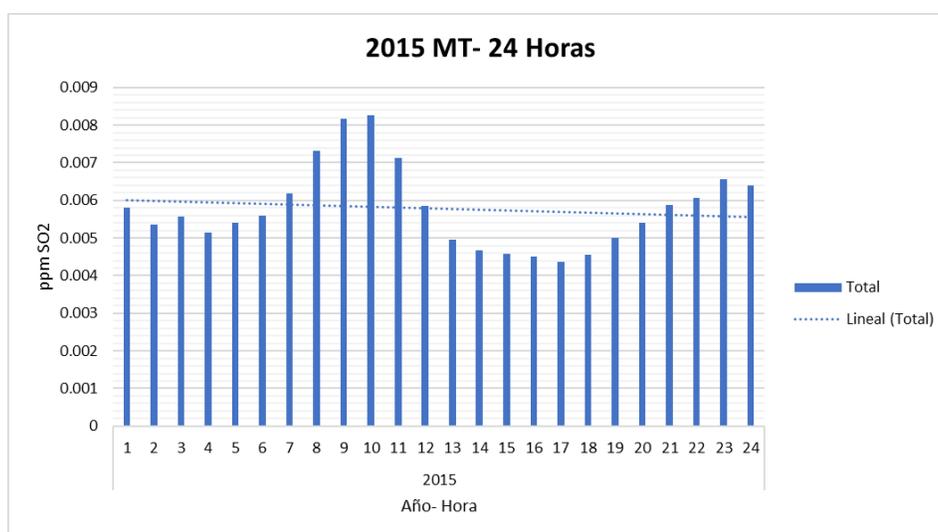
#### 4.1.1.5.3. (MT) Metepec

En el **Gráfico 4.1.35.** se observa una línea de tendencia media decreciente (línea azul), pues de la 1:00 a las 24:00 horas, ésta va de las 0.006 ppm hasta las casi 0.005 ppm; marcando un promedio en 24 horas, de 0.005 ppm para la estación MT.

Por un lado, los registros diurnos incrementan desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, ambas estando en las 0.007 ppm, con un máximo a las 9:00 y 10:00 horas con 0.008 ppm.

Las horas crepusculares se vuelven a elevar después de un descenso marcado desde las 15:00 hasta las 18:00 horas, con 0.0045 ppm en todas las horas; posterior a ello, desde las 21:00 hasta las 24:00 horas, se vuelven a elevar los registros, con un máximo de casi 0.007 ppm a las 23:00 horas.

**Gráfico 4.1.35. 2015 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Durante el año 2015, en la estación MT se registran algunos de los valores más bajos dentro del periodo de estudio 2011-2016; es así como el promedio para 24 horas es de el más bajo en 2015, de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

Si bien se observan registros bajos, esto no exime el comportamiento del Bióxido de Azufre con incrementos durante las 9:00 y 10:00 horas, así como de 21:00 a 23:00 horas, ambos pudiéndose explicar gracias a la emisión de SO<sub>2</sub> por la actividad industrial (GEM, 2012) y a la radiación nocturna en la ZMVT (Ayllón, 2003).

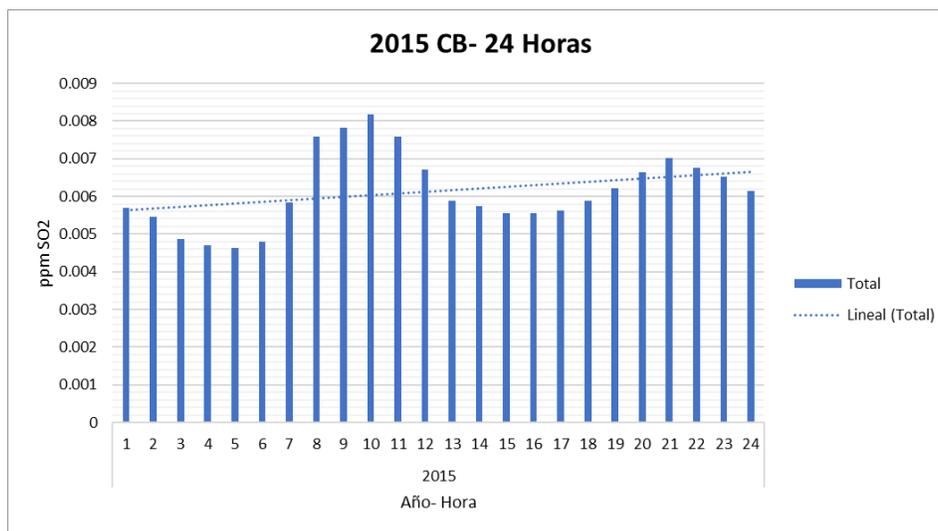
#### 4.1.1.5.4. (CB) Ceboruco

En la estación de CB, el comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pues pasa de las 0.0055 ppm en la hora 1:00, a las 0.007 ppm en la hora 24:00; arrojando así, un promedio en 24 horas de 0.006 ppm.

En las horas diurnas se presentan registros altos para el SO<sub>2</sub>, iniciando a las 8:00 horas con 0.0075 ppm y terminando a las 12:00 horas con 0.007 ppm; y a su vez, se presenta un máximo a las 10:00 horas de 0.008 ppm.

Durante la noche, es posible observar otra elevación en los registros, de 20:00 a 23:00 horas, todos cerca de las 0.0065 ppm y con un máximo a las 20:00 horas de 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.36. 2015 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.36.** es posible observar que los registros altos de la noche son casi tan elevados como los registros matutinos. Es preciso mencionar que el aumento nocturno puede explicarse gracias a la isla de calor que se genera en Toluca, pues gracias a ésta, algunas condiciones meteorológicas matutinas se replican en horas nocturnas, favoreciendo el atrapamiento de ciertos contaminantes atmosféricos (Morales, Madrigal, & González, 2007).

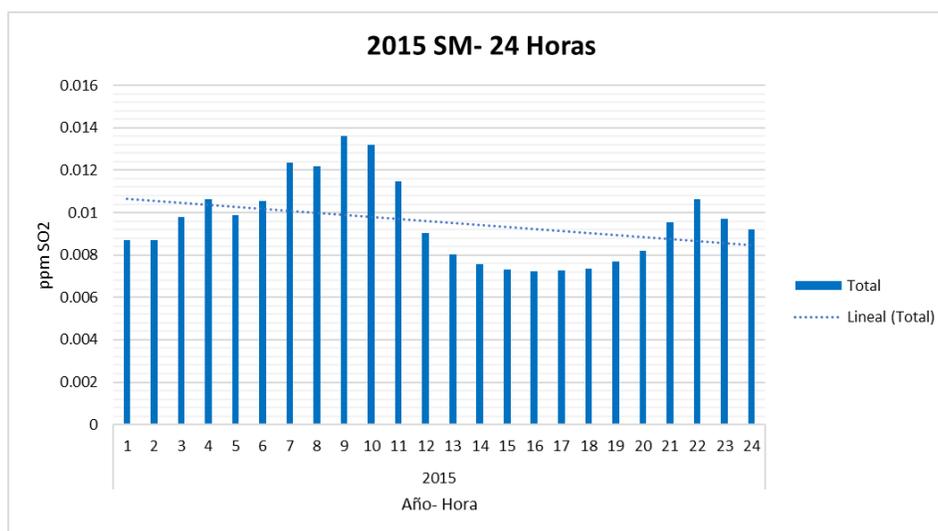
#### 4.1.1.5.5. (SM) San Mateo Atenco

En 2015 se presenta una línea de tendencia media (línea azul) descendente que va de 0.01 ppm a 0.008 ppm, arrojando así, un promedio para 24 horas de 0.009 ppm.

Para mediciones diurnas, éstas se elevan desde las 6:00 hasta las 11:00 horas, con 0.01 al inicio y 0.012 ppm al final, presentando su registro más alto a las 9:00 horas de 0.014 ppm.

Por su parte, durante la noche, las mediciones se elevan después de un marcado descenso que va desde las 13:00 hasta a las 20:00, oscilando las 0.007 ppm en todas las horas; por su parte, el aumento empieza a las 21:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.01 ppm a las 22:00 horas.

**Gráfico 4.1.37. 2015 San Mateo Atenco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

El promedio para 24 horas que marca la estación SM es el más alto de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2015, ya que también presenta los registros más altos de la estación para todo el periodo de estudio 2011-2016.

En 2015 es cuando San Mateo Atenco produjo más de 5,100 (millones de pesos) en actividad industrial (IGECEM, 2015). En este sentido, cabe destacar que uno de los factores que más aporta a la generación de contaminantes atmosféricos es la actividad industrial (IPCC Working Group I, 2007).

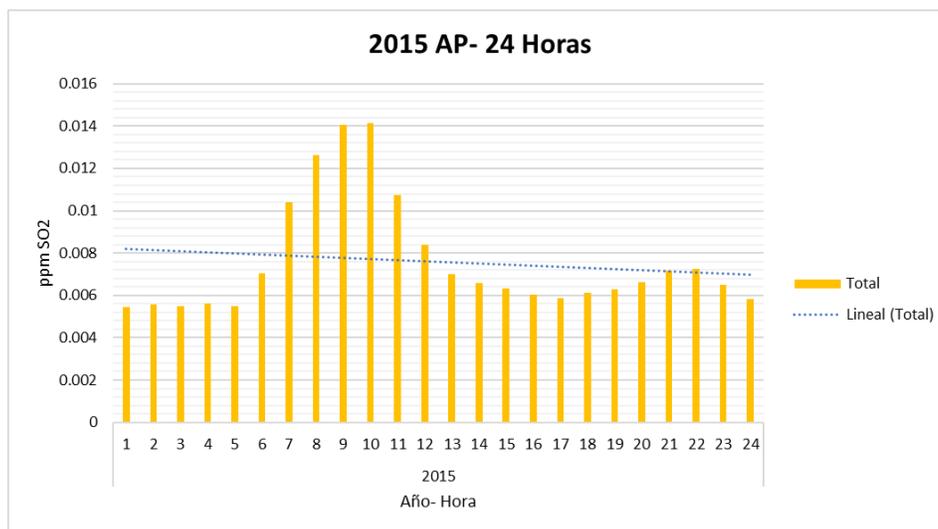
#### 4.1.1.5.6. (AP) Aeropuerto

En el **Gráfico 4.1.38.** se presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) decreciente, pasando de las 0.008 ppm a las 0.007 ppm; con un promedio de 0.007 ppm.

Por un lado, las mediciones en el día marcan elevaciones desde las 7:00 horas, con 0.01 ppm, hasta las 11:00 horas, con 0.01 ppm también. Presentando su punto más alto a las 9:00 y 10:00 horas con 0.014 ppm.

Por otro lado, las mediciones vespertinas decrecen y alcanzan un mínimo de 0.006 ppm desde las 14:00 hasta las 20:00 horas. Posterior a ello, durante la noche, se elevan los registros a 0.007 ppm a las 21:00 y 22:00 horas.

**Gráfico 4.1.38. 2015 Aeropuerto por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el transcurso de 2015, la estación AP alberga el segundo promedio más elevado de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, de manera contrastante, es en este mismo año, cuando AP registra los niveles más bajos de 2011 a 2016; lo cual aún mantiene a la estación AP como la estación que registra los niveles más altos de contaminación atmosférica en la ZMVT.

El comportamiento de esta estación es un reflejo de la dinámica del AICT, pues al disminuir su actividad, las concentraciones de SO<sub>2</sub> disminuyen; toda vez que, la cantidad de pasajeros transportados fue de aproximadamente 70 mil personas, en comparación a 2011, año en el cual se trasladaron alrededor de 120 mil pasajeros (SCT, 2017).

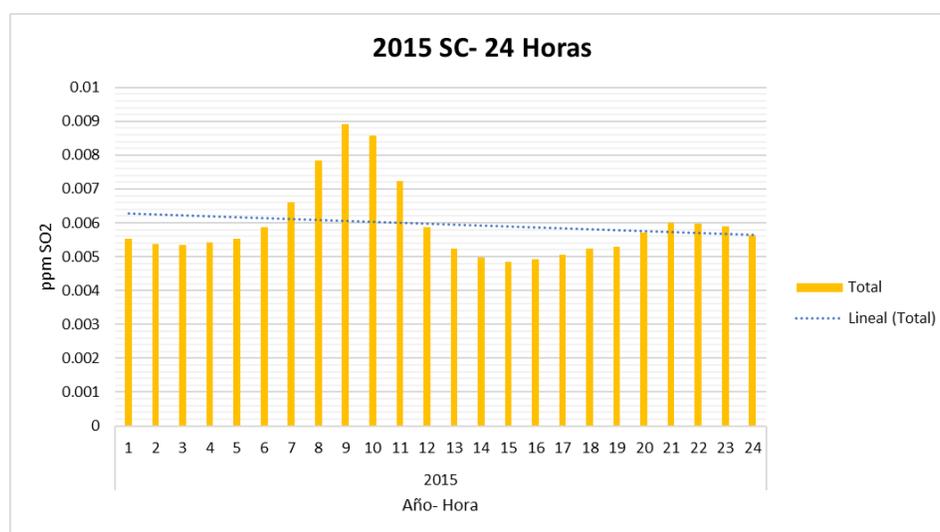
#### 4.1.1.5.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En la estación SC se observa un comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) descendiente, pero que fluctúa las 0.006 ppm; arrojan así, un promedio de 0.006 ppm en 24 horas.

En el horario matutino se observan registros superiores desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, con 0.008 ppm y 0.007 ppm, respectivamente y con un punto crítico a las 9:00 horas, de 0.009 ppm.

Durante la tarde se presenta una disminución en los niveles de SO<sub>2</sub>, desde las 14:00 hasta las 17:00 horas, fluctuando las 0.005 ppm; y posterior a ello, de 20:00 a 24:00 horas, se presenta un segundo pico en los registros, llegando a las 0.006 ppm en todas las horas.

**Gráfico 4.1.39. 2015 San Cristóbal Huichochitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación SC se presentan depreciaciones vespertinas que son las más bajas registradas en la estación desde 2011 hasta 2016 y, consecuentemente, el promedio de 0.006 ppm es el segundo valor más bajo dentro de las siete estaciones en el año 2015.

En SC las actividades económicas coadyuvan a obtener resultados más bajos que en el resto de las estaciones, pues las actividades económicas primarias, tales como la agricultura, predominan (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011), y no tienen afecciones en la calidad del aire en la zona.

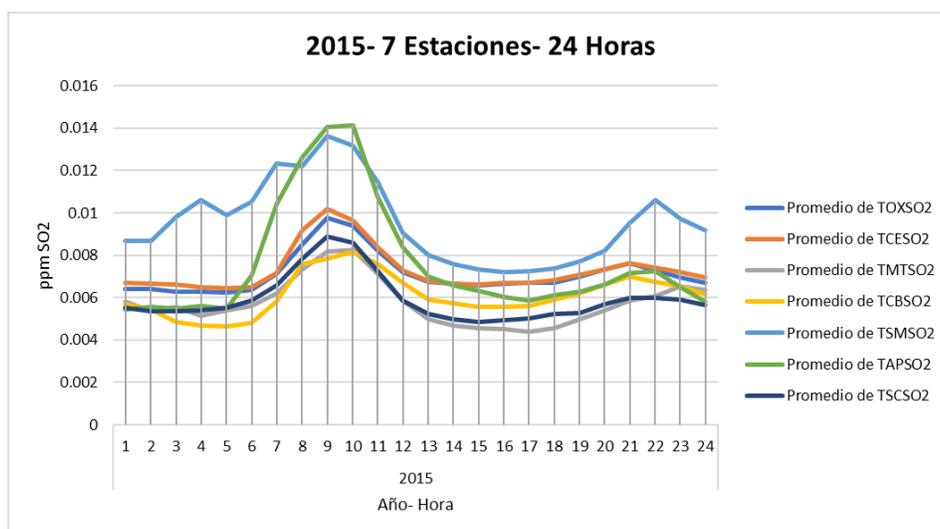
#### 4.1.1.5.8. 2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.40.** se presentan las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en 2015.

Como se aprecia en el gráfico, la estación AP (verde) y la estación SM (azul claro), son las que poseen los registros más altos para promedio horario, pues en las primeras horas del día y de 21:00 a 24:00 horas, SM rebasa por 0.002 ppm de los registros de las otras estaciones; por su parte AP, únicamente presenta una elevación de 8:00 a 11:00 horas.

De manera general, todas las estaciones sufren de una baja vespertina, desde las 14:00 hasta las 18:00 horas, para presentar un ascenso nocturno que varía de acuerdo con cada estación.

**Gráfico 4.1.40. 2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En 2015 se presenta un año crítico para la estación SM, pues gracias a la dinámica económica que alberga el municipio de San Mateo Atenco, se generó una aportación al PIB por parte del sector industrial, de más de 5,100 (mdp) (IGCEM, 2015), pudiendo ser el causante de los registros elevados de la estación SM.

No obstante, en materia jurídica, ninguna de las estaciones de la RAMA-ZMVT sobrepasa el límite máximo permisible que establece la NOM-022-SSA1-2010, para promedio de 24 horas, no mayor a 0.110 ppm (NOM-022-SSA1-2010, 2010).

#### 4.1.1.6. Año 2016

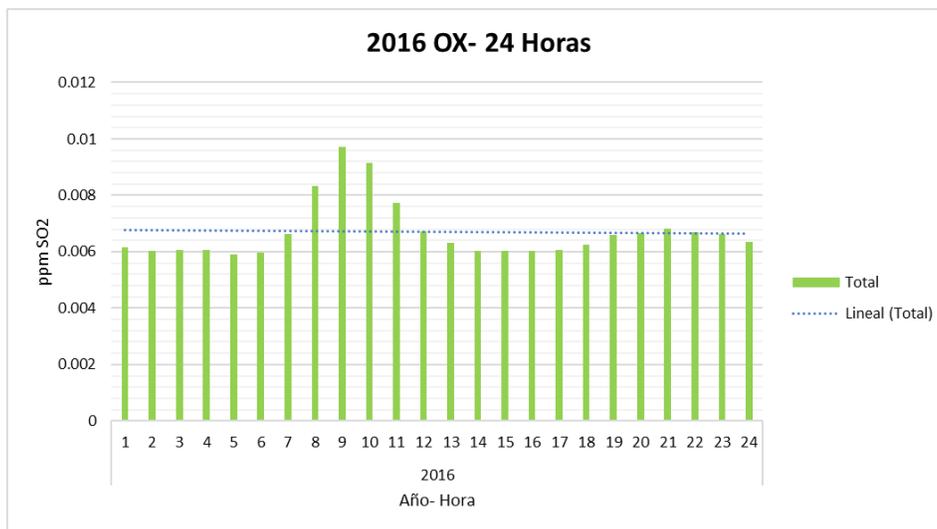
##### 4.1.1.6.1. (OX) Oxtotitlán

En la estación de OX para el año 2016, se presenta una línea de tendencia anual (línea azul) constante, la cual oscila las 0.006 ppm; arrojando así un promedio de 0.006 ppm en esta estación para 2016.

En las horas diurnas del **Gráfico 4.1.41**, se observa un aumento desde las 8:00 hasta a las 11:00 horas, marcando un máximo a las 9:00 horas de casi 0.01 ppm.

Por su parte, durante las horas nocturnas, se vuelven a elevar las mediciones, desde las 19:00 hasta las 23:00 horas, con un máximo en todas estas horas de casi 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.41. 2016 Oxtotitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

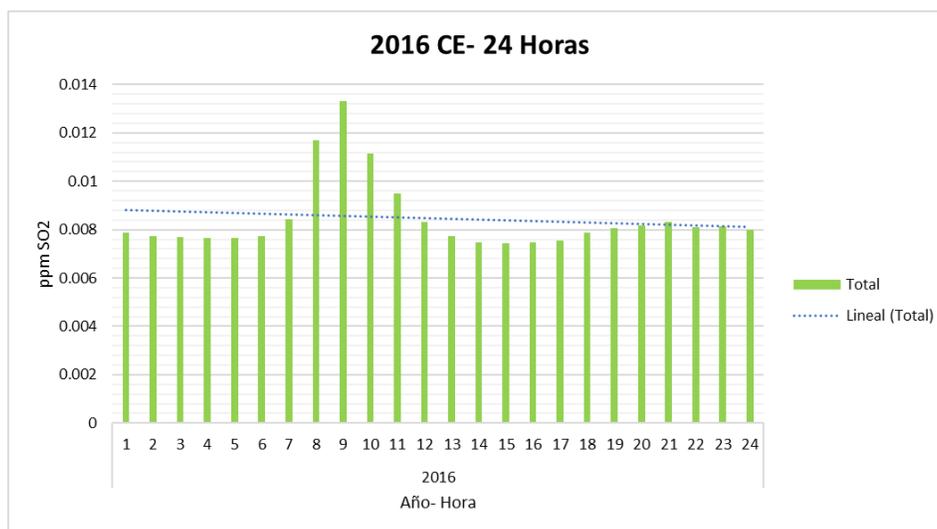
La estación OX marca los valores más bajos de medición de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, para 2016. De igual manera, los registros de 2015 en OX son más altos que en 2016, ya que pasan de las 0.007 ppm a las 0.006 ppm. Un descenso en los registros de la estación puede deberse a una correcta aplicación de políticas y normatividad en torno al SO<sub>2</sub>, tal como la NOM-022-SSA1-2010 y que esto pudiese coadyuvar al descenso de los registros de contaminantes.

#### 4.1.1.6.2. (CE) Centro

Durante 2016, se presenta un aumento en las mediciones de SO<sub>2</sub> desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, ambas oscilando las 0.012 ppm; y llegando a un punto máximo con de 0.013 ppm a las 9:00 horas; lo cual arroja un promedio para las 24 horas de 0.007 ppm, en la estación CE.

Para las mediciones vespertinas y nocturnas, los valores se vuelven a elevar desde las 20:00 hasta las 23:00 horas, oscilando las 0.008 ppm en todas las horas. De esta manera, la línea de tendencia media (línea azul), se observa a la baja de la 1:00 a las 24:00 horas, iniciando en 0.009 ppm y terminando en 0.008 ppm, respectivamente.

**Gráfico 4.1.42. 2016 Centro por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Si bien la línea de tendencia media (línea azul) se comporta de manera descendente, es preciso mencionar que los registros matutinos son de los más altos que presenta la estación CE en el periodo de estudio 2011-2016, con un máximo de 0.013 ppm (SEDEMA, 2017).

La dinámica poblacional y económica pudiese estar relacionada con los incrementos matutinos elevados que se presentan en esta estación, toda vez que el parque vehicular particular de Toluca ascendió de 30 mil unidades en 2011, a 40 mil unidades en 2016 (IGECEM, 2016). En este sentido, cabe mencionar que, el parque vehicular genera 3,363 toneladas al año de Bióxido de Azufre (GEM, 2012).

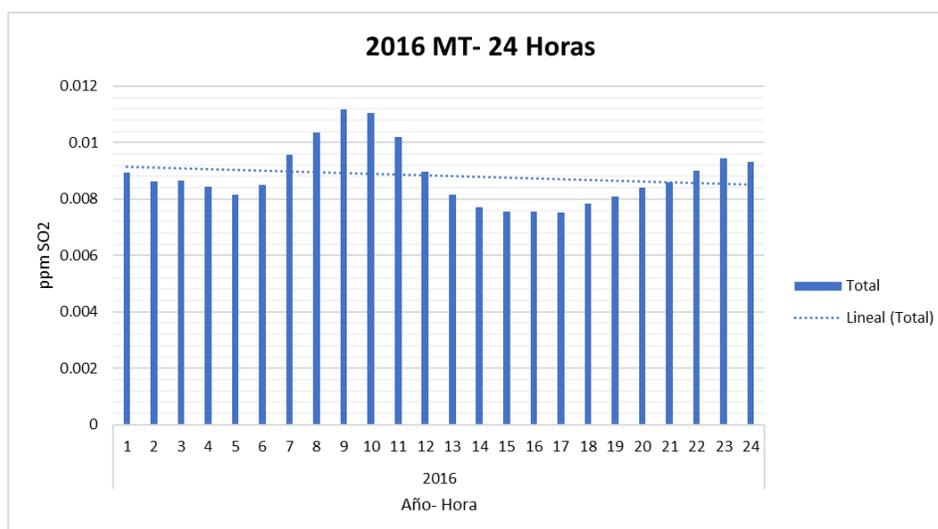
#### 4.1.1.6.3. (MT) Metepec

En el **Gráfico 4.1.43.** se observa una línea de tendencia media decreciente (línea azul), pues de la 1:00 a las 24:00 horas, ésta va de las 0.009 ppm hasta las casi 0.008 ppm; marcando un promedio en 24 horas, de 0.008 ppm para la estación MT.

Por un lado, los registros diurnos incrementan desde las 7:00 hasta las 11:00 horas, ambas oscilando las 0.01 ppm, con un máximo a las 9:00 horas con casi 0.012 ppm.

Las horas crepusculares se vuelven a elevar desde las 21:00 hasta las 24:00 horas, con todos los rangos en 0.009 ppm.

**Gráfico 4.1.43. 2016 Metepec por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación MT, durante 2016, se registró el segundo promedio más alto del año, de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT. Si bien la línea de tendencia media es descendente, esto no exime el hecho de haber registrado uno de los promedios más elevados del año.

En el municipio de Metepec, existe una población total de 227, 827 personas (IGECEM, 2016); en este tenor, Ballesteros y Rotter (2014), en su investigación actuarial, a la letra dicen:

*“La densidad explica un 35% los niveles mostrados del Dióxido de Azufre presentados en el periodo de estudio”* (Ballesteros & Rotter, 2014). Con este fundamento, se podría explicar el comportamiento al alza del **Gráfico 4.1.43.** de la estación MT.

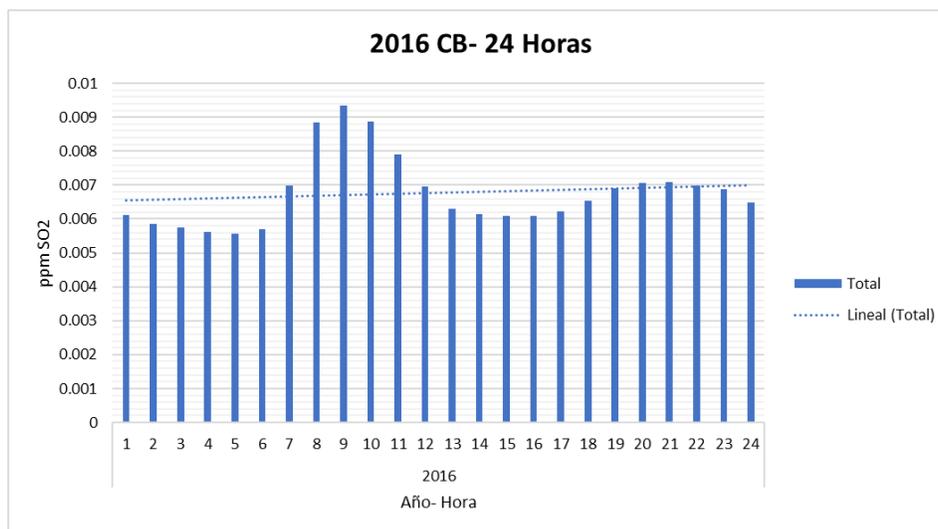
#### 4.1.1.6.4. (CB) Ceboruco

En la estación de CB, el comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pues pasa de las 0.0055 ppm en la hora 1:00, a las 0.006 ppm en la hora 24:00; arrojando así, un promedio en 24 horas de 0.006 ppm.

En las horas diurnas se presentan registros altos para el SO<sub>2</sub>, iniciando a las 7:00 horas y 12:00 horas con 0.007 ppm en ambos casos; y a su vez, se presenta un máximo a las 9:00 horas de 0.009 ppm.

Durante la noche, es posible observar otra elevación en los registros, de 19:00 a 23:00 horas, todos cerca de las 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.44. 2016 Ceboruco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el año 2016, dentro de la estación CB, se registraron algunas de las concentraciones horarias más elevadas de esta estación para el periodo de estudio 2011-2016.

De acuerdo con los inventarios de INE (2009), hoy INECC, el Bióxido de Azufre solo debería presentar incrementos en mediciones, durante horas matutinas (INE, 2009), sin embargo es posible observar concentraciones en ambos casos, pudiéndose deber a la dinámica poblacional de la zona en la que se encuentra la estación CB, pues la relación dinámica poblacional-concentración de contaminantes es del 35% (Ballesteros & Rotter, 2014).

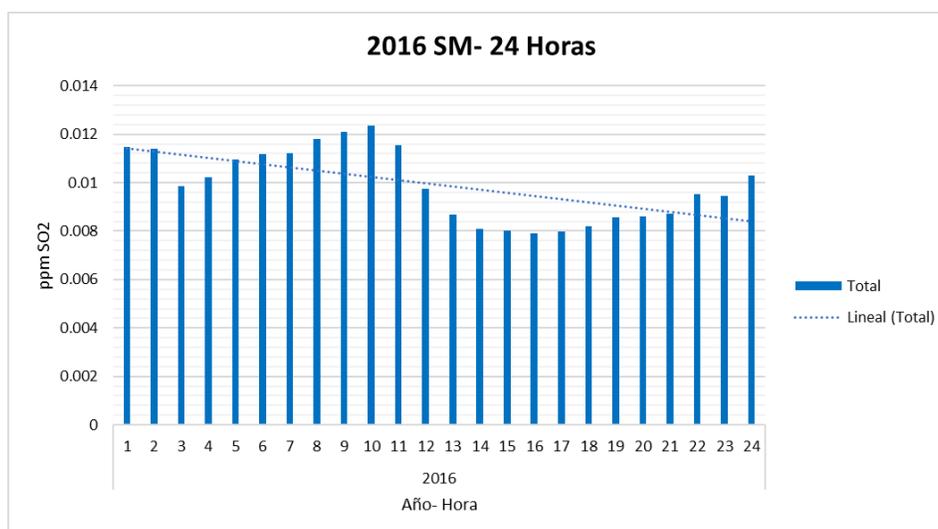
#### 4.1.1.6.5. (SM) San Mateo Atenco

En 2016 se presenta una línea de tendencia media (línea azul) descendente que va de 0.012 ppm a 0.008 ppm, arrojando así, un promedio para 24 horas de 0.01 ppm.

Para mediciones diurnas, éstas se elevan desde las 5:00 hasta las 11:00 horas, todas horas oscilando las 0.01 y 0.012 ppm, presentando su registro más alto a las 10:00 horas de 0.012 ppm.

Por su parte, durante la noche, las mediciones se elevan nuevamente a las 22:00 y termina a las 24:00 horas, con un máximo de 0.01 ppm a las 24:00 horas.

**Gráfico 4.1.45. 2016 San Mateo Atenco por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación SM, aunque con línea de tendencia descendente, aún posee el promedio más alto registrado en 2016, de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

En este tenor, el municipio de San Mateo Atenco es el cuarto posición a niveles estatal en cuanto actividad económica, específicamente, industria y manufactura (COESPO, 2012); de esta manera, se pudiese explicar el porqué de los registros tan elevados de concentraciones de Bióxido de Azufre, pues de acuerdo con el Registro Estatal de Emisiones y Fuente Contaminantes de España, las actividades económicas industriales, generan subproductos tales como el SO<sub>2</sub> (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

#### **4.1.1.6.6. (AP) Aeropuerto**

**\*Nota:** La estación AP, durante el año 2016, no registró ningún dato, pues de acuerdo con personal la RAMA-ZMVT, ésta fue apagada.

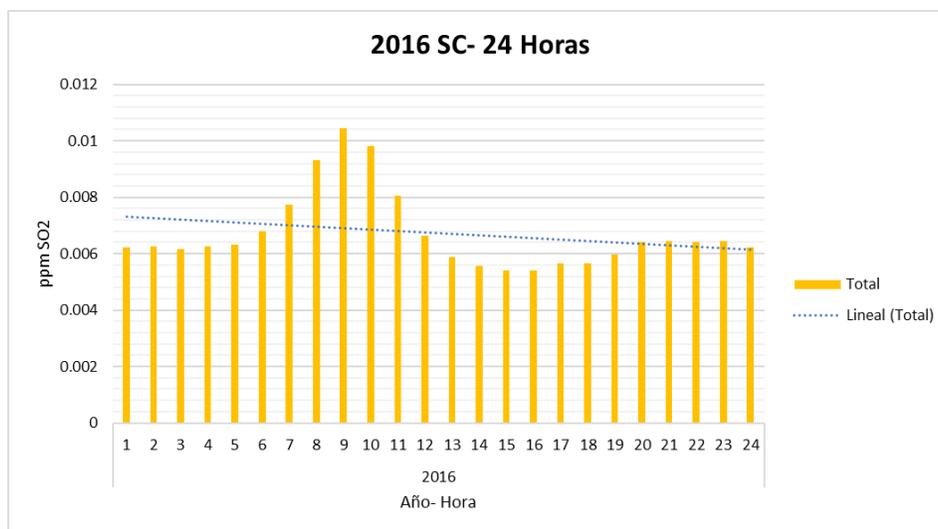
#### 4.1.1.6.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En la estación SC se observa un comportamiento de la línea de tendencia media (línea azul) descendiente, que va de 0.007 ppm a 0.006 ppm; arrojan así, un promedio de 0.006 ppm en 24 horas.

En el horario matutino se observan registros superiores desde las 8:00 hasta las 11:00 horas, con 0.009 ppm y 0.008 ppm, respectivamente y con un punto crítico a las 9:00 horas, de 0.01 ppm.

Durante la tarde se presenta una disminución en los niveles de SO<sub>2</sub>, desde las 14:00 hasta las 17:00 horas, fluctuando las 0.005 ppm; y posterior a ello, de 20:00 a 24:00 horas, se presenta un segundo pico en los registros, llegando a las 0.006 ppm en todas las horas

**Gráfico 4.1.46. 2016 San Cristóbal Huichochitlán por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Como ya se ha mencionado, la estación SC, es la que posee los registros más bajos de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT y 2016 no es la excepción, pues su promedio figura como el más bajo en este año.

Al parecer SC no representa un punto crítico en mediciones, ya que gracias sus actividades económicas primarias, los niveles de contaminantes atmosféricos, caso específico, SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2007), no se presentan en grandes concentraciones en el aire de la zona (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011).

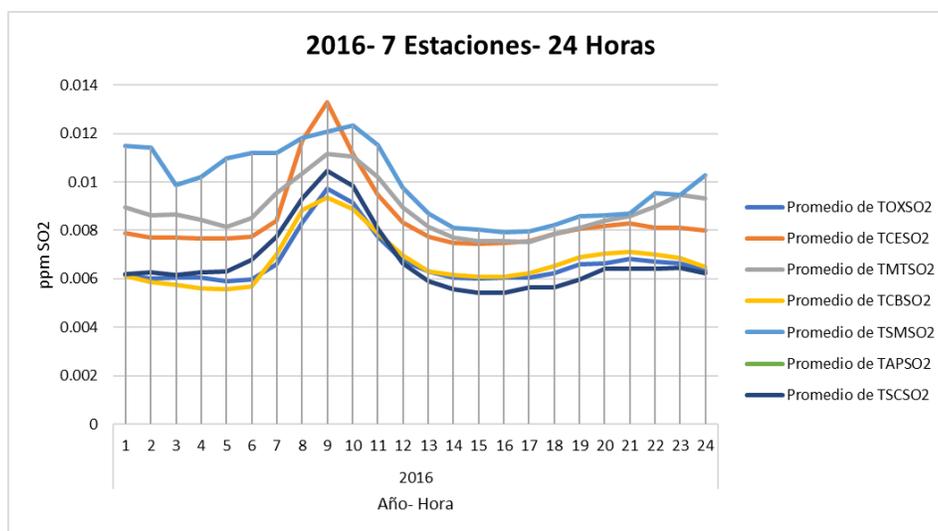
#### 4.1.1.6.8. 2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.47.** se presentan las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en 2015.

Como se aprecia en el gráfico, la estación AP (verde) ya no se detalla. Por su parte, la estación SM (azul claro) y la estación CE (naranja), son las que poseen los registros más altos, con 0.012 y 0.013 ppm respectivamente.

De manera general, todas las estaciones sufren de una baja vespertina, desde las 14:00 hasta las 17:00 horas, para presentar un ascenso nocturno que varía de acuerdo con cada estación.

**Gráfico 4.1.47. 2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.47.**, lo que más salta a la vista es la falta de las mediciones de la estación AP, pues en todos los años de estudio, esta estación era la que reportaba los registros más elevados de todas las estaciones; sin embargo, en 2016, la estación AP fue apagada.

Por su parte estaciones CE (naranja) y SM (azul claro) poseen los registros más elevados, pues gracias a su dinamismo socioeconómico, ambos municipios se colocan a la cabeza con aportaciones al PIB del Estado de México (COESPO, 2012). De esta manera, se espera que dicho dinamismo, juegue un papel importante en la cantidad de emisiones de Bióxido de Azufre al aire, como subproducto de las actividades antropogénicas (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

#### **4.1.1.7. Periodo de estudio 2011-2016**

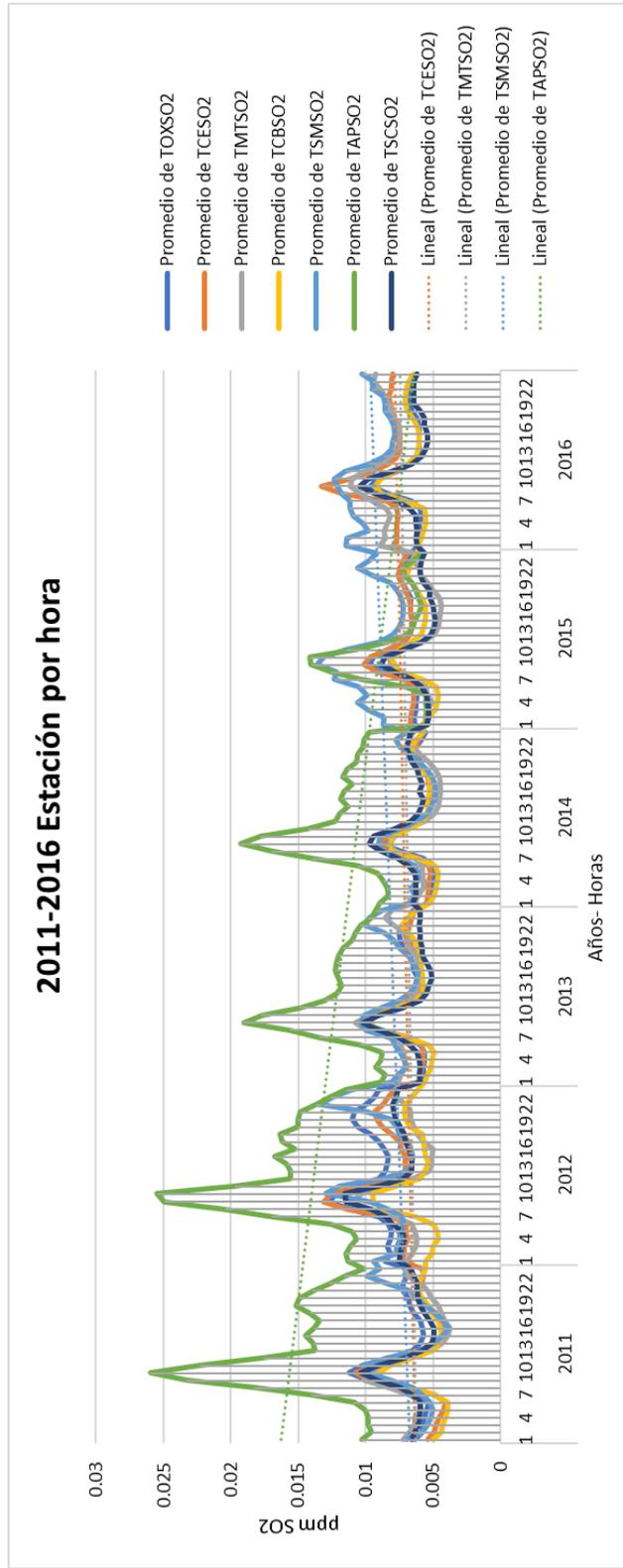
En el último apartado del análisis horario de concentraciones por 24 horas para Bióxido de Azufre, se presentan gráficos que compilan la información de todos los años de estudio (2011-2016), para las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

Esta información se desglosa con dos gráficos, uno de los cuales analiza el comportamiento de las estaciones y el otro, el comportamiento de las 24 horas del día; en ambos casos se estudian de 2011 a 2016.

##### **4.1.1.7.1. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT**

En el **Gráfico 4.1.48.** se observan la evolución de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, a lo largo de los años de estudio (2011-2016).

**Gráfico 4.1.48. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

El comportamiento de las estaciones de la RAMA-ZMVT varía de una a otra, por ejemplo, la estación AP (verde), es la que posee los registros más elevados desde 2011 hasta 2013, años en los cuales, el AICT mantenía una dinámica de 100 mil pasajeros en sus traslados aéreos; a diferencia de 2015 y 2016, años en los cuales, el promedio de dichos pasajeros descendió a 67 mil (SCT, 2017). No obstante, dicha estación fue apagada en 2016 y, aun así, en mediciones finales, esta estación continúa siendo la que marca el promedio más elevado de todas, con 0.012 ppm, desde 2011 hasta 2016.

Por su parte, las estaciones SM (azul claro) y MT (gris), presentan comportamientos ascendentes (ver **Gráfico 4.1.48.**), lo cual indicaría una merma en la calidad del aire dentro de la Zona Centro de la ZMVT. En este sentido, se debe mencionar que, ambas estaciones se ubican en municipios cuyo crecimiento poblacional y económico es de los más elevados en todo el Estado de México (COESPO, 2012), factores que coadyuvan en un 35% a las emisiones de SO<sub>2</sub> (Ballesteros & Rotter, 2014).

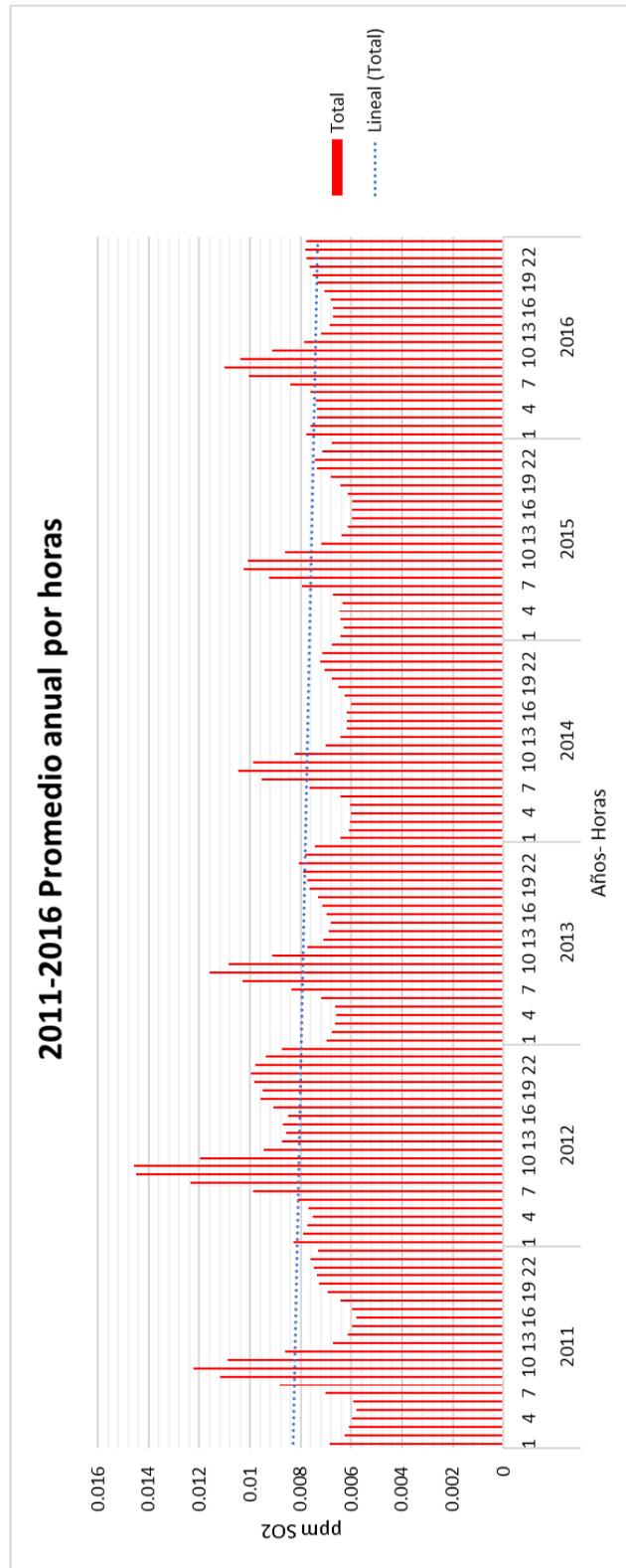
Por otro lado, la estación CE (naranja) incrementa niveles de concentración por encima de SM en 2016, e incluso sus registros van en aumento a lo largo de los años de estudio. Lo que caracteriza al municipio de Toluca es el crecimiento del parque vehicular, el cual juega un papel importante en el desempeño de la calidad del aire, pues dicho parque aumentó de 30 mil unidades, en 2011, a 40 mil unidades en 2016 (IGECEM, 2016), generando así, gases contaminantes tales como el SO<sub>2</sub> (García, 2014).

#### **4.1.1.7.2. 2011-2016 Reporte por hora**

El **Gráfico 4.1.49**. promedia las mediciones de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT y las muestra en reportes de 24 horas.

En el reporte final, se puede observar que la línea de tendencia media decrece y oscila las 0.008 ppm.

Gráfico 4.1.49. 2011-2016 Reporte por hora



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Como ya se mencionó, en el Capítulo 2, de acuerdo con el INE (2009), hoy INECC, este contaminante cuenta con dos tipos de comportamiento diario: bimodal y unimodal, el primero hace alusión a dos cambios de concentración diaria por diversos factores, intensificándose entre las 9:00 y 12:00 horas (INE, 2009 b); en este sentido, el **Gráfico 4.1.49**. muestra estas horas críticas presentes en todos los años de estudio, así como una segunda elevación durante las horas nocturnas.

Si bien el INE (2009), menciona en sus almanaques los cambios de concentraciones desde las 9:00 hasta las 12:00 horas, es posible observar que existen otras horas nocturnas que también presentan mediciones por arriba de la media, desde las 20:00 hasta las 24:00 horas. En este tenor, se plantea la posibilidad de que la radiación nocturna entre en una interacción con el enfriamiento de la superficie terrestre, ya que ésta provoca un desprendimiento de calor, lo cual calienta las capas de aire inmediatas y genera un almacenamiento de impurezas en capas de los primeros niveles, tales como SO<sub>2</sub> (Ayllón, 2003).

Todos los años de estudio, presentan una elevación matutina consecuencia de diversos factores. Algunos de ellos pudiesen ser los factores meteorológicos, como la humedad (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007), o factores socio-económicos, tales como la actividad industrial (GEM, 2012), o los medios de transporte utilizados (IPCC Working Group III, 2001).

Finalmente, se debe recordar que, aunque 2016 presenta mediciones bajas que ocasionan el decremento del propio gráfico, este año no contempla las elevaciones que anteriormente aportaba la estación AP, las cuales se caracterizaban por ser las más altas y mostraban la realidad completa de la ZMVT.

#### 4.1.2. Concentraciones por mes

Las mediciones mensuales son promedios que presenta la rama de los 30 o 31 días de cada mes del año. Dichas mediciones se presentan en ppm (partes por millón), iniciando en enero y terminando en diciembre; para las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, desde 2011 hasta 2016.

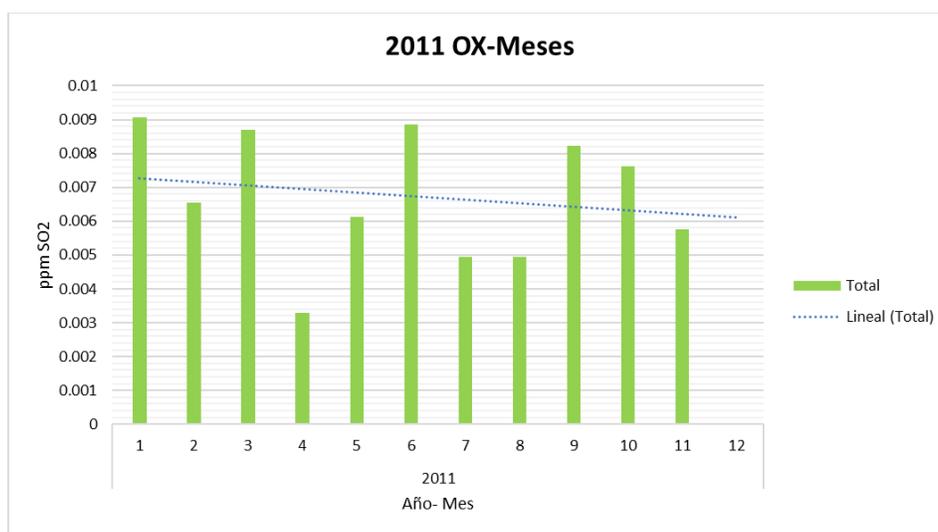
##### 4.1.2.1. Año 2011

##### 4.1.2.1.1. (OX) Oxtotitlán

En el **Gráfico 4.1.50.** se observa un comportamiento totalmente heterogéneo, con una línea de tendencia media (línea azul) descendente, que va de las 0.007 ppm a las 0.006 ppm, resultando en un promedio de 0.007 ppm al cabo de 12 meses.

Los meses con los registros más bajos son: abril, con 0.003 ppm, julio y agosto, con 0.005 ppm en sus registros. En el caso de los meses de febrero, mayo y noviembre, el registro oscila las 0.006 ppm y, por último, los meses con los reportes más elevados son: enero, marzo, julio septiembre y octubre, con niveles desde 0.008 ppm hasta 0.009 ppm.

**Gráfico 4.1.50. 2011 Oxtotitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Debido al comportamiento descendente de la línea de tendencia media, es posible decir que en esta estación las concentraciones de Bióxido de Azufre fueron a la baja. Sin embargo, esto

no resta importancia a las mediciones tan irregulares que se registraron en este año en la estación OX.

El mes de abril presenta la medición más baja del año 2011, con 0.003 ppm, sin embargo, este fenómeno se repite en todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en 2011, dejando la posibilidad de que sea gracias a la dinámica de vientos que se vivió en abril de 2011 y que favoreció a la disminución de niveles de contaminación atmosférica en OX (Domínguez, 2015).

Por su parte, el mes de enero registra los niveles más altos de contaminación, con 0.009 ppm de SO<sub>2</sub>, por ello, se entiende que no existen fenómenos meteorológicos en esta época del año que favorezcan la depositación húmeda de contaminantes, tales como el Bióxido de Azufre (INE, 2009 b).

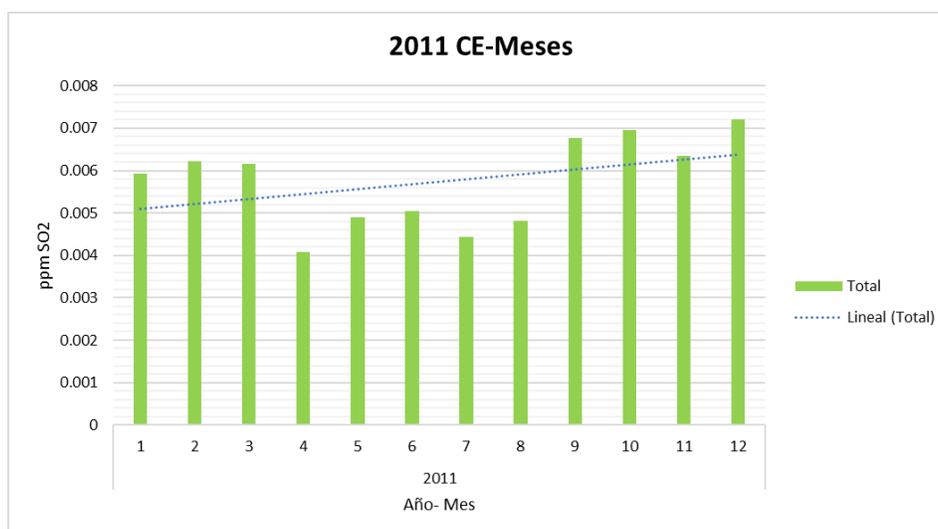
#### 4.1.2.1.2. (CE) Centro

Durante 2011 la estación CE registra una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, pasando de las 0.005 ppm a las 0.0065 ppm; y deriva en un promedio de 0.006 ppm en 12 meses.

Los niveles más elevados se presentan en los meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, con registros de 0.006 a 0.007 ppm.

Por otro lado, los niveles más bajos se presentan desde marzo hasta agosto, 0.004 y 0.005 ppm.

**Gráfico 4.1.51. 2011 Centro por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación CE el comportamiento de las mediciones de SO<sub>2</sub> se puede deber, entre otras cosas, a los factores climáticos terrestres, toda vez que, es en verano cuando los continentes del Hemisferio Norte tienen mayor temperatura (UNS Perú, 2008), lo cual coincide con el efecto de enfriamiento que posee el SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2001).

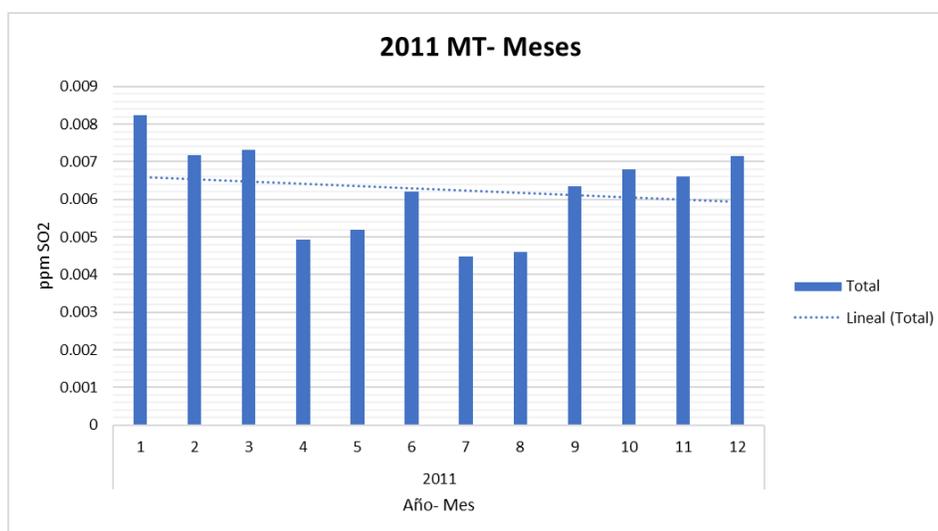
Para los registros elevados presentados en invierno, éstos pudiesen explicarse con el efecto indirecto que existe entre los GEI de larga vida con el SO<sub>2</sub>, pues es en los meses más fríos cuando el efecto invernadero se agudiza gracias a la permanencia de contaminantes atmosféricos en la atmosfera, misma permanencia afecta y es afectada por las concentraciones de SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2013).

#### 4.1.2.1.3. (MT) Metepec

En la estación MT se observa una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, pasando de las 0.007 ppm a las 0.006 ppm a final del año; para marcar así, un promedio de 0.006 ppm.

Es en los meses de primavera y verano: abril, mayo, julio y agosto; cuando se presenta un decremento en los registros, desde 0.005 a 0.004 ppm y, en meses de otoño e invierno: enero, febrero, marzo, septiembre, octubre y noviembre, dichos registros se elevan de 0.006 a 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.52. 2011 Metepec por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación MT se presentan las mediciones más elevadas en los meses más fríos, esto favorecido por el efecto invernadero, que, si bien no depende directamente del SO<sub>2</sub> ni éste del propio efecto invernadero, si guardan una relación por la característica del Bióxido de Azufre como un gas que ayuda a la permanencia de los GEI de larga vida en la atmósfera (IPCC Working Group I, 2013).

En los meses de abril, mayo, julio y agosto, se presenta una mayor presencia de factores hídricos en la zona (SEDEMA, 2017), la cual podría influir sobre la disminución de concentraciones para este gas, gracias a la característica hidrosoluble que posee dicho contaminante (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

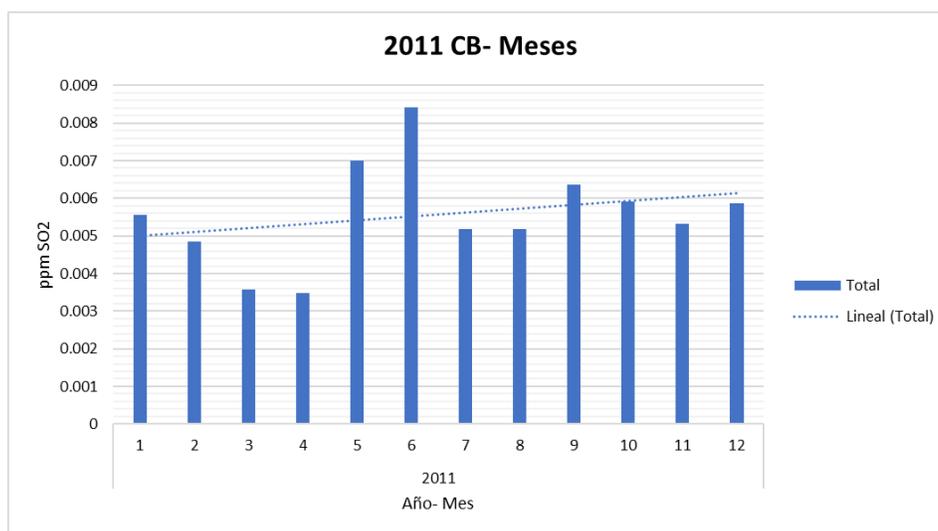
#### 4.1.2.1.4. (CB) Ceboruco

En el **Gráfico 4.1.53.** se aprecia una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, pasando de las 0.005 ppm a las 0.006 ppm. De esta manera, el promedio para los doce meses es de 0.0055 ppm.

Por un lado, los meses de enero, febrero, julio, agosto y noviembre marcan registros que fluctúan las 0.005. Por otro lado, los meses marzo y abril, marcan los registros más bajos con 0.0035 ppm cada uno.

Por último, los meses con los registros más altos son: mayo y junio, con 0.007 y 0.0085 ppm respectivamente.

**Gráfico 4.1.53. 2011 Ceboruco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Para el **Gráfico 4.1.53.** se presentan las mayores elevaciones en los meses de mayo y junio, mismos que coinciden con los registros más altos de temperatura en la estación CB (SEDEMA, 2017), lo cual apunta a que, aunque la concentración de SO<sub>2</sub> es una variable con dependencia multifactorial y también puede guardar relación con la temperatura.

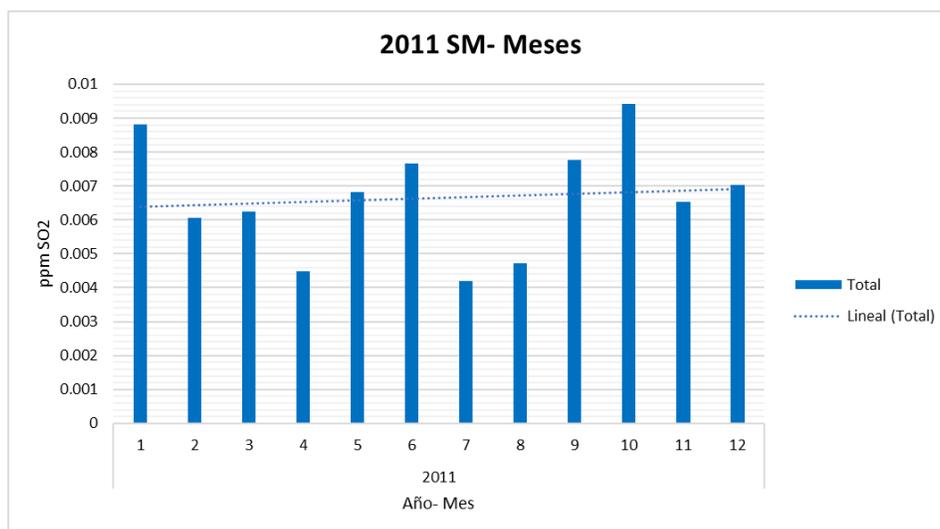
No obstante, el promedio que marca la estación CB en 2011 es el más bajo del año, para las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

#### 4.1.2.1.5. (SM) San Mateo Atenco

La estación SM presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) ascendente, que va de las 0.006 a las 0.007 ppm; y resultando en un promedio para doce meses, de 0.006 ppm.

En general, en esta estación las mediciones son heterogéneas y no presentan un patrón de comportamiento. En este tenor, se observa que los meses con registros elevados son enero, mayo, junio, septiembre, octubre y diciembre, con valores de 0.007 a 0.009 ppm. Por otro lado, los meses con decrementos más pronunciados son febrero, marzo, julio, agosto y noviembre, con valores de 0.004 a 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.54. 2011 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación SM reporta las concentraciones de SO<sub>2</sub> en una de las zonas industriales más importantes del área metropolitana del Valle de Toluca, pues San Mateo Atenco es el segundo municipio con mayor aporte al PIB estatal (COESPO, 2012).

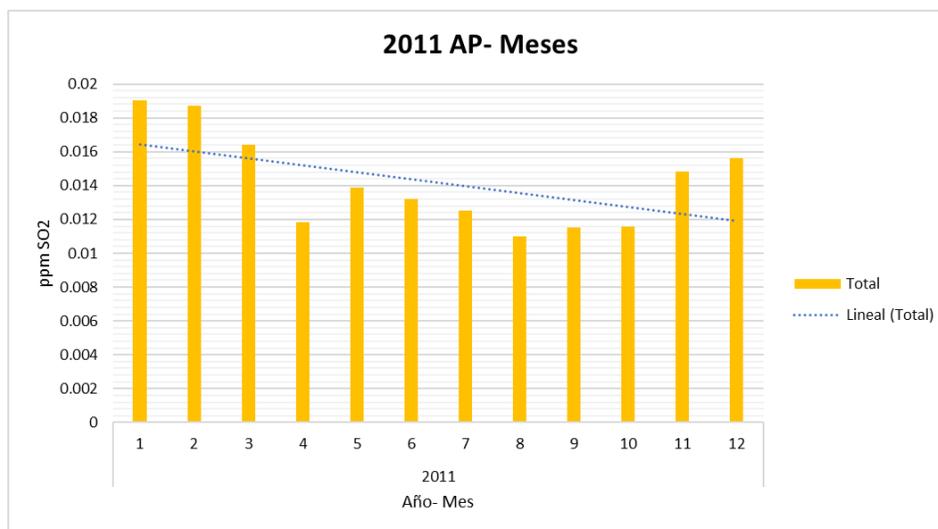
Gracias al dinamismo que guarda este municipio es posible atribuir gran parte de las concentraciones de Bióxido de Azufre a las emisiones industriales o bien, a la cantidad de transporte que existe en esta región (GEM, 2012).

#### 4.1.2.1.6. (AP) Aeropuerto

Durante 2011 la estación AP presenta una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, la cual pasa de las 0.016 a las 0.012 ppm al cabo de doce meses; arrojando un promedio de 0.014 ppm.

En los meses correspondientes a primavera y verano, de abril a septiembre, se registran los valores más bajos de la estación, oscilantes en 0.012 y 0.014 ppm. En los meses de otoño e invierno, es cuando los valores más elevados se reportan, con registros de 0.015 a 0.019 ppm, en enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre.

**Gráfico 4.1.55. 2011 Aeropuerto por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En **Gráfico 4.1.55.** correspondiente a la estación AP, se presenta un comportamiento descendente, sin embargo, dicha estación posee los registros más elevados de las siete estaciones de la RMA-ZMVT en todo el periodo de estudio 2011-2016.

Si bien la dinámica del AICT afecta de manera directa las mediciones registradas en la estación AP, también es posible observar que los registros más bajos se presentan en los meses de verano, de esta manera, se plantea la posibilidad de que, en los meses de abril a septiembre, existan condiciones meteorológicas que promuevan la depositación húmeda de dicho contaminante (INE, 2009 b).

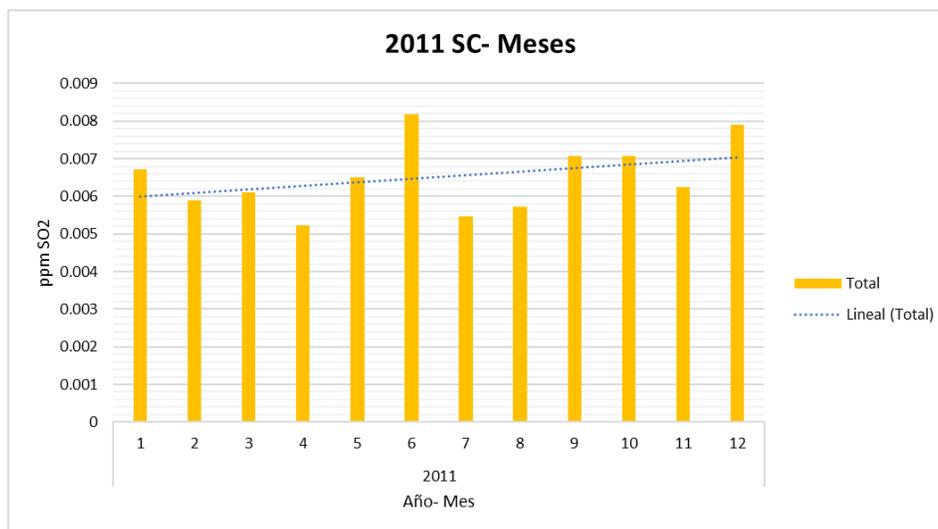
#### 4.1.2.1.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En el **Gráfico 4.1.56.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, la cual va de las 0.006 ppm a las 0.007 ppm al final del año; y arrojando un promedio de 0.006 ppm, en doce meses.

Las mediciones más elevadas se observan en los meses de junio y diciembre, ambas con 0.008 ppm. Le siguen enero, febrero, marzo, mayo, septiembre, octubre y noviembre, todos fluctuando las 0.006 y las 0.007 ppm.

Por último, las mediciones más bajas se presentan en abril, julio y agosto, con registros de 0.005 ppm.

**Gráfico 4.1.56. 2011 San Cristóbal Huichochitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación SC el comportamiento es heterogéneo, al parecer no obedece ningún patrón de comportamiento, pues existen decrementos tanto en abril como en noviembre; o bien elevaciones en los meses de diciembre y julio.

La estación SC se encuentra en la zona más rural de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, lo cual hace complicado un análisis en torno a actividades industriales o de transporte. En esta zona, las actividades primarias predominan y consecuentemente, la generación de contaminantes atmosféricos se ve menos afectada que en el resto de las estaciones (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011).

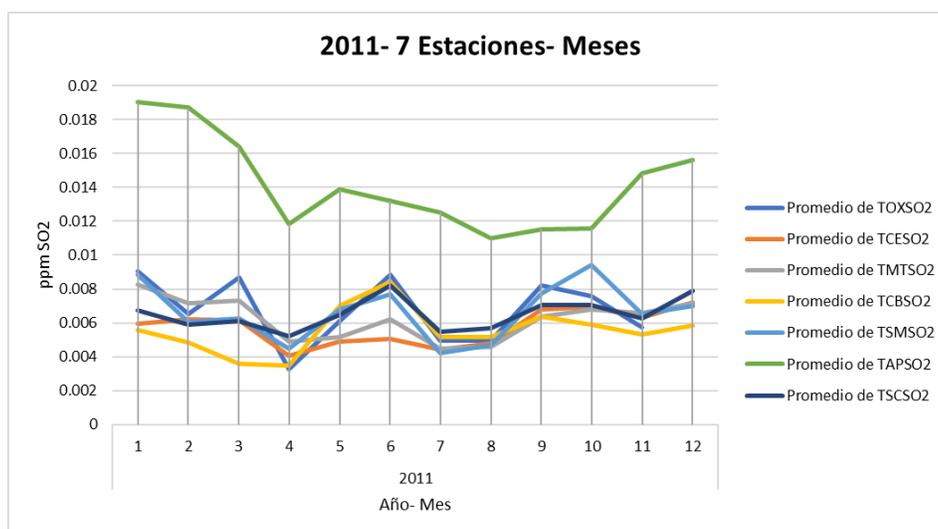
#### 4.1.2.1.8. 2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.57.** se presentan las siete estaciones, con registros de los doce meses del año en 2011.

De manera general, todas las estaciones presentan decrementos en el mes de abril, pues se registran valores de entre 0.0035 y 0.005 ppm; le siguen julio y agosto, con decrementos de 0.004 y 0.006 ppm. Por último, los registros elevados se presentan en enero y diciembre.

De igual manera, se observa que la estación AP (verde) es la estación con los niveles más altos del año.

**Gráfico 4.1.57. 2011 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Si bien algunas de las estaciones presentan comportamientos que obedecen patrones de parámetros meteorológicos como la temperatura, no es posible generalizar estos factores como confluente de las concentraciones de Bióxido de Azufre, pues existen otras estaciones como, por ejemplo: OX (azul fuerte), que no obedece patrón meteorológico alguno.

Por otro lado, en julio y agosto es cuando todas las estaciones coinciden con bajas en los registros y es en estos meses, cuando algunos fenómenos meteorológicos hidrológicos, aumentan (SEDEMA, 2017), efecto que podría deberse a la característica hidrosoluble del Bióxido de Azufre (RETC- Registro de Emisiones y Transeferencias de Contaminantes- Chile, 2017).

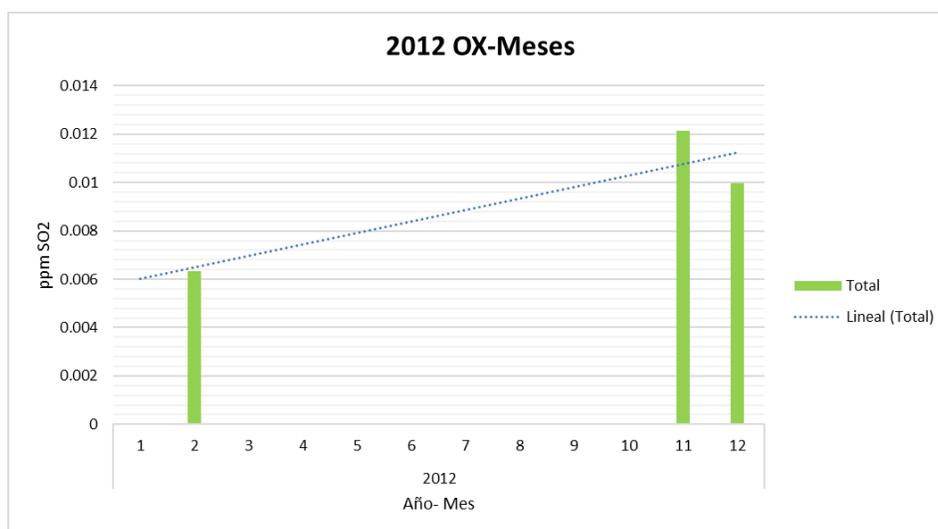
#### 4.1.2.2. Año 2012

##### 4.1.2.2.1. (OX) Oxtotitlán

En el **Gráfico 4.1.58.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, que va de las 0.006 ppm a las 0.012 ppm. Sin embargo, sólo existen registros de tres meses: febrero, noviembre y diciembre. Esto debido a que la estación fue apagada en el resto de los meses de 2012.

Aun con esto, la concentración mínima se registró en febrero con 0.006 ppm y la máxima en noviembre con 0.012 ppm.

**Gráfico 4.1.58. 2012 Oxtotitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Debido a la falta de datos, no es posible concluir ni analizar de manera fidedigna el **Gráfico 4.1.58.** pues de doce datos, nueve son inexistentes. Esto gracias a que la RAMA-ZMVT en ocasiones apaga las estaciones por meses completos.

#### 4.1.2.2.2. (CE) Centro

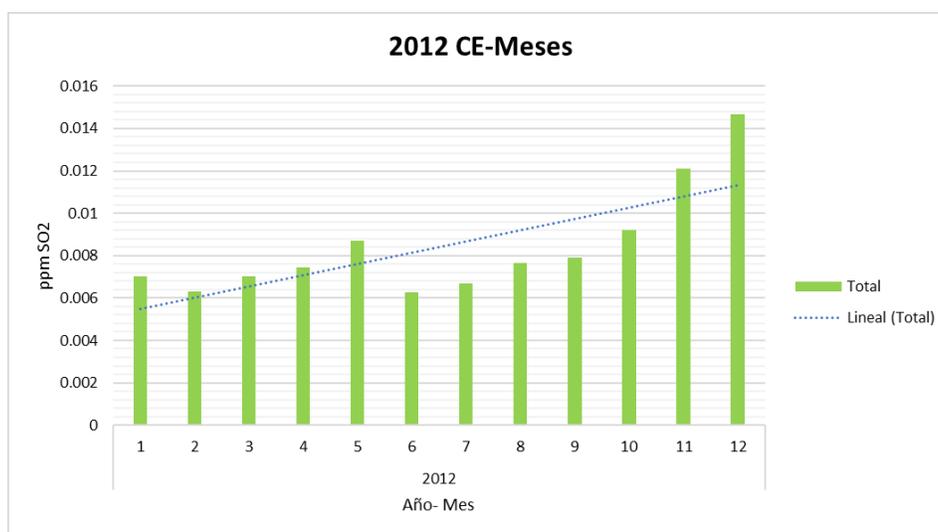
Durante 2012 la estación CE registra una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, pasando de las 0.005 ppm a las 0.012 ppm; y deriva en un promedio de 0.008 ppm en 12 meses.

El **Gráfico 4.1.59.** se presenta como un espejo, enero-mayo y junio-diciembre.

Los niveles más elevados se presentan en los meses de noviembre y diciembre, con registros de 0.012 a 0.014 ppm.

Por otro lado, los niveles más bajos se presentan desde enero hasta abril, así como junio y julio, con valores de 0.006 ppm. Por último, en los meses de mayo, septiembre y octubre se registran niveles entre 0.008 y 0.009 ppm.

**Gráfico 4.1.59. 2012 Centro por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Una de las explicaciones del porqué en diciembre se alcanzan los niveles máximos de medición, es que debido a la ausencia de lluvias en dicho mes (SEDEMA, 2017), generada por la presencia de sistemas de alta presión (UNS Perú, 2008), dicho contaminante se mantuvo en la atmósfera sin posibilidad de solubilizarse o de dispersarse (RETC- Registro de Emisiones y Transeferncias de Contaminantes- Chile, 2017).

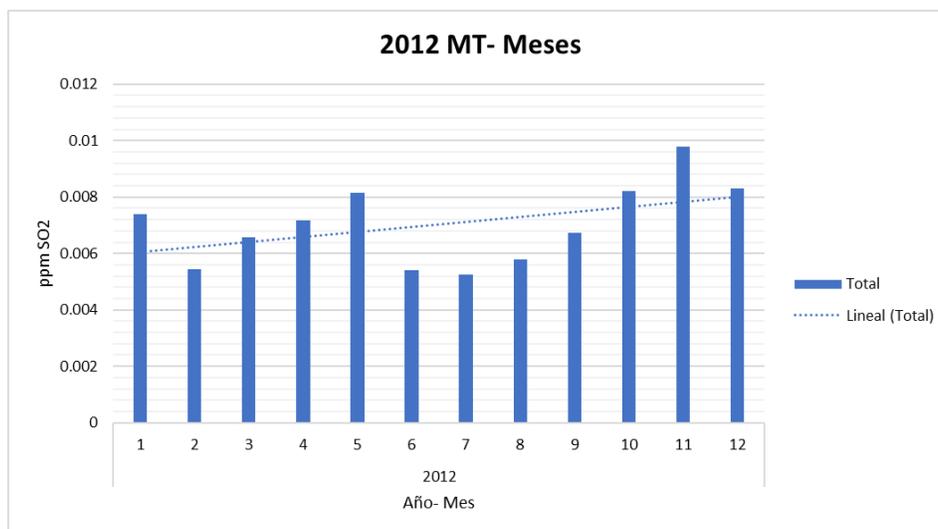
Caso contrario para los meses de junio y julio cuando los registros de precipitación pluvial alcanzan sus máximos en 2012 para la estación CE (SEDEMA, 2017).

#### 4.1.2.2.3. (MT) Metepec

En la estación MT se observa una línea de tendencia media (línea azul) creciente, pasando de las 0.006 ppm a las 0.008 ppm a final del año; para marcar así, un promedio de 0.007 ppm.

En la estación se presenta un comportamiento espejo, entre los periodos febrero-mayo y junio-diciembre; con bajas al inicio y elevaciones al final de cada periodo. Es en los meses febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre; cuando se presenta un decremento en los registros, de 0.006 y 0.005 ppm. Por otro lado, en los meses de enero, abril, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, dichos registros se elevan de 0.007 a 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.60. 2012 Metepec por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.60.** se observa que los meses de junio y julio son los que presentan las mediciones más bajas, lo cual, de acuerdo con el INE (2009), hoy en día INECC; se debe a que en estos meses existen condiciones meteorológicas que ayudan a la depositación humedad de Bióxido de Azufre (INE, 2009 b).

Por su parte, la tendencia elevada en la estación MT, puede deberse a que, dentro de la ZMVT, Metepec es uno de los municipios con mayor cantidad de uso de suelo urbano y de grandes vialidades, factores que coadyuvan a la emisión de gases contaminantes, tales como el SO<sub>2</sub> (GEM, 2012).

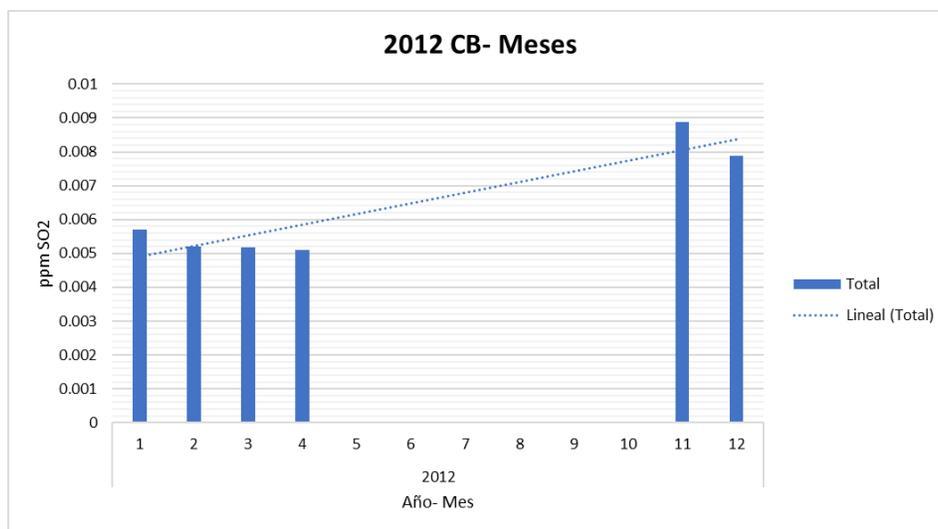
#### 4.1.2.2.4. (CB) Ceboruco

En el **Gráfico 4.1.61.** se aprecia que existe una falta de la mitad de los datos, o bien, de seis meses, de mayo a octubre. Esto debido a que, en los meses faltantes, la estación fue apagada por la RAMA-ZMVT.

Como se observa en dicho gráfico, la línea de tendencia media (línea azul) es ascendente, pasando de las 0.005 ppm a las 0.0085 ppm. De esta manera, el promedio para la estación es de 0.006 ppm.

Por un lado, los meses de enero a abril, marcan registros que fluctúan las 0.005 y 0.006 ppm. Por otro lado, los meses de noviembre y diciembre arrojan datos nuevamente, con 0.009 y 0.008 ppm, respectivamente.

**Gráfico 4.1.61. 2012 Ceboruco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

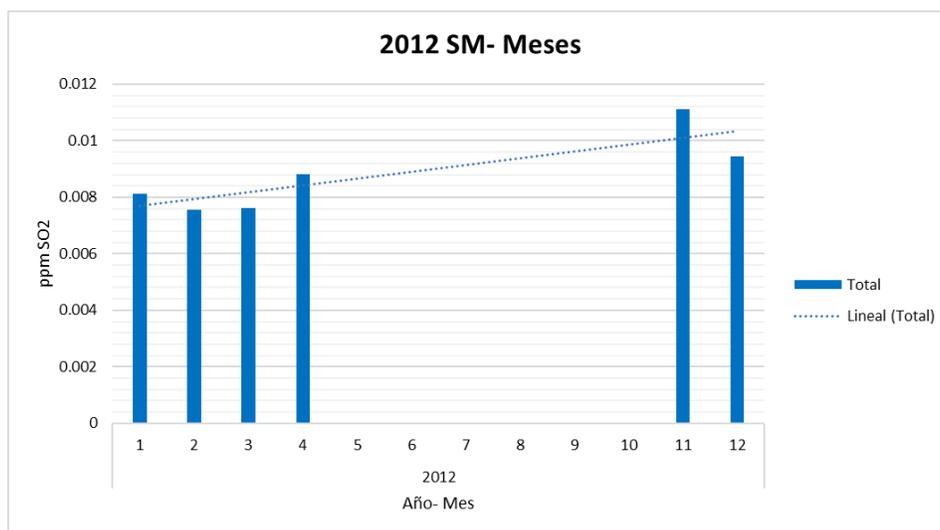
Debido a la falta de datos, no es posible concluir de manera certera acerca del comportamiento al alza del **Gráfico 4.1.61.** pues únicamente se cuenta con el 50% de los datos del año, ya que la estación fue apagada en esos meses.

#### 4.1.2.2.5. (SM) San Mateo Atenco

La estación SM presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) ascendente que va de las 0.008 a las 0.01 ppm; y resultando en un promedio de 0.008 ppm.

En esta estación las mediciones de mayo a octubre no se registran, gracias a que la estación fue apagada por la RAMA-ZMVT en los meses sin registros. Por otro lado, los meses de enero a abril, así como noviembre y diciembre, presentan valores desde 0.008 a 0.012 ppm.

**Gráfico 4.1.62. 2012 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

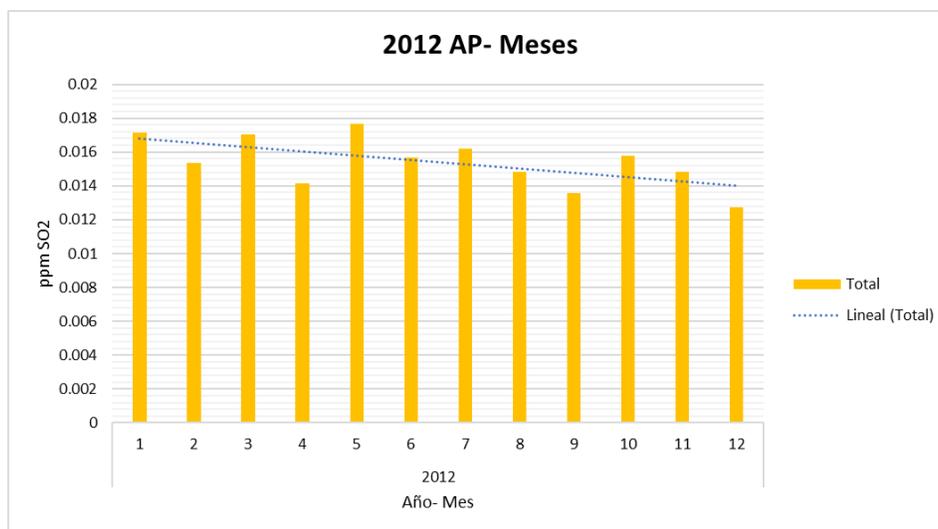
Para la estación SM en el año 2012, no existen datos suficientes que puedan ayudar a la defensoría de una posible explicación, ya que hay una ausencia del 50% de los datos.

#### 4.1.2.2.6. (AP) Aeropuerto

Durante 2012 la estación AP presenta una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, la cual pasa de las 0.017 a las 0.014 ppm al cabo de doce meses; arrojando un promedio de 0.015 ppm.

De manera general, los registros de la estación se presentan constantes y fluctúan las 0.014 y las 0.018 ppm en todo el año. A manera de excepción, septiembre y diciembre son los meses con los valores más bajos, ya que marcan 0.013 y 0.012 ppm, respectivamente.

**Gráfico 4.1.63. 2012 Aeropuerto por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación AP se registran los valores más altos a lo largo de todo el periodo de estudio 2011-2016, sin embargo, parece no haber patrón alguno que sigan los registros de dicha estación.

Cabe mencionar que el AICT en 2012 se reportó como el quinto aeropuerto más importante a nivel nacional (GEM, 2012). Aun con esto, en el año 2012, el AICT reporta una baja en el número pasajeros transportados, pues de 2011 a 2012, el total baja de 120 mil a 66 mil pasajeros en este año (SCT, 2017).

Si bien la estación AP muestra una tendencia a la baja, esta sigue siendo la estación que reporta los más altos índices de concentraciones de Bióxido de Azufre en 2012.

#### 4.1.2.2.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En el **Gráfico 4.1.64.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, la cual va de las 0.007 ppm a las 0.01 ppm al final del año; y arrojando un promedio de 0.007 ppm, en doce meses.

Las mediciones de mayo a octubre no se reportaron.

Por su parte, los meses de enero a abril van de 0.006 ppm a 0.008 ppm y, noviembre y diciembre, marcan valores de 0.01 y 0.009 ppm, respectivamente.

**Gráfico 4.1.64. 2012 San Cristóbal Huichochitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En 2012 diversas estaciones se apagaron por varios meses y es el caso para SC, existe una falta de datos del 50%, lo cual no permite un análisis fidedigno de los reportes.

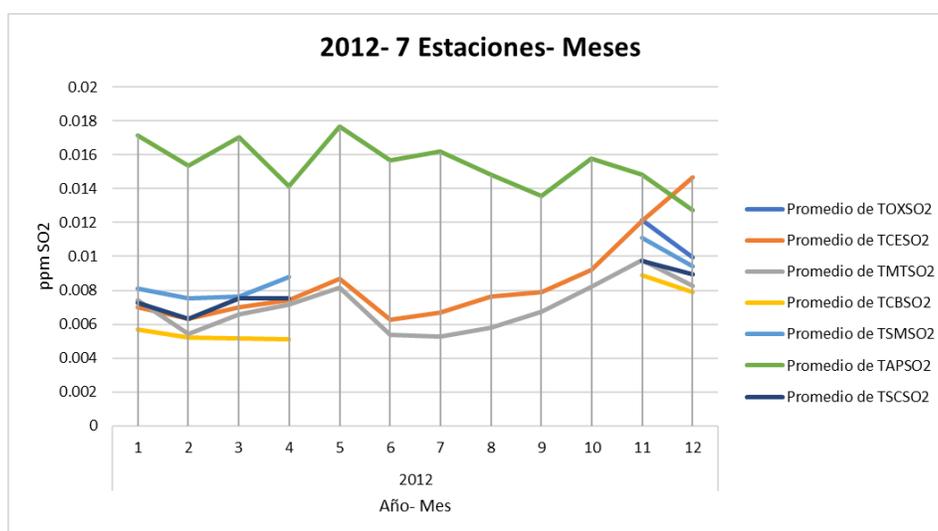
#### 4.1.2.2.8. 2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.65**, se presentan las siete estaciones, con registros por mes del año en 2012.

De manera general, se parecía que las estaciones OX (azul), CB (amarillo), SM (azul claro) y SC (azul fuerte), dejan de reportar niveles de SO<sub>2</sub> desde mayo hasta octubre.

Por su parte la estación CE (naranja) y AP (verde) se colocan como las más elevadas en 2012 y en diciembre, llegan a marcar valores de 0.014 ppm. Por último, los registros de CE y MT (gris), presentan disminuciones en junio y julio, para volver a elevarse desde octubre.

**Gráfico 4.1.65. 2012 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En 2012 se reportan las mediciones de SO<sub>2</sub> más altas del periodo de estudio 2011-2016 y una de las razones por las que se presentan promedios tan elevados como en OX de 0.009 ppm, es que no existe información 100% fidedigna, pues como se observa en el **Gráfico 4.1.65**, hay una ausencia de datos, mismos que podrían repercutir en un posible e hipotético descenso de estas mediciones para 2013.

Por su parte AP, CE y MT son las estaciones que poseen el 100% de los datos y, en diciembre presentan aumentos. Este factor puede deberse a la relación indirecta entre los GEI de larga vida con el SO<sub>2</sub>, pues es en los meses más fríos cuando el efecto invernadero se agudiza y repercute esta relación, con registros altos para GEI de larga vida y SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2013).

### 4.1.2.3. Año 2013

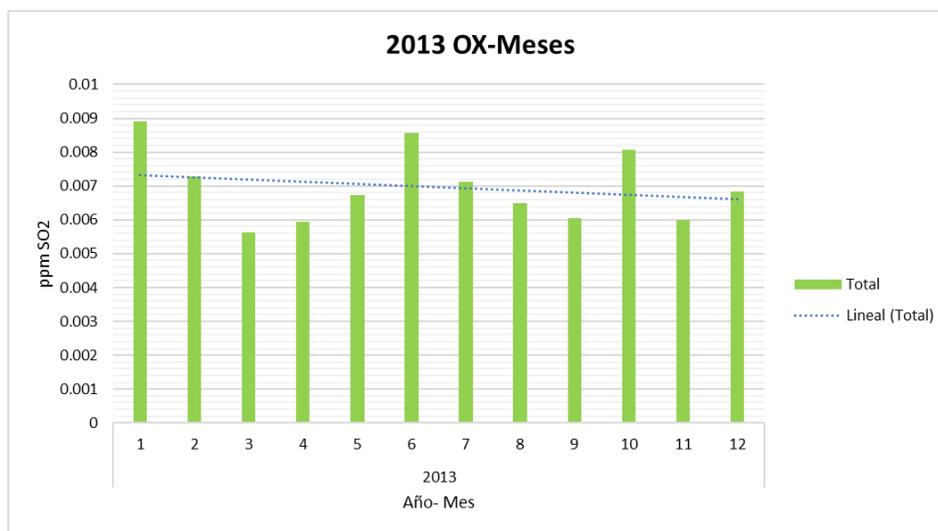
#### 4.1.2.3.1. (OX) Oxtotitlán

En el **Gráfico 4.1.66.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) descendente, que fluctúa las 0.007 ppm, resultando en un promedio de 0.007 ppm en 12 meses.

Los meses con los registros más bajos son: marzo, con 0.005 ppm, así como abril, septiembre y noviembre, con 0.006 ppm cada uno.

En el caso de los meses de febrero, mayo, julio, agosto y diciembre, el registro oscila las 0.007 ppm y, por último, los meses con los reportes más elevados son: enero y junio, con 0.009 ppm cada uno, así como octubre, con 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.66. 2013 Oxtotitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación OX para el año 2013 se aprecian bajas en las mediciones en los meses de marzo, septiembre y noviembre. Para el caso de marzo, al debilitarse los vientos alisios, los vientos predominantes son aquellos que se transportan Oeste a Este, favoreciendo la calidad del aire en la estación OX, ubicada al oeste de la ZMVT (García, 2014).

Por su parte, el mes de septiembre también registra un promedio de precipitación pluvial alto en la estación OX (SEDEMA, 2017); de esta manera, se pudiese explicar las disminución de concentraciones para Bióxido de Azufre, pues es un gas hidrosoluble y a mayor cantidad de agua, este se diluye (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

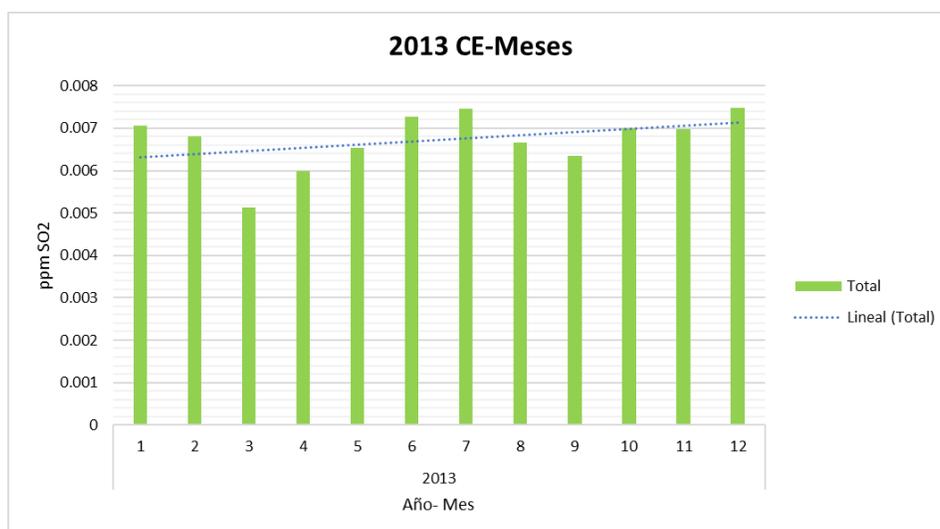
#### 4.1.2.3.2. (CE) Centro

Durante 2013 la estación CE registra una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, pasando de las 0.006 ppm a las 0.007 ppm; y deriva en un promedio de 0.007 ppm en 12 meses.

Los niveles más elevados se presentan en los meses de enero, febrero, mayo, junio, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre, con registros de 0.007 a 0.008 ppm.

Por otro lado, los niveles más bajos se presentan en marzo, abril y septiembre con 0.005 y 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.67. 2013 Centro por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

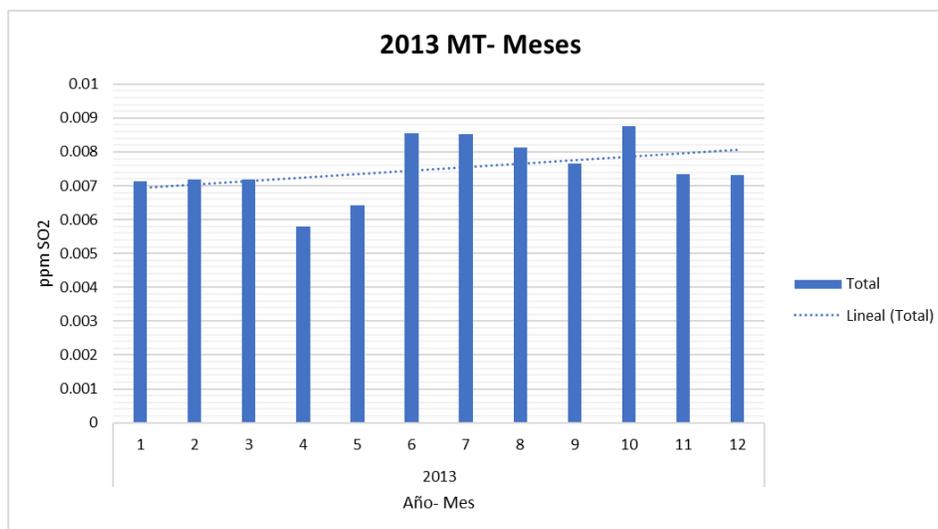
Al igual que en la estación OX en 2013, la estación CE marca una disminución importante en el mes de septiembre, mismo mes que posee los registros más altos de precipitación pluvial, lo cual hace alusión a su característica hidrosoluble del SO<sub>2</sub> (Textos Científicos, 2006).

#### 4.1.2.3.3. (MT) Metepec

En la estación MT se observa una línea de tendencia media (línea azul) creciente, pasando de las 0.007 ppm a las 0.008 ppm a final del año; para marcar así, un promedio de 0.0075 ppm.

Es en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, cuando se presenta un ascenso en los registros, desde 0.008 a 0.009 ppm y, en los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, dichos registros disminuyen a de 0.007 ppm. En este tenor, los meses con los registros más bajos son: abril y mayo, con mediciones alrededor de las 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.68. 2013 Metepec por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación MT para el año 2013, se observa un patrón irregular de comportamiento, pues se presentan elevaciones en meses, tales como: julio, o septiembre; cuando de acuerdo con el INE (2009), el Bióxido de Azufre debería registrar valores bajos, pues no hay factores que favorezcan su depositación humedad (INE, 2009 b).

Por otro lado, el municipio de Metepec es uno de los lugares donde la dinámica económica y la tendencia ascendente de la densidad poblacional podrían impactar sobre la cantidad de emisiones de contaminantes a la atmosfera, tales como el Bióxido de Azufre (H. Ayuntamiento de Toluca, 2013).

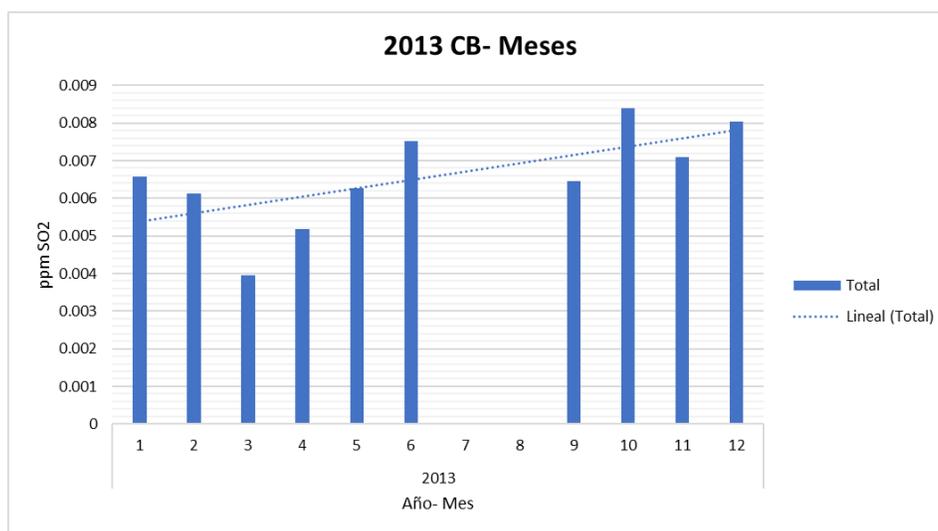
#### 4.1.2.3.4. (CB) Ceboruco

En el **Gráfico 4.1.69.** se aprecia una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, pasando de las 0.005 ppm a las 0.008 ppm. De esta manera, el promedio para los doce meses es de 0.0065 ppm.

Por un lado, los meses de enero, febrero, mayo y septiembre, son los que marcan registros que fluctúan las 0.006 y 0.007 ppm. Por otro lado, los meses marzo y abril marcan los registros más bajos con 0.004 y 0.005 ppm cada uno.

Por último, los meses con los registros más altos son: junio, octubre y diciembre, con 0.007 y 0.008 ppm; y presentando una ausencia de julio y agosto.

**Gráfico 4.1.69. 2013 Ceboruco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación CB los meses de julio y agosto las estaciones fueron apagadas y no presentan registro alguno, sin embargo, los registros posteriores son altos y casi alcanzan las 0.009 ppm en octubre.

De acuerdo con el INE (2009), las mediciones elevadas de Bióxido de Azufre se presentan en los meses de diciembre y enero; si bien enero no es uno de los meses con mayores cantidades, si rebasa la línea de tendencia media. En este tenor, ambos meses no poseen ningún factor que pueda ayudar a la depositación humedad de este contaminante, lo cual, pudiese explicar los altos índices en estos meses (INE, 2009 b).

#### 4.1.2.3.5. (SM) San Mateo Atenco

La estación SM presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) constante, que oscila las 0.008 ppm; y resultando en un promedio para doce meses, de 0.008 ppm.

En general, en esta estación las mediciones son heterogéneas y no presentan un patrón de comportamiento. En este tenor, se observa que los meses con registros elevados son enero, marzo, abril, mayo, junio, octubre y diciembre, con valores de 0.008 a 0.01 ppm. Por otro lado, los meses con decrementos más pronunciados son febrero, julio, agosto, septiembre y noviembre, con valores de 0.006 a 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.70. 2013 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

San Mateo Atenco es uno de los municipios más activos de la ZMVT y es donde la estación SM marca el promedio para doce meses de SO<sub>2</sub> más alto de 2013 (IGECEM, 2015).

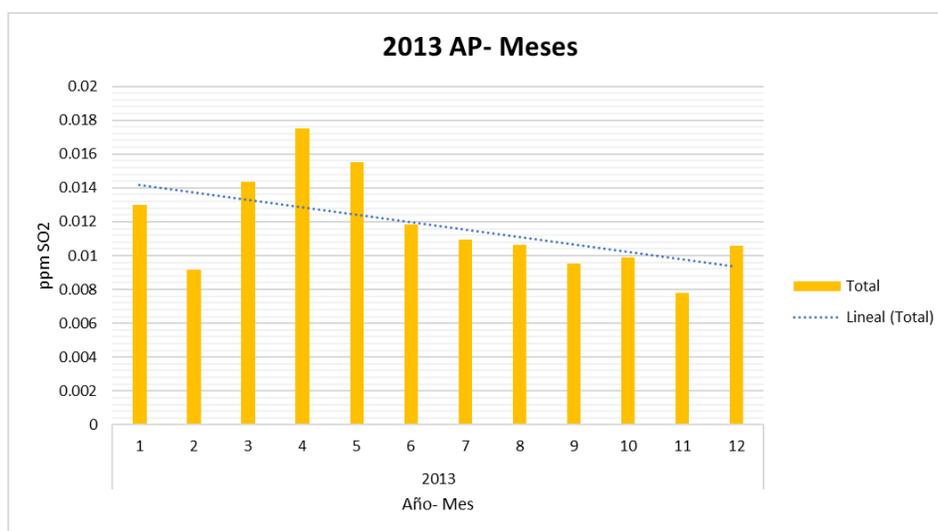
Por su parte, el mes de diciembre, es el mes que marca las elevaciones más concentradas de Bióxido de Azufre, lo cual se pudiese deber a la capacidad de enfriamiento que posee este contaminante y la ausencia de factores que ayuden a la depositación humedad de éste (IPCC Working Group III, 2014).

#### 4.1.2.3.6. (AP) Aeropuerto

Durante 2013 la estación AP presenta una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, la cual pasa de las 0.014 a las 0.01 ppm al cabo de doce meses; arrojando un promedio de 0.011 ppm.

En los meses correspondientes a enero, marzo, abril y mayo, se registran los valores más elevados de la estación, oscilantes en 0.013 y 0.018 ppm. Para el caso de los meses restantes del año, los valores decrecen y reportan registros de 0.008 a 0.012 ppm.

**Gráfico 4.1.71. 2013 Aeropuerto por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.71.** se aprecia un comportamiento irregular de las mediciones, pues la bibliografía soporta que los registros de Bióxido de Azufre deberían ser mayores en enero y diciembre y, no en marzo, abril y mayo, tal y como lo presenta la estación AP (INE, 2009 b).

Por otro lado, cabe mencionar que es en marzo cuando la estación AP no reporta precipitación pluvial (SEDEMA, 2017); de esta manera, se pudiese explicar por qué en marzo las mediciones se elevan tanto, pues no hay actor hídrico alguno que disminuya dichas mediciones (INE, 2009 b).

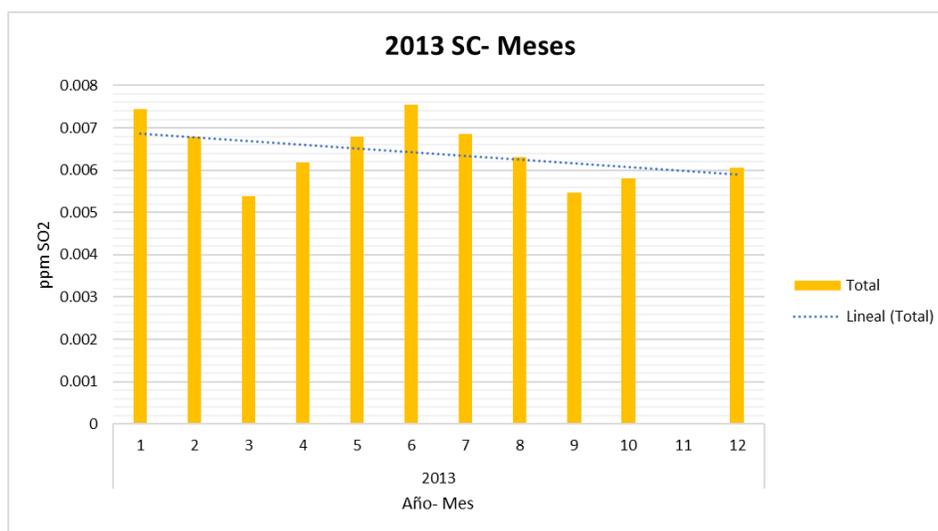
#### 4.1.2.3.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En el **Gráfico 4.1.72.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) descendente, la cual va de las 0.007 ppm a las 0.006 ppm al final del año; y arrojando un promedio de 0.0065 ppm, en doce meses.

Las mediciones más elevadas se observan en los meses de enero y junio, ambas con 0.0075 ppm. Le siguen febrero, abril, mayo, julio, agosto y diciembre, todos fluctuando las 0.006 y las 0.007 ppm.

Por último, las mediciones más bajas se presentan en marzo, septiembre y octubre, con registros de 0.0055 ppm.

**Gráfico 4.1.72. 2013 San Cristóbal Huichochitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Los meses de mayo, junio y julio son de los que presentan concentraciones elevadas de Bióxido de Azufre, meses en los cuales la precipitación pluvial no es tan elevada en 2013 (SEDEMA, 2017); en este tenor, el abatimiento de concentración de Bióxido de Azufre puede deberse a la cantidad de precipitación pluvial, pues su característica hidrosoluble lo hace vulnerable a dicho fenómeno meteorológico (RETC- Registro de Emisiones y Transeferencias de Contaminantes- Chile, 2017).

#### 4.1.2.3.8. 2013 siete estaciones de la RAMA-ZMVT

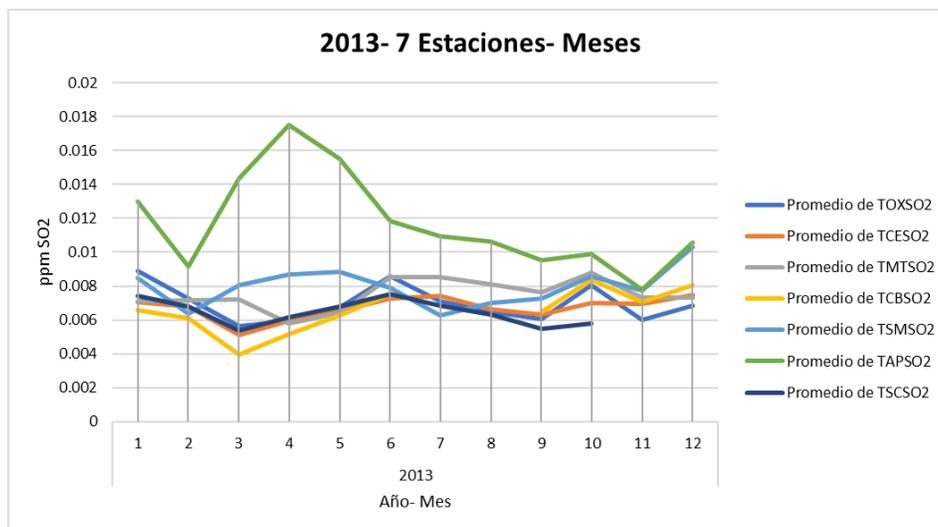
En el **Gráfico 4.1.73.** se presentan las siete estaciones, con registros de los doce meses del año en 2013.

De manera general, no es posible apreciar un comportamiento que se distinga en todas las estaciones de la RAMA-ZMVT, ya que, por ejemplo: existen elevaciones en abril para AP (verde) y SM (azul) y de igual manera, existen decrementos en este mes para CB (amarillo) y CE (naranja).

Por su parte, los meses de enero y diciembre si presentan elevaciones en sus registros para todas las estaciones de la RAMA-ZMVT.

Por último, también se observa que la estación AP (verde) es la estación con los niveles más altos del año.

**Gráfico 4.1.73. 2013 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En 2013 la cantidad de datos a reportar aumenta y con ello la certeza de estos, a diferencia de 2012; en este sentido, en 2013 el promedio anual disminuye a 0.007 ppm.

La estación AP tiene altos niveles en abril, mayo y junio, factor que pudiese ser explicado por la falta de precipitación pluvial en dichos meses, pues cabe mencionar que en el Estado de México el régimen de lluvia obedece a julio, agosto, septiembre y octubre como meses con alta precipitación (GEM, 2012).

#### 4.1.2.4. Año 2014

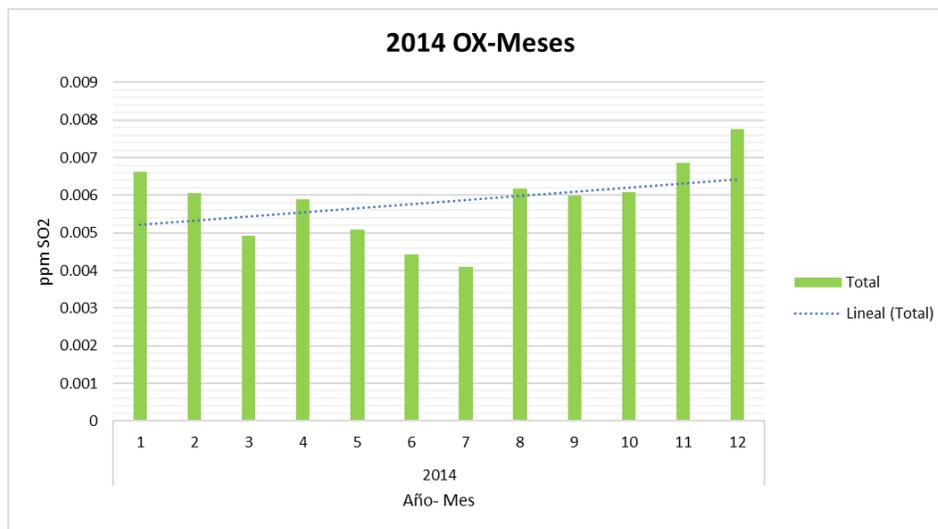
##### 4.1.2.4.1. (OX) Oxtotitlán

En el **Gráfico 4.1.74.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, que va de las 0.005 ppm a las 0.007 ppm, resultando en un promedio de 0.006 ppm en 12 meses.

Los meses con los registros más bajos son: marzo y mayo, con 0.005 ppm, así como junio y julio, con 0.004 ppm cada uno.

En el caso de los meses de febrero, abril, agosto, septiembre y octubre el registro oscila las 0.006 ppm y, por último, los meses con los reportes más elevados son: enero y noviembre con 0.007 ppm, así como diciembre con 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.74. 2014 Oxtotitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación OX, es en los meses de invierno cuando los registros se elevan por encima de la media, alcanzando las 0.008 ppm en diciembre. En este sentido, cabe mencionar que la zona de Toluca y sus alrededores, presentan una disminución de condiciones meteorológicas, tales como precipitaciones o condiciones húmedas, que logren abatir la concentración de este contaminante en los meses de noviembre, diciembre y enero (INE, 2009 b).

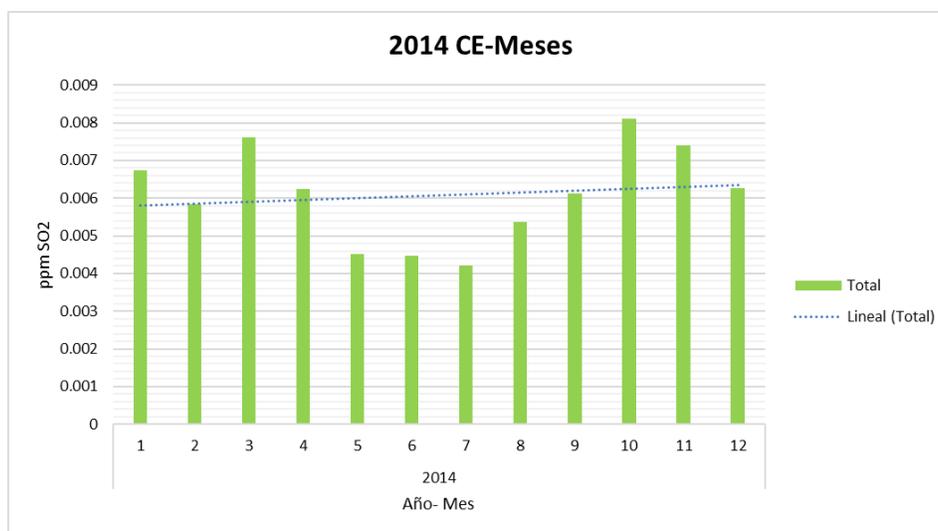
#### 4.1.2.4.2. (CE) Centro

Durante 2014 la estación CE registra una línea de tendencia media (línea azul) constante, oscilando las 0.006 ppm; lo cual deriva en un promedio de 0.006 ppm en 12 meses.

Los niveles más elevados se presentan en los meses de enero, marzo, octubre y noviembre con registros de 0.007 y 0.008 ppm.

Por otro lado, los niveles más bajos se presentan en mayo, junio, julio y agosto, con registros que oscilan las 0.004 ppm.

**Gráfico 4.1.75. 2014 Centro por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En 2014 las dos estaciones de la Zona Centro de la RAMA-ZMVT, disminuyen en verano y aumentan en invierno, las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

En este tenor, es el mes de octubre el que presenta los registros más elevados de la estación. Una de las posibles explicaciones del porqué es que en este mismo mes es cuando las precipitaciones disminuyen (SEDEMA, 2017).

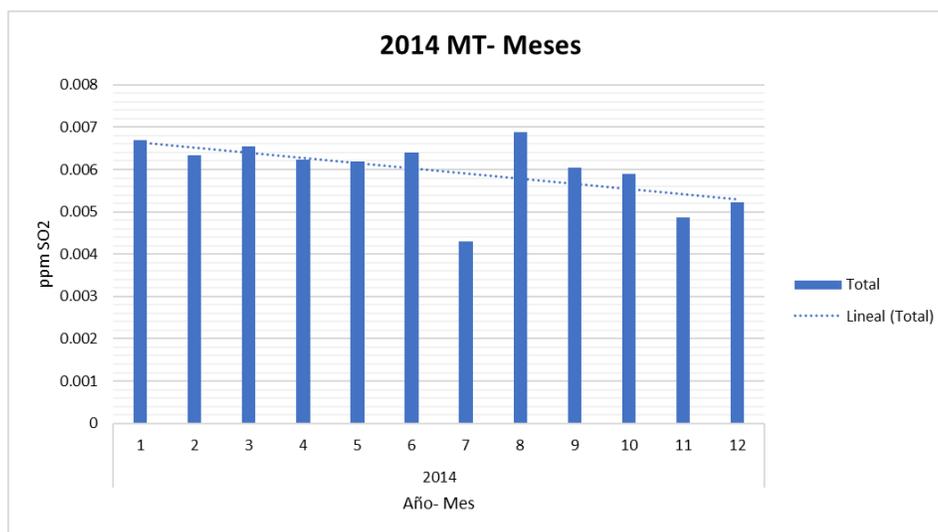
Por su parte, la estación de verano contribuye a la disminución de las concentraciones de Bióxido de Azufre, pues esta misma provee características meteorológicas favorables gracias a su condición hidrosoluble del SO<sub>2</sub> (INE, 2009 b).

#### 4.1.2.4.3. (MT) Metepec

En la estación MT se observa una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, pasando de las 0.007 ppm a las 0.005 ppm a final del año; para marcar así, un promedio de 0.006 ppm.

Es en la mayoría de los meses cuando se marcan valores iguales o mayores a 0.006 ppm; con un máximo en agosto de 0.007 ppm. Como excepción a estos registros, se presentan julio, noviembre y diciembre, con valores de 0.004 a 0.005 ppm.

**Gráfico 4.1.76. 2014 Metepec por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación MT existe una disminución de los registros en 2014, pues si bien la mayoría de los meses se ubica en las 0.006 ppm, es gracias a los meses de julio, noviembre y diciembre que el promedio disminuye, ya que son los registros más bajos del periodo de estudio 2011-2016.

Para el caso de julio, mes en el que se registra la menor concentración de Bióxido de Azufre, es posible plantear que debido a los altos registros de precipitación pluvial (SEDEMA, 2017), la concentración de este contaminante disminuye drásticamente; pues cabe mencionar que la hidrosolubilidad del mismo coadyuva a que se deposite de manera húmeda el mismo (INE, 2009 b).

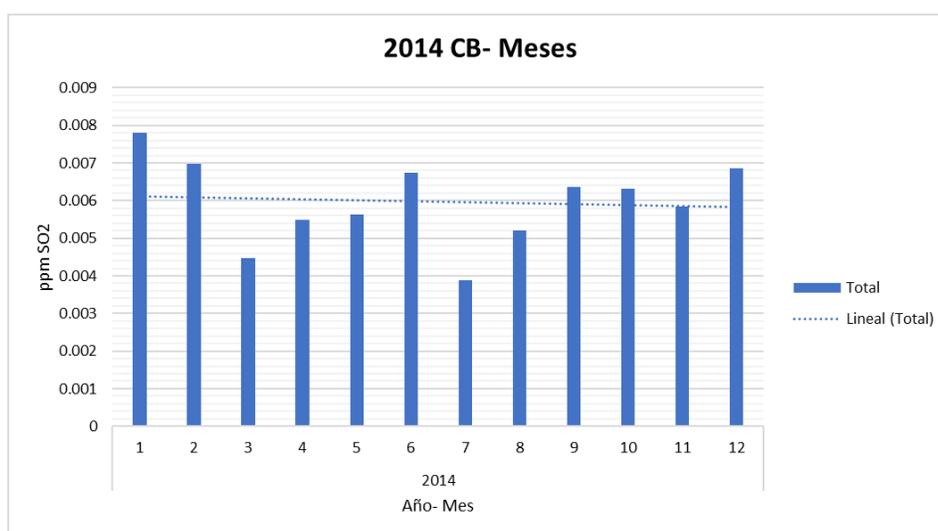
#### 4.1.2.4.4. (CB) Ceboruco

En el **Gráfico 4.1.77.** se aprecia una línea de tendencia media (línea azul) constante que oscila las 0.006 ppm. De esta manera, el promedio para los doce meses es de 0.006 ppm.

En la estación MT se presenta un comportamiento espejo entre los periodos marzo-junio y julio-octubre. Por un lado, los meses de enero, febrero, junio, septiembre, octubre y diciembre son los que marcan registros elevados que fluctúan las 0.006 y 0.008 ppm. Por otro lado, los meses de abril, mayo, agosto y noviembre marcan registros de 0.005 y 0.006 ppm cada uno.

Por último, los meses con los registros más bajos son marzo y julio con 0.004 ppm.

**Gráfico 4.1.77. 2014 Ceboruco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.77.** no es posible apreciar un patrón de comportamiento, pues hay elevaciones en enero, junio, septiembre, octubre y diciembre.

Las elevaciones en los meses de enero y diciembre se pudiesen explicar gracias a la característica hidrosoluble del Bióxido de Azufre, pues en estos meses no existen actores meteorológicos que abatan los registros de concentración de dicho gas (Puppo, 2012).

Por otro lado, el mes de julio es el mes con los registros más bajos del periodo de estudio 2011-2016, en estación. Lo cual podría deberse a la presencia de los mismos actores meteorológicos que depositen húmedamente a este contaminante (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

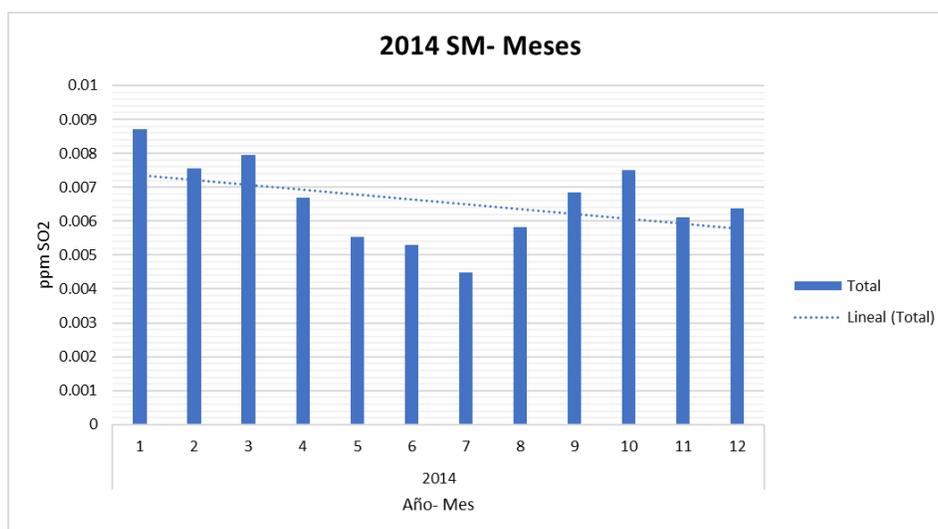
#### 4.1.2.4.5. (SM) San Mateo Atenco

La estación SM presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) descendente, que va de las 0.007 a las 0.006 ppm; y resultando en un promedio para doce meses, de 0.006 ppm.

En general, en esta estación las mediciones presentan una disminución en los meses de verano, desde mayo hasta agosto, con valores de 0.004 y 0.005 ppm.

Por otro lado, los meses con aumentos más pronunciados son de enero a abril y de septiembre a diciembre, con valores de 0.007 a 0.009 ppm.

**Gráfico 4.1.78. 2014 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

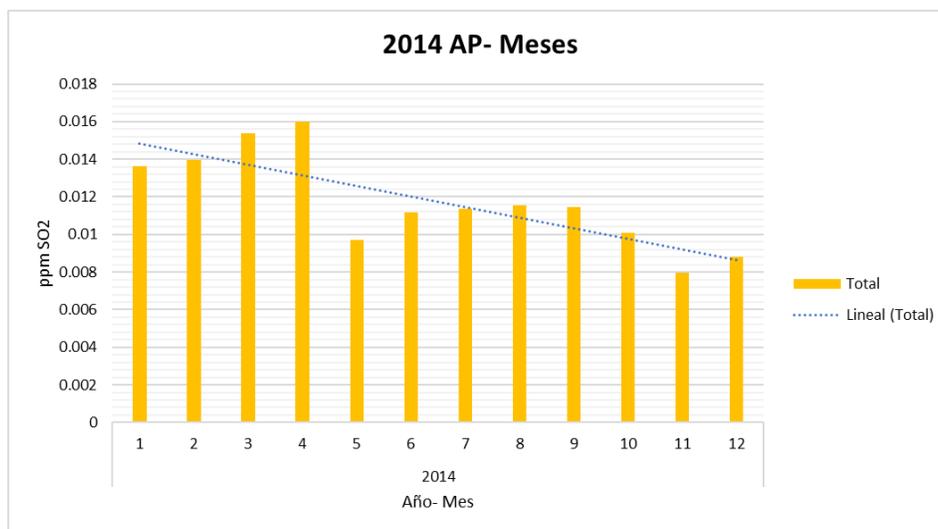
En SM se presenta una tendencia a la baja y de acuerdo con el IGCEM (Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México), en 2014, San Mateo Atenco reportó un PIB del sector industrial que disminuyó (IGCEM, 2015), es así como este factor económico, pudiese tener injerencia en la cantidad de emisiones de contaminantes a la atmósfera, pues este sector económico contribuye de manera notable a la cantidad de emisiones de Bióxido de Azufre (IPCC Working Group I, 2007).

#### 4.1.2.4.6. (AP) Aeropuerto

Durante 2014 la estación AP presenta una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, la cual pasa de las 0.015 a las 0.008 ppm al cabo de doce meses; arrojando un promedio de 0.011 ppm.

En los primeros meses del año, como enero, febrero, marzo y abril, se registran los valores más altos de la estación, oscilantes en 0.014 y 0.016 ppm. Por su parte, en los meses restantes del año, es cuando los valores bajan y se reportan con registros de 0.008 a 0.012 ppm, con un mínimo en noviembre de 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.79. 2014 Aeropuerto por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

De manera general, el **Gráfico 4.1.79.** presenta un comportamiento descendente, sin embargo, los registros para febrero, marzo y abril son los más altos en 2014, con casi 0.016 ppm. Parte de este aumento puede deberse a que todos los gases contaminantes en la ZMVT tienden a aumentar en los meses fríos (Hernández & Madrigal, 2004).

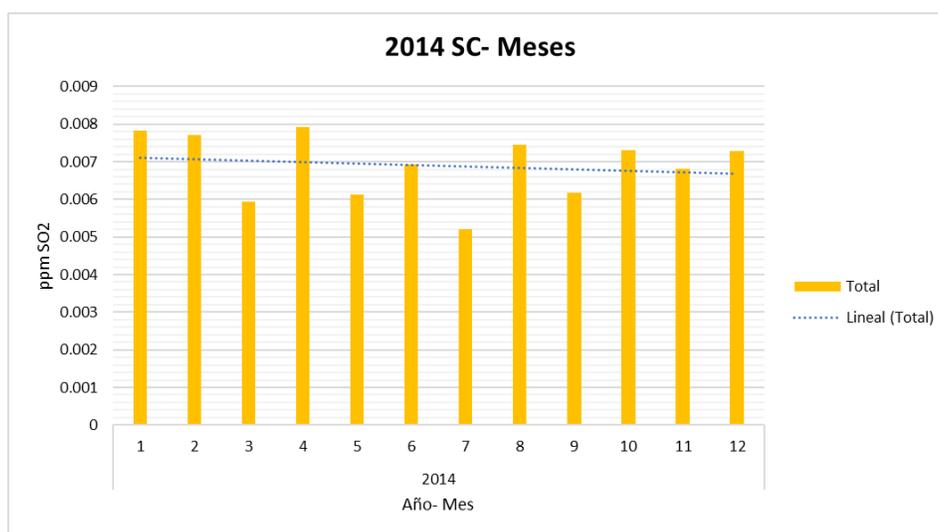
Por otro lado, el gran decremento de la línea de tendencia media es posible que esté relacionado con la disminución en el número de pasajeros transportados en el AICT, dicho número pasa de 105 mil en 2013, a 64 mil pasajeros en 2014 (SCT, 2017).

#### 4.1.2.4.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En el **Gráfico 4.1.80.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) constante, la cual oscila las 0.007 ppm; y arrojando un promedio de 0.007 ppm, en doce meses.

Las mediciones en las estaciones SC son irregulares, pues las más elevadas se observan en los meses de enero, febrero, abril, junio, agosto, octubre, noviembre y diciembre. Le siguen marzo, mayo, julio y septiembre, todos fluctuando las 0.005 y las 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.80. 2014 San Cristóbal Huichochitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Si bien se observa una disparidad en el **Gráfico 4.1.80.** la estación SC, por primera vez desde 2011, representa un foco de atención para la RAMA-ZMVT, toda vez que los niveles de esta son los más elevados de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT en 2014. Factor que puede ser causado por el proceso de descampenización que San Cristóbal Huichochitlán sufre año con año y que causa un rezago en actividades económicas primarias, tales como la agricultura (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011).

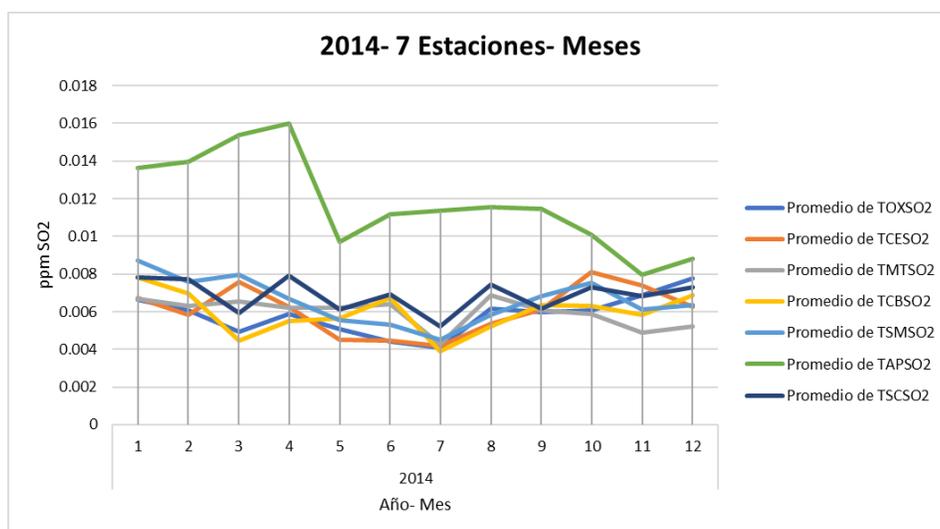
#### 4.1.2.4.8. 2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.81.** se presentan las siete estaciones, con registros de los doce meses del año en 2014.

De manera general, todas las estaciones presentan decrementos en el mes de julio, pues se registran valores de entre 0.004 y 0.006 ppm. Por otro lado, los registros elevados se presentan en enero, agosto y diciembre.

De igual manera, se observa que la estación AP (verde) es la estación con los niveles más altos del año y que ésta decrece en el segundo semestre del año.

**Gráfico 4.1.81. 2014 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En 2014 las mediciones de SO<sub>2</sub> fueron más bajas que en 2013.

Es posible observar en el **Gráfico 4.1.81.** que en el mes de julio todas las estaciones registran un decremento en las concentraciones de este contaminante.

Por otro lado, la estación AP, durante 2014, continua con disminuciones en las concentraciones de SO<sub>2</sub>, y consecuentemente el promedio registrado para todo 2014 no aumenta como se pudo haber esperado por el actuar de los altos registros de la estación SM.

#### 4.1.2.5. Año 2015

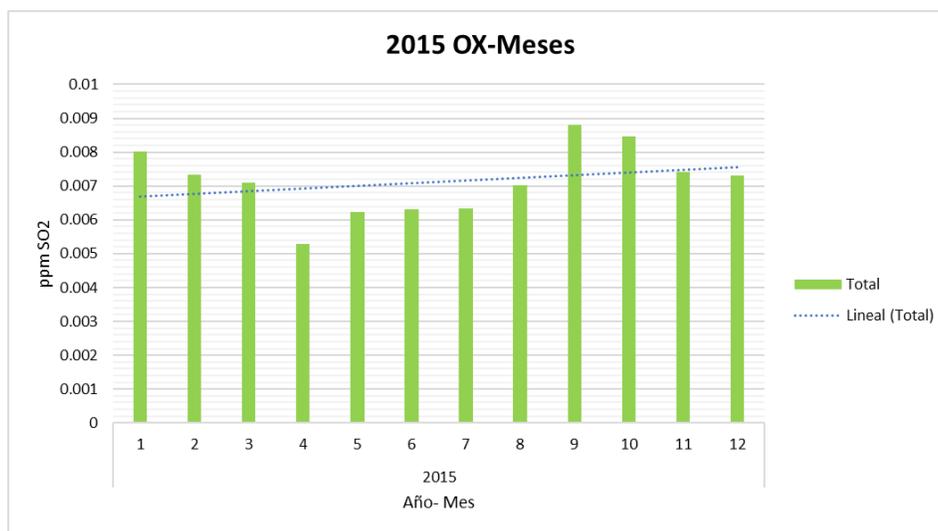
##### 4.1.2.5.1. (OX) Oxtotitlán

En el **Gráfico 4.1.82.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, que va de las 0.007 ppm a las 0.008 ppm, resultando en un promedio de 0.007 ppm en 12 meses.

Los meses con los registros más bajos son: abril con 0.005 ppm, mayo, junio y julio con 0.006 ppm cada uno.

En el caso de los meses de febrero, marzo, agosto, noviembre y diciembre el registro oscila las 0.007 ppm y, por último, los meses con los reportes más elevados son: enero con 0.008 ppm, así como septiembre y octubre con 0.009 ppm cada uno.

**Gráfico 4.1.82. 2015 Oxtotitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.82.** se aprecia una disminución en los registros durante los meses de abril, mayo, junio y julio. Estos meses pueden obedecer a la posibilidad de que existan condiciones meteorológicas que promuevan la depositación húmeda de dicho contaminante (INE, 2009 b).

Por su parte, Toluca registra un crecimiento poblacional de poco más de 20 mil habitantes desde 2014, razón por la cual se explicaría los meses de octubre y noviembre con los valores más elevados para 2015 (GEM, 2012).

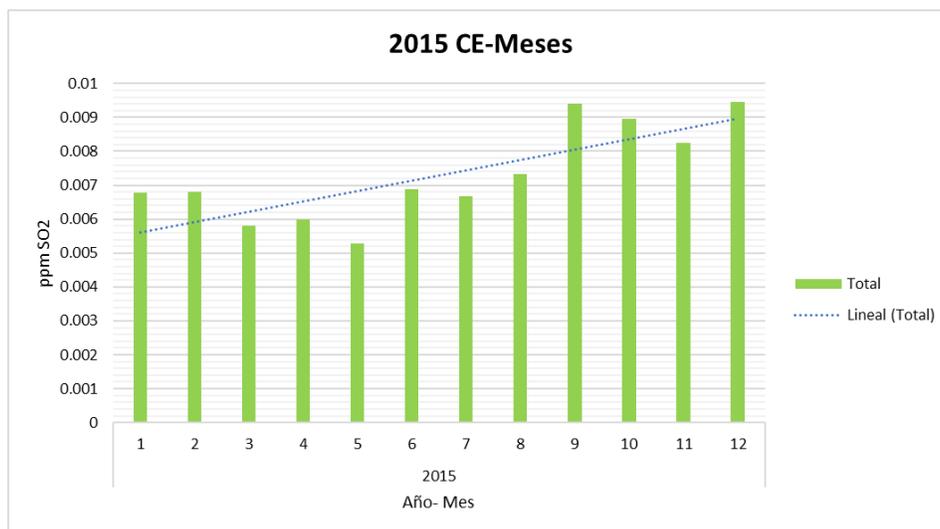
#### 4.1.2.5.2. (CE) Centro

Durante 2015 la estación CE registra una línea de tendencia media (línea azul) ascendente, pasando de las 0.005 ppm a las 0.009 ppm; y deriva en un promedio de 0.007 ppm en 12 meses.

Los niveles más elevados se presentan en los meses desde septiembre a diciembre, con registros de 0.008 a 0.009 ppm.

Por otro lado, los niveles más bajos se presentan en marzo, abril y mayo, con valores de 0.005 y 0.006 ppm. Por último, en los meses de enero, febrero, junio, julio y agosto se registran niveles entre 0.008 y 0.009 ppm.

**Gráfico 4.1.83. 2015 Centro por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación CE es la que posee los segundos valores más altos de concentración de Bióxido de Azufre, para el año 2015 (SEDEMA, 2017).

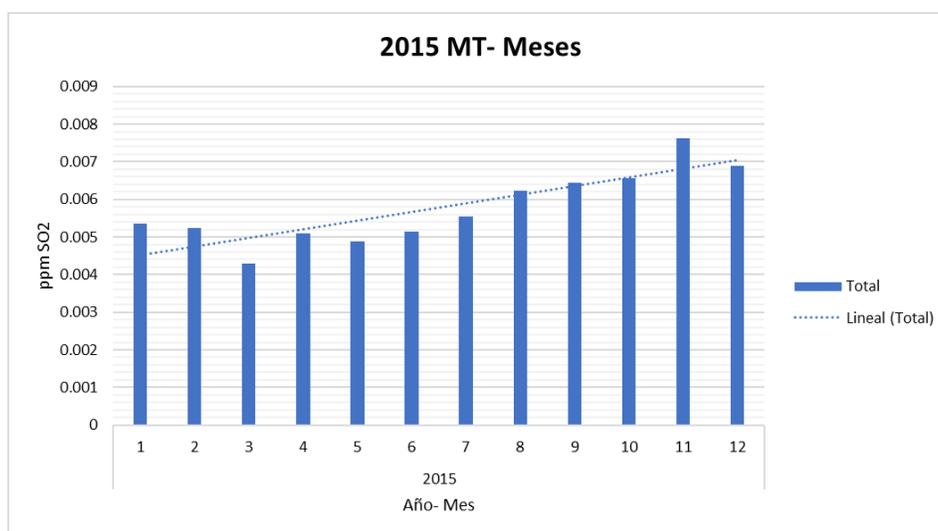
Una de las posibles explicaciones para un comportamiento tan elevado es que debido al crecimiento demográfico de 2014 a 2015, de más de 20 mil personas; las concentraciones de Bióxido de Azufre se elevaron a causa de la dinámica poblacional que sufrió el Municipio de Toluca (GEM, 2012), ya que la dinámica social explica en un 35% los aumentos de concentraciones de SO<sub>2</sub> (Ballesteros & Rotter, 2014).

#### 4.1.2.5.3. (MT) Metepec

En la estación MT se observa una línea de tendencia media (línea azul) creciente, pasando de las 0.0045 ppm a las 0.007 ppm a final del año; para marcar así, un promedio de 0.006 ppm.

Es en los meses de agosto a diciembre, cuando se presenta un ascenso en los registros, desde 0.006 a 0.008 ppm y, en los meses de enero a julio, dichos registros disminuyen y oscilan las 0.005 y 0.004 ppm.

**Gráfico 4.1.84. 2015 Metepec por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

El **Gráfico 4.1.84.** pareciera ser que se posiciona dentro de los que aportan niveles altos al año 2015, sin embargo, no es así, pues su promedio registrado es de 0.005 ppm, promedio más bajo registrado en 2015 de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

Por otro lado, para los registros elevados presentados en invierno, éstos pudiesen explicarse con el efecto indirecto que existe entre los GEI de larga vida con el  $\text{SO}_2$ , pues es en los meses más fríos cuando el efecto invernadero se agudiza gracias a la permanencia de los GEI de larga vida en la atmosfera, misma permanencia afecta y es afectada por las concentraciones de  $\text{SO}_2$  (IPCC Working Group I, 2013).

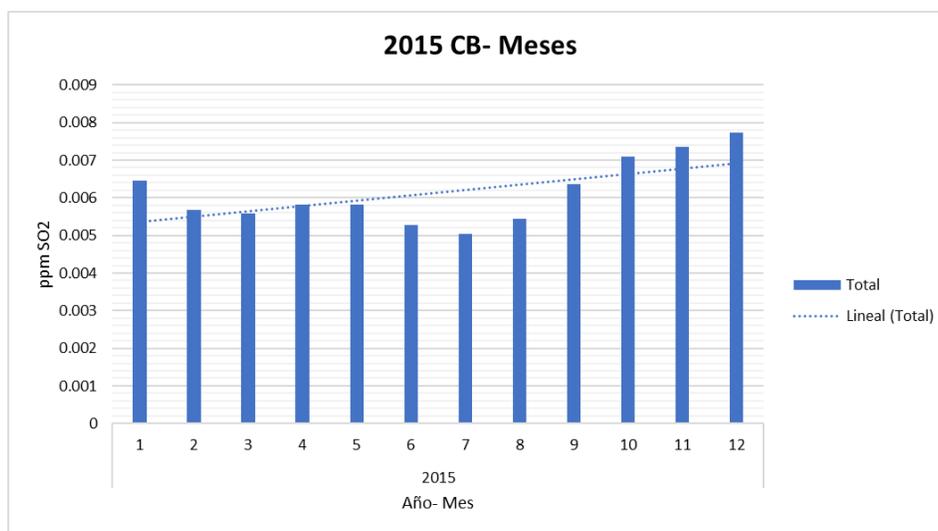
#### 4.1.2.5.4. (CB) Ceboruco

En el **Gráfico 4.1.85.** se aprecia una línea de tendencia media (línea azul) ascendente que va de las 0.005 a las 0.007 ppm. De esta manera, el promedio de doce meses es de 0.006 ppm.

Por un lado, los meses de febrero a mayo poseen registros que fluctúan las 0.006 ppm. Por otro lado, los meses de junio a agosto marcan los registros más bajos, que oscilan las 0.005 ppm.

Por último, los meses con los registros más elevados son de octubre a diciembre con 0.007 y 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.85. 2015 Ceboruco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.85.** es posible apreciar que en los meses de verano es cuando la depositación húmeda favorece a la disminución de las concentraciones de Bióxido de Azufre en la atmósfera (IPCC Working Group I, 2013).

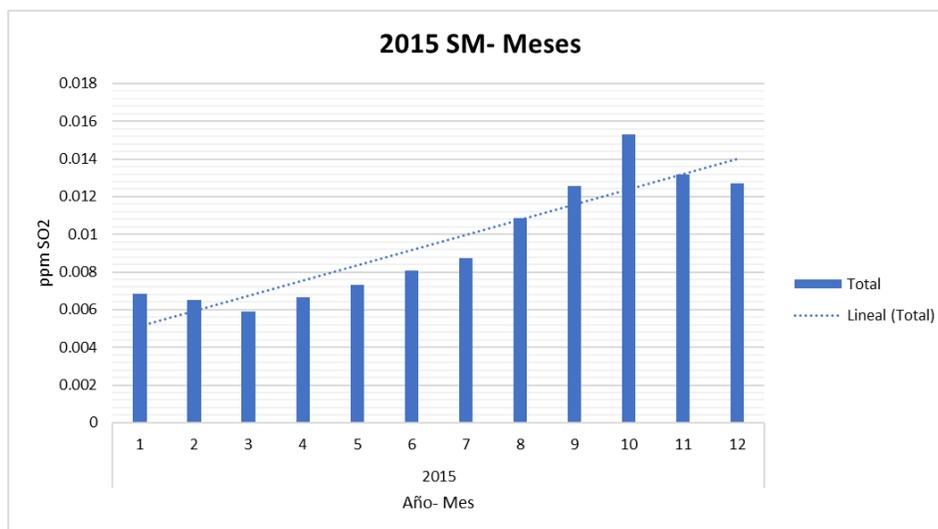
Por su parte, en los meses correspondientes al invierno se presentan brizas de montaña, lo cual favorece al transporte de contaminantes a la ciudad (Morales, Madrigal, & González, 2007).

#### 4.1.2.5.5. (SM) San Mateo Atenco

La estación SM presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) ascendente, que va de las 0.004 a las 0.014 ppm; y resultando en un promedio para doce meses, de 0.009 ppm.

En general, en esta estación las mediciones son elevadas. En este tenor, se observa que los meses con registros elevados son de agosto a diciembre, con valores de 0.01 a 0.016 ppm. Por otro lado, los meses con decrementos pronunciados son de enero a julio, con valores de 0.006 a 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.86. 2015 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación SM, para el año 2015, es cuando se presentan los registros más altos de todo el periodo de estudio 2011-2016, incluso por encima de lo medido en la estación AP (SEDEMA, 2017).

En el municipio de San Mateo Atenco, durante el año 2015, el valor del PIB por parte de la industria llega a más de 5 cinco millones 100 mil pesos (IGECEM, 2015), lo cual, pudiese explicar un aumento tan abrupto en los registros de concentraciones de Bióxido de Azufre, pues el sector industrial está estrechamente ligado con el nivel de concentración de contaminantes en la atmósfera (IPCC Working Group I, 2007).

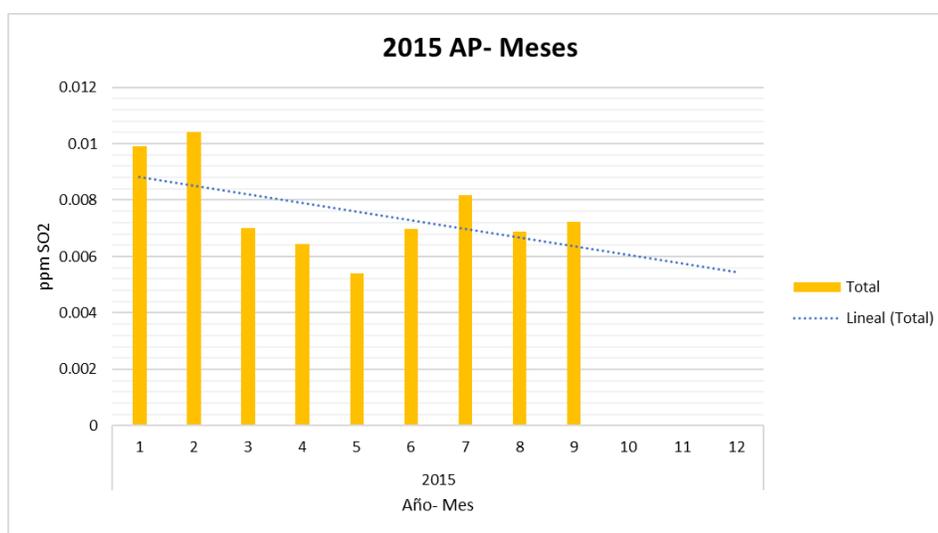
#### 4.1.2.5.6. (AP) Aeropuerto

Durante 2015 la estación AP presenta una línea de tendencia media (línea azul) decreciente, la cual pasa de las 0.009 a las 0.005 ppm; arrojando un promedio de 0.007 ppm.

En los meses de octubre a noviembre, no existen datos reportados.

Por su parte, los meses de enero, febrero y julio, presentan los valores más elevados desde 0.008 ppm hasta 0.01 ppm. En cambio, los meses de marzo, abril, mayo, junio, agosto y septiembre reportan datos de 0.005 ppm a 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.87. 2015 Aeropuerto por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En la estación AP, a diferencia de otros años, en 2015 se dejan de medir las concentraciones de Bióxido de Azufre a partir de octubre y hasta al cabo del año. Gracias a esta falta de datos el promedio resulta afectado.

Cabe mencionar que los meses faltantes son los que más aportan en cuanto a registros elevados, pues es durante el invierno, cuando el depósito húmedo del Bióxido de Azufre no se ve favorecido por la falta de parámetros meteorológicos como la precipitación pluvial (INE, 2009 b).

En este tenor, es preciso mencionar que 2015 no es un año con bajas en la actividad aeroportuaria en la Ciudad de Toluca, pues los pasajeros transportados incrementaron a más de 70 mil en 2015 (SCT, 2017).

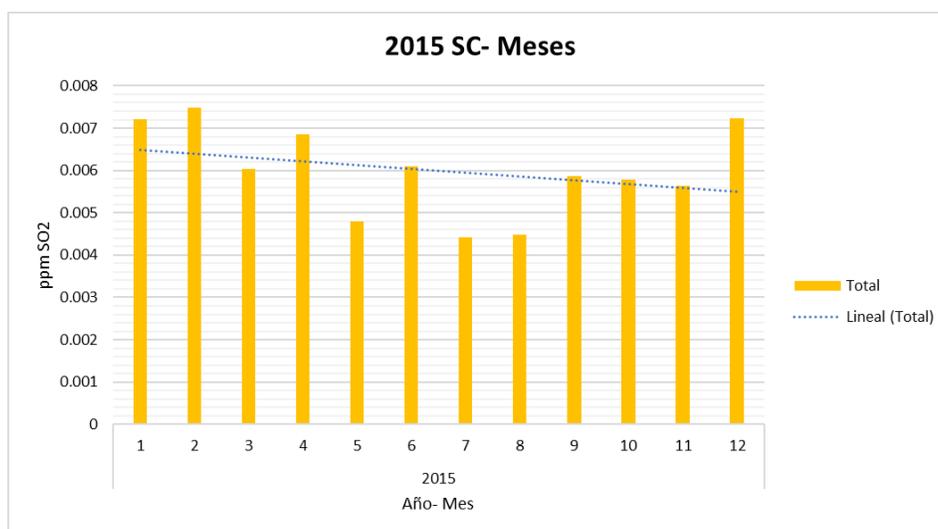
#### 4.1.2.5.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En el **Gráfico 4.1.88.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) descendente, la cual va de las 0.0065 ppm a las 0.0055 ppm al final del año; y arrojando un promedio de 0.006 ppm, en doce meses.

Las mediciones más elevadas se observan en los meses de enero, febrero, abril y diciembre, con 0.008 ppm. Le siguen marzo, septiembre, octubre y noviembre, todos en 0.006 ppm.

Por último, las mediciones más bajas se presentan en mayo, julio y agosto, con registros de 0.004 y 0.005 ppm.

**Gráfico 4.1.88. 2015 San Cristóbal Huichochitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Si bien no es posible apreciar un patrón de comportamiento para los registros de medición, los meses de julio y agosto obedecen lo esperado para la disminución de concentración de  $\text{SO}_2$ ; pues gracias a las condiciones hídricas se favorece la depositación húmeda del mismo (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

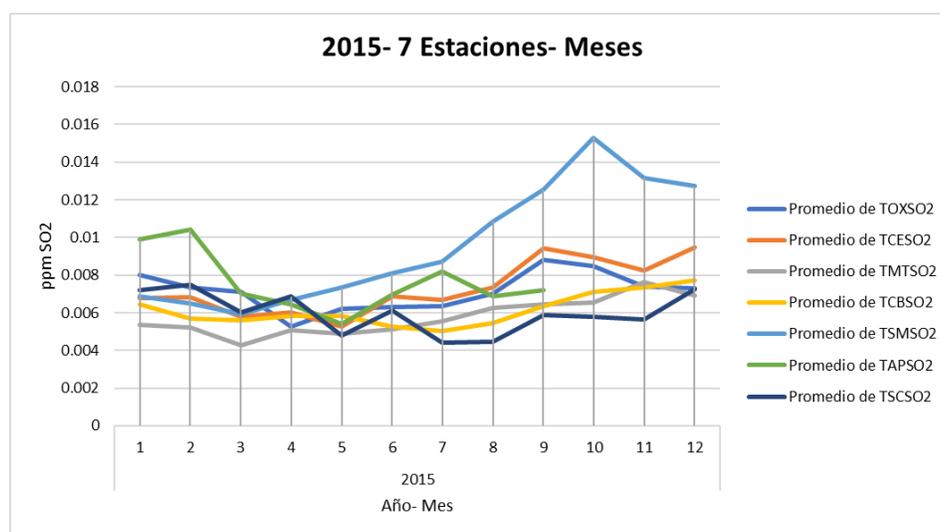
Por otro lado, los meses de enero, febrero y diciembre, son meses que se pudiesen explicarse con el efecto indirecto que existe entre los GEI de larga vida con el  $\text{SO}_2$ , pues es en los meses más fríos cuando el efecto invernadero se agudiza gracias a la permanencia de los GEI de larga vida en la atmosfera, misma permanencia afecta y es afectada por las concentraciones de  $\text{SO}_2$  (IPCC Working Group I, 2013).

#### 4.1.2.5.8. 2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.89.** se presentan las siete estaciones, con registros de los doce meses del año en 2015.

De manera general, no es posible apreciar un comportamiento homogéneo de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT. Sin embargo, es posible apreciar que la estación AP (verde) fue apagada desde noviembre y dejó de reportar datos; consecuentemente, la estación SM (azul) se coloca como la estación con los registros más elevados en 2015, con 0.016 ppm en noviembre.

**Gráfico 4.1.89. 2015 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.89.** es posible observar que, por primera vez, la estación SM obtiene los registros más elevados de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, e incluso iguala lo que en otros años la estación AP registró. Si bien la actividad aeroportuaria estuvo a la baja en el AICT (SCT, 2017), aún sería importante contar con información para esta zona de la RAMA-ZMVT.

En 2015 la estación SM marca las mediciones más altas del periodo de estudio 2011-2016. En este sentido, el municipio de San Mateo Atenco en 2015 obtuvo más de 5 millones de pesos para su PIB, por parte del sector industrial (IGCEM, 2015), lo cual pudiese explicar un aumento tan alto en las concentraciones de SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2007).

#### 4.1.2.6. Año 2016

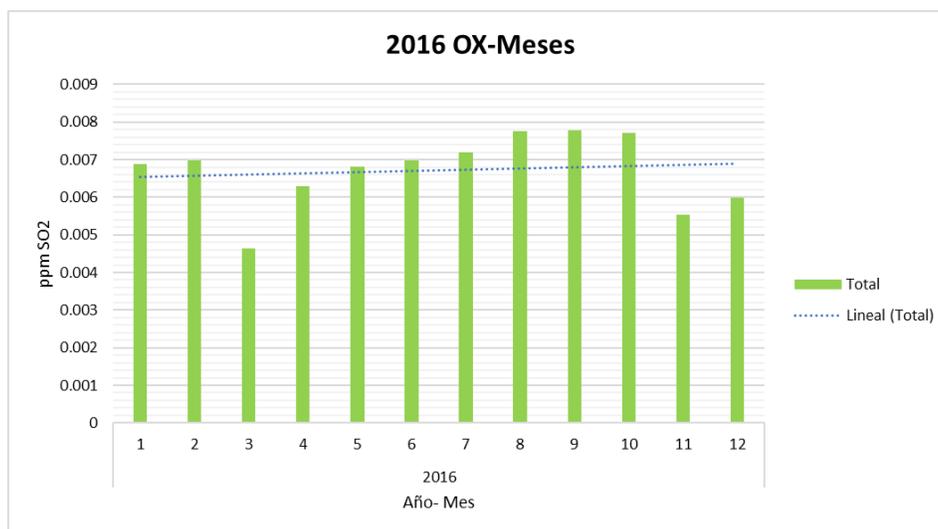
##### 4.1.2.6.1. (OX) Oxtotitlán.

En el **Gráfico 4.1.90**, se observa una línea de tendencia media (línea azul) estable, que oscila las 0.007 ppm, al cabo de 12 meses; resultando en un promedio de 0.006 ppm.

Los meses con los registros más bajos son: marzo con 0.0045 ppm y noviembre con 0.005 ppm.

En el caso de los meses de enero, febrero, abril, mayo, junio, julio y diciembre, el registro fluctúa entre 0.006 ppm y las 0.007 ppm y, por último, los meses con los reportes más elevados son: agosto, septiembre y octubre con 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.90. 2016 Oxtotitlán por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Para la estación OX se observa que los meses de agosto, septiembre y octubre son los meses con registros más elevados, lo cual puede deberse a la sequía registrada en este año de estudio, pues de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente de Toluca, en 2016 se registraron niveles bajos de precipitación en esta estación (SEDEMA, 2017), lo cual, disminuye la posibilidad de abatimiento hidrosoluble de este contaminante (Textos Científicos, 2006).

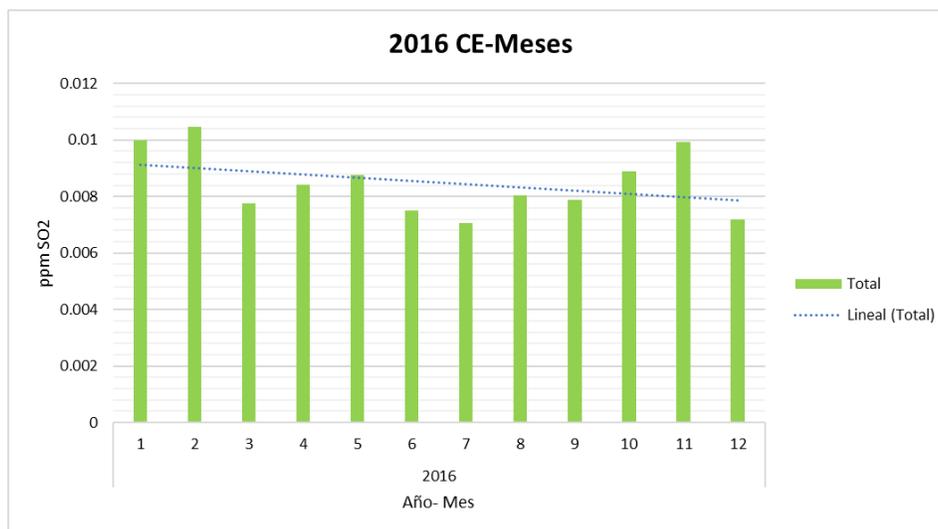
#### 4.1.2.6.2. (CE) Centro

Durante 2016 la estación CE registra una línea de tendencia media (línea azul) descendente, pasando de las 0.009 ppm a las 0.008 ppm; y deriva en un promedio de 0.008 ppm en 12 meses.

Los niveles más elevados se presentan en los meses de enero, febrero y noviembre, con registros de 0.01 ppm.

Por otro lado, los niveles más bajos se presentan en junio, julio y diciembre, con valores de 0.006 y 0.007 ppm. Por último, en los meses de marzo, abril, mayo, agosto y septiembre se registran niveles de 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.91. 2016 Centro por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

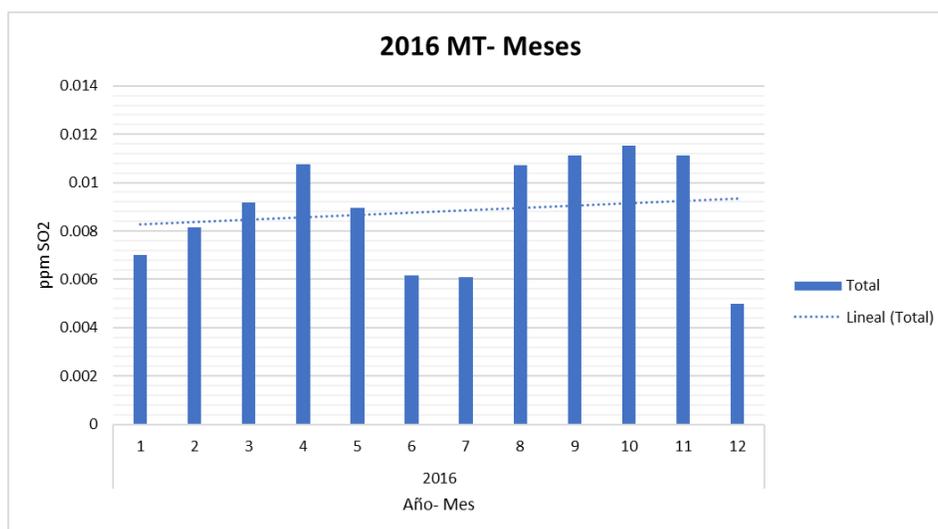
En la estación CE se presenta el típico comportamiento del Bióxido de Azufre, pues las concentraciones bajan en los meses de verano, temporada durante la cual se presentan más meteoros climatológicos que coadyuvan a disminuir las concentraciones de este contaminante, tales como la lluvia (INE, 2009 b).

Por su parte, los meses fríos responden también al efecto invernadero, pues es cuando este fenómeno se agudiza y provoca un estancamiento de GEI de larga vida, mismos gases que interactúan con el propio SO<sub>2</sub>, causando así, un aumento en sus mediciones (IPCC Working Group I, 2013).

#### 4.1.2.6.3. (MT) Metepec

En la estación MT se observa una línea de tendencia media (línea azul) creciente, pasando de las 0.008 ppm a las 0.01 ppm a final del año; para marcar así, un promedio de 0.009 ppm. Es en los meses de abril, agosto, septiembre, octubre y noviembre, cuando se presenta un ascenso en los registros, desde 0.01 a 0.012 ppm y, en los meses de febrero, marzo y mayo, dichos registros disminuyen a 0.008 y 0.009 ppm. En este tenor, los meses con los registros más bajos son: enero, junio, julio y diciembre, con mediciones alrededor de las 0.005 y 0.007 ppm.

**Gráfico 4.1.92. 2016 Metepec por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Para el **Gráfico 4.1.92.** los meses con las concentraciones menos elevadas son los meses que presentan mayor número de meteoros climatológicos, pues es en esta época cuando la precipitación pluvial aumenta, causando así, una disminución en las concentraciones de este contaminante (INE, 2009 b).

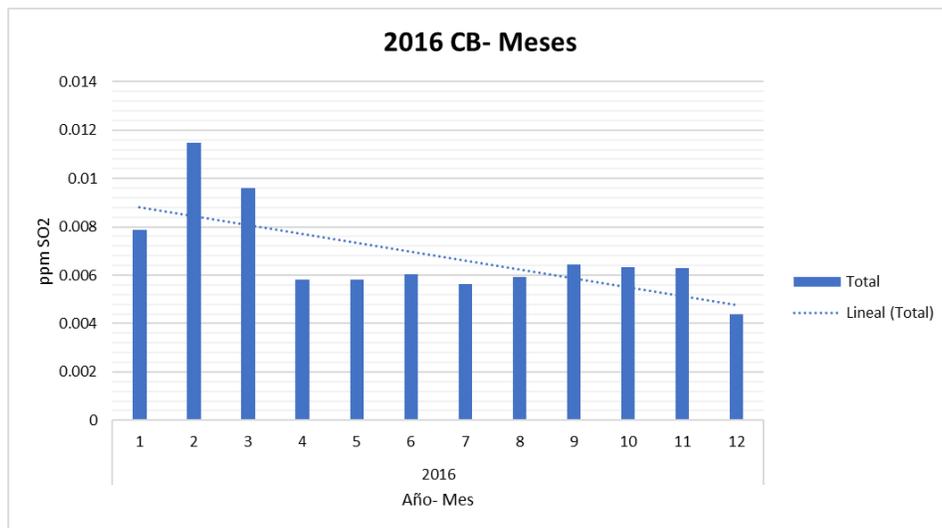
El municipio de Metepec ha estado en un constante crecimiento económico y poblacional durante los últimos años, pues de acuerdo con Ballesteros y Rotter (2014), el aumento poblacional de este municipio es de los más elevados en la ZMVT (Ballesteros & Rotter, 2014), factor que coadyuva a la emisión de contaminantes tales como SO<sub>2</sub> (GEM, 2012).

#### 4.1.2.6.4. (CB) Ceboruco

En el **Gráfico 4.1.93.** se aprecia una línea de tendencia media (línea azul) descendente que va de las 0.009 a las 0.004 ppm. De esta manera, el promedio de doce meses es de 0.006 ppm.

Por un lado, los meses de febrero y marzo son los que marcan los registros más elevados con 0.012 y 0.01 ppm, respectivamente. Por otro lado, los meses de abril a diciembre son los meses que marcan los registros más bajos y constantes, que oscilan las 0.006 ppm.

**Gráfico 4.1.93. 2016 Ceboruco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Una disminución tan pronunciada en los registros puede deberse a la dinámica de viento en la ZMVT, pues los vientos predominantes en época fría son aquellos provenientes del sur con dirección al norte, pasando así, de la estación CB a otras como OX o CE, las cuales se ubican al norte de la estación CB (García, 2014).

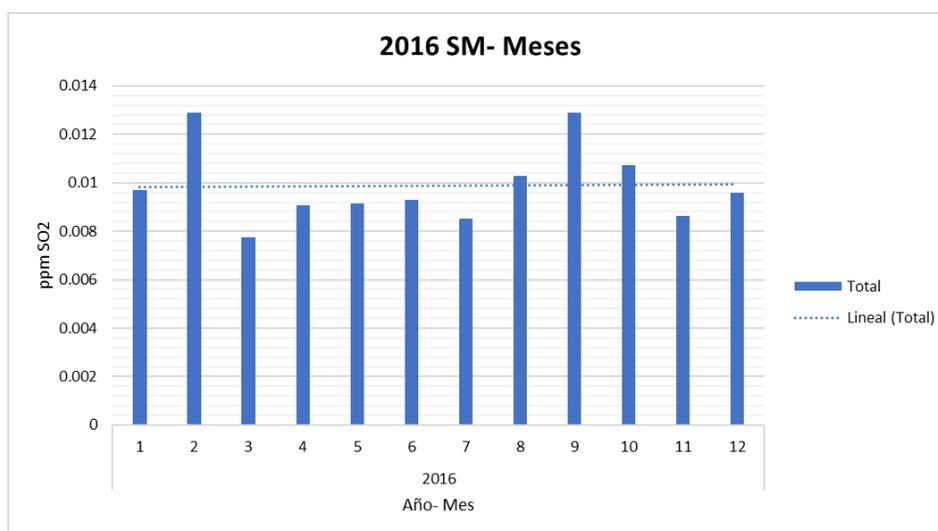
Diferentes factores pudieron haber causado una disminución tan visible, sin embargo, la dirección de vientos es representativa este año (Domínguez, 2015).

#### 4.1.2.6.5. (SM) San Mateo Atenco

La estación SM presenta un comportamiento en la línea de tendencia media (línea azul) constante que fluctúa las 0.01 ppm; y resultando en un promedio para 12 meses, de 0.01 ppm.

En general, en esta estación las mediciones son heterogéneas. En este tenor, se observa que los meses con registros elevados son febrero y septiembre con valores de 0.012 ppm. Por otro lado, los meses con decrementos de marzo a agosto, así como octubre, noviembre, diciembre y enero, con valores de 0.008 a 0.01 ppm.

**Gráfico 4.1.94. 2016 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación SM se encuentra en el municipio de San Mateo Atenco, uno de los municipios con mayor actividad social, económica e industrial de la ZMVT. En este tenor, San Mateo Atenco es el municipio con mayor densidad de población con más de cinco mil habitantes por Km<sup>2</sup>, factor que influye de manera importante en la cantidad de emisiones de SO<sub>2</sub>, pues los centros de empleo y las unidades económicas industriales han ido al alza en este municipio, lo cual genera una derrama económica, pero merma la calidad del aire (GEM, 2012).

Cabe mencionar que los meses con disminuciones en las concentraciones son los meses que presentan mayor presencia hídrica en la atmósfera, lo cual favorece al abatimiento de estas concentraciones (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp, 2007).

#### **4.1.2.6.6. (AP) Aeropuerto**

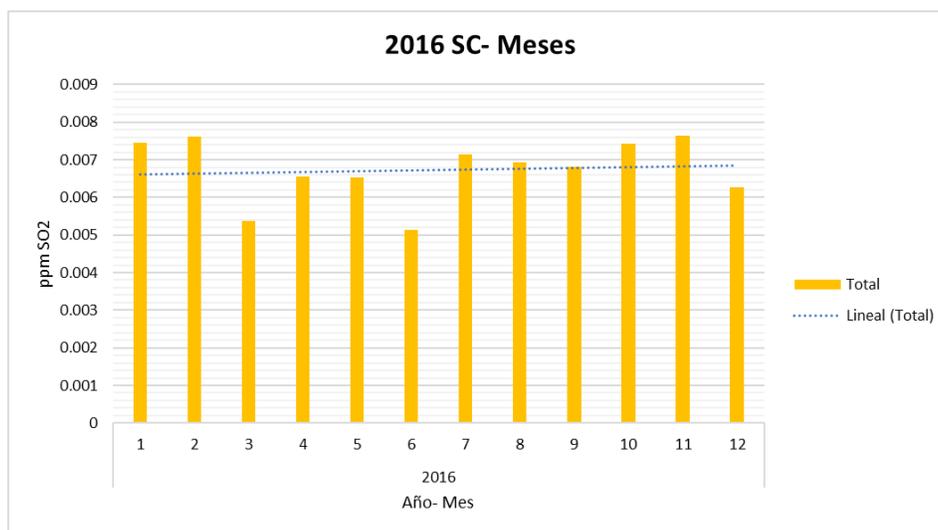
**\*Nota:** La estación AP, durante el año 2016, no registró ningún dato, pues de acuerdo con personal la RAMA-ZMVT, ésta fue apagada.

#### 4.1.2.6.7. (SC) San Cristóbal Huichochitlán

En el **Gráfico 4.1.95.** se observa una línea de tendencia media (línea azul) constante en las 0.007 ppm al final del año; y arrojando un promedio de 0.007 ppm, en doce meses.

Por un lado, los registros menos elevados se observan en los meses de abril y junio, ambos con 0.005 ppm, dejando al resto de los meses del año con registros de entre 0.006 y 0.008 ppm.

**Gráfico 4.1.95. 2016 San Mateo Atenco por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La estación SC se ubica en una zona de transición y combinación urbana-rural; consecuentemente en esta estación se guardan los registros más bajos de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en 2016 (Observatorio Geográfico de América Latina, 2011).

Si bien las mediciones de SO<sub>2</sub> parecen estar bajo ningún patrón de comportamiento, éstas si obedecen a las precipitaciones pluviales de la zona de San Cristóbal Huichochitlán, pues en 2016, los registros de estos meteoros son de los más elevados de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT (SEDEMA, 2017).

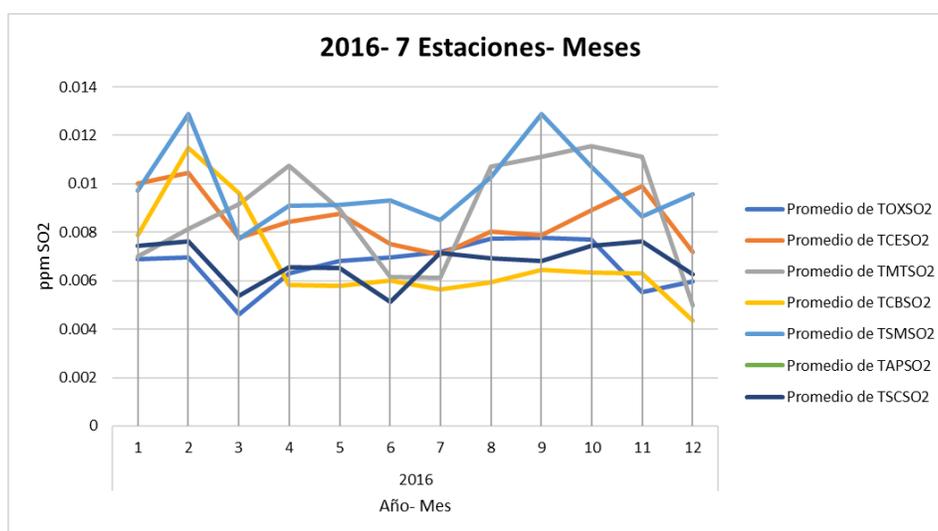
#### 4.1.2.6.8. 2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT

En el **Gráfico 4.1.96.** se presentan las siete estaciones, con registros por mes del año en 2016.

De manera general no es posible apreciar un patrón de comportamiento para las seis estaciones de la RAMA-ZMVT. Sin embargo, en junio y julio, todas las estaciones presentan su respectivo descenso en las mediciones de SO<sub>2</sub>.

Por otro lado, la estación AP ya no es visible en 2016, lo cual deja a los registros de la estación SM (azul claro) como los más altos, tanto en febrero como en septiembre, con 0.013 ppm.

**Gráfico 4.1.96. 2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Pareciera ser que todas las estaciones marcan promedios muy elevados de concentraciones de Bióxido de Azufre, sin embargo, al no haber representación gráfica de mediciones más altas tales como las de la estación AP, el **Gráfico 4.1.96.** se observa así.

Como se observa en el **Gráfico 4.1.96.** las mediciones más bajas se presentan en los meses de verano, lo cual puede deberse a la cantidad de precipitación pluvial que existe en el ambiente de la ZMVT, lo cual favorece la depositación húmeda del SO<sub>2</sub> (INE, 2009 b).

Por su parte, en invierno las emisiones no son uniformes. Este fenómeno puede deberse a la interacción que el SO<sub>2</sub> posee para con los GEI de larga vida, ya que se intensifican en la época seca fría del año; y que, gracias a estos, el SO<sub>2</sub> también cambia su dinámica (IPCC Working Group I, 2013).

#### **4.1.2.7. Periodo de estudio 2011-2016**

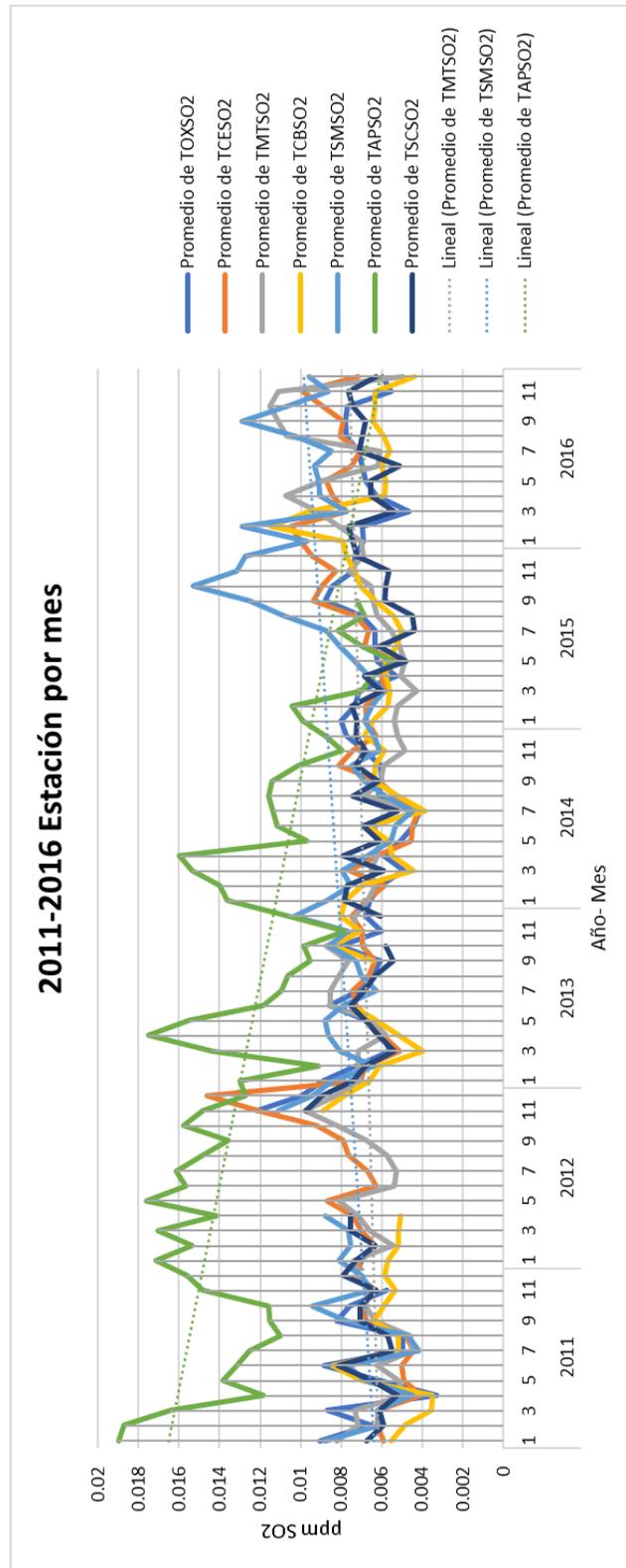
En el último apartado del análisis mensual de concentraciones por doce meses para Bióxido de Azufre, se presentan gráficos que compilan la información de todos los años de estudio (2011-2016), para las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

Esta información se desglosa con dos gráficos, uno de los cuales analiza el comportamiento de las estaciones y el otro, el comportamiento de los doce meses del año; en ambos casos se estudian de 2011 a 2016.

##### **4.1.2.7.1. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT**

En el **Gráfico 4.1.97.** se observan la evolución de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, a lo largo de los años de estudio (2011-2016), con los registros de los 12 meses del año.

**Gráfico 4.1.97. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **Gráfico 4.1.97**, se observa que el comportamiento de las estaciones varía de una a otra de manera significativa, sin embargo, éstas aún mantienen una constante en ciertos meses de los años de estudio, tal es el caso de enero, mes en el cual todas las estaciones de la RAMA-ZMVT marcan una elevación en las concentraciones de Bióxido de Azufre. De manera general, es en los meses fríos cuando el efecto invernadero se acentúa de manera más evidente; y si bien, el SO<sub>2</sub> no es un GEI de larga vida, este aún es un gas que recibe efectos secundarios de dichos GEI, mismos que coadyuvan a su estadía más prolongada, impactando en el balance radiativo terrestre (IPCC Working Group III, 1995).

Por otro lado, es en el mes de julio cuando seis de las siete estaciones (excepto AP), presentan un decremento en los registros (ver **Gráfico 4.1.97**), lo cual es reflejo del comportamiento hidrosoluble del SO<sub>2</sub>, pues en este mes cuando se presentan regímenes de lluvia significativos, generando así, un abatimiento en las concentraciones de este gas (Puppo, 2012).

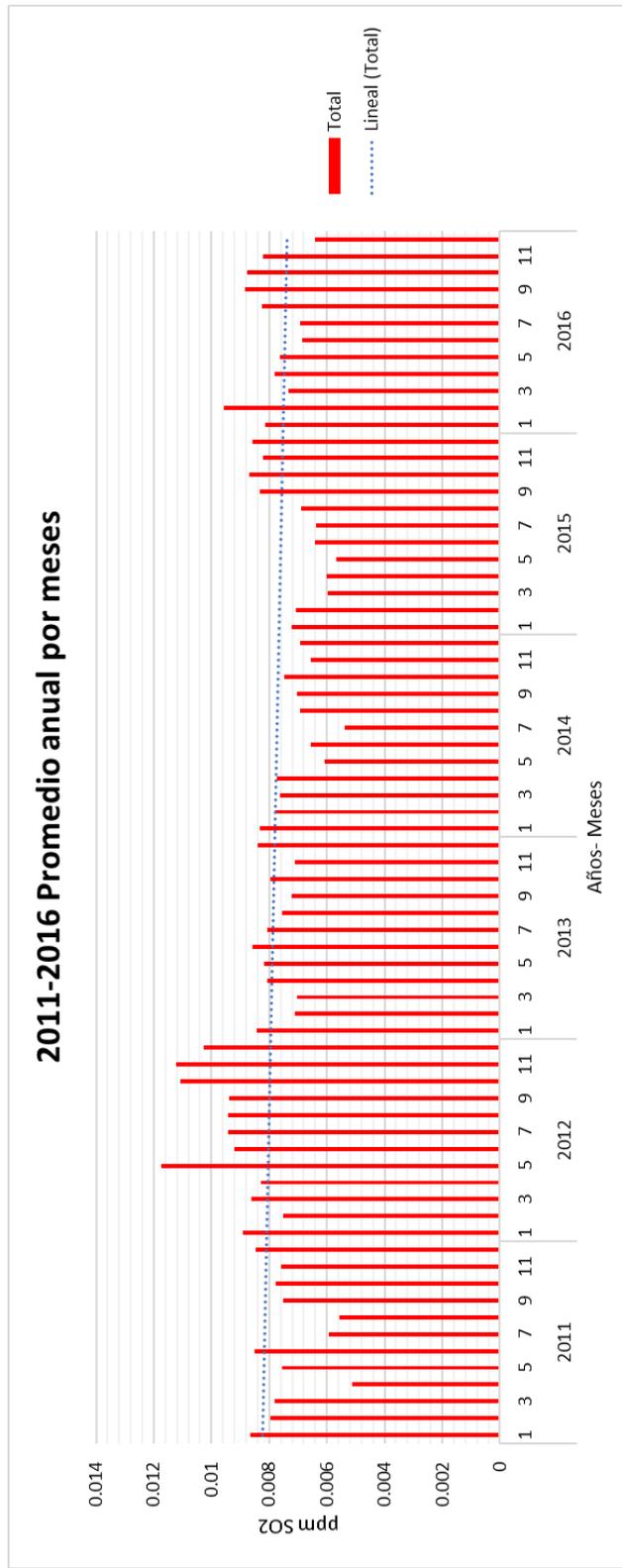
Las estaciones presentadas también poseen diferencias entre sí, por ejemplo: la estación AP (verde) es la que posee los registros más elevados de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT de 2011 a 2014, mismos años en los cuales el AICT mantenía una dinámica de 100 mil pasajeros en sus traslados aéreos; a diferencia de 2015 y 2016, años en los cuales, el promedio de dichos pasajeros descendió a 67 mil (SCT, 2017). Consecuentemente la estación de SM (azul claro) en los años de 2015 y 2016 es la que posee los registros más elevados de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT elevados del periodo de estudio.

#### **4.1.2.7.2. 2011-2016 Reporte por mes**

El **Gráfico 4.1.98.** promedia las mediciones de todas las esatciones de la RAMA-ZMVT y las muetsra en reportes de los doce meses del año.

En el **Gráfico 4.1.98.** es posible observar una línea de tendencia anual descendente, la cual oscila las 0.008 ppm de Bióxido de Azufre.

**Gráfico 4.1.98. 2011-2016 Reporte por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Las mediciones mensuales muestran el comportamiento del Bióxido de Azufre a lo largo del año, incluyendo la época de estiaje, la época de lluvia, la temporada fría, así como la cálida. Si bien el SO<sub>2</sub> no es un GEI de larga vida este aún reciente los cambios que se presenten en la atmósfera, llámese clima o meteoros climáticos, esto debido a que es precursor de contaminantes tales como: lluvia ácida y aerosoles, mismos que responden inmediatamente a la composición atmosférica (IPCC Working Group I, 1995).

Aunque en el **Gráfico 4.1.98.** se muestra un comportamiento general a la baja, se debe recordar que la estación AP fue apagada en 2016, causando así, una disminución de los registros de Bióxido de Azufre en la ZMVT; en este sentido, cabe mencionar que el **Gráfico 4.1.98.** muestra los promedios de todas las estaciones, no obstante, éstas no son visibles de manera individual, sino que sus registros se ponderan de manera general por mes desde 2011 hasta 2016.

Para 2011 y 2012 no es posible observar un comportamiento que respalde las características del SO<sub>2</sub>, pues se presentan niveles altos de medición en meses tales como: enero, mayo, junio, septiembre y diciembre, por mencionar algunos, de esta manera no se registra ningún patrón de comportamiento que ayude a explicar su causalidad.

Por otro lado, los años desde 2014 hasta 2016, sí aportan respaldo a lo que indica la teoría sobre el SO<sub>2</sub> como gas hidrosoluble, ya que en estos años se observan bajas en los registros de los meses de junio, julio, agosto y septiembre. En este tenor, es preciso destacar que gracias a la capacidad abatible húmeda del Bióxido de Azufre se generan descensos en sus mediciones durante los meses lluviosos del año, tales como: julio, agosto y septiembre (INE, 2009).

Por último, aunque el Bióxido de Azufre no está en la lista de los seis principales GEI de la CMNUCC, es importante destacarlo no sólo por sus afecciones a la salud, sino también por su actuar indirecto sobre el efecto invernadero y, por ende, sobre la propia química de la atmósfera (IPCC Working Group I, 2013).

### **4.1.3. Concentraciones por año**

En este apartado de análisis se estudian las siete estaciones de la RAMA-ZMVT a lo largo del periodo de estudio (2011-2016), dejando de lado el régimen establecido por promedios horarios o mensuales, sino que, con base en ellos, se toma el promedio anual de dichas estaciones, para así, poder observar el comportamiento del Bióxido de Azufre desde 2011 hasta 2016.

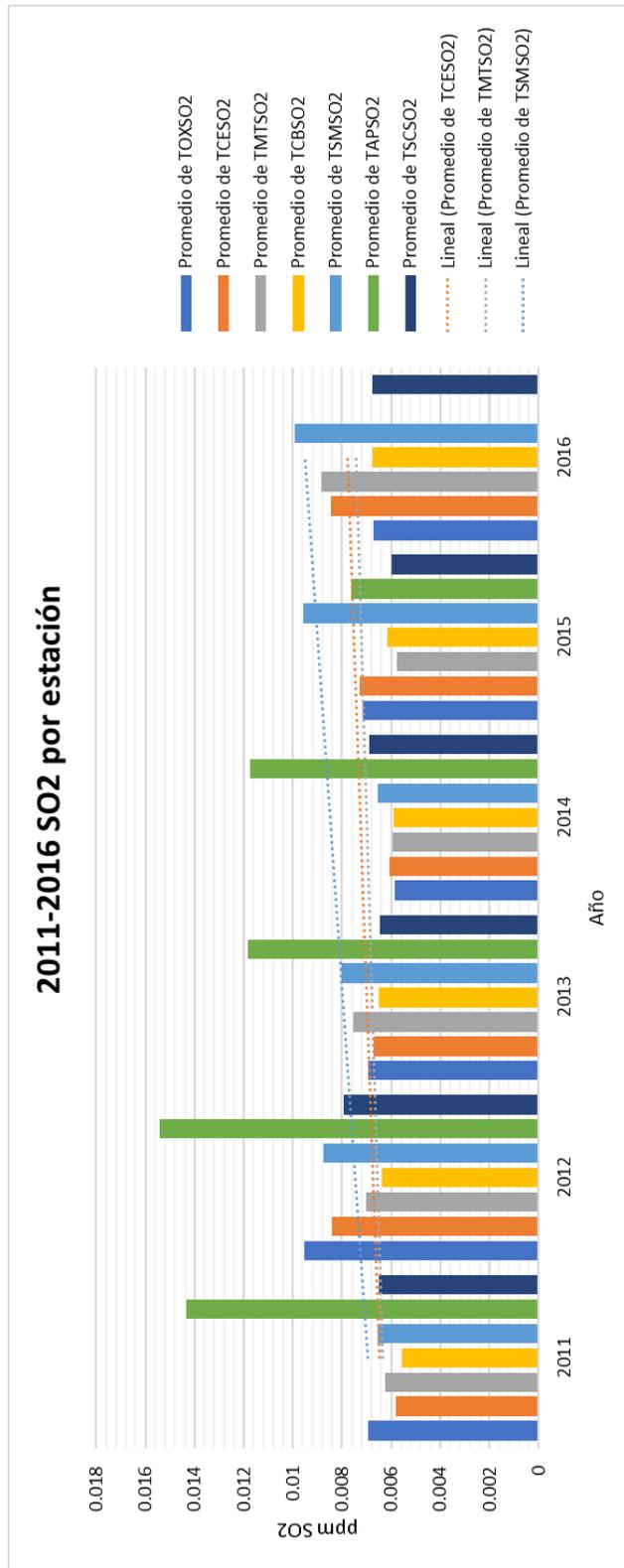
Por otro lado, después del gráfico por estación, se muestra esta compilación de datos sin hacer distinción alguna entre estaciones, pues muestra únicamente el promedio anual desde 2011 hasta 2016 de las concentraciones de Bióxido de Azufre en la ZMVT.

#### **4.1.3.1. 2011-2016 Siete estaciones RAMA-ZMVT**

En el **Gráfico 4.1.99.** se observan los reportes de concentración de Bióxido de Azufre en promedio anual de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, en un periodo de 2011 a 2016.

De manera general, las líneas de tendencia media anual de las diferentes estaciones varían sin importar que su ubicación sea en Zona Norte, Sur o Centro de la RAMA-ZMVT.

**Gráfico 4.1.99. 2011-2016 Siete estaciones de la RAMA-ZMVT**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Para el caso específico de la estación AP (verde), se presenta una línea de tendencia media anual totalmente a la baja, ya que esta pasa de las 0.016 ppm a casi 0.006 ppm. En este tenor, dentro de la misma Zona Norte de la RAMA-ZMVT, la estación SC (azul fuerte) presenta un comportamiento mínimo descendente en sus concentraciones de Bióxido de Azufre, pues este oscila las 0.007 ppm, pero a la baja.

Cabe mencionar que la Zona Norte y la Zona Sur son las que poseen las localidades con mayor actividad industrial y económica de la ZMVT (GEM, 2012), pues una de ellas es la zona del AICT, mismo que de 2011 a 2014 contribuyó de manera significativa las concentraciones de Bióxido de Azufre en al ZMVT (SCT, 2017); desafortunadamente, la RAMA-ZMVT apagó la estación AP, dejando fuera este registro tan valiosos para el año 2016 (ver **Gráfico 4.1.99**).

Para las estaciones de la Zona Centro, con las estaciones OX (azul rey) y CE (naranja) la línea de tendencia media anual es ascendente en CE y descendente en descendente en OX. La variabilidad de las mediciones en estas estaciones es visible a lo largo de todo el estudio, pues algunos años la estación CE marcaba registros más elevados que la estación OX y viceversa. Cabe mencionar que el municipio de Toluca también posee gran actividad económica en la ZMVT, pues es quien que más aporta al PIB de la zona, pudiéndose explicar las mediciones elevadas gracias a dicha actividad (COESPO, 2012).

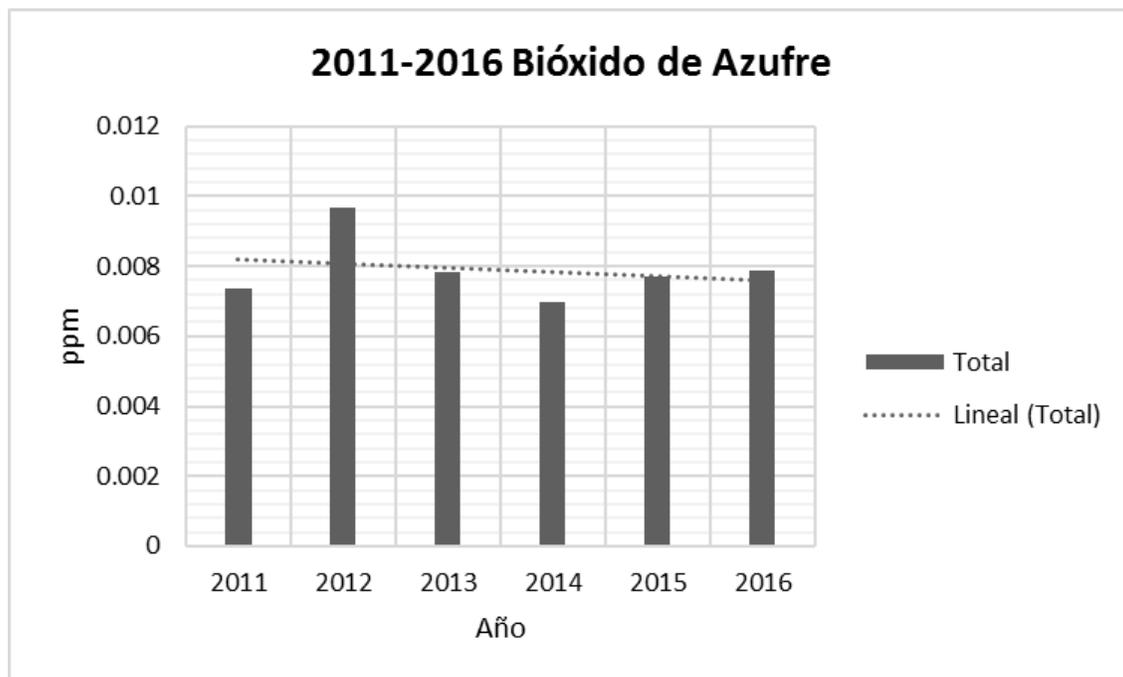
Por último, la Zona Sur, que contiene las estaciones de MT (gris), CB (amarillo) y SM (azul claro), es la zona que posee todas las líneas de tendencia media anual al alza. En este sentido es importante mencionar que la actividad económica de San Mateo Atenco también coadyuva en gran medida al PIB de la ZMVT, pues es la segunda área económica más importante de la ZMVT (COESPO, 2012).

#### 4.1.3.2. 2011-2016 Concentraciones de Bióxido de Azufre

El **Gráfico 4.1.100.** muestra el promedio general desde 2011 hasta 2016 de las concentraciones de Bióxido de Azufre en la ZMVT.

En este gráfico es posible observar una línea de tendencia media anual descendente, la cual pasa de las 0.008 ppm a poco menos de 0.008 ppm, lo cual demuestra un descenso en las concentraciones de este contaminante no tan significativo.

**Gráfico 4.1.100. 2011-2016 Bióxido de Azufre**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

En el **gráfico 4.1.100**, es posible apreciar que el año 2012 es el que posee las mediciones más elevadas de todo el periodo de estudio, pues casi alcanza las 0.01 ppm. Es importante destacar que 2012 es el año que registró menos datos en la RAMA-ZMVT, con cuatro de las siete estaciones apagadas durante diferentes meses en el año (ver **Capítulo 4.1.2 Concentraciones por mes**). Si bien 2012 reporta un promedio tan alto, se debe tomar en cuenta esta ausencia de datos su actuar sobre el promedio general.

Por otro lado, los años de 2011, 2013, 2014, 2015 y 2016, también llegan a poseer ausencia de datos, pero de una manera menos significativa, ya que se habla únicamente de una estación apagada en todo el año.

Apuntar a que un contaminante se comporta de una manera que tiende a disminuir es un argumento delicado, pues se sabe que la contaminación atmosférica es un fenómeno que con el paso de los años no hace otra cosa que aumentar, sin embargo, es importante mencionar que diferentes acciones se han llevado a cabo a lo largo de los años para coadyuvar a una disminución, tales como la remoción del Azufre de las gasolinas desde 2009 (López, 2016), o bien, la próxima modificación de los límites máximos permisibles de la NOM-022-SSA1-2010 (El Economista, 2015). Estos son ejemplos de que es posible accionar planes para combatir la contaminación atmosférica y quizá, mantenerla bajo control.

## 4.2. Relación de SO<sub>2</sub>-Temperatura

La relación entre las concentraciones de SO<sub>2</sub> y la temperatura, parte del efecto de enfriamiento que poseen los aerosoles Sulfato como subproducto de las concentraciones de SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 2001), esto para encontrar el grado de causalidad que posee el Bióxido de Azufre en la disminución de la temperatura en la ZMVT. En este sentido, se entiende como variable independiente a las concentraciones de SO<sub>2</sub>, medidas en ppm y como variable dependiente, a la temperatura, medida en °C.

Para la relación entre concentraciones de Bióxido de Azufre y temperatura de la ZMVT, se realizan tres gráficos de correlación lineal simple entre las mismas variables. Dichos gráficos muestran los datos en porcentajes (%) de concentración para SO<sub>2</sub> y temperatura; todo en el periodo de estudio 2011-2016, presentado en horas, meses y estaciones.

En este sentido, cabe aclarar que se presentan dos tablas para cada uno de los tres casos: horas, meses y estaciones. Una de las tablas muestra los datos de cada variable, en las unidades correspondientes, reportadas por la RAMA-ZMVT; siendo ppm para las concentraciones de SO<sub>2</sub> y, °C para la temperatura. Por su parte, la segunda tabla muestra los resultados en % que derivan de la conversión de las unidades (ppm y °C) a escalas de 0 a 100%; dichos porcentajes son utilizados para la visualización gráfica en las correlaciones SO<sub>2</sub>-Temperatura por horas, meses y estaciones, que se observarán a continuación.

#### 4.2.1. 2011 a 2016 SO<sub>2</sub>-Temperatura por hora

Para el análisis por 24 horas, primero se muestran las tablas que contiene los registros de SO<sub>2</sub> y de temperatura, tanto en ppm y °C (ver **Tabla 5.1**), como en porcentajes (%) (ver **Tabla 5.2**); reportados por la RAMA-ZMVT de 2011 a 2016. Esto para demostrar la procedencia de los datos trabajados tanto en el coeficiente de correlación lineal simple, como en la gráfica.

**Tabla 4.1. SO<sub>2</sub> (ppm)-Temperatura (°C) por hora**

Horas	SO <sub>2</sub>	Temperatura
1	0.00706728	11.4248948
2	0.00676466	10.84700108
3	0.0066608	10.33293627
4	0.0065834	9.855555416
5	0.00659195	9.417763252
6	0.00693365	9.018452426
7	0.00807617	8.683810423
8	0.00989102	8.836385303
9	0.01130245	10.72868579
10	0.01119265	13.32970416
11	0.00953053	15.67326712
12	0.00785904	17.5919726
13	0.00695987	19.03075067
14	0.00665784	19.86731247
15	0.00659497	20.12825397
16	0.00656732	19.75010786
17	0.00667716	18.96013775
18	0.00694363	17.85816788
19	0.00727111	16.47153594
20	0.00751667	15.18653291
21	0.00776787	14.15885759
22	0.00792394	13.35955687
23	0.00777872	12.65606428
24	0.00742743	12.02312027

Fuente: Elaboración propia, con base en (SEDEMA, 2017).

**Tabla 4.2. SO<sub>2</sub>-Temperatura (%) por hora**

Horas	SO <sub>2</sub>	Temperatura
1	3.83	3.41
2	3.67	3.24
3	3.61	3.08
4	3.57	2.94
5	3.57	2.81
6	3.76	2.69
7	4.38	2.59
8	5.36	2.64
9	6.12	3.20
10	6.07	3.98
11	5.16	4.68
12	4.26	5.25
13	3.77	5.68
14	3.61	5.93
15	3.57	6.01
16	3.56	5.89
17	3.62	5.66
18	3.76	5.33
19	3.94	4.91
20	4.07	4.53
21	4.21	4.22
22	4.29	3.99
23	4.22	3.78
24	4.02	3.59
<b>%</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia, con base en (SEDEMA, 2017).

#### 4.2.1.1. Correlación lineal simple

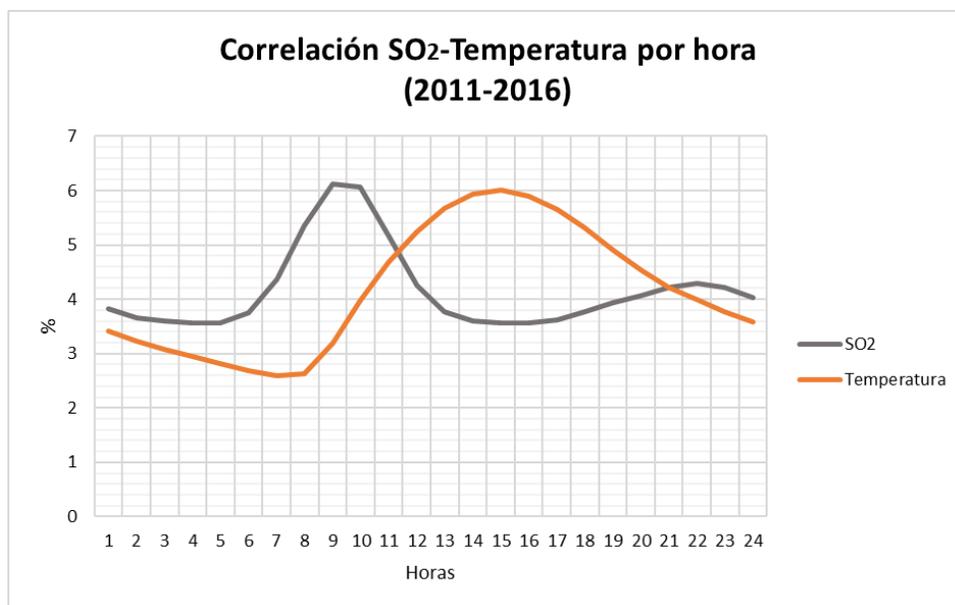
En el **Gráfico 4.3.1.** se presenta la correlación lineal simple entre las variables SO<sub>2</sub> y temperatura.

Desde las 13:00 hasta las 18:00 horas, la temperatura llega a su cúspide en un 6%, mientras que las concentraciones de SO<sub>2</sub>, llegan a su mínimo en dichas horas, con casi 3% del total.

Por su parte, las concentraciones del Bióxido de Azufre presentan 6% del total de 8:00 a 10:00 horas, mismas horas en las cuales la temperatura baja a un mínimo del 2%.

Por otro lado, es posible observa dos intersecciones entre las variables; una a las 11:00 horas, en la cual, la temperatura aumenta y las concentraciones del gas disminuyen; y otra, a las 21:00 horas, en la cual el SO<sub>2</sub> aumenta y la temperatura disminuye.

**Gráfico 4.3.1. 2011-2016 Correlación lineal simple SO<sub>2</sub>-Temperatura por hora**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La premisa que sustenta la segunda parte de las relaciones del Bióxido de Azufre (temperatura), es que a mayor concentración de SO<sub>2</sub>, menor será la temperatura registrada. Esto debido a la capacidad de enfriamiento que poseen los aerosoles Sulfato, producto de las emisiones de SO<sub>2</sub> (IPCC Working Group I, 1995).

En este sentido, es posible observar que en las horas de 7:00 a 11:00, las concentraciones de Bióxido de Azufre aumentan y, en teoría, esto ocasiona un descenso en la temperatura de la

ZMVT (IPCC Working Group I, 2001). Por su parte, también las disminuciones vespertinas de SO<sub>2</sub> coinciden con los aumentos de temperatura registrados en la ZMVT, lo cual sugiere, entre otras cosas, que, al haber poca presencia de este gas, las temperaturas se elevarán (IPCC Working Group I, 1995).

La temperatura es un elemento del clima terrestre multifactorial y no depende únicamente de la concentración de SO<sub>2</sub> ni de los aerosoles Sulfato; sino que también dependerá de la altitud, latitud, otros contaminantes o época estacional, por mencionar algunos (Ayllón, 2003). En este sentido, el porcentaje del coeficiente de correlación lineal simple entre SO<sub>2</sub> y temperatura es de -26.7%. Por ello, es preciso mencionar que la relación entre ambas variables en la ZMVT sí es inversamente proporcional y denota que mientras las concentraciones de SO<sub>2</sub> aumentan, la temperatura disminuye (IPCC Working Group I, 2001). Sin embargo, las bajas temperaturas no sólo se deben a la característica de enfriamiento de los aerosoles Sulfato, sino que también se ven involucrados los factores mencionados anteriormente (Ayllón, 2003).

#### 4.2.2. 2011 a 2016 SO<sub>2</sub>-Temperatura por mes

Para el análisis por 12 meses, primero se muestran las tablas que contiene los registros de SO<sub>2</sub> y de temperatura, en ppm y °C, respectivamente (ver **Tabla 5.3**), reportados por la RAMA-ZMVT de 2011 a 2016; de igual manera, en la **Tabla 5.4** se presentan los valores obtenidos en porcentajes (%) para ambas unidades. Esto para demostrar la procedencia de los datos trabajados tanto en el coeficiente de correlación lineal simple, como en el gráfico.

**Tabla 4.3. SO<sub>2</sub> (ppm)-Temperatura (°C) por mes**

Meses	SO <sub>2</sub>	Temperatura
1	0.00831223	10.52135982
2	0.007827	12.41878841
3	0.00737896	13.53781584
4	0.00720429	15.69251269
5	0.00771752	15.94411144
6	0.00758928	15.4040649
7	0.00697446	14.89450003
8	0.00748366	15.12521364
9	0.00800355	15.00572474
10	0.00864129	14.24599369
11	0.00812466	12.927084
12	0.00812074	12.00455762

Fuente: Elaboración propia, con base en (SEDEMA, 2017).

**Tabla 4.4. SO<sub>2</sub> -Temperatura (%) por mes**

Mes	SO <sub>2</sub>	Temperatura
1	8.90	6.27
2	8.38	7.40
3	7.90	8.07
4	7.72	9.36
5	8.26	9.51
6	8.13	9.18
7	7.47	8.88
8	8.01	9.02
9	8.57	8.95
10	9.25	8.49
11	8.70	7.71
12	8.70	7.16
%	100	100

Fuente: Elaboración propia, con base en (SEDEMA, 2017).

#### 4.2.2.1. Correlación lineal simple

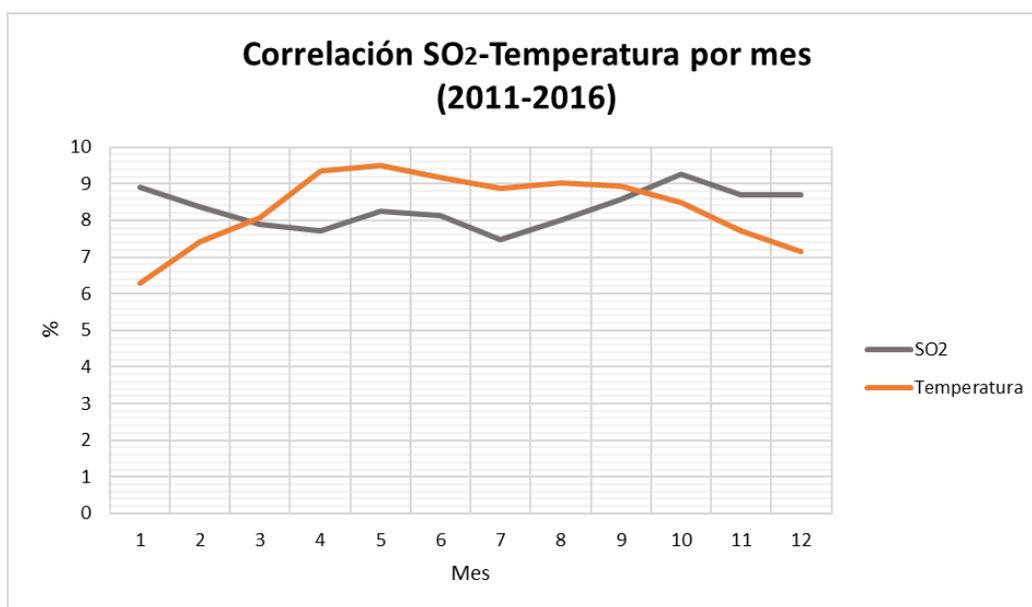
En el **Gráfico 4.3.2.** se presenta la información sobre la correlación lineal simple entre las variables SO<sub>2</sub> y temperatura, en promedio desde 2011 hasta 2016, de los doce meses del año.

De manera general, ambas variables se comportan de manera elevada, pues oscilan la concentración de 6% a 9.5%. Sin embargo, también se observa que el comportamiento en meses tales como diciembre o mayo, es opuesto y mientras el SO<sub>2</sub> aumenta, la temperatura disminuye en el **Gráfico 4.3.2.**

Por un lado, las concentraciones de Bióxido de Azufre (gris) se observan al alza en los meses invernales, enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre.

Por otro lado, la temperatura (naranja) se presenta a la baja en los meses invernales, tales como enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre. Caso contrario a los meses de verano, en los cuales la temperatura se eleva.

**Gráfico 4.3.2. 2011-2016 Correlación lineal simple SO<sub>2</sub>-Temperatura por mes**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

La característica de enfriamiento de los aerosoles Sulfato, producto de las emisiones de Bióxido de Azufre (IPCC Working Group I, 2001), se demuestra en los meses invernales, tales como enero, noviembre y diciembre, pues coincidentemente, las concentraciones de

Bióxido de Azufre aumentan, así como la de los aerosoles Sulfato; provocando un descenso en las temperaturas (IPCC Working Group I, 1995).

El coeficiente de correlación lineal simple entre las concentraciones de Bióxido de Azufre y temperatura es de -52.7%, lo cual demuestra que efectivamente existe un actuar sobre la temperatura de parte de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, precursores de los aerosoles Sulfato, ya que este porcentaje denota una correlación entre las variables inversamente proporcional. En este sentido, se entiende que, al aumentar las mediciones de Bióxido de Azufre, los registros de temperatura bajarán (IPCC Working Group I, 2001).

Si bien el porcentaje es elevado, la temperatura es un elemento del clima multifactorial y depende de las estaciones del año, la altitud de la zona, la conglomeración de zonas urbanas y más (Fuentes, 2012); por lo cual, no se puede establecer que es la concentración de SO<sub>2</sub> la única causa del descenso registrado en las temperaturas de ciertos meses, en la ZMVT.

### 4.2.3. 2011 a 2016 SO<sub>2</sub>-Temperatura por estación

Para el análisis de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT, se muestran las tablas que contienen los registros de SO<sub>2</sub> y de temperatura, en sus respectivas unidades (ppm y °C) (ver **Tabla 5.5**), reportados por la RAMA-ZMVT de 2011 a 2016. Por otro lado, en la Tabla 5.6, se presentan los resultados en porcentaje (%) de las unidades anteriormente mencionadas. Esto para demostrar la procedencia de los datos trabajados en el coeficiente de correlación lineal simple, como en el gráfico.

**Tabla 4.5. SO<sub>2</sub> (ppm)-Temperatura (°C) por estación**

Estaciones	SO <sub>2</sub>	Temperatura
<b>OX</b>	0.00685769	13.84817913
<b>CE</b>	0.00716407	13.71530001
<b>MT</b>	0.00690025	14.36691195
<b>CB</b>	0.00618469	13.70854482
<b>SM</b>	0.00819764	14.11527312
<b>AP</b>	0.01247617	13.553474
<b>SC</b>	0.00664788	14.01309879

Fuente: Elaboración propia, con base en (SEDEMA, 2017).

**Tabla 4.6. SO<sub>2</sub>-Temperatura (%) por estación**

Estaciones	SO <sub>2</sub>	Temperatura
<b>OX</b>	12.60	14.23
<b>CE</b>	13.16	14.09
<b>MT</b>	12.68	14.76
<b>CB</b>	11.36	14.09
<b>SM</b>	15.06	14.50
<b>AP</b>	22.92	13.93
<b>SC</b>	12.21	14.40
<b>%</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

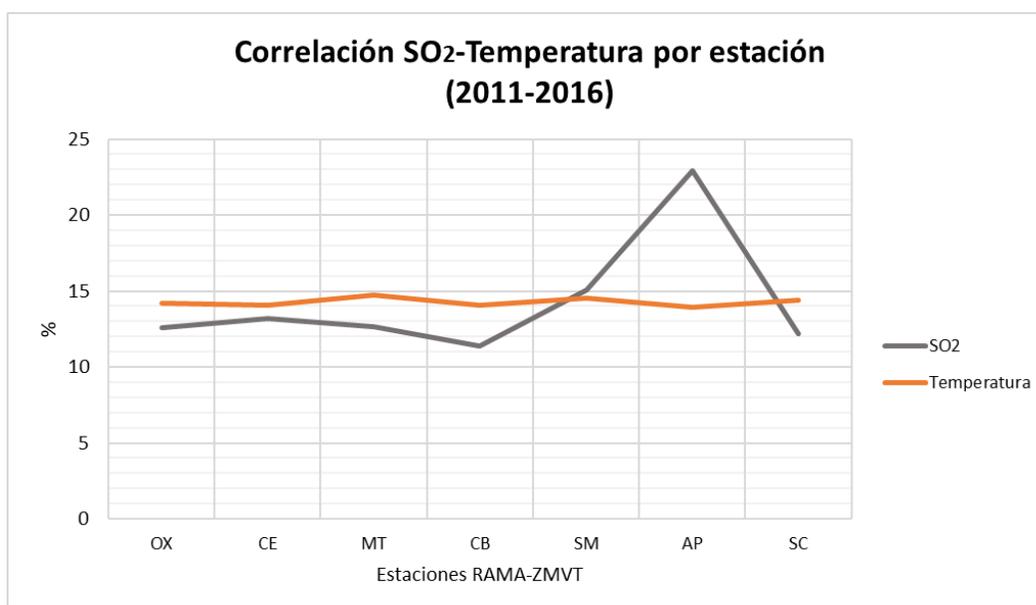
Fuente: Elaboración propia, con base en (SEDEMA, 2017).

#### 4.2.3.1. Correlación lineal simple

En el **Gráfico 4.3.3.** se aprecia la correlación lineal simple entre las concentraciones de Bióxido de Azufre y la temperatura registrada en la ZMVT de 2011 a 2016.

Seis de las siete estaciones de la RAMA-ZMVT presentan un comportamiento similar entre concentraciones de SO<sub>2</sub> (gris) y temperatura (naranja), ya que fluctúan entre 10 y 15% del total; sin embargo, la estación AP figura como la única que posee un aumento de concentraciones de Bióxido de Azufre.

**Gráfico 4.3.3. 2011-2016 Correlación lineal simple SO<sub>2</sub>-Temperatura por estación**



Fuente: Elaboración propia basada en datos de (SEDEMA, 2017).

Gracias a la estación AP es posible apreciar que el factor de enfriamiento de los aerosoles Sulfato, producto de las emisiones de SO<sub>2</sub>, no juega un papel importante en las zonas industriales, ya que las concentraciones de SO<sub>2</sub> aumentan sin que la temperatura se vea afectada. En este sentido, es importante resaltar la existencia de islas de calor en las zonas urbanas, mismas que coadyuvan a la alteración de patrones climáticos, tales como la temperatura (Pérez, y otros, 2010).

Como resultado de la interacción entre las variables, el coeficiente de correlación lineal simple es de un -44.2% que, aunque es una cifra menor al 50%, si denota la participación del

SO<sub>2</sub> como precursor de aerosoles Sulfato y éstos a su vez, como factores de enfriamiento (IPCC Working Group I, 1995) en la ZMVT, de 2011 a 2016.

Los registros de SO<sub>2</sub> en la zona industrial de la ZMVT están determinados por las actividades económicas que en ella se desarrollan, tales como actividad industrial, manufacturera, medios de transporte y otros (COESPO, 2012). Consecuentemente, las concentraciones de Bióxido de Azufre se ven más elevadas en las estaciones de AP y SM.

Por su parte, la temperatura del lugar se ve parcialmente influenciada por la dinámica social y económica (Orozco, y otros, 2015) y, por su puesto, por la dinámica terrestre (UNS Perú, 2008). En este tenor, es preciso aclarar que, gracias a la multifactorialidad de la temperatura, ésta no sólo responde ante concentraciones de contaminantes atmosféricos (Ibáñez, 2010), no obstante, si existe una relación que se demuestra con su coeficiente de correlación inversamente proporcional, entre el SO<sub>2</sub> y la temperatura en la ZMVT, de 2011 a 2016.

# **Capítulo 5**

# **Conclusiones**

# Conclusiones

## 5.1. Conclusiones

Durante el periodo de estudio 2011-2016, el Bióxido de Azufre fue analizado en modalidad hora, mes y año, este último se realizó por las siete estaciones de la RAMA-ZMVT.

Para el análisis por **hora**, el Bióxido de Azufre presenta únicamente el comportamiento bimodal, el cual, de acuerdo con la literatura del INE (2009), hoy INECC; dicho comportamiento hace alusión a dos elevaciones en las mediciones diarias (INE, 2009).

Para el caso de este estudio, una elevación se presenta de 8:00 a 12:00 horas y otra, de 20:00 a 23:00 horas. Para la elevación matutina, esta pudiese ser explicada gracias a la actividad económica e industrial que en la ZMVT se desempeña, ya que existen alrededor de once mil 364 unidades económicas industriales en toda el área (GEM, 2012). En este sentido, cabe señalar que la industria energética, manufacturera y de construcción, son algunas de las actividades económicas que más participan en la formación de SO<sub>2</sub> (SEMARNAT, 2002). Aunado a ello, la estación SC registra este comportamiento bimodal en menor medida; lo cual indicaría que gracias a la baja actividad industrial de San Cristóbal Huichochitlán, esta estación posea los niveles más bajos y estables de SO<sub>2</sub> (SEMARNAT, 2002).

Por su parte, las elevaciones nocturnas, que no se encuentran documentadas en la bibliografía, pueden ser consecuencia de la interacción de la radiación nocturna, ya que al enfriarse la superficie terrestre, ésta provoca un desprendimiento de calor, lo cual calienta las capas de aire inmediatas y genera un almacenamiento de impurezas en capas de los primeros niveles, tales como los GEI (Ayllón, 2003). Cabe aclarar que el Bióxido de Azufre es un GEI de corta vida, que, si bien no tiene injerencia directa con el efecto invernadero, si presenta una interacción química con los GEI de larga vida, la cual afecta las concentraciones de SO<sub>2</sub> y viceversa (IPCC, 2007 b).

En el caso del análisis por **mes**, únicamente en los años de 2014, 2015 y 2016 se puede apreciar una disminución de los registros en los meses de verano y un aumento en los meses invernales. Con lo anterior, se hace alusión a **dos aspectos importantes que engloban al comportamiento del Bióxido de Azufre** en el presente estudio y son: interacción con los GEI de larga vida y temperatura.

En **primer lugar**, la interacción del SO<sub>2</sub> con los GEI de larga vida (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC y SF<sub>6</sub>) (CMNUCC, 2007), parte de la premisa de que este gas se cataloga como un GEI de corta vida y que si bien éste no presenta causas ni consecuencias directas del o sobre el efecto invernadero; sí es capaz de establecer relación química en la atmósfera con los GEI de larga vida, intensificándose así, las concentraciones de ambos tipos de GEI (IPCC, 2007 b). De esta manera, en los meses invernales los registros atmosféricos de GEI de larga vida aumentan, ya que es cuando el efecto invernadero se intensifica y, consecuentemente, también ascienden los niveles de los GEI de corta vida (IPCC, 2007 b).

En el **mismo orden de ideas**, continua el factor hidrosolubilidad, ya que el Bióxido de Azufre es considerado como un gas hidro-abatible a causa de dicho factor (EPA, 2017); en este tenor, en los meses de verano del periodo 2014-2016, las mediciones de SO<sub>2</sub> disminuyen, apuntando así, a la posibilidad de que gracias a la presencia de meteoros hídricos en esta época estacional (UNS Perú, 2008), el SO<sub>2</sub> se vea depositado de manera húmeda y consecuentemente, los registros atmosféricos de este contaminante, se vean disminuidos.

En **tercer lugar**, la temperatura. Gracias a que el Bióxido de Azufre es considerado como un contaminante atmosférico con efecto de enfriamiento debido al reflejo de la radiación solar que éste ocasiona (MAC Mesoamerican and Caribbean Air Quality, 2009), es como se plantea la posibilidad de que en los meses invernales de 2014 a 2016, las concentraciones atmosféricas de este gas tengan cierto grado de injerencia en las bajas temperaturas registradas en dichos meses (IPCC Working Group III, 1995).

Para las mediciones de Bióxido de Azufre **anuales** por estación de la RAMA-ZMVT (OX, CE, MT, CB, SM, AP y SC), se observaron diversos comportamientos en las mismas.

En cuanto a los registros de las estaciones AP y SM, de la Zona Norte y Sur de la RAMA-ZMVT, respectivamente; se ubican las localidades con mayor actividad industrial de la ZMVT (GEM, 2012), lo cual coadyuva a que estas estaciones reporten los niveles más altos de SO<sub>2</sub> en todo el periodo de estudio (IPCC Working Group I, 2007). Así mismo, en ambas locaciones se ubican dos vías de comunicación importantes de la ZMVT, Paseo Tollocan y Boulevard Aeropuerto (GEM, 2012), mismas que generan un constante uso de vehículos para transporte y, consecuentemente, una mayor emisión de contaminantes atmosféricos, tales como el Bióxido de Azufre (Romero, y otros, 2004).

En el caso específico de la estación AP, ésta registró las más altas concentraciones de Bióxido de Azufre en al ZMVT, lo cual indicaría que también la actividad del AICT impactaba en las mediciones de SO<sub>2</sub>, ya que la turbosina posee este gas en sus componentes (Herrera & Vales, 2013). Desafortunadamente, la RAMA-ZMVT apagó la estación AP, dejando fuera este registro tan valioso para el año 2016.

Por último, en la estación CE de la Zona Centro de la RAMA-ZMVT, es donde se reportan los promedios más altos después de AP y SM. En este sentido, cabe mencionar que el municipio de Toluca también posee gran actividad económica en la ZMVT, pues es quien que más aporta al PIB de la zona (COESPO, 2012), pudiéndose explicar las mediciones elevadas gracias a su actuar económico.

Para dar término a este capítulo, se ahonda en el tema del análisis sobre la relación **SO<sub>2</sub>-Temperatura**. Dicho análisis se basa en la característica de enfriamiento que poseen los aerosoles Sulfato, los cuales son subproducto directo de las emisiones de Bióxido de Azufre (IPCC Working Group III, 2014). En este sentido, cabe destacar que el SO<sub>2</sub> es un GEI de corta vida, lo cual significa que no posee la capacidad de prolongar su estadía en la atmósfera; caso contrario a lo GEI de larga vida (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, entre otros) (IPCC, 2007 b). Esta premisa sustenta que el SO<sub>2</sub>, al no ser un GEI de larga vida, no es capaz de reaccionar con la temperatura, ni de hacer reaccionar a la misma (IPCC, 2007 b). No obstante, la correlación SO<sub>2</sub>-Temperatura tiene su sustento en el SO<sub>2</sub> como precursor de aerosoles Sulfato, mismos que si reaccionan con la temperatura y la hacen decrecer (IPCC Working Group I, 2001).

Para este análisis se realizaron correlaciones entre ambas variables de manera horaria, mensual y por estación de la RAMA-ZMVT, obteniendo así un coeficiente de correlación lineal simple de -26.7%, -52.7% y -44,2%, respectivamente. De esta manera, es posible decir que en los tres análisis existe un grado de causalidad entre las concentraciones de SO<sub>2</sub> y los registros bajos de temperatura en la ZMVT, de 2011 a 2016.

En el caso de la correlación horaria el coeficiente de correlación es bajo, no obstante, el mismo coeficiente es negativo y, denota así, que efectivamente existe causalidad entre las emisiones de SO<sub>2</sub> y las temperaturas bajas de la zona. Si bien el SO<sub>2</sub> es un GEI de corta vida, esto no lo exime de estar generando, gracias a su papel como precursor de aerosoles, un descenso en las temperaturas de la ZMVT (IPCC Working Group I, 1995).

Por su parte, las correlaciones mensuales y por estación, poseen coeficientes de correlación más elevados. Para el primer caso, cabe destacar que la temperatura no sólo responde ante efectos de contaminantes atmosféricos, sino que también está determinada por el calor almacenado, radiación solar o radiación terrestre, evaporación, circulación atmosférica, así como oceánica y otros (Fuentes, 2012). Dichos factores, explican el porcentaje restante del comportamiento de la temperatura.

En el caso del análisis por estación de la RAMA-ZMVT, pese a que también existe un grado de correlación negativo que respalda el factor de enfriamiento de los aerosoles Sulfato; esto no deja de lado la multifactorialidad a la que la temperatura terrestre responde. De acuerdo con diversas fuentes bibliográficas, tales como GEM (2012), Ibáñez (2010), entre otras, la temperatura de la Tierra y en este caso, de la ZMVT, es producto del actuar de diferentes factores, tales como islas de calor en la ZMVT (Pérez, y otros, 2010), heladas (GEM, 2012), interacción de GEI con el clima (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007) o dinámica de vientos (Ibáñez, 2010), por mencionar algunos. Aunado a ello, las estaciones de SM y AP generan también una disyuntiva, ya que, es aquí donde los registros de SO<sub>2</sub> son los más elevados, gracias a su gran dinámica industrial y económica (IGECEM, 2015), lo que ocasionaría una baja contundente en las temperaturas, caso que no se observa en este estudio.

## 5.2. Recomendaciones

La multifactorialidad de las causas de las concentraciones de Bióxido de Azufre y de las temperaturas registrados en la ZMVT de 2011 a 2016, demuestran que la interacción entre SO<sub>2</sub>-temperatura son importantes y se nivelan entre sí. Desde otra perspectiva, las emisiones de SO<sub>2</sub> no son producto, únicamente, de actividades antropogénicas, sino que también devienen de actividad natural terrestre, como las explosiones volcánicas (RAMA-ZMVT, 2014). En este sentido, se recomienda continuar con estudios que engloben al SO<sub>2</sub> no únicamente como contaminante criterio, sino que también sea considerado como GEI de corta vida y como un gas con injerencia en ciertos meteoros del clima terrestre (IPCC, 2007 b).

Dicha premisa puede incluso guiar a conocer al SO<sub>2</sub> como un gas que puede equilibrar las elevadas temperaturas de la Tierra y que se puede controlar con la presencia de hidrometeoros, para así, no afectar la salud humana ni la dinámica económica de las áreas industriales.

Por otro lado, de acuerdo con la OMS se recomienda establecer un límite máximo de 0.118 ppm para un promedio de 10 minutos, pues las enfermedades asociadas al Bióxido de Azufre van desde asma y bronquitis hasta a la muerte (OMS, 2011). Sin embargo, México no toma en consideración ningún límite para un promedio de 10 minutos ni dentro del Capítulo II de la LGEEPA ni en la NOM-022-SSA1-2010; regulaciones que rigen situaciones en torno a la contaminación atmosférica y al Bióxido de Azufre.

De manera particular se recomienda introducir un parámetro de límite máximo de concentración de SO<sub>2</sub> para un tiempo promedio de 10 minutos dentro la legislación mexicana, tal y como lo recomienda la OMS.

# **Bibliografía**

# Bibliografía

- AEMA. (23 de Agosto de 2016). *Agencia Europea de Medio Ambiente AEMA*. Recuperado el 03 de Septiembre de 2016, de Actividades: <http://www.eea.europa.eu/es/themes/air/eea-activities>
- Almazán, J. (1999). *Variabilidad climática y disponibilidad de agua en el Noroeste de México* (1 ed.). (J. M. Almazán Rodríguez, Ed.) México: UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ayllón, T. (2003). *Elementos de Meteorología y Climatología* (2 ed.). México: Trillas.
- Ballesteros, M., & Rotter, C. (2014). *Análisis de la contaminación del aire en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec a través de la metodología de simulación bajo el método de Montecarlo, 2000-2020"* (1 ed.). Toluca: UAEMéx: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Benavides, H., & León, G. (2007). *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático*. Colombia: IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, cambio climático, calentamiento global... *revista.unam.mx Revista Digital Universitaria*, 1(6079), 1.
- CAICE Media. (2015). CAICE: Center for Aerosol Impacts on Climate and the Environment. Aerosoles, Nubes y Lluvia. San Diego, USA: CAICE.
- Calbó, J. (2006). Análisis de dos climatologías de nubosidad globales (ISCCP y CRU TS2.1) a escala de la Península Ibérica. *ResearchGate*, 1(1), 11.
- CAME. (2010). *CAME: Comisión Ambiental Metropolitana. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México* (1 ed.). México: Secretaría de Ecología GEM- Secretaría del Medio Ambiente DF.
- Cebrián, A. (2006). *Actualización de la página Web de la Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire* (1 ed.). México: INE. Instituto Nacional de Ecología.
- CMNUCC. (01 de Noviembre de 2007). *Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. (C. M. Climático, Ed.) Recuperado el 28 de Noviembre de 2016, de Unidos por el Clima: [http://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate\\_spa.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate_spa.pdf)
- COESPO. (2012). *Consejo Estatal de Población. Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Aspectos sociodemográficos* (1 ed.). Toluca: GEM: Gobierno del Estado de México.
- Comisión Europea. (2012). *Comisión Europea Fiscalidad y Unión Aduanera*. Obtenido de Humos y Nieblas: [http://ec.europa.eu/taxation\\_customs/dds2/SAMANCTA/ES/Safety/FumesMists\\_ES.htm](http://ec.europa.eu/taxation_customs/dds2/SAMANCTA/ES/Safety/FumesMists_ES.htm)
- CONABIO. (2012). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Recuperado el 23 de Marzo de 2017, de <https://www.gob.mx/conabio>

- Córdova, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre - 2009, marzo - 2010. *Terra Nueva Etapa*, 95-122.
- Delgado, M. (01 de Agosto de 2016). *Los errores de la contingencia atmosférica*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de <http://www.estepais.com/articulo.php?id=657&t=los-errores-de-la-contingencia-atmosferica>
- Departamento del Distrito Federal. (2016). *Dirección de Monitoreo Atmosférico*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2016, de PROAIRE:  
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=&dc=aA==>
- Domínguez, W. (2015). *Representación espacial por interpolación con KRIGING de los contaminantes criterio para analizar la situación de la contaminación atmosférica en la ZMVT en el año 2011* (1 ed.). Toluca: UAEMéx: Universidad Autónoma del Estado de México.
- EcuRed. (2018). *Neblina*. Obtenido de EcuRed: <https://www.ecured.cu/Neblina>
- El Economista. (2015). *COFEPRIS ajusta la NOM en niveles de SO2 en el ambiente*. Recuperado el 02 de Octubre de 2016, de <http://eleconomista.com.mx/sociedad/2016/03/17/cofepris-ajusta-nom-niveles-so2-ambiente>
- EPA. (2017). *EPA: United States Environmental Protection Agency. La lluvia ácida*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, de  
[https://www3.epa.gov/acidrain/education/site\\_students\\_spanish/whyharmful.html](https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/whyharmful.html)
- Fernández, V. (13 de Abril de 2016). *Gases de Efecto Invernadero: impactos e inventario*. Obtenido de Cuba Solar:  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/Articulo13.htm>
- Flores, R., & Delgado, F. (2012). Aplicaciones del SF6 en la industria Eléctrica y su impacto en el Medio Ambiente. *Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán*, 229-241.
- Fuentes, J. (2012). *Iniciación a la Meteorología y Climatología* (1 ed.). España: Mundiprensa.
- García. (2014). *Análisis correlacional entre el incremento de los automoviles particulares y la concentración de Partículas Menores a Diez Picómetros (PM10) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante el periodo 2006-2011* (1 ed.). Toluca: UAEMéx: Universidad Autónoma del Estado de México.
- García, G., Mario, E., Hermes, U., Maulenert, P., Ángel, R., & García, C. (2006). Influencia de los contaminantes SO2 y NO2 en la formación de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *e-Gnosis. Universidad de Guadalajara*, 1.
- García, Ulloa, Arias, & Pérez. (2012). Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Guadalajara, México. *Redalyc*, 1(58), 9-29.

- Gariola, R. (2015). *Planetario de la Ciudad de Buenos Aires. "Galileo Galilei"*. Recuperado el 24 de Diciembre de 2016, de El clima terrestre y los factores astronómicos: [http://www.planetario.gob.ar/astro\\_art\\_clima\\_terrestre.html](http://www.planetario.gob.ar/astro_art_clima_terrestre.html)
- GEM. (2007). *GEM: Gobierno del Estado de México. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004*. Toluca: Secretaría de Medio Ambiente.
- GEM. (2012). *GEM: Gobierno del Estado de México. ProAire: Programa para Mejorar la Calidad del Aire Valle de Toluca 2012-2017*. Secretaría del Medio Ambiente. Toluca: SEDEMA: Secretaría de Medio Ambiente.
- Gil, M. (2009). 1970-1988: De la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente hasta la Subsecretaría de Ecología. En *Crónica del Instituto Nacional de Ecología* (págs. 39-49). México: SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e INE: Instituto Nacional de Ecología. Obtenido de 1970-1988. De la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente hasta la Subsecretaría de Ecología: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/614/1970.pdf>
- Gómez, L. (2007). *Variabilidad climática y cambio de uso de suelo en la Sierra Norte de Oaxaca: Implicaciones en los escenarios de Cambio Climático* (1 ed.). México: UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
- H. Ayuntamiento de Toluca. (2013). *Plan de Desarrollo Municipal de Toluca 2013-2015*. Toluca: Gaceta Municipal Especial.
- Hernández, J., & Madrigal, D. (2004). Comportamiento del Monóxido de Carbono y el clima en la ciudad de Toluca, de 1995 a 2001. *Ciencia Ergo Sum*, 11(3), 263-274.
- Hernández, R. (2010). *Metodología de investigación* (5 ed.). México: Mc Graw Hill.
- Herrera, A., & Vales, N. (2013). *Estimación de las emisiones de gases contaminantes generados por la actividad aérea en México*. Querétaro: IMT: Instituto Mexicano del Transporte. SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Ibáñez, L. (16 de Marzo de 2010). *Chapingo.mx. Hidrología y Meteorología*. (D. d. Irrigación-UACH, Ed.) Recuperado el 24 de Diciembre de 2016, de El tiempo Atmosférico y la Hidrología: [http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia\\_sup/HIDRO-METEO.pdf](http://irrigacion.chapingo.mx/planest/documentos/apuntes/hidrologia_sup/HIDRO-METEO.pdf)
- IGECEM. (2015). *IGECEM: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. Información para el plan de desarrollo San Mateo Atenco*. Toluca: GEM: Gobierno del Estado de México.
- IGECEM. (2016). *IGECEM: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. Estadística Básica Municipal Toluca*. Toluca: GEM: Gobierno del Estado de México.
- IGECEM. (2016). *IGECEM: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. Estadística Básica Municipal Metepec*. Toluca: GEM: Gobierno del Estado de México.

- INE. (2000). *Instituto Nacional de Ecología. La evaluación del Impacto Ambiental* (1 ed.). México: SEMARNAP: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- INE. (2007). *Instituto Nacional de Ecología. Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México, 1995-2000*. Recuperado el 04 de Octubre de 2016, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC): <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/gaceta38/pma55.html>
- INE. (2007). Instituto Nacional de Ecología. Tercer Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas. En M. Zuk, M. G. Tzintzun Cervantes, L. Rojas Bracho, M. Zuk, M. Tzintzun, & L. Rojas (Edits.), *Bióxido de Azufre* (págs. 83-92). México: SEMARNAP: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- INE. (2009 b). Instituto Nacional de Ecología. El estado de la calidad del aire en México: 18 ciudades. En *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2008-2009)* (págs. 59-71). México: SEMARNAT: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INE. (2009). Instituto Nacional de Ecología. Zona Metropolitana del Valle de Toluca, Edo. de Méx. En INECC, *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2008-2009)* (págs. 145-155). México: SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INE-SINAICA. (2010). *INE: Instituto Nacional de Ecología. SINAICA: Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire. Manual 3: Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire* (1 ed.). México: INE: Instituto Nacional de Ecología. SINAICA: Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire.
- IPCC. (2007 b). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Informe del Grupo de Trabajo I - Base de las Ciencias Físicas*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html)
- IPCC. (2007). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Originantes del Cambio Climático*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/es/mains2-2.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/mains2-2.html)
- IPCC. (2013 b). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio Climático. Bases Físicas 2013*. PNUMA, Organización Meteorológica Mundial. Noruega: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (01 de Octubre de 2013). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Glosario*. Recuperado el 23 de Diciembre de 2016, de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf)
- IPCC. (16 de Septiembre de 2016). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2016, de Actividades: [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_spanish.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml)

- IPCC. (2017). *IPCC: Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. Recuperado el 12 de Agosto de 2017, de <http://www.ipcc.ch/index.htm>
- IPCC Supplementary Report. (1992). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Supplementary Report Scientific Assessment of Climate Change*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group I. (1990). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. First Assessment Report Scientific Assessment of Climate Change*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group I. (1995). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Second Assessment Report The Science of Climate Change*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group I. (2001). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Third Assessment Report Scientific Basis*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group I. (2007). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report The Physical Science Basis*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group I. (2013). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group II. (1990). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. First Assessment Report Impacts Assessment of Climate Change*. Australia: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group II. (2014). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group III. (1995). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Second Assessment Report Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group III. (2001). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Third Assessment Report Mitigation*. Ghana: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group III. (2007). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report Mitigation of Climate Change*. Cambridge: WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.
- IPCC Working Group III. (2014). *IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report Climate Change 2014: Mitigación del Cambio Climático*. Cambridge:

WMO: World Meteorological Organization/ UNEP: United Nations Environment Programme.

- Levy, J., Ropeik, D., & Cray, G. (2002). Risk: A Practical Guide for Deciding What's Really Safe and What's Really Dangerous in the World Around You. En J. Levy, J. Spengler, D. Greenbaum, A. Holian, & M. Costantini (Edits.), *Air pollution (Outdoor)* (pág. 166). Boston: Houghton Mifflin.
- Leyva, V. (2009). *Estudios sobre variabilidad de la irradiación solar superficial UV como factor externo del Cambio Climático* (1 ed.). (V. H. Leyva García, Ed.) México: UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
- LGEEPA. (04 de Junio de 2012). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México: DOF: Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 04 de Octubre de 2016
- López, P. (01 de Julio de 2016). *La política de la contaminación*. Recuperado el 04 de Octubre de 2016, de nexo: <http://www.nexos.com.mx/?p=28760>
- MAC Mesoamerican and Caribbean Air Quality. (2009). *El Bióxido de Azufre en Atmósfera*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, de <http://alg.umbc.edu/mac/2009/04/el-dioxido-de-azufre-en-la-atm.html>
- Martín, E., Fernández, O., & Atienza, J. (2015). La Docencia en Ciencias Medioambientales en la Universidad Autónoma de Madrid. *Formación Universitaria*, 3-12.
- Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio Climático: una visión desde México*. México: SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. INE: Instituto Nacional de Ecología.
- Martínez, L. (2003). *Evaluación de las políticas públicas del gobierno del D.F. (1997-2002), dirigidas a la contaminación del aire en la Z.M.V.M.* (1 ed.). México: UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, S., & Rodríguez, A. (2000). *Evaluación de la Contaminación Atmosférica Producida por Partículas en Suspensión en las Redes de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid*. Madrid: CIEMAT: Centro de Investigación Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- Morales, C., Madrigal, D., & González, L. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*, 307-316.
- Moreno, J. (2009). El desarrollo sustentable, el Cambio Climático global y el mundo urbano. *Quivera*, 11(2), 52-67.
- Mugica, V., Figueroa, J., & Hernández, A. (2010). *Evaluación y seguimiento del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. México: Universidad Autónoma Metropolitana UAM.
- NOM-022-SSA1-2010. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010. Salud Ambiental*. México: Secretaría de Salud.

- NOM-039-SEMARNAT-1993. (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-039-SEMARNAT-1993*. México: SEMARNAT: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- NOM-156-SEMARNAT-2012. (16 de Junio de 2012). *DOF: Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017, de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012)
- NU. (1972). Naciones Unidas. Declaración de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano. *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano* (págs. 1-4). Estocolmo: NU: Naciones Unidas.
- NU. (1992). *Naciones Unidas. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Río de Janeiro: NU: Naciones Unidas.
- Observatorio Geográfico de América Latina. (2011). El proceso de descampesinización de una comunidad indígena del Valle de Toluca, Estado de México. *Observatorio Geográfico de América Latina*, 1(1), 24.
- OMM. (2016). *Organización Meteorológica Mundial. Clima*. Recuperado el 23 de Diciembre de 2016, de Organización Meteorológica Mundial: <http://www.wmo.int/youth/es/clima>
- OMS. (1999). *Guías para la Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud OMS.
- OMS. (2010). *OMS: Organización Mundial de la Salud. BVSDE: Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. Contaminantes del aire*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de [http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc4/lecc4\\_p.html](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc4/lecc4_p.html)
- OMS. (2011). *Organización Mundial de la Salud OMS*. Recuperado el 03 de Octubre de 2016, de Contaminación del aire: <http://www.who.int/es/>
- OMS. (2016). *Organización Mundial de la Salud OMS*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2016, de Salud Pública y Medio Ambiente: [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/outdoorair\\_aqg/es/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/)
- Orozco, M., Tapia, J., Mireles, P., Vera, M., Orozco, M., & Tapia, J. (2015). Desarrollo agropecuario y variación climática en el Estado de México. *Quivera*, 17(1), 99-119.
- Paulini, A. (2005). *Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca alta del Río Quiroz* (1 ed.). Perú: Universidad de Piura.
- Pérez, J., Némiga, X., Monroy Gaytán, J. F., Gutiérrez, J., Balderas, M., Loik, M., . . . Camacho, J. (2010). Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 17(2), 143-153.
- Préndez, M., Ortíz, J., Zolezzi, S., Campos, C., & Apablaza, N. (1991). Aerosoles atmosféricos de naturaleza inorgánica. Contaminación en Santiago de Chile. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 224-237.

- Primo, A. (2015). *Variabilidad de la temperatura y de la precipitación, en la ciudad de Toluca, Estado de México. Periodo: 1970-2013* (1 ed.). Toluca: UAEMéx: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Puppo, M. (2012). LA QUÍMICA EN CONTEXTO AGROPECUARIO: UN DESAFÍO . *Cátedra de Química General e Inorgánica. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata*, 1(2), 10.
- RAMA-ZMVT. (2014). *Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT*. Recuperado el 04 de Octubre de 2016, de <http://rama.edomex.gob.mx/>
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes-Esp. (2007). *PRTR-España*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2016, de Óxidos de Azufre: <http://www.prtr-es.es/SOx-oxid-os-de-azufre,15598,11,2007.html>
- RETC- Registro de Emisiones y Transeferencias de Contaminantes- Chile. (2017). *Bióxido de Azufre*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2017, de <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43789.html>
- Romero, M., Más, P., Lacasaña, M., Téllez, M., Aguilar, J., & Romieu, I. (2004). Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana. *salud pública de méxico*, 46(3), 12.
- Ruíz, F., & Hernández, L. (2006). *La agenda ambiental y la reforma del Estado. El caso de la contaminación ambiental en México en 1994-2002* (1 ed.). México: UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santiago, M. (2013). *Estudio de la formación de aerosoles orgánicos secundarios en un modelo fotoquímico mediante experimentos en una cámara de estimulación amtosféricca*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Sarochar, H. (2013). *Introducción a la Meteorología General* (1 ed.). (F. d. Geofísicas, Ed.) La Plata: UNLP: Universidad Nacional de La Plata.
- SCT. (2017). *Secretaría de Caminos y Transportes*. México: Aeronáutica Civil.
- Secretaría de Salud. (1994). *salud.gob.mx. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-022-SSA1-1993. "SALUD AMBIENTAL. CRITERIO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE, CON RESPECTO AL BIOXIDO DE AZUFRE (SO2)*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017, de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/022ssa13.html>
- SEDEMA. (01 de Febrero de 2017). *SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente*. Recuperado el 02 de Mayo de 2017, de <http://datos.edomex.gob.mx/organization/sma>
- SEMARNAT. (2002). *SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Inventario Nacional de Emisiones de gases de Efecto Invernadero 1990-2002* (1 ed.). México: INE: Instituto Nacional de Ecología.

- SEMARNAT. (2012). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Glosario*. Recuperado el 03 de Noviembre de 2016, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://tramites.semarnat.gob.mx/index.php/2012-11-06-21-50-20>
- SEMARNAT. (2012). SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Atmósfera. En S. S. Naturales (Ed.), *Informe de la situación del Medio Ambiente en México* (págs. 191-253). México: SNIARN: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.
- SINAICA. (2017). *SINAICA*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de <http://sinaica.inecc.gob.mx/>
- Textos Científicos. (2006). *Los Óxidos de Azufre*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2017, de <https://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/azufre/oxidos-azufre>
- Tirado, D. (24 de Noviembre de 2013). *Introducción: Conceptos económicos básicos*. Recuperado el 29 de Diciembre de 2016, de <http://www.uib.cat/depart/deaweb/webpersonal/dolorestirado/archivos/concp-3.pdf>
- UJA Esp. (15 de Marzo de 2005). *UJA: Universidad de Jaén España. Análisis de la Calida del aire atmosférico*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, de [http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia\\_archivos/Quimica%20analitica%20ambiental/tema9.pdf](http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica%20analitica%20ambiental/tema9.pdf)
- Universidad Complutense Madrid. (2016). *Sistemas territoriales*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de Anales de Geografía de la Universidad Complutense: <http://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/32346>
- UNS Perú. (08 de Enero de 2008). *Universidad Nacional del Santa Perú. Climatología*. Recuperado el 25 de Diciembre de 2016, de Sala de docentes: <http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/>